



# ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΩΠΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Το ασύρματο περιβάλλον  
στις κινητές επικοινωνίες



- Γενικές αρχές για τη διάδοση
- Απώλειες διαδρομής
  - Διάδοση στον ελεύθερο χώρο
  - Διάδοση πάνω από επίπεδη και αγωγήμη επιφάνεια
  - Διάδοση μη-οπτικής επαφής
- Σκίαση
- Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών
  - σε διαύλους στενής ζώνης
  - σε διαύλους ευρείας ζώνης
- Παράμετροι διαύλων με πολλαπλές διαδρομές
- Αρχή της αντιστροφής

# Γενικές αρχές για τη διάδοση



## Βασικές απαιτήσεις για αξιόπιστη επικοινωνία

- κατανομή της μέσης ηλεκτρομαγνητικής ισχύος σε συγκεκριμένη περιοχή
- επαρκής ισχύς, όχι παρεμβολές
- ενδιαφέρει όχι μόνο η μέση ισχύς αλλά και στατιστική συμπεριφορά της ισχύος, λόγω της κίνησης του τερματικού
- ενδιαφέρει επίσης η ποιότητα του σήματος, ώστε να μην εμφανίζονται σφάλματα

# Γενικές αρχές για τη διάδοση



- Απαιτείται να υπάρχει επαρκής γνώση για τη συμπεριφορά του διαύλου (διαμόρφωση, κωδικοποίηση, εξισορρόπηση )

## *Μοντέλα για τη μελέτη των ραδιοδιαύλων*

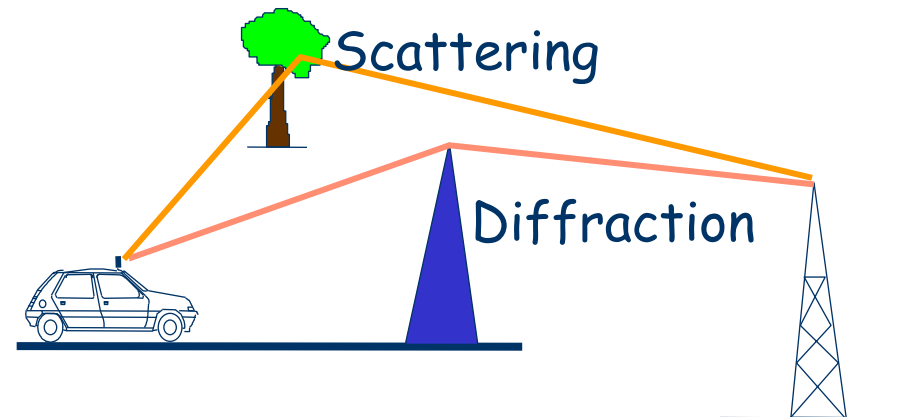
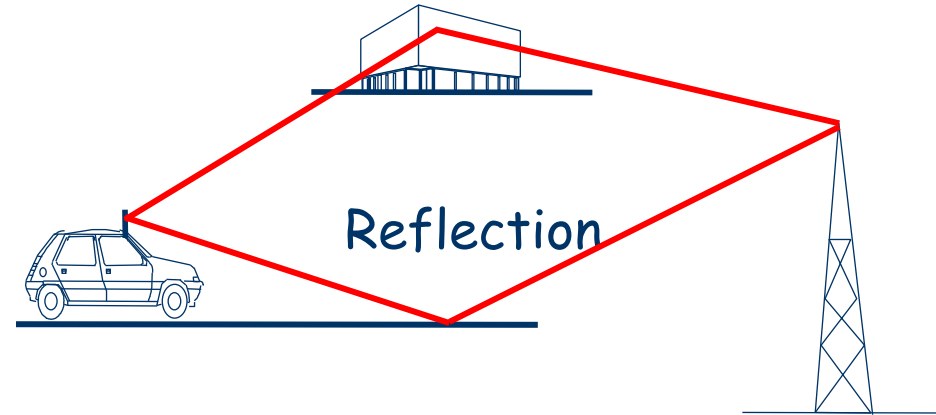
- **παραμετρικά στατιστικά:** απλά στη χρήση τους, αλλά σχετικά χονδρικά
- **ντετερμινιστικά:** ειδικά για κάθε περιβάλλον, παρέχουν καλύτερη ακρίβεια

# Γενικές αρχές για τη διάδοση



Οι μηχανισμοί που διέπουν τη διάδοση είναι πολύπλοκοι και ποικίλοι και μπορεί να συνοψιστούν σε τρεις βασικούς:

- **ανάκλαση (reflection):**  
διαστάσεις εμποδίων  $\gg \lambda$
- **περίθλαση (diffraction):**  
παρεμβολή αδιαπέραστου σώματος στη διαδρομή διάδοσης
- **σκέδαση (scattering):**  
διαστάσεις εμποδίων  $\leq \lambda$



# Γενικές αρχές για τη διάδοση



Καθώς το κινητό τερματικό κινείται σε μια περιοχή, οι τρεις μηχανισμοί διάδοσης επιδρούν κάθε στιγμή στο λαμβανόμενο σήμα κατά διαφορετικούς τρόπους.

Ακόμη και αν το κινητό τερματικό διανύει μικρές αποστάσεις, η λαμβανόμενη στιγμιαία ισχύς μεταβάλλεται απότομα και εμφανίζονται βραχύχρονες διαλείψεις.

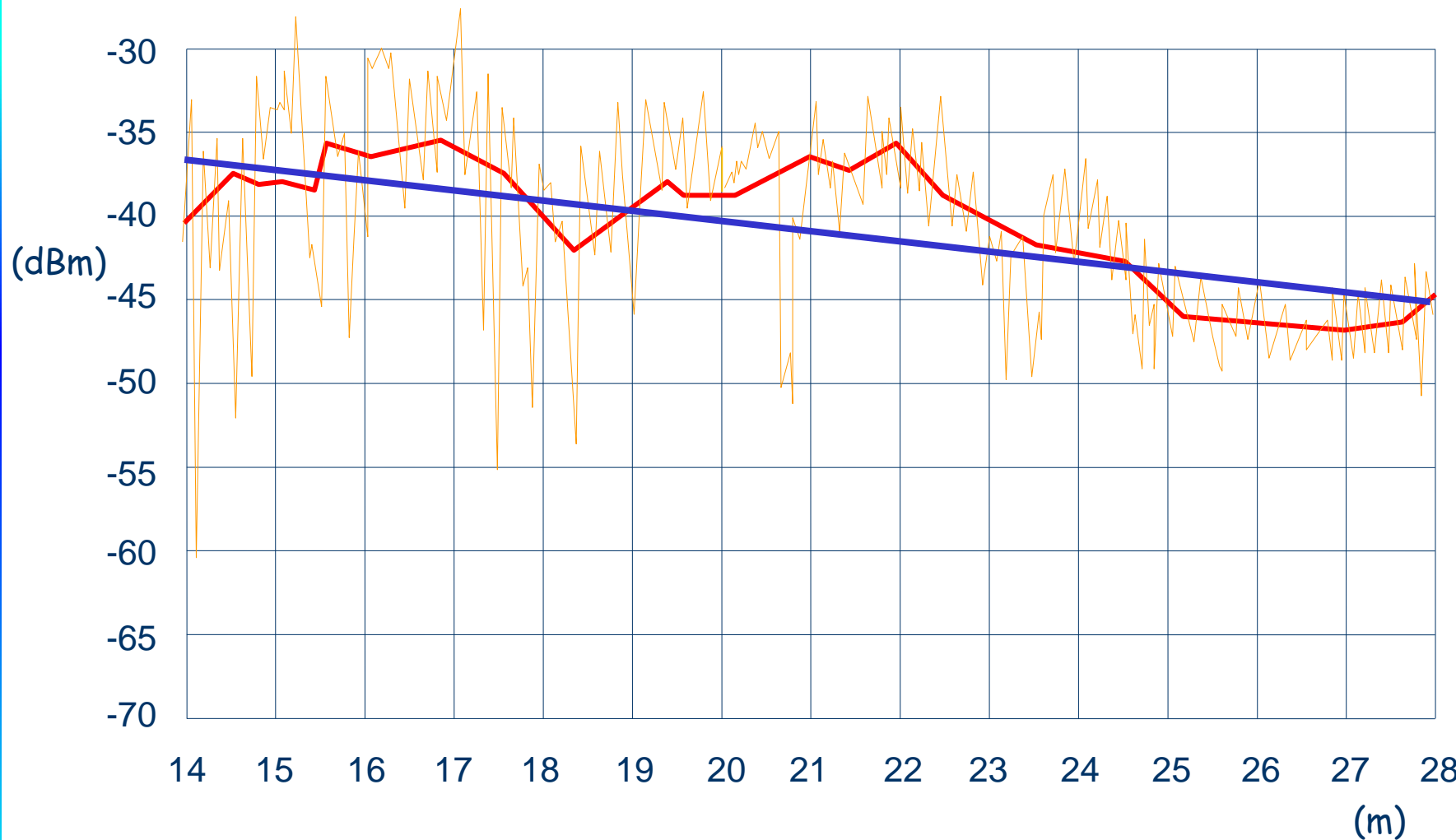
# Γενικές αρχές για τη διάδοση



Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιβάλλοντα κινητών επικοινωνιών χαρακτηρίζεται από τρία επιμέρους φαινόμενα:

- *απώλειες διαδρομής (path loss)*
- *σκίαση (shadowing)*
- *διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (multipath fading)*

# Γενικές αρχές για τη διάδοση





# Απώλειες διαδρομής



## Διάδοση στον ελεύθερο χώρο

$$S_o = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi d^2} \quad (W / m^2) \quad \vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

$$S_o = E_o \cdot H_o \quad (W / m^2) \quad H_o = \frac{E_o}{120\pi} \quad (A / m)$$

$$S_o = \frac{E_o^2}{120\pi} \quad (W / m^2)$$

$$E_o = \frac{\sqrt{30P_t G_t}}{d} \quad (V / m) \quad E_{om} = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d} \quad (V / m)$$

$$E_o(t) = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d} \cos 2\pi f(t - d/c) = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d} \cos(2\pi ft - \beta d)$$



## Διάδοση στον ελεύθερο χώρο

$$P_{or} = \frac{E_o^2}{120\pi} A_r \quad (W)$$

$$A_r = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$$

$$P_{or} = \left( \frac{E_o \cdot \lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_r}{120} \quad (W)$$

$$\frac{P_{or}}{P_t} = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = G_t G_r \left( \frac{c/f}{4\pi d} \right)^2$$

Για ιστροπικές  
κεραίες με  $G=1$

$$\frac{P_{or}}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = \left( \frac{c/f}{4\pi d} \right)^2$$

# Απώλειες διαδρομής



## Διάδοση στον ελεύθερο χώρο

### Απώλειες διαδρομής

$$L_f = \frac{P_t}{P_{or}} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi d}{c/f} \right)^2$$

Εξαρτώνται  
από το  $d^2$   
και το  $f^2$

### Απώλειες διαδρομής σε dB

$$L_f [dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{c/f} \right)$$



## Διάδοση στον ελεύθερο χώρο

Η διαφορά  $\Delta p$  σε dB των ισχύων δύο σημάτων που λαμβάνονται από δύο διαφορετικούς δέκτες σε αποστάσεις  $d_1$  και  $d_2$  από τον πομπό

$$\Delta p = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{or2}}{P_{or1}} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{d_1}{d_2} \right) dB$$

# Σχετική στάθμη ισχύος



Λόγος ισχύων εκφραζόμενος σε dB

$$P_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$$

$$P_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{2} \frac{V_1^2}{R_1}}{\frac{1}{2} \frac{V_2^2}{R_2}} = 10 \log_{10} \frac{V_1^2}{V_2^2} + 10 \log_{10} \frac{R_2}{R_1}$$

Για  $R_1 = R_2$

$$P_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} = 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2}$$

# Σχετική στάθμη ισχύος



Σχετική τιμή ως προς στάθμη αναφοράς

$$P_{rel} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_{ref}} = 10 \log_{10} P_1 - 10 \log_{10} P_{ref}$$

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{1mW} \qquad P_{dBW} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{1W}$$

$$P_{dBm} = P_{dBW} + 30$$

# Σχετική στάθμη ισχύος



## Άλγεβρα

$$10\log_{10} \frac{P_1}{P_2} = 10\log_{10} \frac{P_1 / P_{ref}}{P_2 / P_{ref}} = 10\log_{10} \frac{P_1}{P_{ref}} - 10\log_{10} \frac{P_2}{P_{ref}}$$

$$\text{Αν } P_{ref} = 1\text{mW}$$

$$10\log_{10} \frac{P_1}{P_2} = P_{1dBm} - P_{2dBm} \quad P_{1dBm} = P_{2dBm} + 10\log_{10} \frac{P_1}{P_2}$$

$$P_{1dBm} = P_{2dBm} + P_{dB}$$







## Παράδειγμα 2.1

Αν  $P_t = 40\text{W}$ ,  $P_t(\text{dBm}) = ;$ ,  $P_t(\text{dBW}) = ;$

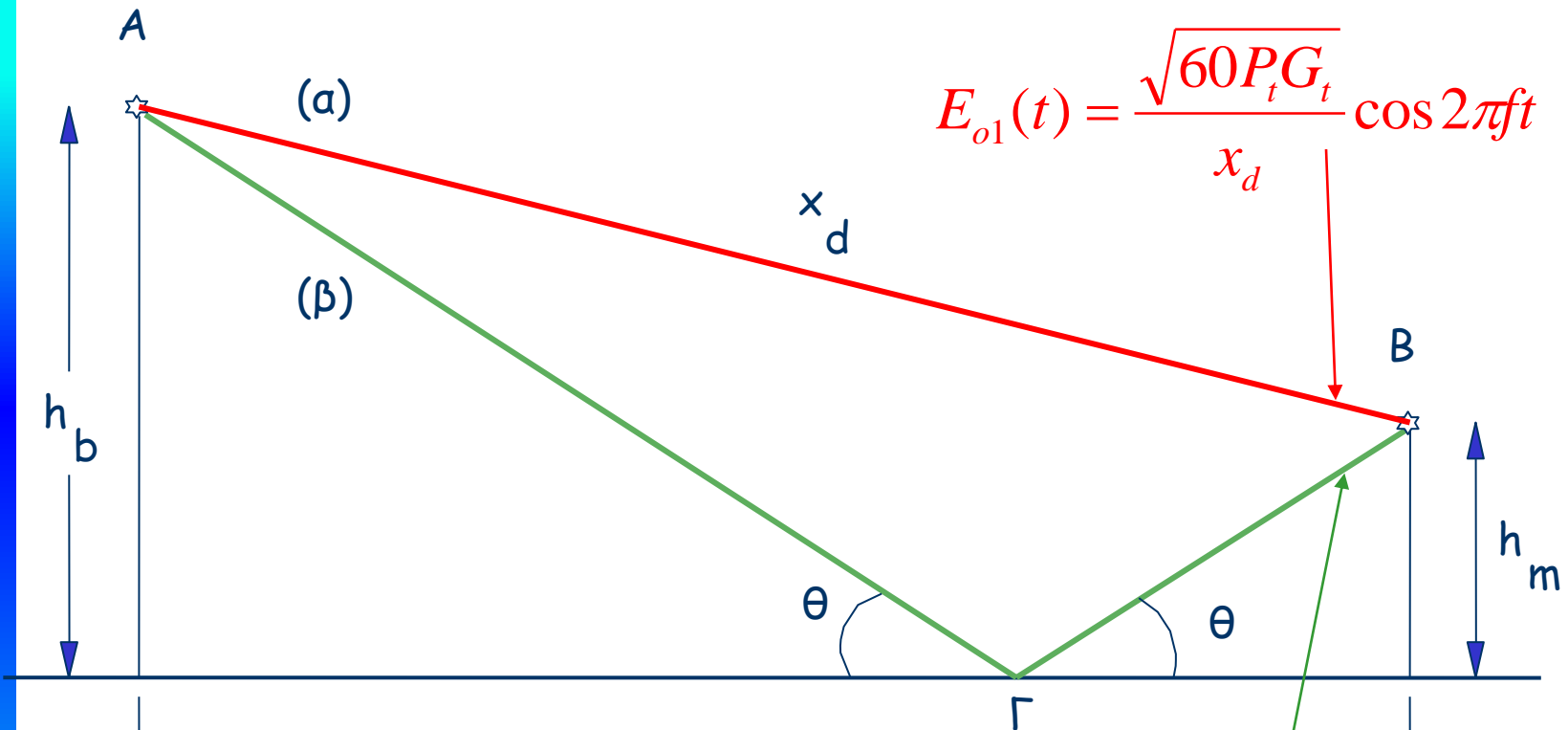
Αν  $G_t = 1$ ,  $f_c = 1.8\text{ GHz}$  και έχουμε διάδοση σε ελεύθερο χώρο  $P_{or}(300\text{m}) = ;$ ,  $P_{or}(8\text{ km}) = ;$

Θεωρήστε  $G_r = 1$ .

# Απώλειες διαδρομής



## Διάδοση πάνω από επίπεδη επιφάνεια



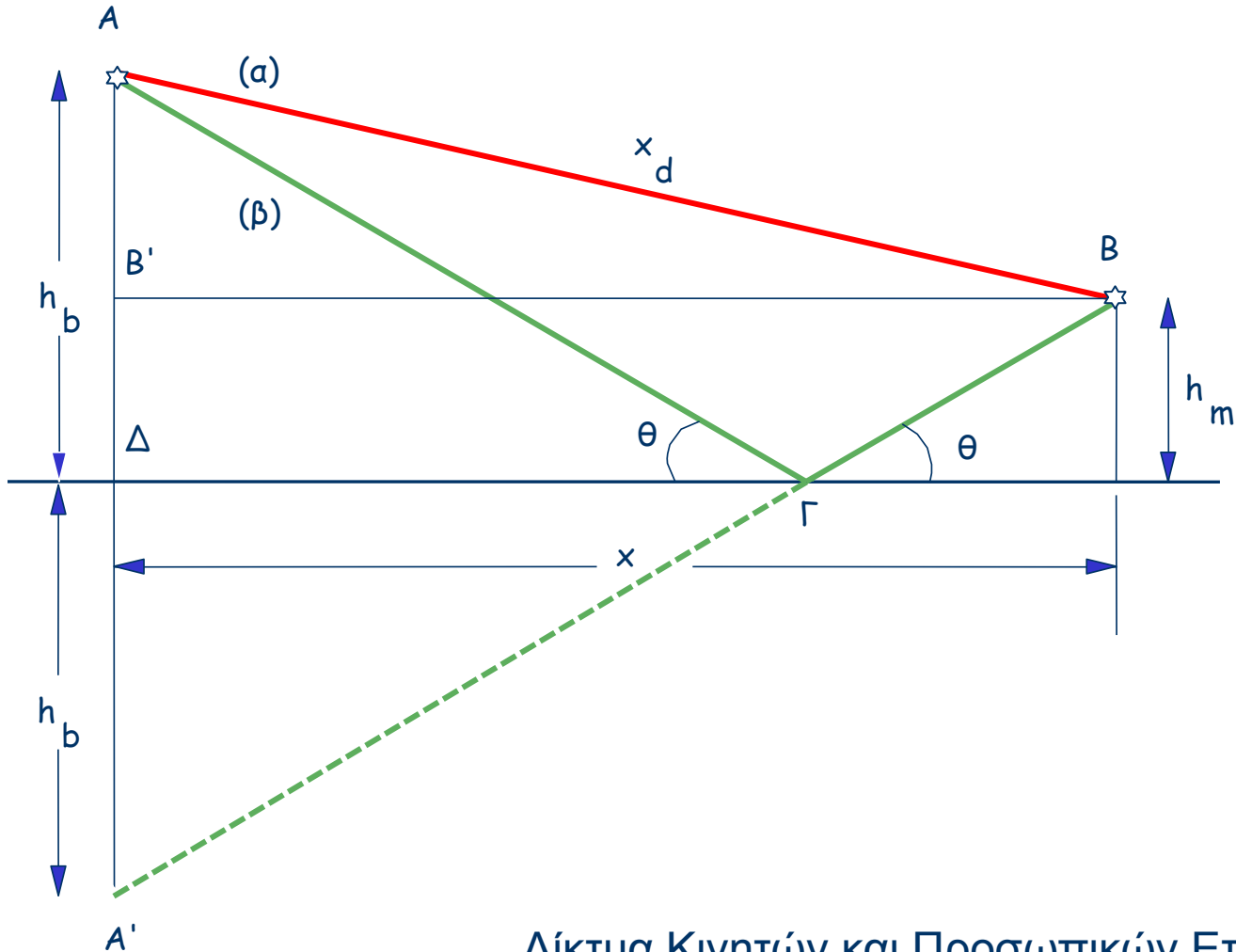
$$E_{o1}(t) = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{x_d} \cos 2\pi f t$$

$$E_{o2}(t) = R \cdot \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{x_d + \Delta x} \cos\left(2\pi f t - \gamma - \frac{2\pi \Delta x}{\lambda}\right)$$

# Απώλειες διαδρομής



## Διάδοση πάνω από επίπεδη επιφάνεια



# Απώλειες διαδρομής



## Διάδοση πάνω από επίπεδη επιφάνεια

$$P_{rx} = 4P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi x} \right)^2 G_t G_r \sin^2 \left( \frac{2\pi h_b h_m}{\lambda x} \right)$$

Για μικρή τιμή του  $(2\pi h_b h_m / \lambda x)$

$$P_{rx} = P_t G_t G_r \left( \frac{h_b h_m}{x^2} \right)^2$$

$$P_{rx} = 10 \log(P_t G_t G_r) - 40 \log x + 20 \log h_b + 20 \log h_m$$

# Απώλειες διαδρομής



Διάδοση πάνω από επίπεδη επιφάνεια

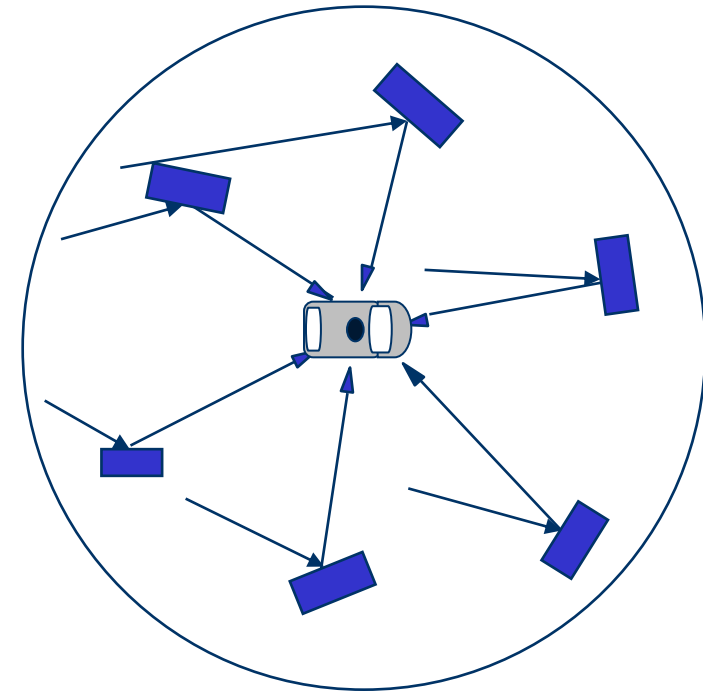
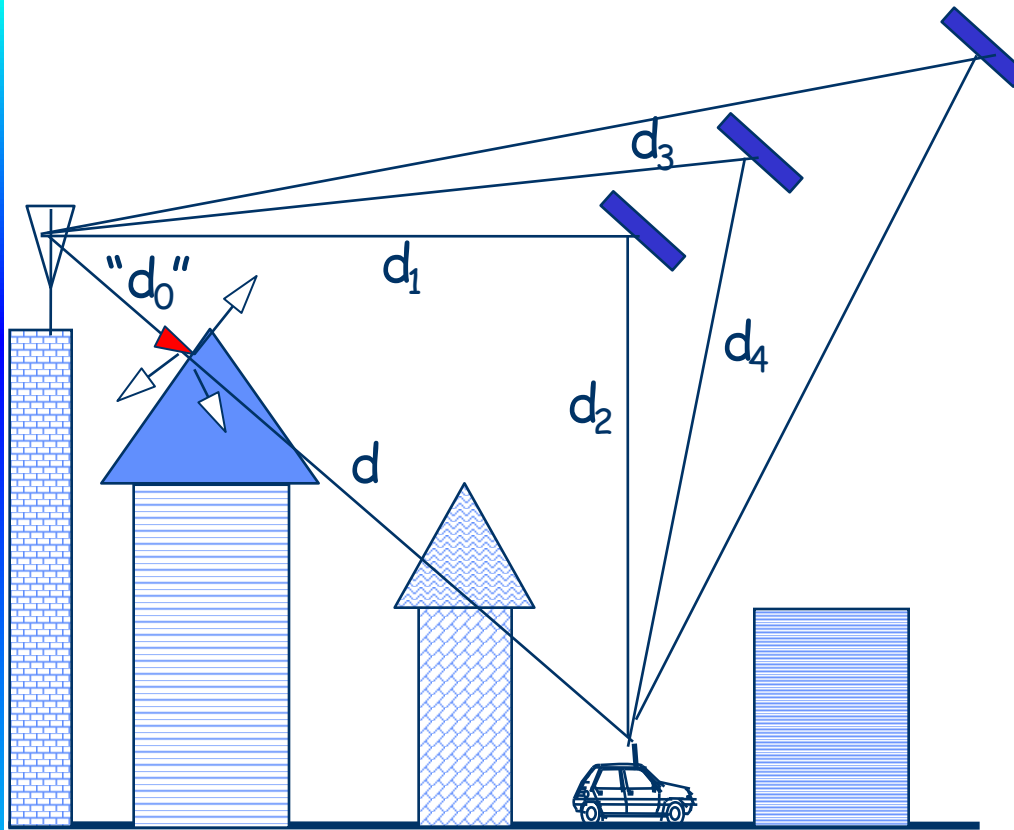
*Παράδειγμα: Σύγκριση καλύψεων*

Σταθμός βάσης καλύπτει 1 km σε περιοχή που μοντελοποιείται ως διάυλος δύο ακτίνων. Ποια θα ήταν η απόσταση κάλυψής του αν χρησιμοποιούταν σε δορυφόρο;

# Απώλειες διαδρομής



## Διάδοση μη-οπτικής επαφής





## Διάδοση μη-οπτικής επαφής

Βάσει εμπειρικών δεδομένων έχει αναπτυχθεί ένα γενικό μοντέλο για διάδοση NLOS

$$L(d) \propto L(d_0) \cdot \left( \frac{d}{d_0} \right)^n$$

$n: 3.5 \leq n \leq 5$ .

$d$  = Απόσταση μεταξύ κεραιών εκπομπής και λήψης

$d_0$  = Απόσταση αναφοράς (1 km ή 1-3 m)

$L(d_0)$  = Απώλειες διαδρομής σε απόσταση  $d_0$  και διάδοση LOS

$L(d)$  = Απώλειες διαδρομής για διάδοση LOS και NLOS



## Διάδοση μη-οπτικής επαφής

*Απόλυτη μέση τιμή απωλειών διαδρομής  
(absolute mean path loss)*

$$L(d) = L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d / d_0) \quad dB$$





## Διάδοση μη-οπτικής επαφής

### Παράδειγμα 2.2

$d = 1500\text{m}$ ,  $f_c = 840\text{ MHz}$ .

$P_{or} = -80\text{dBm}$ . Το ΜΤ ταξιδεύει με  $80\text{km/h}$  σε ευθεία διαδρομή και απομακρύνεται από τον σταθμό βάσης.

$n = 4$  και αμελείται η σκίαση. Ποια θα είναι η μέση ισχύς του σήματος ένα λεπτό αργότερα;

# Μέγιστη απόσταση ραδιοκάλυψης



Για συνθήκες LOS

$$\frac{P_r(d)}{P_t} = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = G_t G_r \left( \frac{c/f}{4\pi d} \right)^2$$

$$\begin{aligned} P_r(d) = P_{r \min} \quad d_{\max} &= \left( \frac{P_t G_t G_r}{P_{r \min}} \right)^{1/2} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \\ &= \left( \frac{P_t G_t G_r}{P_{r \min}} \right)^{1/2} \cdot \frac{c}{f} \cdot \frac{1}{4\pi} \text{ (m)} \end{aligned}$$

# Μέγιστη απόσταση ραδιοκάλυψης



Για γενικότερες συνθήκες NLOS

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot L_{TOT}$$

$$L_{TOT} = L_{LOS} \cdot L_{NLOS}$$

$$L_{TOT}(d) = \left( \frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 \cdot \left( \frac{d_0}{d} \right)^n$$

↑                    ↑

(LOS)            (NLOS)

$$d_{\max} = \left[ \frac{P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2}{P_{r \min}} \right]^{1/n} d_0 (m)$$

# Σκίαση και απώλειες διαδρομής



Η τιμή των απωλειών διαδρομής  $\mathcal{L}(d)$  είναι τυχαία μεταβλητή και έχει λογαριθμική-κανονική κατανομή γύρω από την απόλυτη μέση τιμή

$$\mathcal{L}(d) = \mathbf{L}(d) + X_\sigma = \mathbf{L}(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d / d_0) + X_\sigma \text{ dB}$$

$X_\sigma$  (dB): τυχαία μεταβλητή Gauss, με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση  $\sigma$  (dB)

$$P_r(d) = P_t - \mathcal{L}(d) \text{ dB}$$

# Σκίαση και απώλειες διαδρομής



- Η λογαριθμική-κανονική κατανομή περιγράφει τις τυχαίες επιδράσεις σκίασης σε θέσεις που έχουν μεν την ίδια απόσταση από τον πομπό, αλλά έχουν διαφορετικούς βαθμούς αταξίας στη διαδρομή διάδοσης.
- Η λογαριθμική-κανονική σκίαση συνεπάγεται ότι οι μετρούμενες στάθμες σήματος, για συγκεκριμένη απόσταση από τον πομπό, έχουν κατανομή Gauss γύρω από την απόλυτη μέση τιμή στάθμης  $L(d)$ .
- Οι απώλειες διαδρομής είναι η μέση τιμή της λογαριθμικής κανονικής σκίασης, που ονομάζεται επίσης και **μέσος όρος περιοχής (area mean)**.

# Σκίαση και απώλειες διαδρομής



## Υπολογισμός περιθωρίου διαλείψεων

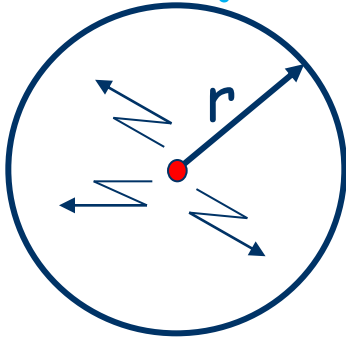
### *Παράδειγμα 2.3*

Σύστημα κινητών επικοινωνιών πρέπει να παρέχει κατά 90% επιτυχείς επικοινωνίες στα όρια της περιοχής κάλυψης κάθε σταθμού βάσης. Η συνιστώσα της σκίασης έχει κατανομή Gauss με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση 8 dB. Ποιο περιθώριο διαλείψεων απαιτείται;

# Σκίαση και απώλειες διαδρομής



## Διευκρινίσεις (I)



**Ελεύθερος χώρος:** Όλα τα σημεία του κύκλου έχουν την ίδια στάθμη λήψης ή τον ίδιο  $S/N$  (uplink ή downlink)

**Ιδανικό επίπεδο έδαφος:** Η ίδια θεώρηση

**NLOS (δηλ.  $d^{-n}$ ) και λογαριθμική κανονική σκίαση:**

- τα σημεία στην περιφέρεια θα έχουν την ίδια πιθανότητα για μια συγκεκριμένη στάθμη σήματος ή για έναν συγκεκριμένο  $S/N$
- σε όλη την περιφέρεια, ο λόγος του μήκους του τόξου στο οποίο έχουμε σήμα πάνω (ή κάτω) από μια στάθμη προς το ολικό μήκος της περιφέρειας θα έχει καθορισμένη τιμή
- δεν αποτελεί ο κύκλος γεωμετρικό τόπο συγκεκριμένης στάθμης σήματος

# Σκίαση και απώλειες διαδρομής



## Διευκρινίσεις (II)



- ένα περίγραμμα όπου όλα τα σημεία του θα έχουν ίδια στάθμη σήματος ή ίδιον λόγο  $S/N$ , θα έχει ακανόνιστο σχήμα και μπορεί ακόμη να είναι πολλαπλά συνδεδεμένο
- έτσι, ο όρος κάλυψη ή ο επιτρεπόμενος διαχωρισμός σταθμών βάσης (κυψελών) είναι *στατιστικός* για το γενικό ασύρματο περιβάλλον



# Σκίαση και απώλειες διαδρομής

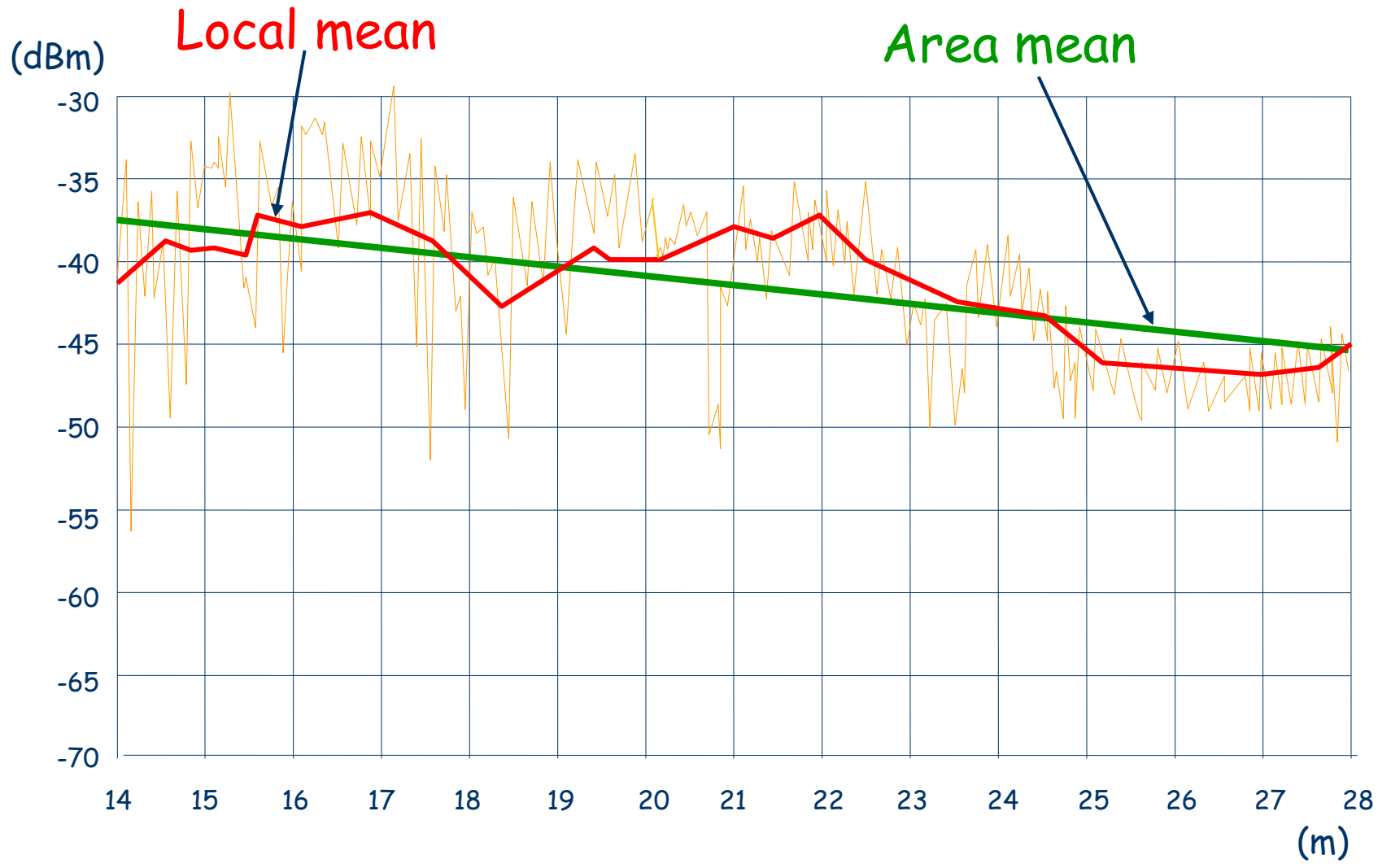


## Διευκρινίσεις (III)

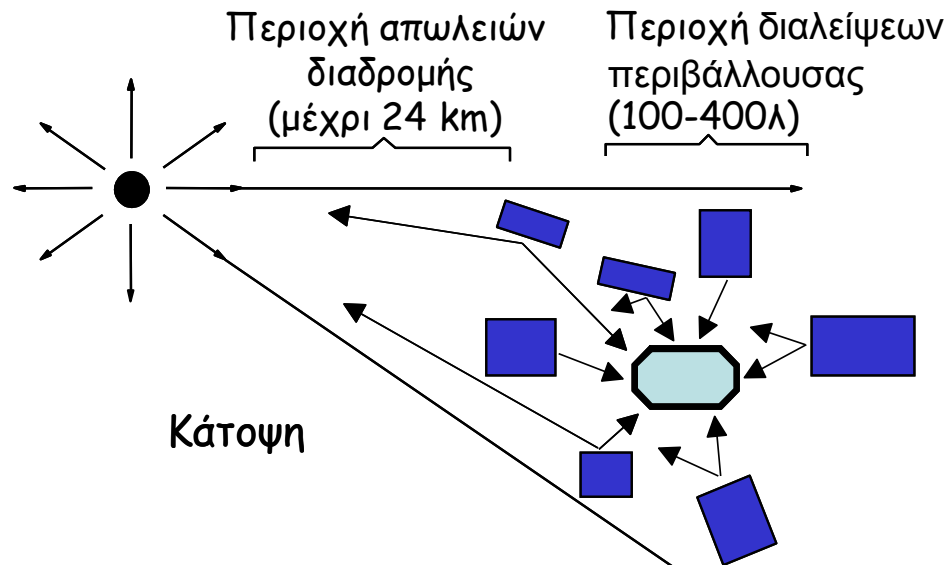
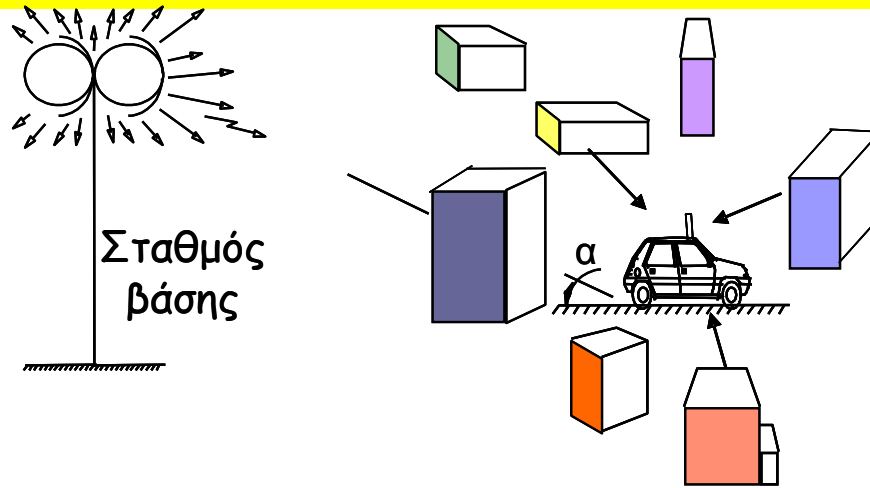
Στην τυπική διάδοση στα επίγεια συστήματα κινητών επικοινωνιών ισχύουν τρία καθεστώτα, ανάλογα με τη χωρική κλίμακα:

- **Μέσος όρος περιοχής (area mean):** χαρακτηρίζεται από τον εκθέτη  $n$ , με το οποίο μειώνεται η μέση ισχύς
- **Τοπικός μέσος όρος (local mean):** η ισχύς σε μια περιοχή είναι κατανεμημένη λογαριθμικά- κανονικά γύρω από την area mean ( $\sigma = 6 - 8$  dB)
- Σε αποστάσεις  $< 100$ λ η μέση ισχύς είναι ουσιαστικά σταθερή. Οι μεταβολές στην περιβάλλουσα έχουν κατανομή Rayleigh)

# Στάθμη του λαμβανόμενου σήματος



# Διαλείψεις, στο ασύρματο περιβάλλον των κινητών επικοινωνιών



# Διαλείψεις, στο ασύρματο περιβάλλον των κινητών επικοινωνιών



Το κινητό τερματικό γενικά λαμβάνει ένα άμεσο και πολλά ανακλώμενα κύματα

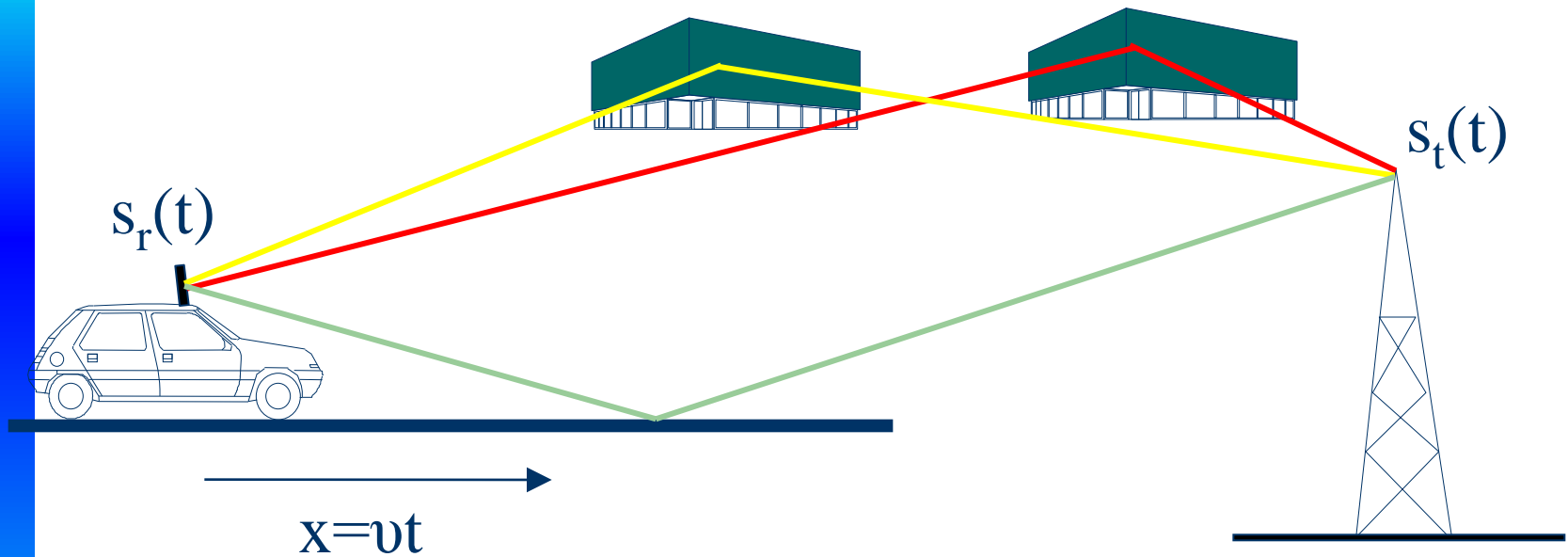
## ➤ Στατιστικό μοντέλο Rice

➤ Το άμεσο κύμα παρουσιάζεται σχετικά πιο ισχυρό

## ➤ Κατανομή Rayleigh

➤ Ο αριθμός των επιπέδων κυμάτων που καταφθάνουν από διάφορες κατευθύνσεις είναι αρκούντως μεγάλος και δεν υπάρχει ισχυρή συνιστώσα από διάδοση οπτικής επαφής

# Διαλείψεις περιβάλλουσας



# Διαλείψεις περιβάλλουσας



$$\tilde{s}_t(t) = A \cdot e^{j[2\pi f_c t + \psi_s(t)]}$$

Το χρονικά μεταβαλλόμενο τυχαίο μέσο διάδοσης εκφράζεται με τη χαρακτηριστική

$$\tilde{p}(t) = r_p(t) e^{j\psi_r(t)} \quad r_p(t) = m(t) \cdot r_0(t)$$

$m(t)$ : αφορά τις *μακρόχρονες διαλείψεις*, δηλ. τον *τοπικό μέσο όρο*

$r_0(t)$ : αφορά τις *βραχύχρονες διαλείψεις*, έχει μέση τιμή 1 (αλλιώς δεν ισχύει ο ορισμός)

# Διαλείψεις περιβάλλουσας



$$x = v \cdot t \quad r_p(x) = m(x) \cdot r_0(x)$$

*Μοντέλο γινομένου*

$$\begin{aligned} \tilde{s}_r(t) &= \tilde{s}_t(t) \cdot \tilde{p}(t) = \\ &= A \cdot m(t) \cdot r_0(t) \cdot e^{j[2\pi f_c t + \psi_s(t) + \psi_r(t)]} \end{aligned}$$

$r(t) = Am(t)r_0(t)$ : περιβάλλουσα

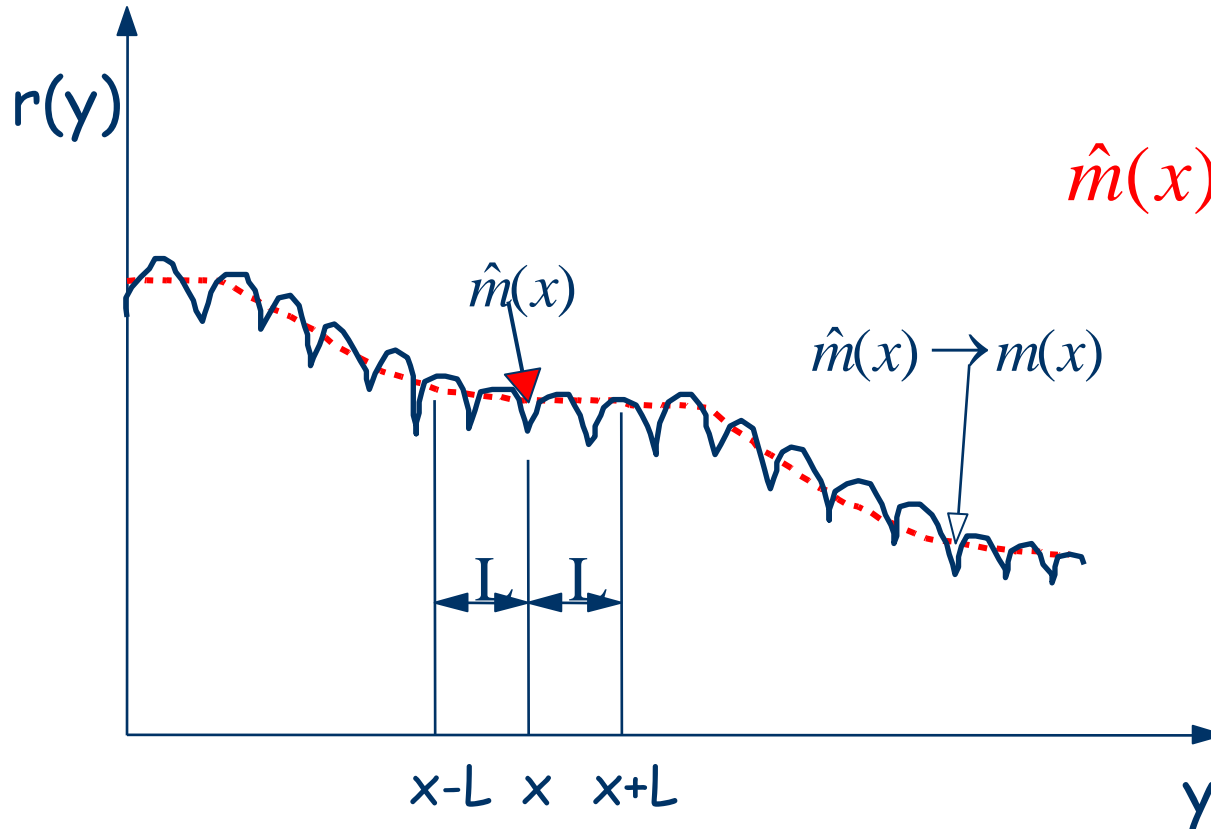
$\psi_r(t)$ : τυχαία συνιστώσα φάσης



# Μακρόχρονες διαλείψεις

## Τοπικός μέσος όρος

Είναι ο μέσος όρος της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου ραδιοσήματος. Κάθε τιμή του αντιστοιχεί στη μέση τιμή της έντασης του πεδίου σε κάθε σημείο.



$$\hat{m}(x) = \frac{1}{2L} \int_{x-L}^{x+L} r(y) dy$$

$$L = 20\lambda - 40\lambda$$



# Μακρόχρονες διαλείψεις



## Τοπικός μέσος όρος

$$\hat{m}(x) = \frac{1}{2L} \int_{x-L}^{x+L} r(y) dy = \frac{1}{2L} \int_{x-L}^{x+L} m(y) r_0(y) dy$$

Για  $L = 20\lambda$  έως  $40\lambda$

$$\hat{m}(x) = m(x) \cdot \frac{1}{2L} \int_{x-L}^{x+L} r_0(y) dy$$

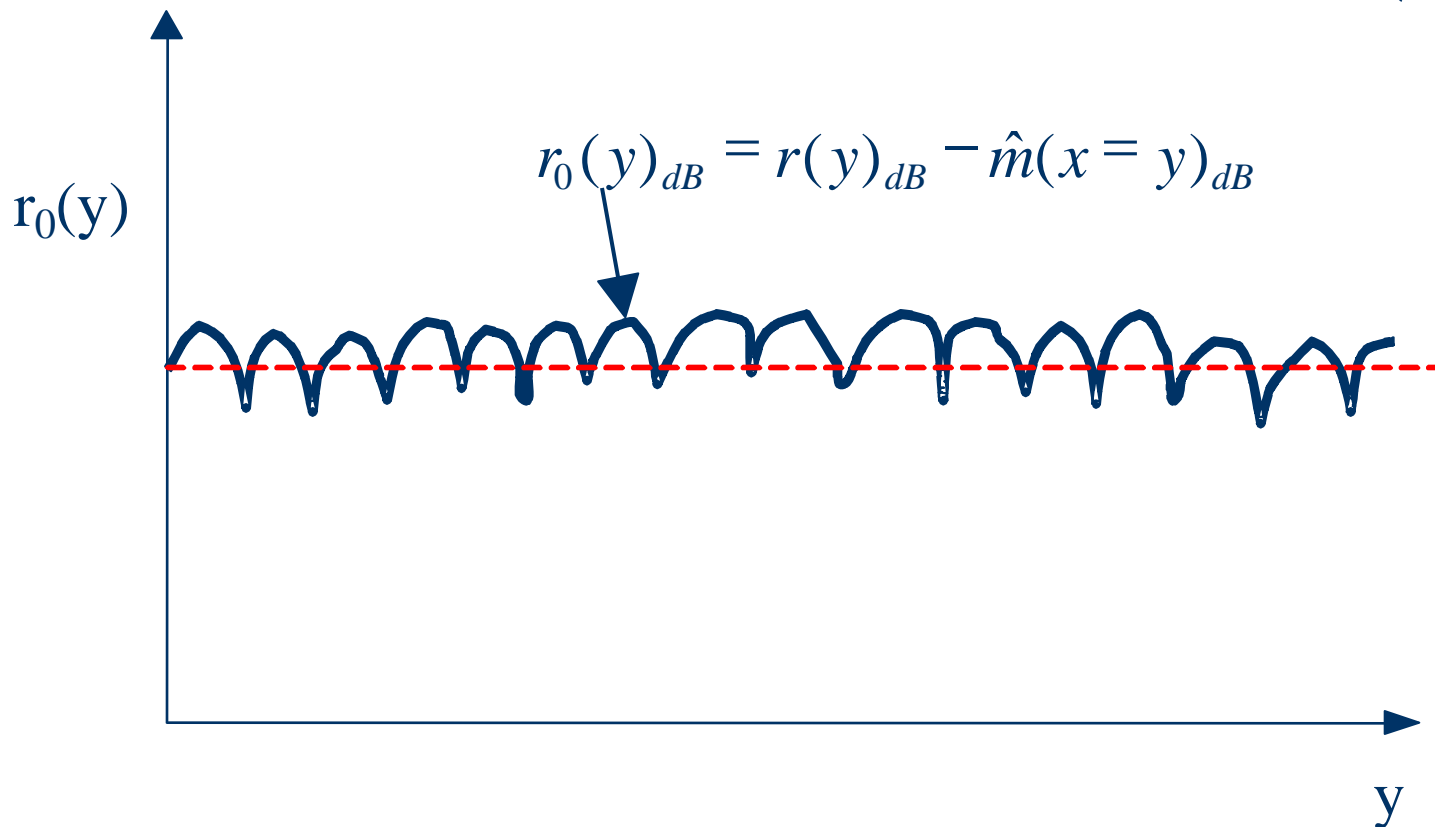
$$m(x) = \hat{m}(x) \frac{1}{2L} \int_{x-L}^{x+L} r_0(y) dy \rightarrow 1$$

# Μακρόχρονες διαλείψεις



## Τοπικός μέσος όρος

$$r_0(y) = \frac{r(y)}{\hat{m}(x=y)}$$





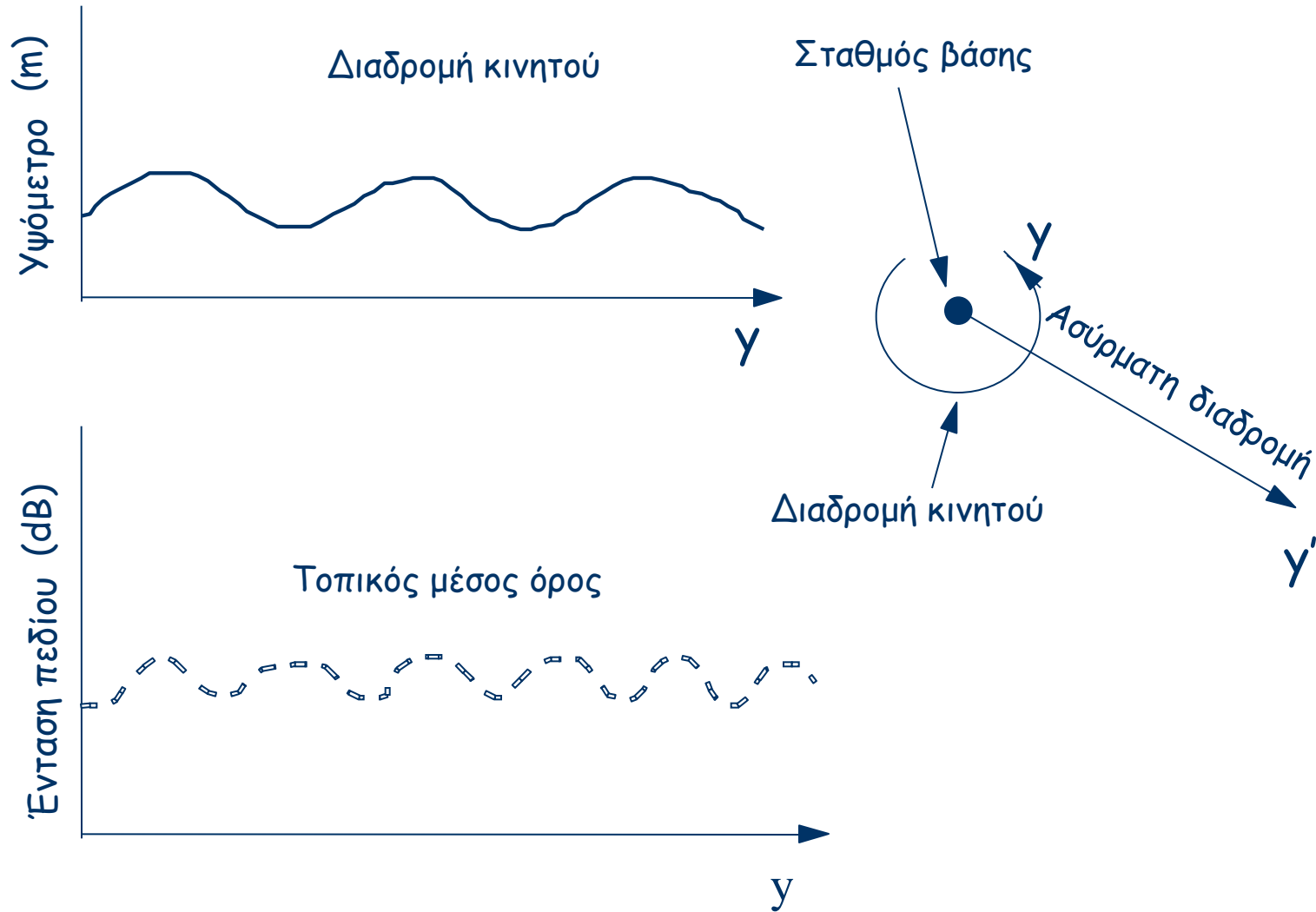
## Τοπικός μέσος όρος

- Για περιοχές με επίπεδη επιφάνεια το  $m(y)$  είναι σταθερό σε όλη τη μετρούμενη περιοχή
- Σε μη επίπεδες περιοχές το  $m(y)$  παρουσιάζει διακυμάνσεις ανάλογες με το περίγραμμα της περιοχής
- Οι διακυμάνσεις οφείλονται κυρίως στη μορφολογία του εδάφους της περιοχής και στα κτίρια που υπάρχουν μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού



# Μακρόχρονες διαλείψεις

## Τοπικός μέσος όρος

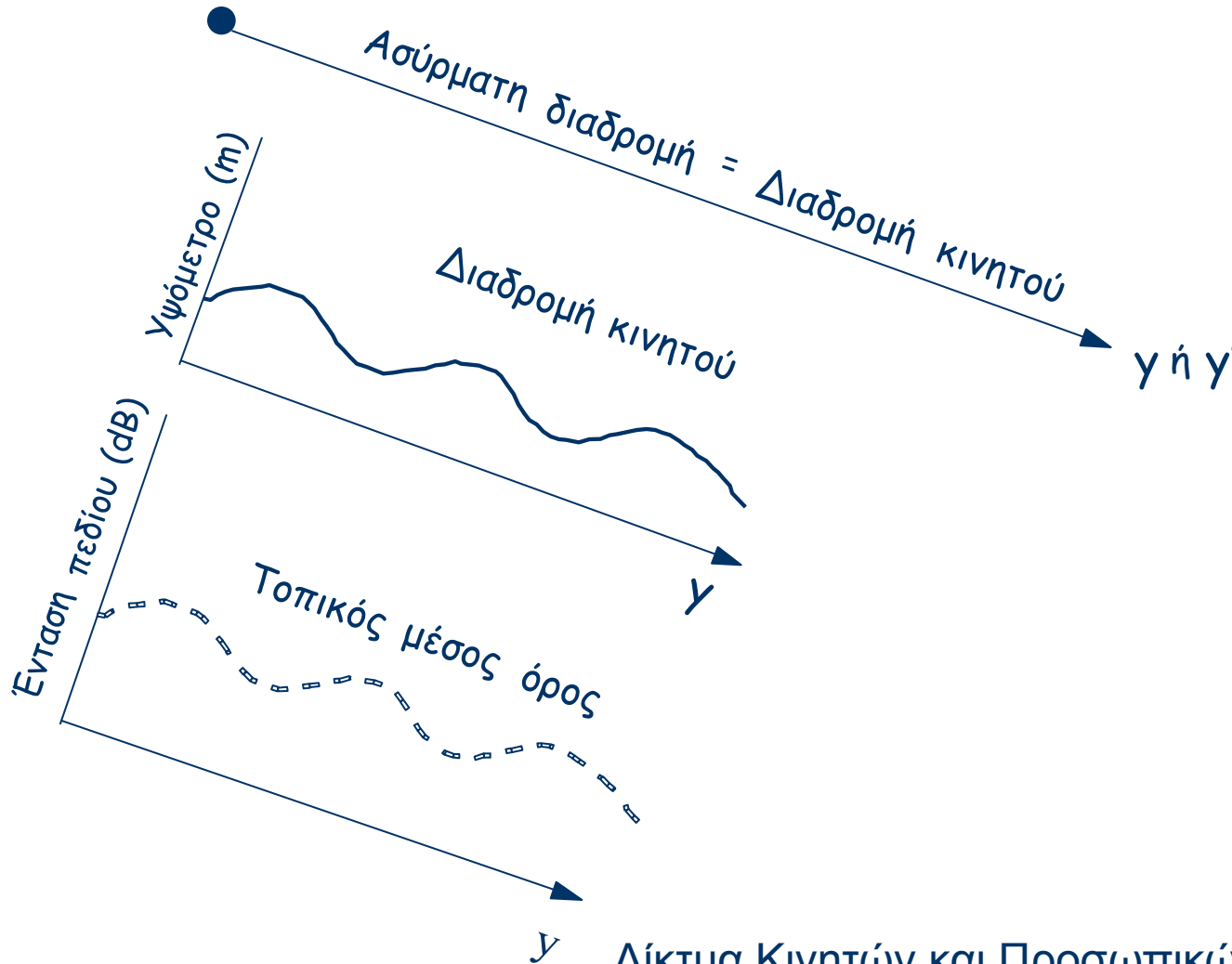




# Μακρόχρονες διαλείψεις

## Τοπικός μέσος όρος

Σταθμός βάσης



# Βραχύχρονες διαλείψεις

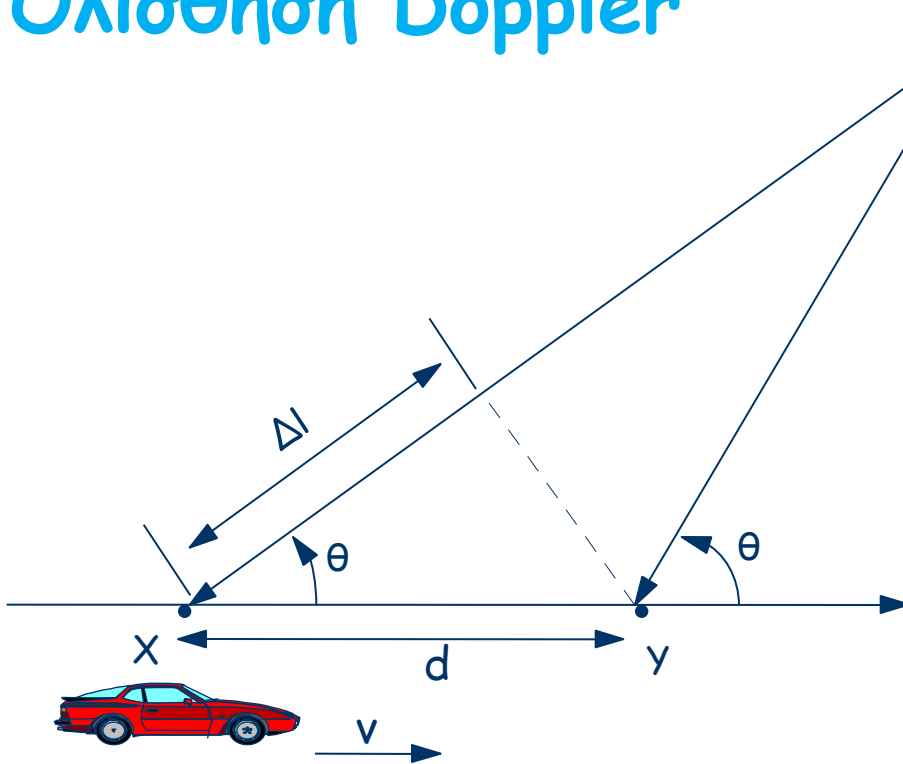


- Οφείλονται κυρίως στις πολλαπλές διαδρομές
- Τρεις κυριότερες συνέπειες από τις πολλαπλές διαδρομές:
  - **Απότομες αλλαγές στη στάθμη του σήματος**, όταν διανύονται μικρές αποστάσεις ή μεσολαβούν μικρά χρονικά διαστήματα
  - **Τυχαία διαμόρφωση συχνότητας** λόγω της ολίσθησης Doppler, που είναι διαφορετική για τα διάφορα σήματα πολλαπλών διαδρομών, λόγω διαφορετικής γωνίας άφιξης των σημάτων ως προς την κατεύθυνση κίνησης του δέκτη
  - **Εξάπλωση χρονοκαθυστέρησης**, η οποία προκαλείται από διαφορετική καθυστέρηση σε κάθε διαδρομή που ακολουθείται από το σήμα.

# Βραχύχρονες διαλείψεις



## Ολίσθηση Doppler



$$\Delta l = d \cos \theta = v \Delta t \cos \theta$$

$$\Delta \phi = \beta \Delta l = \frac{2 \pi v \Delta t}{\lambda} \cos \theta$$

$$f_D = \frac{\Delta \phi}{2 \pi \Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos \theta$$

# Βραχύχρονες διαλείψεις



- Παράγοντες που επηρεάζουν τις βραχύχρονες διαλείψεις:
  - Πολλαπλές διαδρομές
  - Ταχύτητα κινητού
  - Ταχύτητα περιβαλλόντων αντικειμένων
  - Εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος

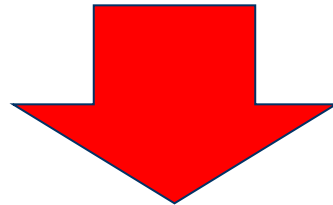


# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



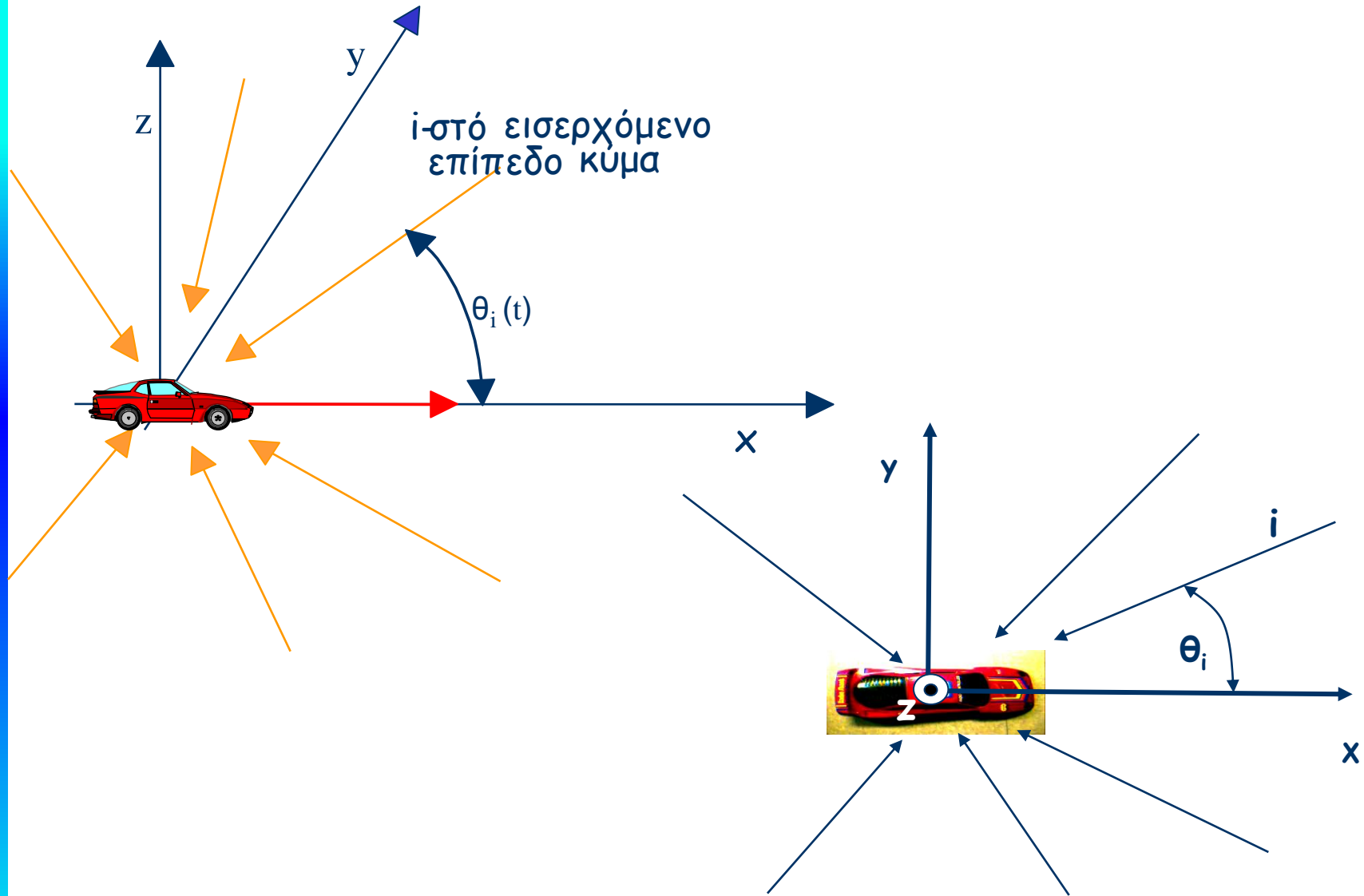
## Επίπεδος δίαυλος ή δίαυλος στενής ζώνης

- Το αντίστροφο του εύρους ζώνης του σήματος είναι πολύ μεγαλύτερο από τη χρονική διασπορά των καθυστερήσεων λόγω πολλαπλών διαδρομών, ή
- Η διάρκεια των διαμορφωμένων συμβόλων είναι πολύ μεγαλύτερη από τη διασπορά καθυστέρησης



Όλες οι συχνότητες του μεταδιδόμενου σήματος θα υφίστανται την ίδια τυχαία εξασθένηση και μετατόπιση φάσης, λόγω πολλαπλών διαδρομών

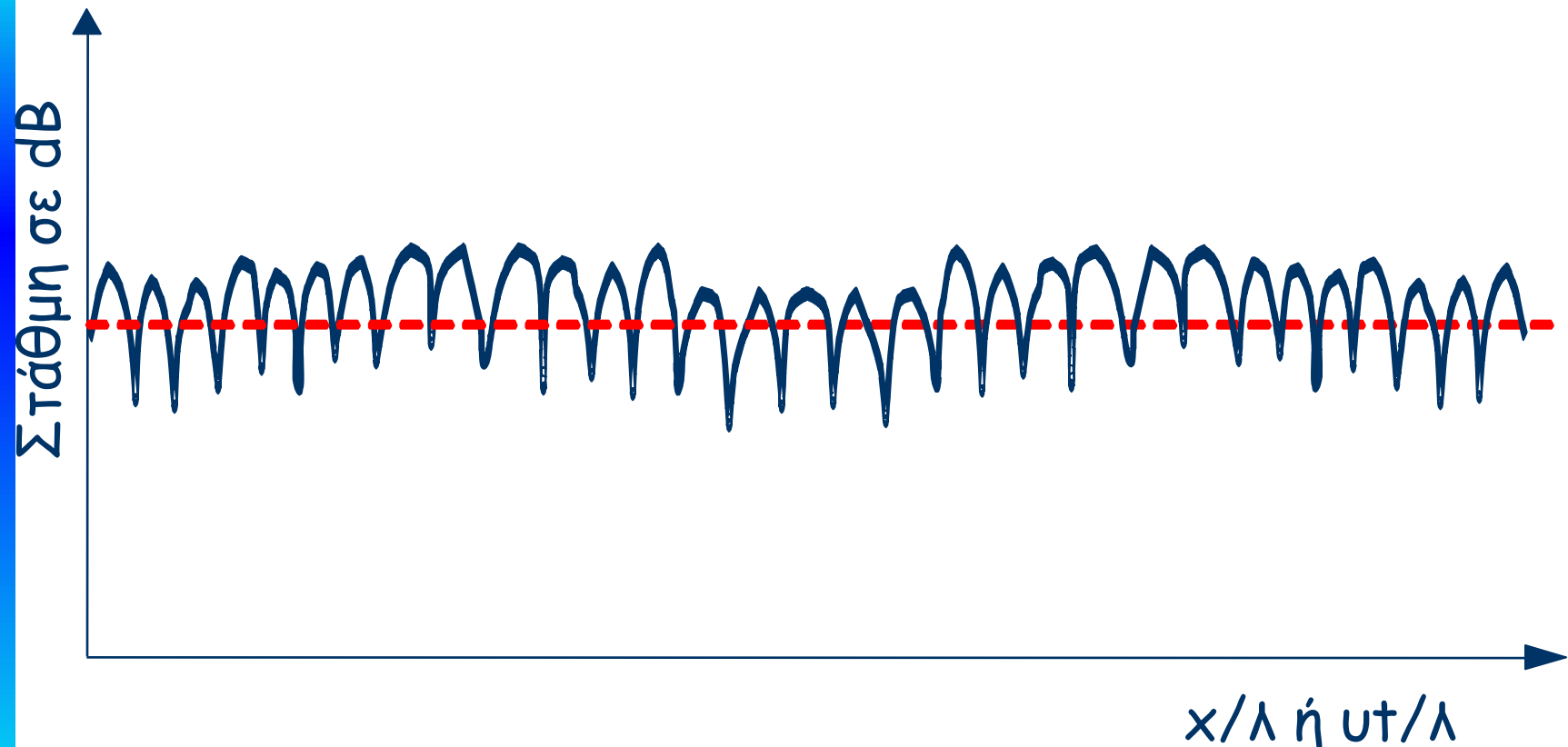
# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



## Διαλείψεις για $N$ διαδρομές



# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



$$f_{D,i}(t) = \frac{v}{\lambda} \cos \theta_i(t) = f_m \cos \theta_i(t) \quad \text{Hz}$$

$$x(t) = \text{Re} \left\{ \tilde{u}(t) \cdot e^{j2\pi f_c t} \right\}$$

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \tilde{r}(t) \cdot e^{j2\pi f_c t} \right\}$$

$$\tilde{r}(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot e^{-j2\pi[(f_c + f_{D,i}(t))\tau_i(t) - f_{D,i}(t)t]} \tilde{u}(t - \tau_i(t))$$

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



$$\tilde{r}(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot e^{-j\phi_i(t)} \tilde{u}(t - \tau_i(t))$$

$$\phi_i(t) = 2\pi[(f_c + f_{D,i}(t))\tau_i(t) - f_{D,i}(t)t]$$

Ο διάυλος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως χρονικά μεταβαλλόμενο φίλτρο με μιγαδική κρουστική απόκριση

$$\tilde{h}(t, \tau) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot e^{-j\phi_i(t)} \delta(\tau - \tau_i(t))$$

$\tilde{h}(t, \tau)$  είναι η απόκριση του διαύλου τη στιγμή  $t$  σε παλμό  $\delta(t - \tau)$

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



- Επειδή το  $f_c + f_{D,i}(t)$  είναι πολύ μεγάλο, μικρή μεταβολή στο  $\tau_i(t)$  προκαλεί μεγάλη μεταβολή στη φάση  $\varphi_i(t)$ .
- Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή  $t$ , οι συνιστώσες με τις τυχαίες φάσεις προστίθενται εποικοδομητικά ή μη.
- Το πλάτος  $A_i(t)$  εξαρτάται από την ενεργό επιφάνεια του  $i$ -στού σκεδαστή (δεν αλλάζει για μικρές αποστάσεις).

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



- αν θεωρήσουμε επίπεδους διαύλους, όλες οι καθυστερήσεις είναι περίπου ίσες με  $\bar{\tau}$
- οι διαλείψεις οφείλονται κυρίως στις χρονικές μεταβολές της τυχαίας φάσης  $\phi_i(t)$  που προκαλούνται από τις ολισθήσεις Doppler  $f_{D,i}(t)$ .

$$\tilde{h}(t, \tau) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot e^{-j\phi_i(t)} \delta(\tau - \bar{\tau}) = \tilde{g}(t) \delta(\tau - \bar{\tau})$$

$$\tilde{H}(t, f) = \tilde{g}(t) e^{-j2\pi f \bar{\tau}}$$

όλες οι συνιστώσες συχνότητας στο φάσμα υφίστανται την ίδια εξασθένηση  $|\tilde{g}(t)|$

$$|\tilde{H}(t, f)| = |\tilde{g}(t)|$$

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



Μελετώντας τη βαθυπερατή μιγαδική περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος για αδιαμόρφωτο φέρον, βρίσκουμε ότι, για μεγάλο αριθμό πολλαπλών διαδρομών,  $N$ , η pdf της  $r(t)$  είναι Rayleigh και εκφράζεται ως

$$p(r) = \frac{2r}{P_0} e^{-\frac{r^2}{P_0}}, \text{ για } r \geq 0$$

όπου  $P_0$  είναι η μέση ισχύς του σήματος

Η φάση  $\varphi$  του λαμβανόμενου σήματος είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα  $-\pi$  έως  $\pi$

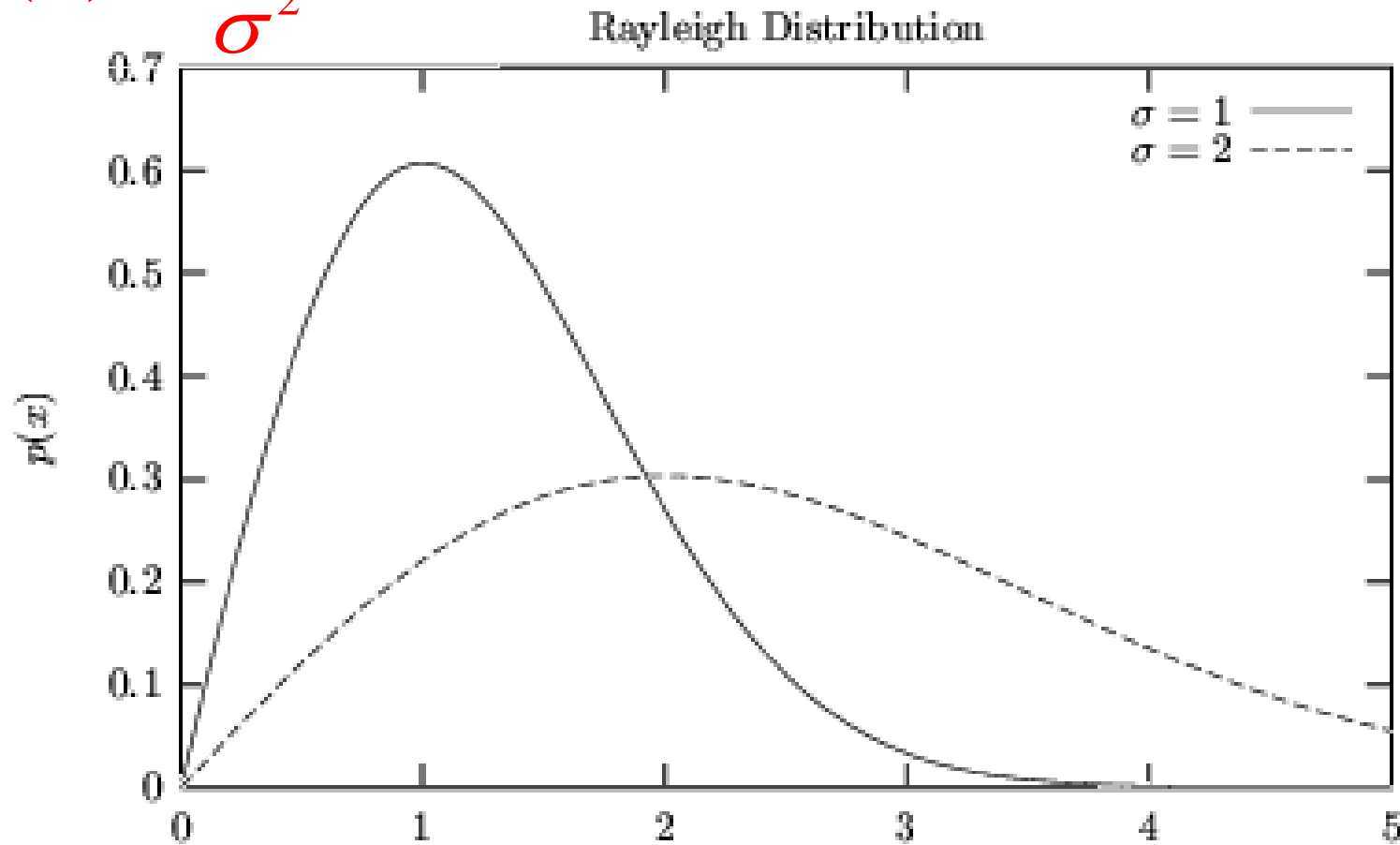


# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



## Κατανομή Rayleigh

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$



# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



## Κατανομή Rayleigh

Η πιθανότητα ότι η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος δεν υπερβαίνει δοθείσα τιμή  $R$

$$P(R) = \text{prob}(r \leq R) = \int_0^R \frac{2r}{P_0} e^{-\frac{r^2}{P_0}} dr$$

$$P(R) = 1 - e^{-\frac{R^2}{P_0}}$$

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



- Η διάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών είναι συνήθως στοχαστική ανέλιξη στον χώρο, αφού οι διαδρομές είναι συναρτήσεις των συντεταγμένων  $x, y, z$ .
- Η κίνηση μέσω μιας χωρικής μεταβολής παράγει μια χρονικά μεταβαλλόμενη στοχαστική ανέλιξη.
- Η κίνηση  $u_x t$  με ταχύτητα  $u_x$ , μετατρέπει τις μεταβολές απόστασης σε χρονικές με ρυθμό μεταβολής (διαλείψεων):  $(u_x / c) \cdot f = u_x / \lambda$ .

$$\cos(2\pi f t - \beta x) = \cos\left[2\pi\left(f - \frac{u_x}{\lambda}\right)t\right]$$

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



- Η pdf Rayleigh περιγράφει τη στατιστική πρώτου βαθμού για την περιβάλλουσα του σήματος σε αποστάσεις σχετικά μικρές, ώστε η μέση τιμή της να εκλαμβάνεται ως σταθερή.
- Ενδιαφέρει μια ποσοτική περιγραφή του ρυθμού διαλείψεων της περιβάλλουσας και η μέση διάρκειά τους κάτω από δοθείσα στάθμη.
- Βοηθάει στην επιλογή του bit rate, του μήκους της κωδικής λέξης και επιτρέπει μια εκτίμηση της επίδοσης του συστήματος.

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



## Ρυθμός υπέρβασης στάθμης

$$\frac{dr}{dt} = \dot{r} > 0$$

$$N(R) = \int_0^{\infty} \dot{r} p(R, \dot{r}) d\dot{r}$$

$$N(R) = \sqrt{2\pi} f_m \rho e^{-\rho^2}$$

$$\rho = R / R_{rms}$$

$$R_{rms} = \sqrt{P_0}$$

$$f_m = \nu / \lambda$$

$$N(R) \approx \sqrt{2\pi} \frac{\nu}{\lambda} \rho$$

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε επίπεδους διαύλους



## Μέση διάρκεια διαλείψεων

$$E[\tau_R] = \tau(R) = \frac{\text{prob}[r \leq R]}{N(R)}$$

$$\tau(R) = \frac{e^{\rho^2} - 1}{\sqrt{2\pi} f_m \rho} = \frac{e^{\rho^2} - 1}{n_o \cdot \rho}$$

$$\tau(R) \approx \frac{\lambda}{\nu} \frac{\rho}{\sqrt{2\pi}}$$



## Παράδειγμα 2.6

Να βρεθεί η μέση διάρκεια διαλείψεων για  $\rho = 1/\sqrt{2}$ ,  $f_D = 30$  Hz. Για δυαδική ψηφιακή διαμόρφωση με  $R = 40$  bps, είναι οι διαλείψεις Rayleigh αργές ή γρήγορες; Ποιος είναι ο μέσος αριθμός εσφαλμένων bit ανά sec για τον δοθέντα ρυθμό μετάδοσης; Θεωρήστε ότι εμφανίζεται ένα εσφαλμένο bit κάθε φορά που οποιοδήποτε τμήμα του bit αντιμετωπίζει διάλειψη για την οποία  $\rho < 0.1$ .

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



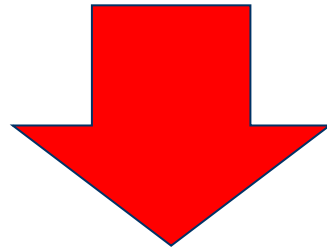
- Η διασπορά των καθυστερήσεων λόγω πολλαπλών διαδρομών είναι μεγάλη σε σύγκριση με το αντίστροφο του εύρους ζώνης του σήματος
- Οι συνιστώσες συχνότητας του μεταδιδόμενου σήματος θα υφίστανται διαφορετικές καθυστερήσεις φάσης κατά μήκος των διαφόρων διαδρομών
- Καθώς μεγαλώνουν οι διαφορές στις καθυστερήσεις, ακόμη και παραπλήσιες συχνότητες στο μεταδιδόμενο σήμα μπορεί να υφίστανται σημαντικά διαφορετικές μετατοπίσεις φάσης



# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



- Οι ραδιοδίαυλοι εισάγουν παραμόρφωση πλάτους και φάσης στο σήμα πληροφορίας.



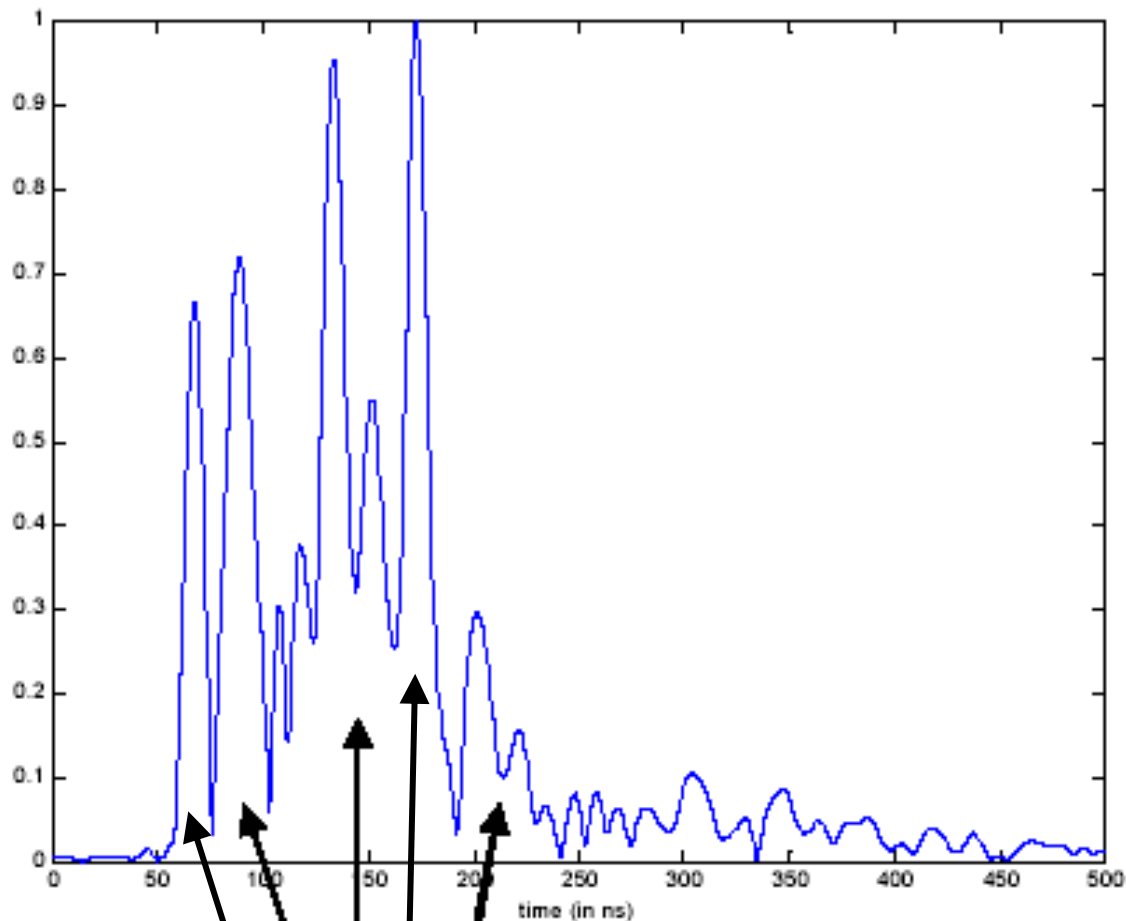
*Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (frequency selective fading).*

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



## Κρουστική απόκριση διαύλου ευρείας ζώνης

Μεταδοθείς στενός παλμός καταφθάνει μέσω πολλαπλών διαδρομών με διαφορετικό εύρος και διαφορετικές καθυστερήσεις



Αφίξεις από πολλαπλές διαδρομές

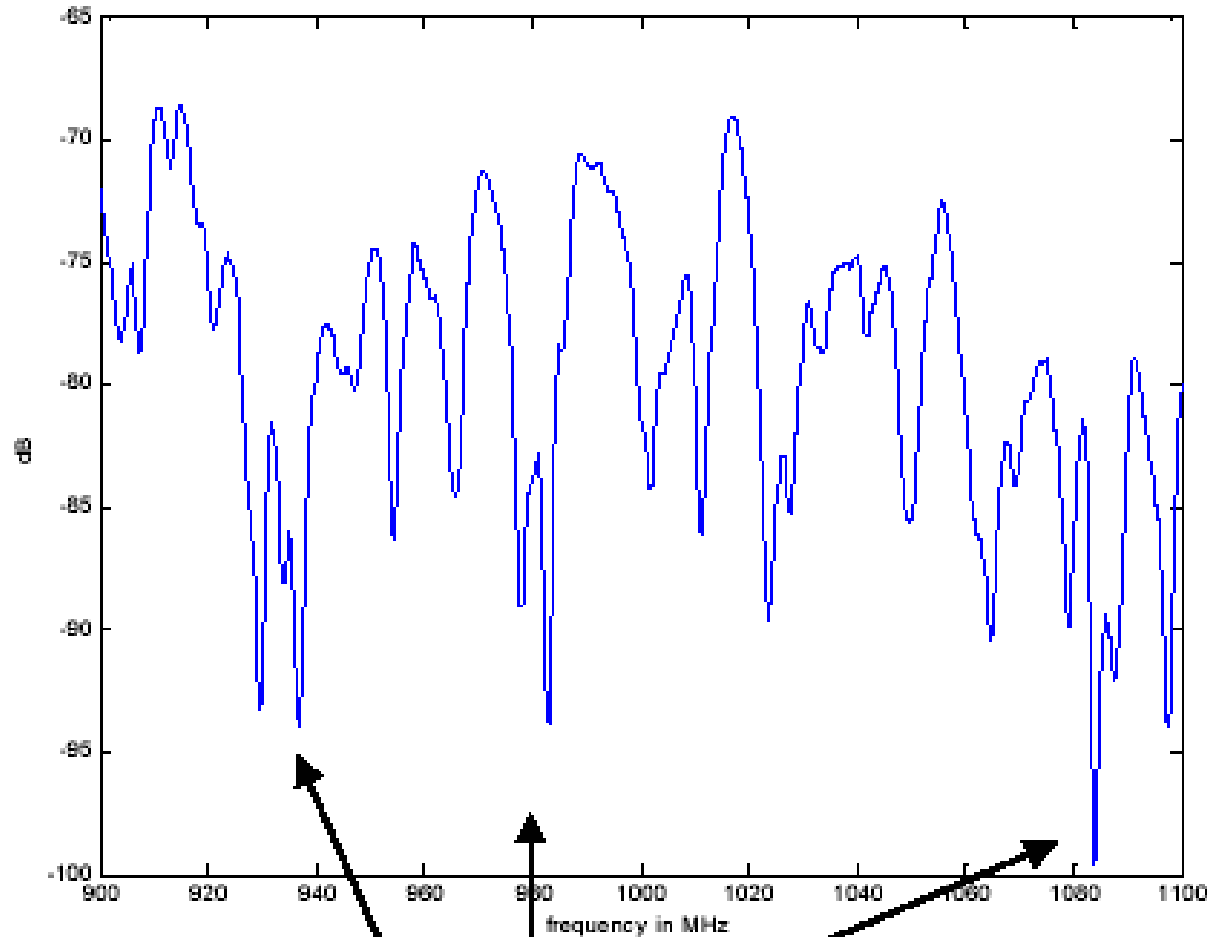
Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



## Απόκριση συχνότητας διαύλου ευρείας ζώνης

Εύρος ζώνης  
200 MHz και  
φέρον 1 GHz



Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα

Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



Η έξοδος της κεραίας του δέκτη είναι άθροισμα πολλών εκδοχών του σήματος που καταφθάνουν μέσω διαφορετικών διαδρομών.

Υποθέσεις:

- κάθε διαδρομή είναι γραμμική, χρονικά αμετάβλητη και χωρίς διασπορά
- η απόσταση πομπού-δέκτη είναι αρκετά μεγάλη (επίπεδο κύμα)
- η θέση του πομπού είναι σταθερή

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



Αν μεταδοθεί κρουστικός παλμός  $\delta(t)$ , το λαμβανόμενο σήμα στη θέση  $\vec{R}$  θα είναι:

$$h(t, \vec{R}) = \sum_{i=1}^{N(\vec{R})} A_i(\vec{R}) \cdot \delta[t - \tau_i(\vec{R})]$$

Αν  $x(t)$  το μεταδιδόμενο σήμα:

$$s(t, \vec{R}) = x(t) \otimes h(t, \vec{R}) = \sum_{i=1}^{N(\vec{R})} A_i(\vec{R}) \cdot x[t - \tau_i(\vec{R})]$$

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



Για ραδιοδιάυλο ζωνοπερατό, περιορισμένου εύρους ζώνης:

$$\tilde{r}(t, \vec{R}) = \tilde{u}(t) \otimes \tilde{h}(t, \vec{R})$$

$$\tilde{h}(t, \vec{R}) = \sum_{i=1}^{N(\vec{R})} A_i(\vec{R}) \cdot e^{-j2\pi f_c \tau_i(\vec{R})} \delta[t - \tau_i(\vec{R})]$$

Για περιοχή  $\mathcal{D}$  με μικρή έκταση

$$\tilde{h}(t, \vec{R}) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot e^{-j2\pi f_c \tau_i(\vec{R})} \delta[t - \tau_i(\vec{R})], \quad \vec{R} \in \mathcal{D}$$

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



## Μεταβολές μικρής κλίμακας

$$\tilde{r}(t, \vec{R}) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot e^{-j2\pi f_c \tau_i(\vec{R})} \tilde{u}(t - \tau_{i,0}), \quad \vec{R} \in \mathcal{D}$$

Αν η περιοχή  $\mathcal{D}$  που μας ενδιαφέρει έχει μικρή έκταση, η  $|\tilde{r}(t, \vec{R})|$ , όταν λαμβάνεται στο σύνολο των χρονικών συναρτήσεων στις θέσεις  $\vec{R}$  έχει κατανομή **Rayleigh** και η **φάση** της περιβάλλουσας είναι **ομοιόμορφα κατανεμημένη** στο διάστημα  $0, 2\pi$ ).

Οι κατανομές της περιβάλλουσας και της φάσης του λαμβανόμενου αποδιαμορφωμένου σήματος είναι ακριβώς όμοιες με εκείνες που παρατηρούνται κατά τη μετάδοση σήματος μιας συχνότητας

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



## Χρονικό φάσμα

$$\tilde{R}(f, \vec{R}) = \tilde{U}(f) \sum_{i=1}^N A_i e^{-j2\pi(f+f_c)\tau_i(\vec{R})}$$

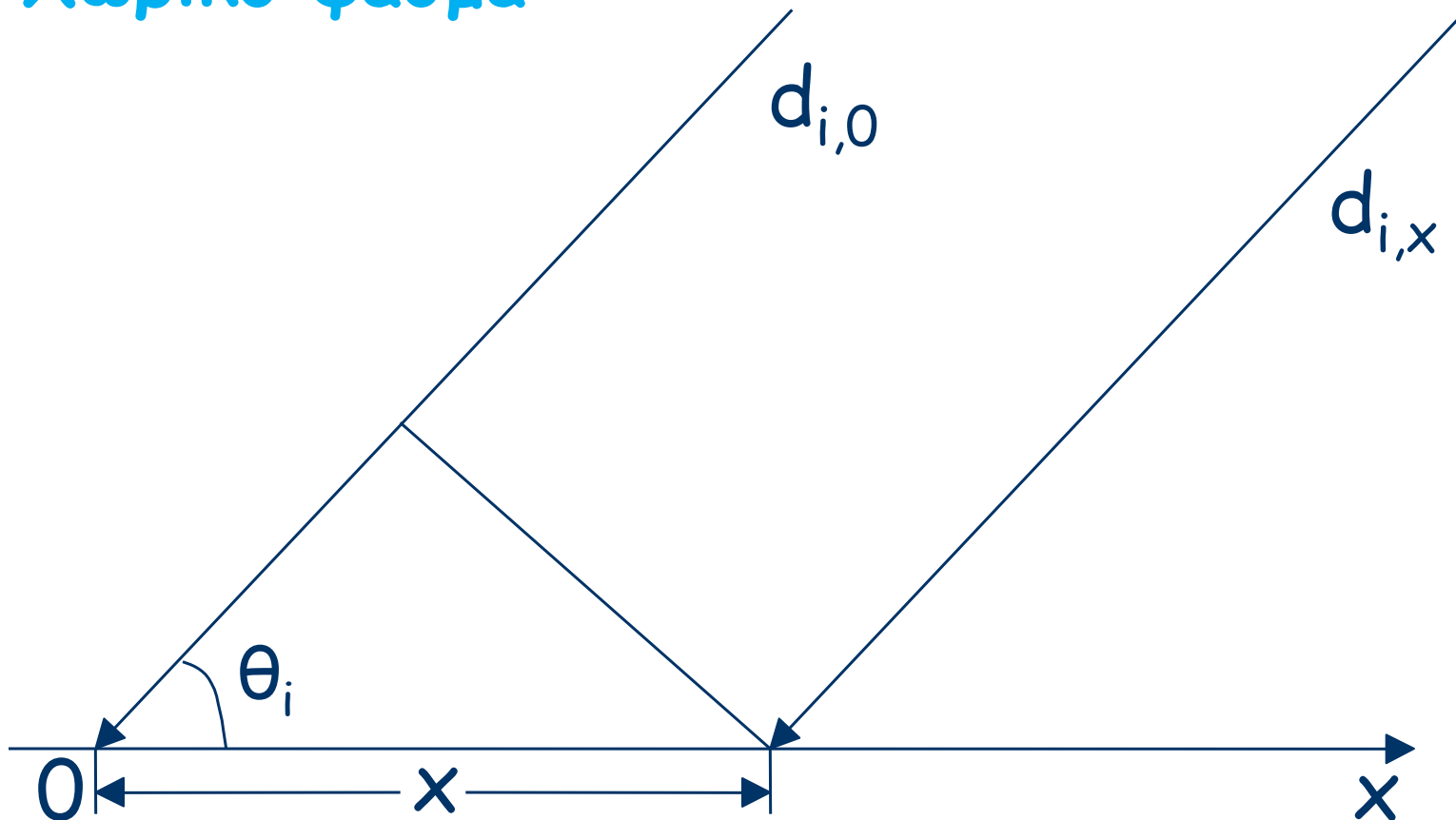
Το πλάτος και η φάση του  $\tilde{R}(f, \vec{R})$  έχουν αντίστοιχα κατανομή Rayleigh και ομοιόμορφη κατανομή, όταν λαμβάνονται στο σύνολο των συναρτήσεων συχνότητας στις θέσεις  $\vec{R}$ .



# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



## Χωρικό φάσμα



$$d_i(\vec{R}) = d_i(x) = d_{i,0} - x \cos \theta_i$$

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



## Χωρικό φάσμα

Η καθυστέρηση στην  $i$ -στή διαδρομή

$$\tau_i(\vec{R}) = \tau_i(x) = \tau_{i,0} - \frac{x}{c} \cos \theta_i$$

Η συνεισφορά της  $i$ -στής διαδρομής στο λαμβανόμενο σήμα

$$\tilde{r}_i(t, \vec{R}) = \tilde{r}_i(t, x) = A_i \cdot e^{-j2\pi f_c \tau_i(x)} \tilde{u}(t - \tau_{i,0})$$

$$= A_i \cdot e^{-j(2\pi f_c \tau_{i,0} - 2\pi \frac{x}{\lambda} \cos \theta_i)} \tilde{u}(t - \tau_{i,0})$$

Για σταθερό  $t$ , μεταβάλλεται ημιτονικά συναρτήσει

του  $x$ , με χωρική συχνότητα  $\nu_i = \cos \theta_i / \lambda$

(κύκλους ανά μήκος κύματος).

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



## Φάσμα Doppler

Θεωρούμε ότι ο δέκτης κινείται με σταθερή ταχύτητα  $v$  κατά τη διεύθυνση  $+x$  και εκφράζουμε το μήκος της  $i$ -στής διαδρομής ( $x = 0$  για  $t = 0$ ).

$$d_i(\vec{R}) = d_i(t) = d_{i,0} - vt \cos \theta_i$$

Η καθυστέρηση στην  $i$ -στή διαδρομή

$$\tau_i(\vec{R}) = \tau_i(t) = \tau_{i,0} - \frac{v}{c} t \cos \theta_i$$

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών σε διαύλους ευρείας ζώνης



## Φάσμα Doppler

Η συνεισφορά της  $i$ -στης διαδρομής στο λαμβανόμενο σήμα

$$\tilde{r}_i(t) = A_i \cdot e^{-j2\pi f_c \tau_i(t)} \tilde{u}(t - \tau_{i,0})$$

$$= A_i \cdot e^{-j2\pi f_c \left( \tau_{i,0} - \frac{v}{c} \cos \theta_i t \right)} \tilde{u}(t - \tau_{i,0})$$

Η φαινομενική μεταβολή της συχνότητας

$$f_{i,d} = f_c \frac{v}{c} \cos \theta_i = \frac{v}{\lambda} \cos \theta_i = v \cdot \nu_i$$

και αναφέρεται ως **ολίσθηση συχνότητας Doppler**

# Παράμετροι διαύλων με πολλαπλές διαδρομές



Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για την πραγματοποίηση μετρήσεων με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς των ραδιοδιαύλων.

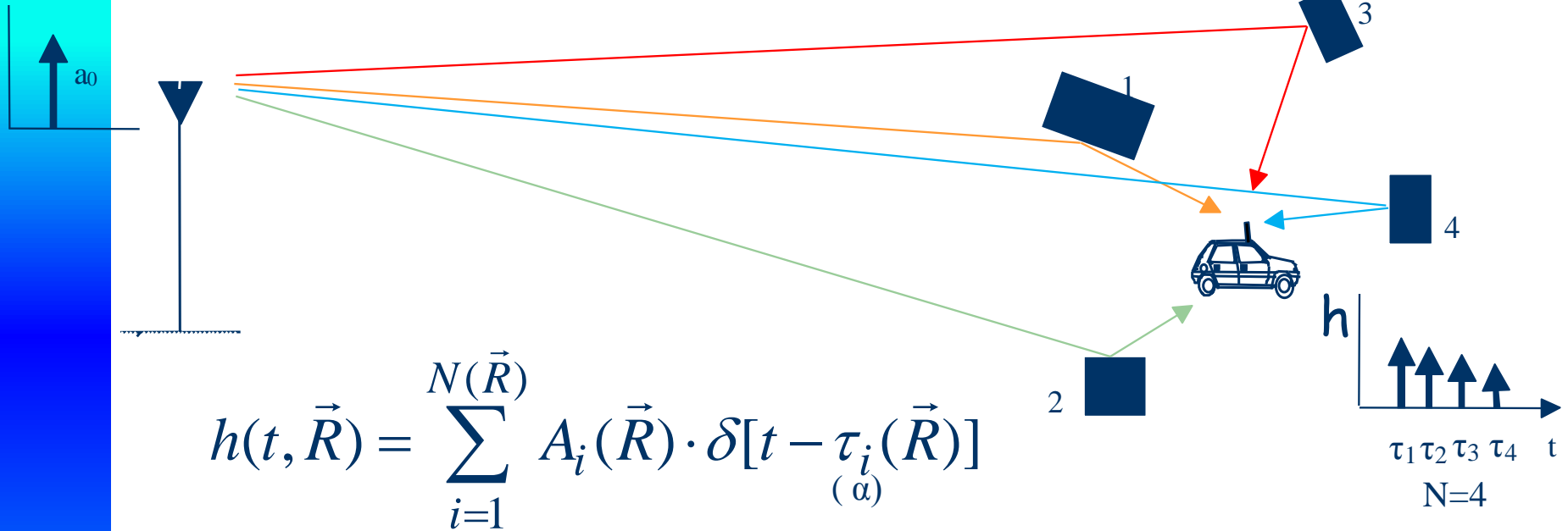
Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται είτε στο πεδίο του χρόνου με άμεση αποστολή παλμών RF, είτε στο πεδίο συχνότητας με σάρωση κατάλληλης περιοχής συχνοτήτων.

Από τις μετρήσεις υπολογίζονται παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των ραδιοδιαύλων, τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και της συχνότητας.

# Παράμετροι διαύλων με πολλαπλές διαδρομές



## Παράμετροι χρονικής διασποράς



(β)



## Παράμετροι χρονικής διασποράς

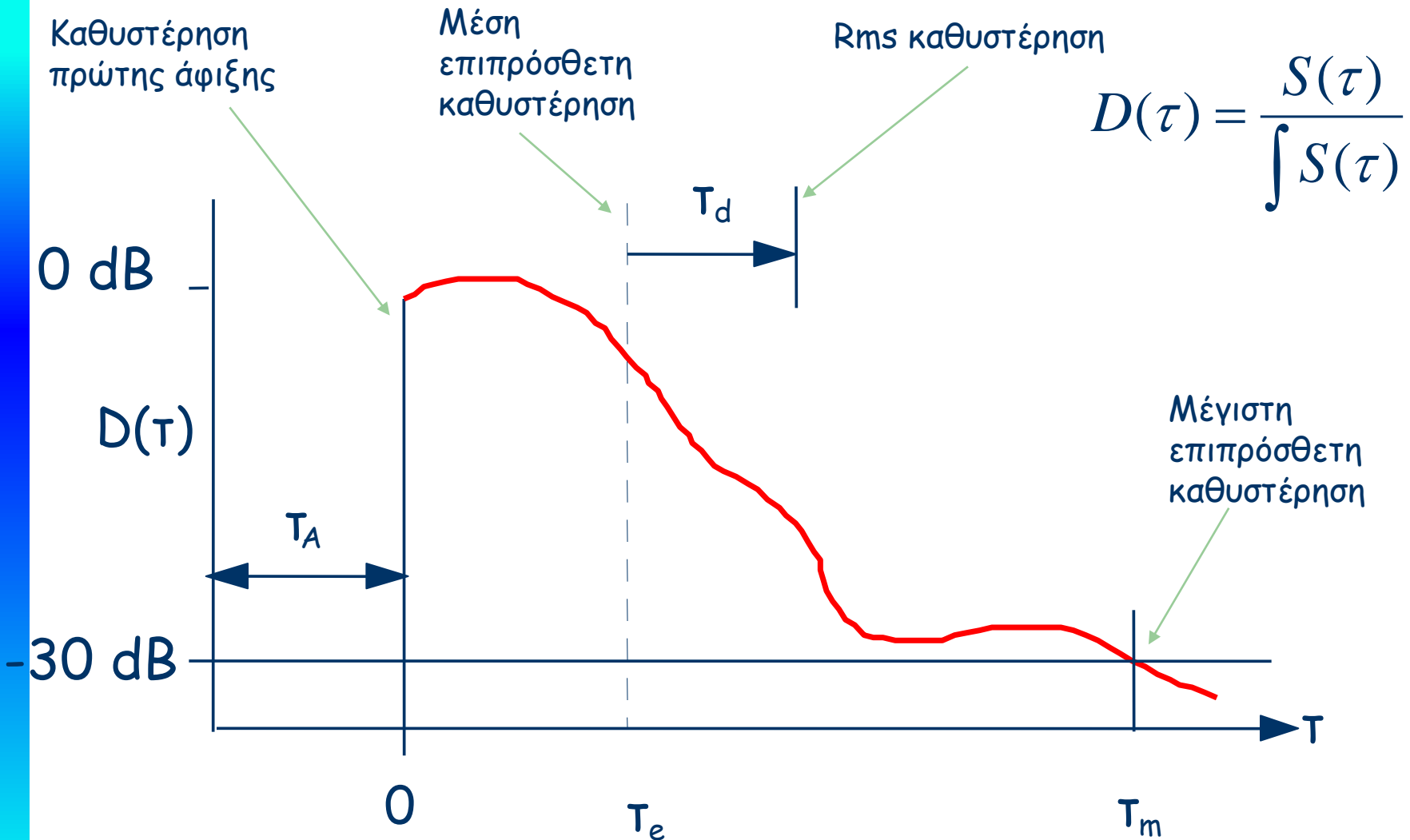
Ο αναμενόμενος βαθμός διασποράς καθυστέρησης καθορίζεται μέσω της μέτρησης του **προφίλ καθυστέρησης ισχύος (power delay profile)** του διαύλου

Τα προφίλ καθυστέρησης ισχύος μετρούνται με διάφορες τεχνικές και παριστάνονται γραφικά ως διαγράμματα της σχετικής λαμβανόμενης ισχύος συναρτήσει της επιπρόσθετης καθυστέρησης ως προς σταθερή χρονική αναφορά.

# Παράμετροι διαύλων με πολλαπλές διαδρομές



## Προφίλ καθυστέρησης ισχύος







## Εύρος ζώνης συνοχής

Το εύρος ζώνης μέσα στο οποίο οι φασματικές συνιστώσες των σημάτων επηρεάζονται κατά παρόμοιο τρόπο, ονομάζεται *εύρος ζώνης συνοχής* (*coherence bandwidth,  $B_c$* ).

Συσχέτιση  $>0.9$

$$B_c \approx \frac{1}{50\tau_d}$$

Συσχέτιση  $>0.5$

$$B_c \approx \frac{1}{5\tau_d}$$



## Εύρος ζώνης συνοχής

### Παράδειγμα 2.9

- Το προφίλ πολλαπλών διαδρομών ενός διαύλου αποτελείται από τέσσερις συνιστώσες με στάθμες  $-20$ ,  $-6$ ,  $-10$  και  $0$  dB και καθυστερήσεις  $0$ ,  $1$ ,  $3$  και  $5$   $\mu$ s.
- $T_e$ ,  $T_d$ ,  $T_M$  ( $-10$  dB);
- $B_c$  (για συσχέτιση  $0.5$ )
- Ποια συστήματα χωρίς ισοσταθμιστές;



## Εξάπλωση Doppler-χρόνος συνοχής

- Η εξάπλωση Doppler και ο χρόνος συνοχής περιγράφουν τη χρονικά μεταβαλλόμενη φύση του διαύλου σε περιοχή μικρής κλίμακας
- Η εξάπλωση Doppler  $B_D$  είναι ένα μέτρο της διεύρυνσης του φάσματος που προκαλείται από τον ρυθμό χρονικής μεταβολής του ραδιοδιαύλου.
- Αν το εύρος ζώνης του σήματος είναι πολύ μεγαλύτερο από το  $B_D$  οι επιδράσεις της εξάπλωσης Doppler στον δέκτη είναι αμελητέες.



## Εξάπλωση Doppler-χρόνος συνοχής

- Ο *χρόνος συνοχής (coherence time)*  $C_T$  είναι η αντίστοιχη προς την εξάπλωση Doppler έννοια στο πεδίο του χρόνου.
- Χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίζει, στο πεδίο του χρόνου, την ιδιότητα του διαύλου να εμφανίζει διασπορά συχνότητας.

$$C_T = 1 / f_m$$



## Εξάπλωση Doppler-χρόνος συνοχής

- Ο χρόνος συνοχής είναι μια στατιστική μέτρηση του χρονικού διαστήματος στο οποίο η απόκριση του διαύλου είναι ουσιαστικά αμετάβλητη.
- Είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο δύο λαμβανόμενα σήματα έχουν μεγάλη πιθανότητα να εμφανίζουν συσχέτιση πλάτους.

$$C_T \approx \frac{9}{16\pi f_m}$$

$$C_T = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_m^2}} = \frac{0.423}{f_m}$$

Συσχέτιση > 0.5



## Τύποι βραχύχρονων διαλείψεων

Ανάλογα με τη σχέση των παραμέτρων του σήματος και των παραμέτρων του διαύλου, τα διάφορα μεταδιδόμενα σήματα υφίστανται διαφορετικούς τύπους διαλείψεων.

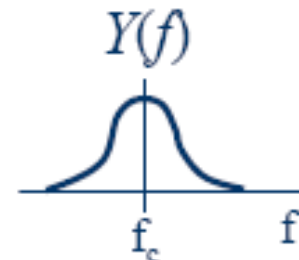
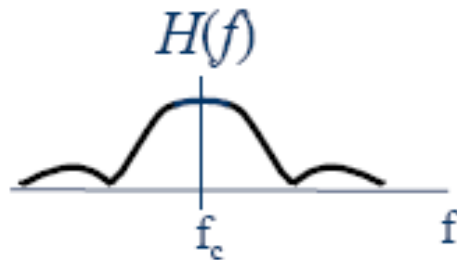
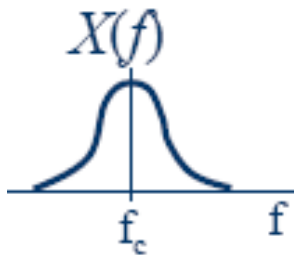
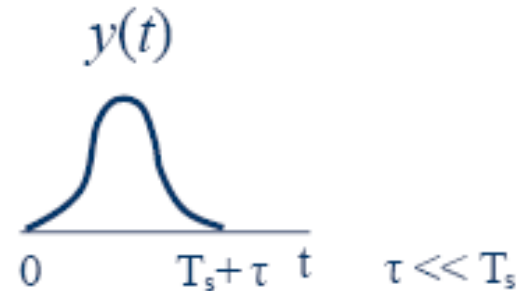
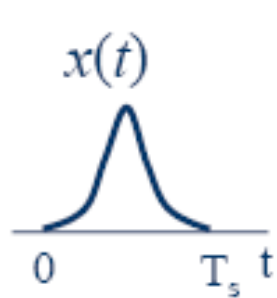
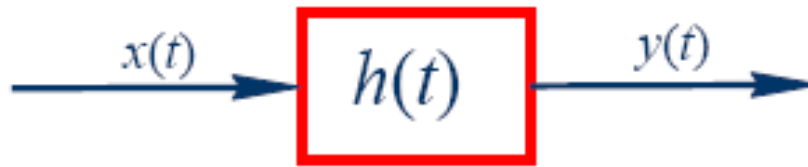
Η εξάπλωση καθυστέρησης προκαλεί χρονική διασπορά και διαλείψεις επιλεκτικές ως προς συχνότητα.

Η εξάπλωση Doppler προκαλεί διασπορά συχνότητας και διαλείψεις επιλεκτικές ως προς χρόνο.

# Παράμετροι διαύλων με πολλαπλές διαδρομές



## Χαρακτηριστικά διαύλου με επίπεδες διαλείψεις





## Διαλείψεις εξάπλωσης χρονοκαθυστέρησης

Ένα σήμα υφίσταται επίπεδες διαλείψεις όταν:

$$B_s \ll B_c \quad \text{και} \quad T_s \gg \tau_d$$

Ένα σήμα υφίσταται διαλείψεις επιλεκτικές ως προς συχνότητα, όταν:

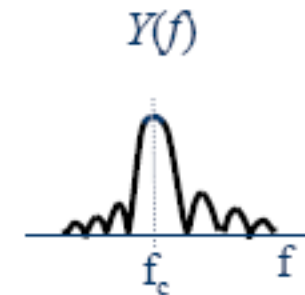
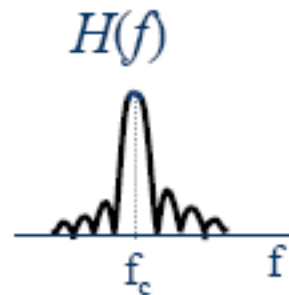
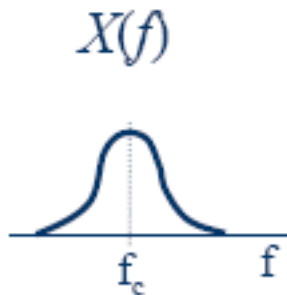
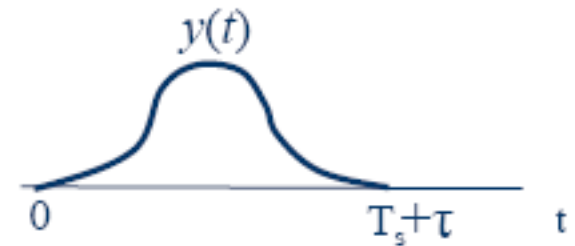
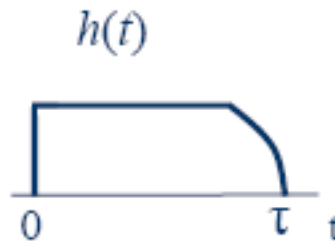
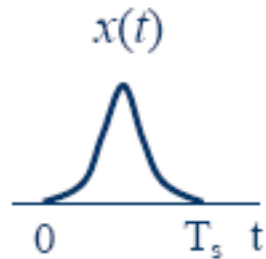
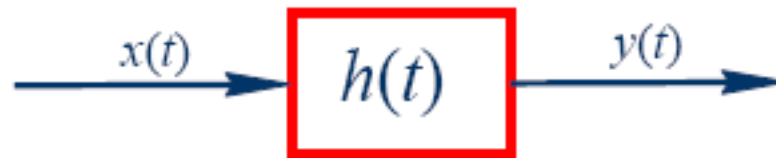
$$B_s \gg B_c \quad \text{και} \quad T_s \langle \tau_d$$



# Παράμετροι διαύλων με πολλαπλές διαδρομές



Χαρακτηριστικά διαύλου με διαλείψεις επιλεκτικές ως προς συχνότητα





## Διαλείψεις εξάπλωσης Doppler

Ένα σήμα υφίσταται ταχείες διαλείψεις όταν:

$$T_s \gg C_T \quad \text{και} \quad B_s \ll B_D$$

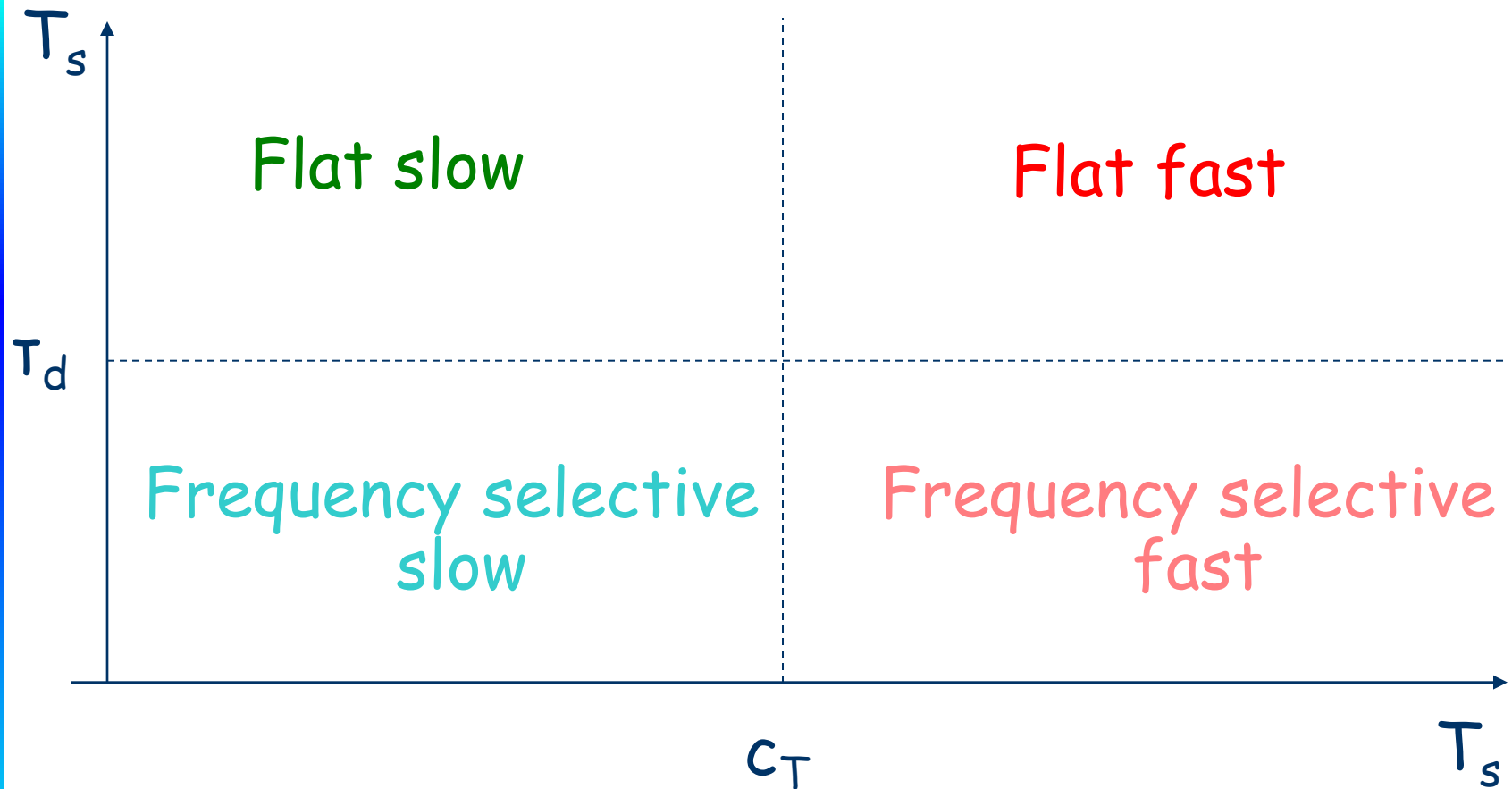
Ένα σήμα υφίσταται αργές διαλείψεις, όταν:

$$T_s \ll C_T \quad \text{και} \quad B_s \gg B_D$$

# Παράμετροι διαύλων με πολλαπλές διαδρομές



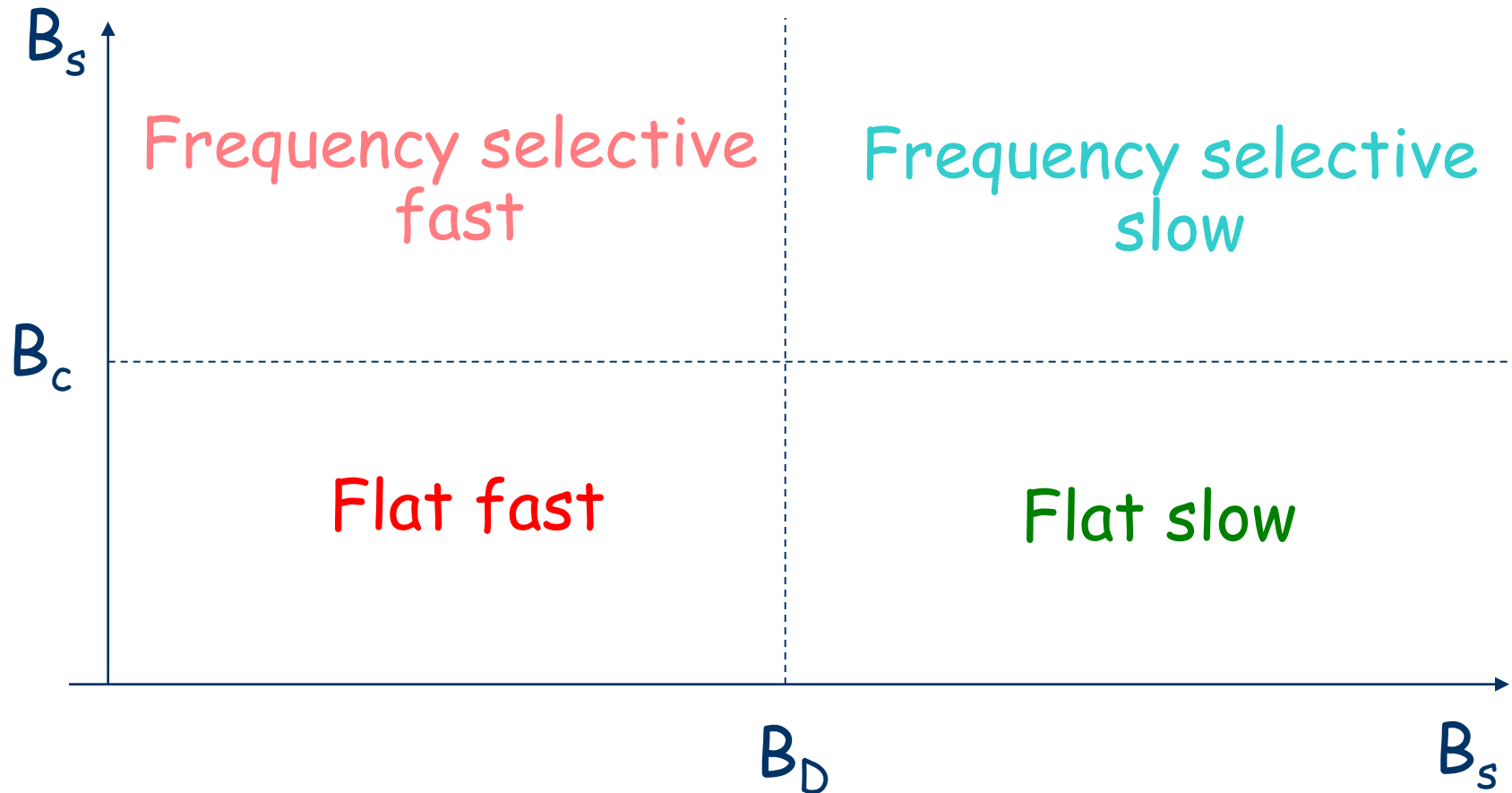
## Τύποι βραχύχρονων διαλείψεων



# Παράμετροι διαύλων με πολλαπλές διαδρομές



## Τύποι βραχύχρονων διαλείψεων



# Αρχή της αντιστροφής



- Η στάθμη του σήματος που λαμβάνεται στην κεραία του σταθμού βάσης, και προέρχεται από κάποιον κινητό πομπό, είναι η ίδια με εκείνη που λαμβάνεται στην κεραία του κινητού και προέρχεται από τον σταθμό βάσης.
- Ισχύει σε ασύρματο περιβάλλον κινητών επικοινωνιών για συγκεκριμένες καταστάσεις