

# Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής

---

## Εργαστήριο Επεξεργασίας Σημάτων και Τηλεπικοινωνιών



### Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών

*Μέρος Α: Τηλεπικοινωνιακά Θέματα*

*Διάυλος Κινητής Επικοινωνίας  
Ιδιαίτερα Χαρακτηριστικά*



# Παραμετρικό μοντέλο διαύλου πολυδιόδευσης

---



Το κινητό κανάλι περιγράφεται συχνά συναρτήσει των παραμέτρων των διαφόρων μονοπατιών, με τον ακόλουθο τρόπο:

Λαμβανόμενο σήμα:

$$r(t) = s(t) * h(\tau; t) + n(t)$$

Κρουστική απόκριση:

$$h(\tau; t) = \sum_{k=1:L} a_k(t) \delta(t - \tau_k)$$

Άρα:

$$r(t) = \sum_{k=1:L} a_k(t) s(t - \tau_k) + n(t)$$

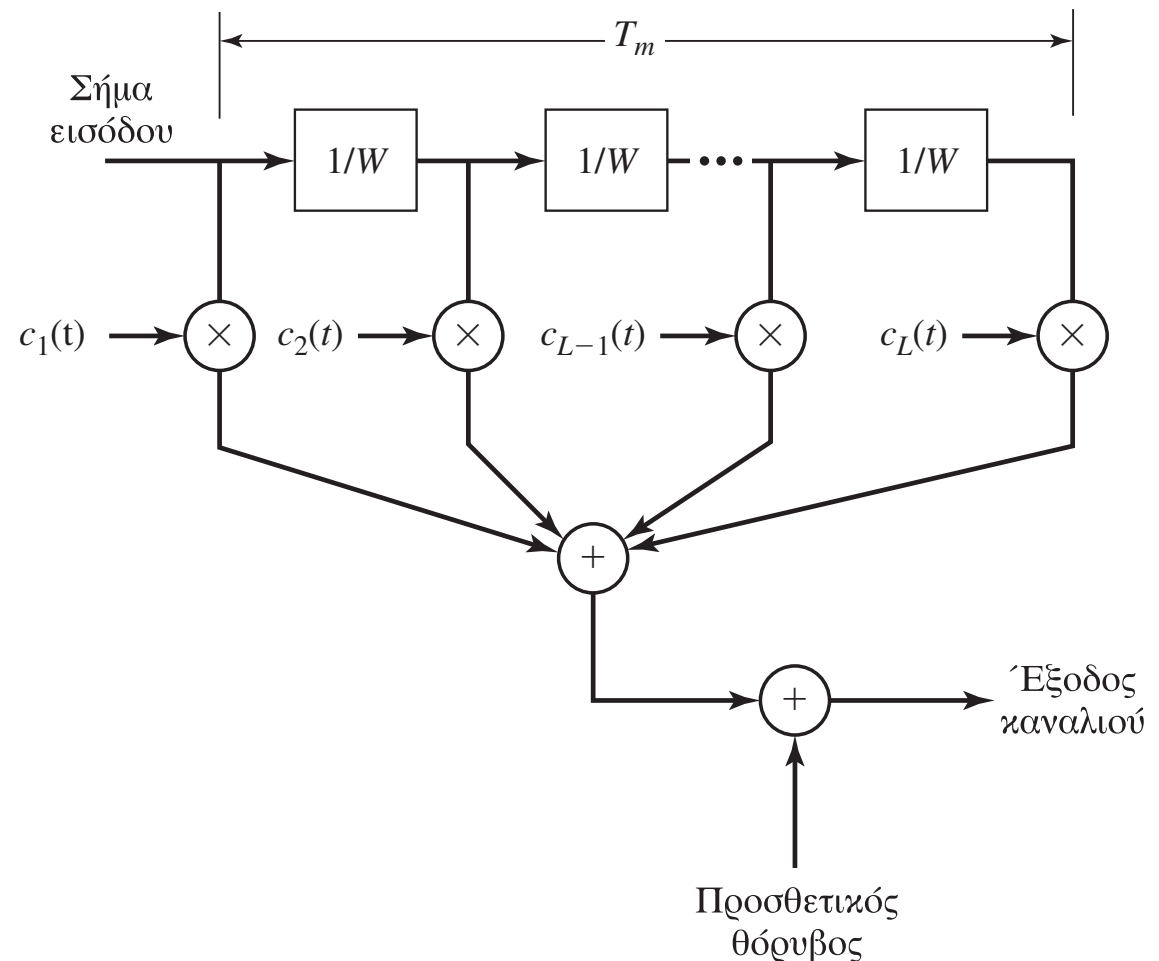


# Μοντέλο ΓΧΜ διαύλου πολυδιόδευσης



Επίσης μπορεί να περιγραφεί ως **γραμμικό χρονικά μεταβαλλόμενο** σύστημα τύπου FIR.

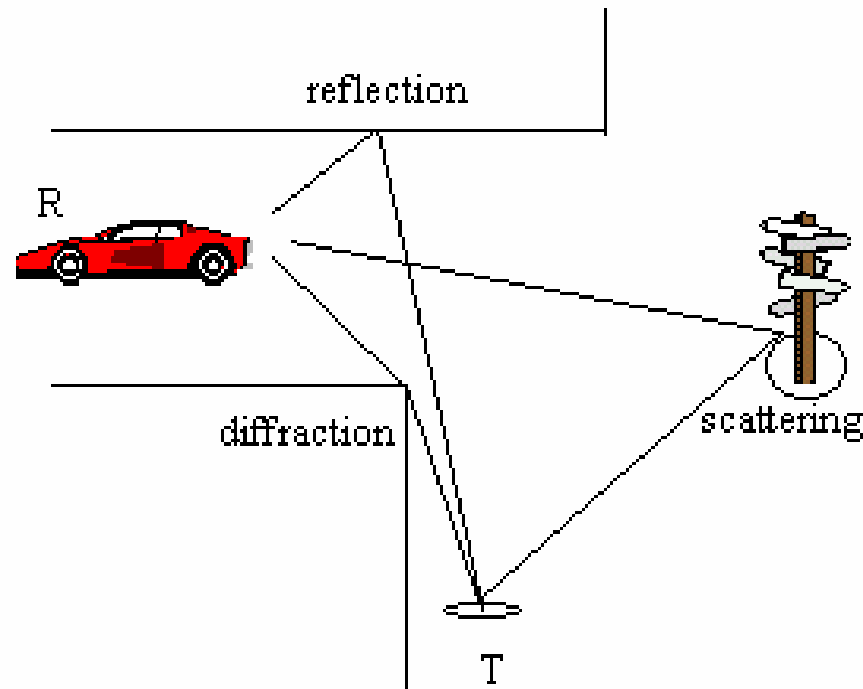
Οι συντελεστές του φίλτρου είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι



- **Παράδειγμα:** Κανάλι με εύρος ζώνης 10KHz και δύο σημαντικές διαδρομές με σχετική χρονική απόσταση ίση με 1ms (άρα έχουμε δύο διακριτούς παλμούς σε απόσταση 1ms)



# Μηχανισμοί διάδοσης



- ανάκλαση (reflection)
- περίθλαση (diffraction)
- σκέδαση (scattering)



# Μηχανισμοί διάδοσης



## Ανάκλαση:

- Πρόσπτωση του κύματος σε αντικείμενα **μεγάλα σε σχέση με το  $\lambda$**
- Μερική ανάκλαση σε επιφάνειες που διαχωρίζουν περιοχές με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά
- Σε τέλειο αγωγό όλη η ποσότητα της προσπίπτουσας ενέργειας ανακλάται
- Απόσβεση και αλλαγή φάσης
- Εδαφική ανάκλαση (γεωμετρικό μοντέλο δύο ακτίνων):  
Χρήσιμο σε εκτιμήσεις παραμέτρων μεγάλης κλίμακας



# Μηχανισμοί διάδοσης



## Περίθλαση:

- Πρόσπτωση του κύματος σε αντικείμενα με ακμές (της τάξης του  $\lambda$ ) που βρίσκονται ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη
- Σύμφωνα με την αρχή του *Huygen* όλα τα σημεία του σφαιρικού μετώπου του κύματος μπορούν να θεωρηθούν ως δευτερεύουσες σημειακές πηγές
- Κάμψη του κύματος και διάδοσή του ακόμη και στις περιοχές «σκιάς» του αντικειμένου.
- Στις υψηλές συχνότητες υπάρχει εξάρτηση του φαινομένου από: γεωμετρία του αντικειμένου, πλάτος και φάση του προσπίπτοντος κύματος, είδος πόλωσης.



# Μηχανισμοί διάδοσης



## Σκέδαση :

- Πρόσπτωση του κύματος σε αντικείμενα (ή επιφάνειες με προεξοχές) με διαστάσεις **μικρότερες από το  $\lambda$**
- Ο αριθμός των αντικειμένων ή/και προεξοχών ανά μονάδα όγκου πρέπει να είναι αρκούντως μεγάλος.
- Για να θεωρείται ανώμαλη η επιφάνεια πρέπει  $(\min(h)/\max(h)) > h_c$   
όπου  $h_c = \lambda / (8 \sin \theta_i)$  το κρίσιμο ύψος προεξοχής  
και  $\theta_i$  η γωνία πρόσπτωσης



# Εξασθένηση μεγάλης κλίμακας (1)

## (Large scale fading)



- Καθώς το κινητό απομακρύνεται από το B.S. (10m, 100m, 1000m) η τοπική μέση τιμή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος θα μειώνεται βαθμιαία αφού τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξασθενούν καθώς διαδίδονται στον χώρο
- Το φαινόμενο αυτό επηρεάζεται από το ανάγλυφο του εδάφους: λόφοι, βλάστηση, κτίρια κ.λπ. («**επισκίαση**»)

$P_t$  μεταδιδόμενη ισχύς

$P_r(d)$  τοπική μέση τιμή της λαμβανόμενης ισχύος σε απόσταση  $d$

$$PL(d) = \frac{P_t}{P_r(d)} \quad \text{path loss}$$

$$PL(d) = 10 \log \frac{P_t}{P_r(d)} [dB] \quad \text{path loss σε dB}$$

- αντιμετωπίζεται με αύξηση της μεταδιδόμενης ισχύος





## Εξασθένηση μεγάλης κλίμακας (2)



Απαιτείται η μοντελοποίηση των φαινομένων μεγάλης κλίμακας ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη της μέσης λαμβανόμενης ισχύος σε κάποιο σημείο της κυψέλης και ο προσδιορισμός βασικών ποσοτήτων όπως: ισχύς μετάδοσης, περιοχές κάλυψης, κατανάλωση ενέργειας από το κινητό τερματικό κλπ.

Friis free space equation

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$$

- $G_t$  : Κέρδος κεραίας πομπού
- $G_r$  : Κέρδος κεραίας δέκτη
- $\lambda$  : Μήκος κύματος
- $L$  : παράγοντας άλλων απωλειών (γραμμών μεταφοράς, κεραίας, φίλτρων κ.λπ.)

**Κέρδος κεραίας :** Είναι ο λόγος της ακτινοβολούμενης ενέργειας της κεραίας προς συγκεκριμένη κατεύθυνση προς την αντίστοιχη ενέργεια εκπομπής μιας ισότροπης κεραίας με ίδια ισχύ εισόδου



## Εξασθένιση μεγάλης κλίμακας (3)

Ideal propagation model

$$P_r(d) = P_r(d_0) \frac{d_0^2}{d^2} \quad d_0 : \text{reference distance}$$

Inverse  $n$ -th power propagation model

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL}(d_0) \frac{d^n}{d_0^n} \quad \text{PL: path loss}$$

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL}(d_0) + 10n \log \frac{d}{d_0} [dB] \quad \text{Log-distance PL model}$$

$$PL(d) = \overline{PL}(d) + X_\sigma [dB]$$

**Log-normal shadowing** με αργά μεταβαλλόμενα στατιστικά χαρακτηριστικά



## Εξασθένιση μεγάλης κλίμακας (4)



Μοντέλα διάδοσης σε εξωτερικό χώρο (outdoor) :

Διακρίνονται σε στατιστικά (ή εμπειρικά, όπως αυτό που περιγράφεται παρακάτω) και ντετερμινιστικά

- *Okumura*: Κατάλληλο για αστικές περιοχές (150MHz - ~2GHz, 1Km-100Km)

$$L_{50} = L_F + A_{mu}(f,d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA}$$

$L_{50}$  : median (50%) value of propagation loss  
(η μεσαία τιμή της δυναμικής περιοχής του L)

$L_F$  : free space propagation loss

$A_{mu}$  : median attenuation relative to free space

$G(h_{te})$  : BS antenna height gain factor

$G(h_{re})$  : MS antenna height gain factor

$G_{AREA}$  : Gain due to the type of environment



## Εξασθένιση μεγάλης κλίμακας (5)



*Hata model for urban areas: PCS (EURO-COST)*

$$P(d)[dB] = 46.36 + 33.9 \cdot \log(f_c) - 13.82 \cdot \log(h_t) - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \cdot \log(h_t)) \cdot \log(d) + C_M$$

$P(d)$  = Path loss in Urban Areas

$h_t$  = Height of base station Antenna. Unit: meter (m)

$h_r$  = Height of mobile station Antenna. Unit: meter (m)

$f_c$  = Frequency of Transmission. Unit: MHz

$C_M$  = Antenna height correction factor

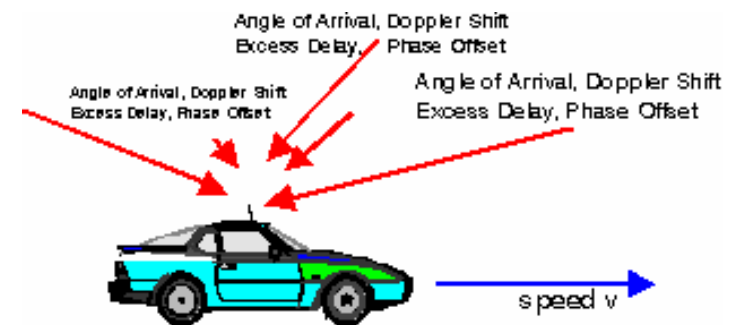
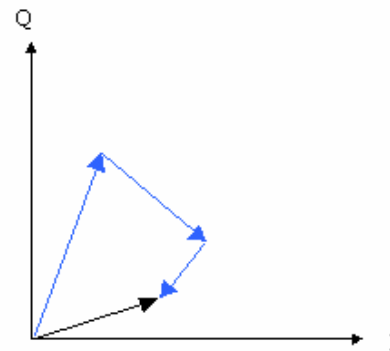
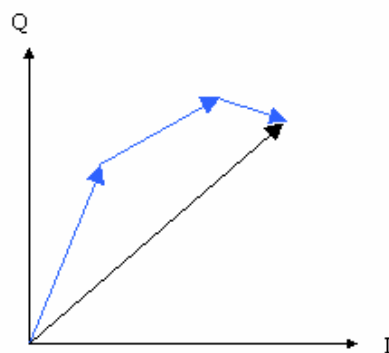
- Μοντέλα διάδοσης σε εσωτερικό χώρο (indoor)
- Γενικά η εξασθένιση μεγάλης κλίμακας χρησιμεύει στο να υπολογίσουμε:
  - Την πραγματική περιοχή κάλυψης
  - Την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής/λήψης σε σταθμό βάσης και κινητό
  - Τις απαιτήσεις σε κατανάλωση ισχύος
  - Το βαθμό παρεμβολής μεταξύ γειτονικών κελιών



# Εξασθένηση μικρής κλίμακας (Small scale fading)



- Ακόμα και αν το κινητό μετακινείται ελάχιστα (10cm, 20cm, 30cm) η **στιγμιαία τιμή της ισχύος** του λαμβανόμενου σήματος θα αυξομειώνεται δραματικά (**30-40dB**)
- Αυτό οφείλεται στο ότι το λαμβανόμενο πεδίο είναι το άθροισμα πολλών συνιστωσών (ηχών) που προέρχονται από διαφορετικές κατευθύνσεις με τυχαίες φάσεις



> αντιμετωπίζεται με επεξεργασία σήματος και όχι με αύξηση ισχύος

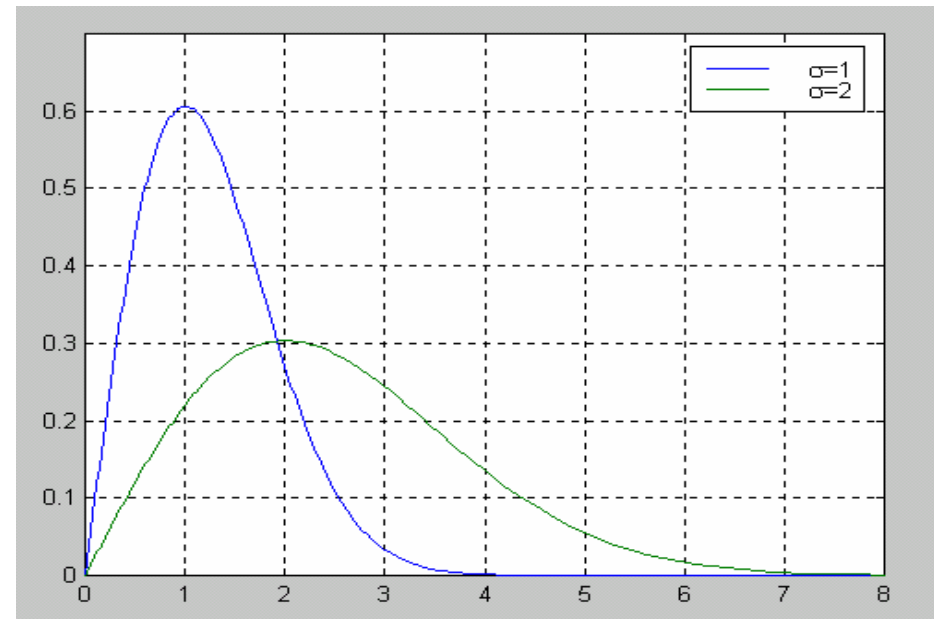


# Κατανομές (για την περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος)



## Κατανομή Rayleigh (NLOS)

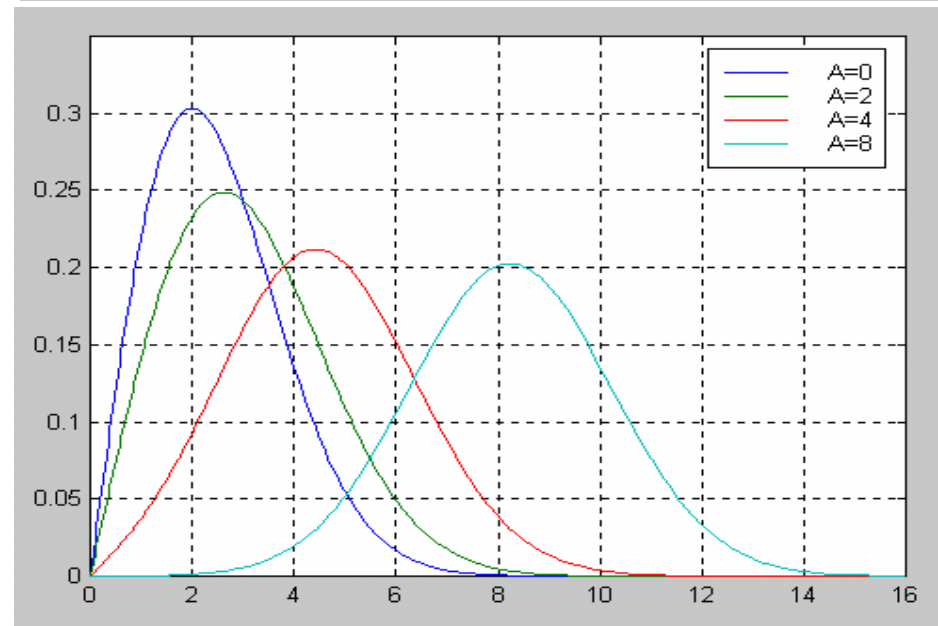
$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$$



## Κατανομή Rice (LOS)

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right)$$

- A: μέγιστο πλάτος κύριας συνιστώσας
- $I_0(\cdot)$  : Bessel function of the first kind and zero-order





# Κατανομές

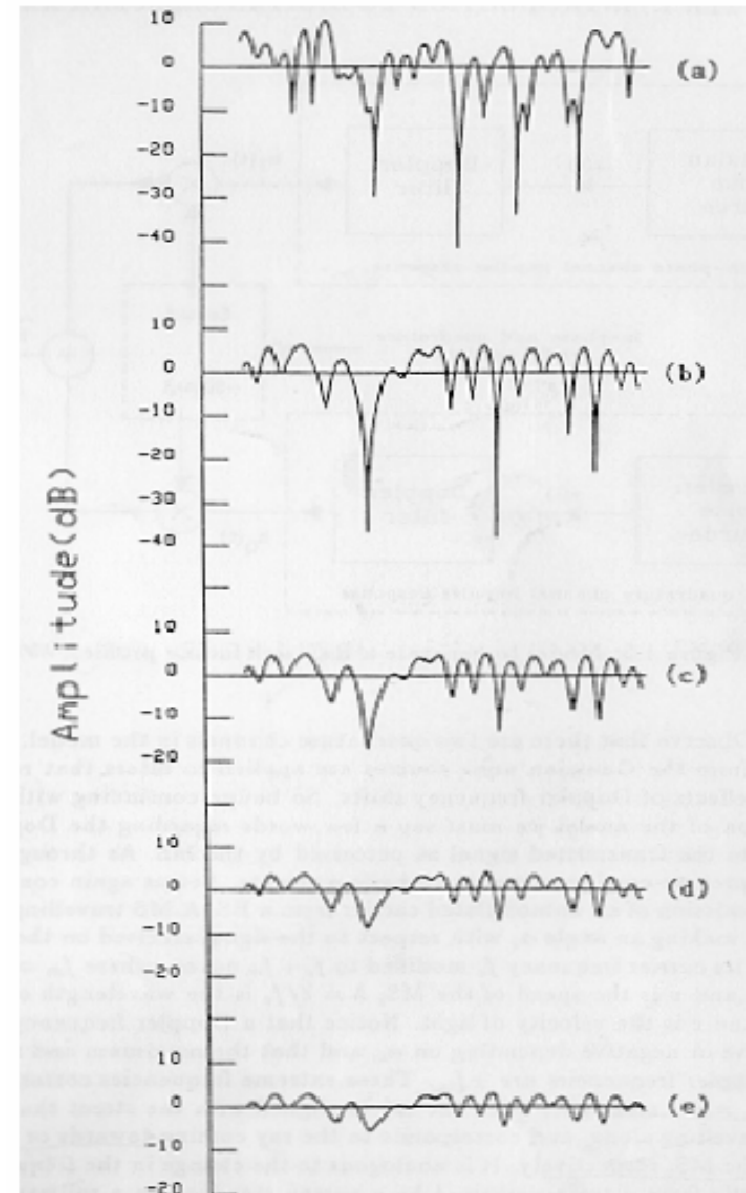


Ο παράγοντας  $K$

$$K = \frac{\text{power in the dominant path}}{\text{power in the scattered paths}}$$

$$K = 10 \log_{10} \frac{A^2}{2\sigma^2}$$

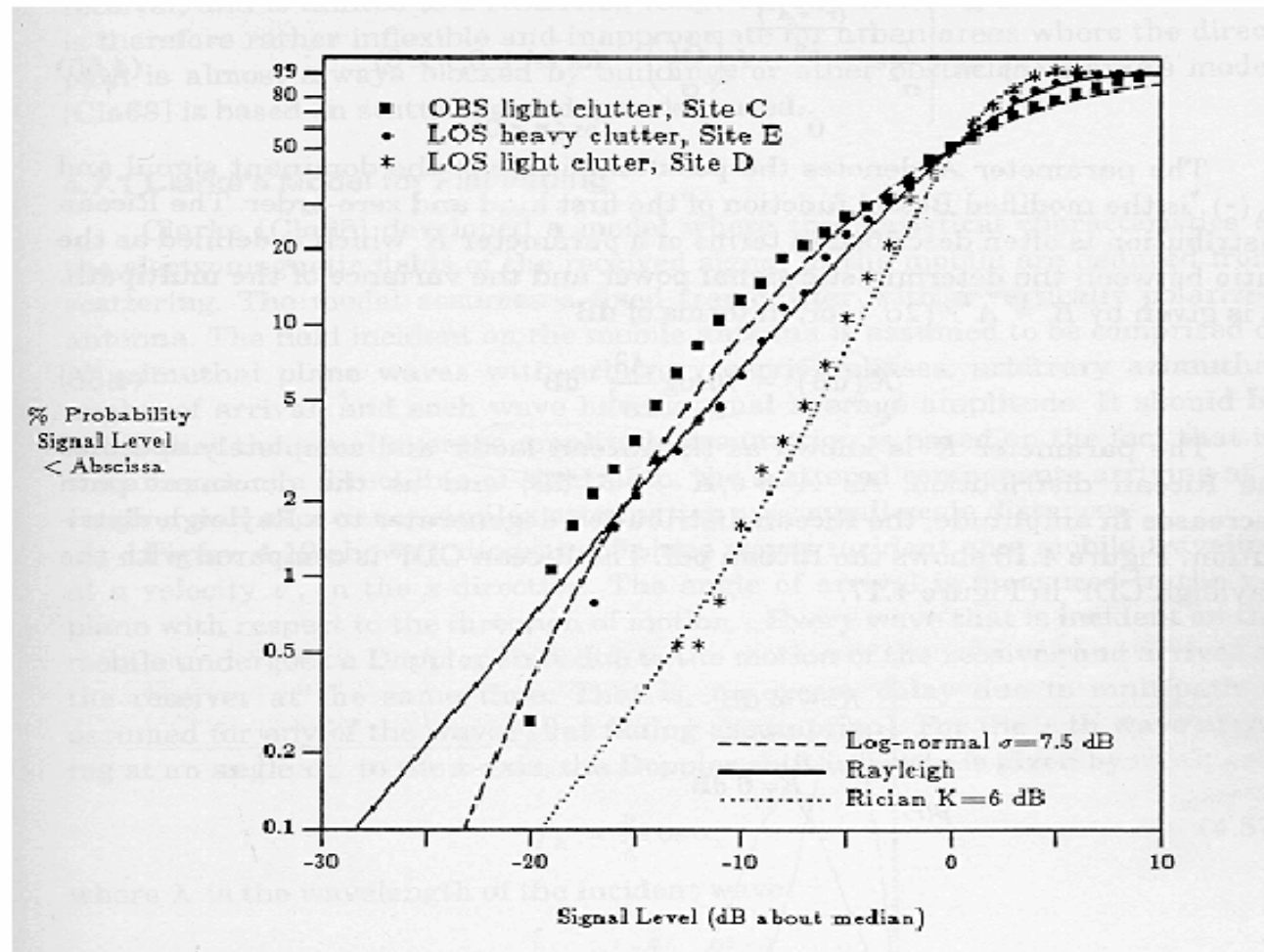
Προφίλ Ricean εξασθένησης για  
σταθμό κινούμενο με 50 km/h,  
 $K=0, 4, 8, 16, 32$  dB







# Αθροιστικές Κατανομές



Κατανομές από μετρήσεις και το ταίριασμά τους με θεωρητικές κατανομές  
(cumulative distribution for three small-scale fading measurements)





# Φαινόμενο Doppler

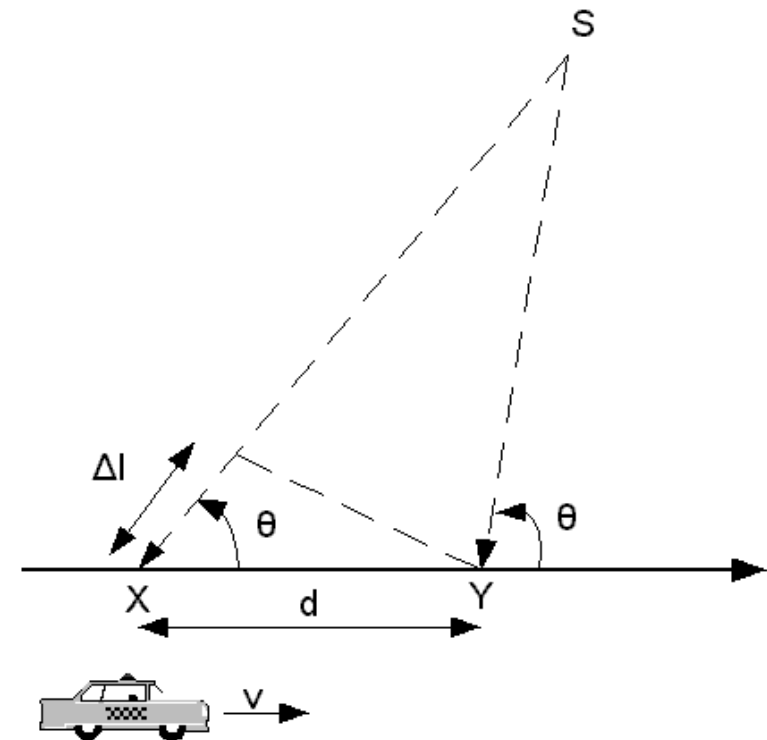


- Εμφανίζεται όταν υπάρχει σχετική κίνηση ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη.
- Αποτέλεσμα: μετατοπίζεται η ονομαστική τιμή της φέρουσας συχνότητας κατά ένα παράγοντα,  $f_c + f_d$ :

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cdot \cos(\theta) = f_m \cos(\theta)$$

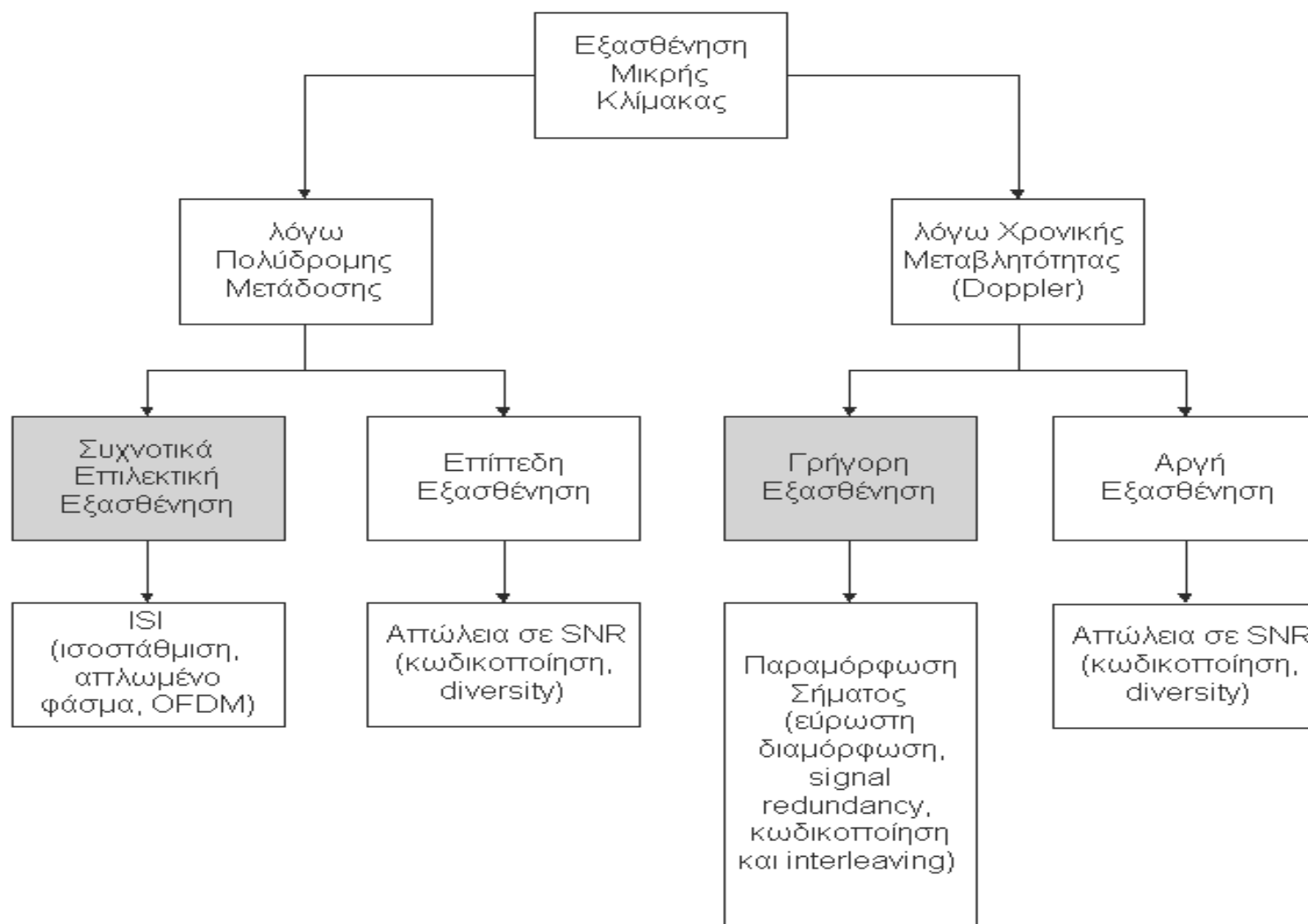
$f_m$  είναι η **μέγιστη μετατόπιση Doppler**

Το φαινόμενο σχετίζεται με τη χρονική μεταβλητότητα του καναλιού  
Πέρα από πομπό και δέκτη, μπορεί να υπάρχουν κινούμενοι ανακλαστές με διαφορετικές ταχύτητες





# Τύποι εξασθένησης μικρής κλίμακας





# Η κρουστική απόκριση του καναλιού

- ας θεωρήσουμε τη μετάδοση ενός φέροντος σήματος στα  $f_c$  Hz

$$\begin{aligned}\tilde{s}(t) &= a_o(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_o(t)) \\ &= \text{Re}\{a_o(t)e^{j(2\pi f_c t + \phi_o(t))}\} \\ &= \text{Re}\{s(t)e^{j2\pi f_c t}\}\end{aligned}$$

όπου  $s(t) = a_o(t)e^{j\phi_o(t)}$  το ισοδύναμο (μιγαδικό) κατωπερατό σήμα

- πολύδρομη διάδοση
- οριζόντια κίνηση με ταχύτητα  $v$ 
  - το  $n$ -οστό κύμα που λαμβάνεται υπό γωνία  $\theta_n(t)$  έχει μετατοπισμένη την ονομαστική συχνότητα εκπομπής (**μετατόπιση Doppler**) κατά

$$f_n(t) = f_m \cos \theta_n(t) \quad \text{όπου} \quad f_m = v/\lambda_c \quad \text{Σημείωση: σε κάποια σημεία η } f_m \text{ συμβολίζεται και ως } f_D$$

- επιπλέον, το  $n$ -οστό κύμα υπόκειται σε:

- **εξασθένηση**  $a_n(t)$
- **καθυστέρηση**  $\tau_n(t)$
- **αλλαγή φάσης** από ανακλάσεις  $\varphi_n(t)$



# Η κρουστική απόκριση του καναλιού

## ■ λαμβανόμενο σήμα

$$\begin{aligned}\tilde{r}(t) &= \sum_n a_n(t) a_o(t - \tau_n(t)) \cos(2\pi(f_c + f_n(t))(t - \tau_n(t)) + \phi_o(t - \tau_n(t)) + \varphi_n(t)) \\ &= \operatorname{Re}\left\{ \sum_n a_n(t) a_o(t - \tau_n(t)) e^{j(2\pi(f_c + f_n(t))(t - \tau_n(t)) + \phi_o(t - \tau_n(t)) + \varphi_n(t))} \right\} \\ &= \operatorname{Re}\left\{ \sum_n a_n(t) s(t - \tau_n(t)) e^{j(-2\pi(f_c + f_n(t))\tau_n(t) + \varphi_n(t))} e^{j2\pi f_n(t)t} e^{j2\pi f_c t} \right\} \\ &= \operatorname{Re}\{r(t) e^{j2\pi f_c t}\}\end{aligned}$$

όπου  $r(t) = \sum_n a_n(t) s(t - \tau_n(t)) e^{-j\{2\pi[(f_c + f_n(t))\tau_n(t) - f_n(t)t] - \varphi_n(t)\}}$  το ισοδύναμο (μιγαδικό) κατωπερατο σήμα

## ■ ο όρος της φάσης αναπαρίσταται απλώς από μία μεταβλητή

$$\theta_n(t) = 2\pi[(f_c + f_n(t))\tau_n(t) - f_n(t)t] - \varphi_n(t)$$

## ■ άρα η κρουστική απόκριση του μοντέλου βασικής ζώνης θα είναι

$$h(\tau, t) = \sum_n a_n(t) e^{-j\theta_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t))$$

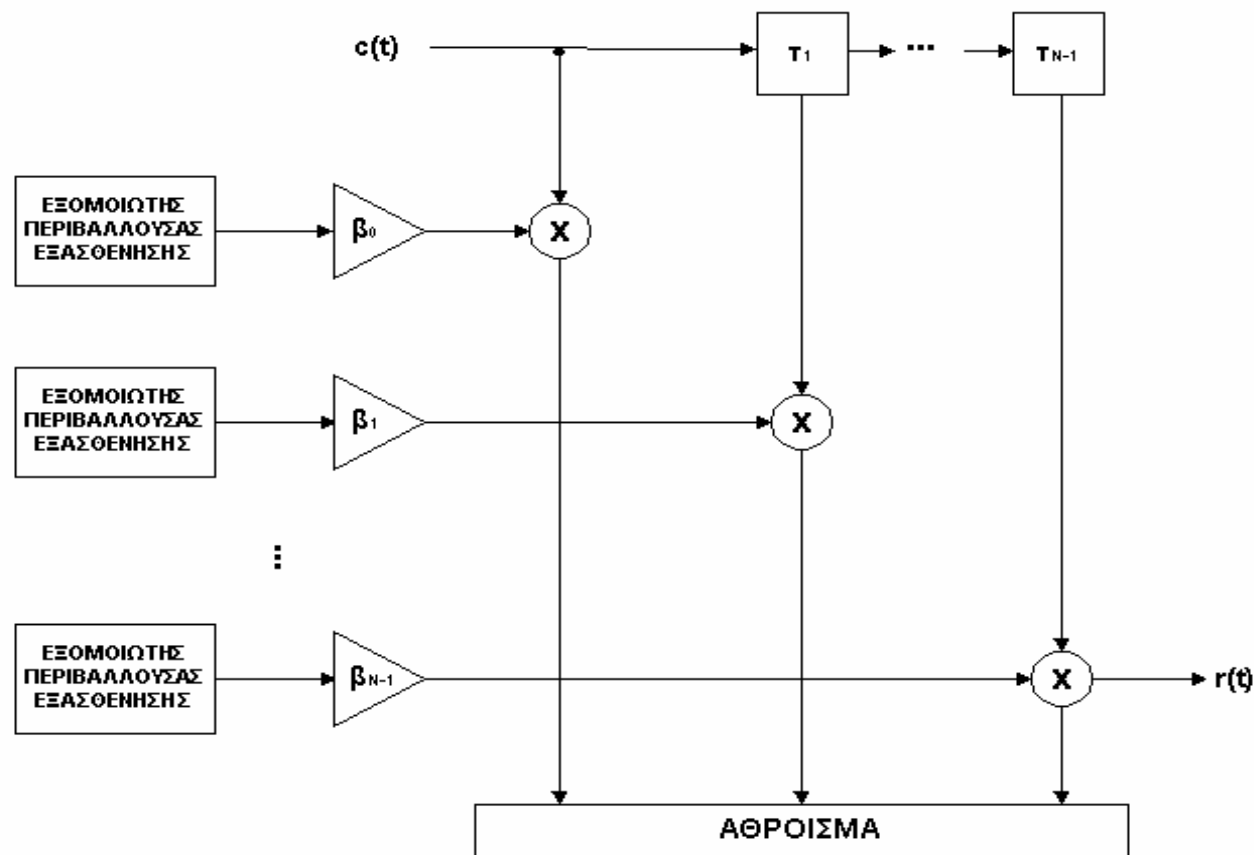
## ■ γενικά τα (μιγαδικά) πλάτη μεταβάλλονται **γρηγορότερα** από τις χρονικές καθυστερήσεις



# Η κρουστική απόκριση του καναλιού

$$h(\tau, t) = \sum_n a_n(t) e^{-j\theta_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t))$$

$$r(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \beta_n h_n(t) s(t - \tau_n(t))$$





## Προσομοίωση κατά Jakes

- $N_s$  διασκορπιστές ομοιόμορφα τοποθετημένοι αζιμουθιακά γύρω από το κινητό (σε αυθαίρετη απόσταση)
- Όλα τα διασκορπισμένα σήματα έχουν το ίδιο μέτρο αλλά τυχαίες φάσεις  $\phi_i$

$$\begin{aligned}h_n(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_s}} \sum_{i=0}^{N_s-1} e^{j(\phi_i + 2\pi f_D t \cos \alpha_i)} \\&= \frac{1}{\sqrt{N_s}} \sum_{i=0}^{N_s-1} e^{j(\phi_i + \omega_i t)}\end{aligned}$$

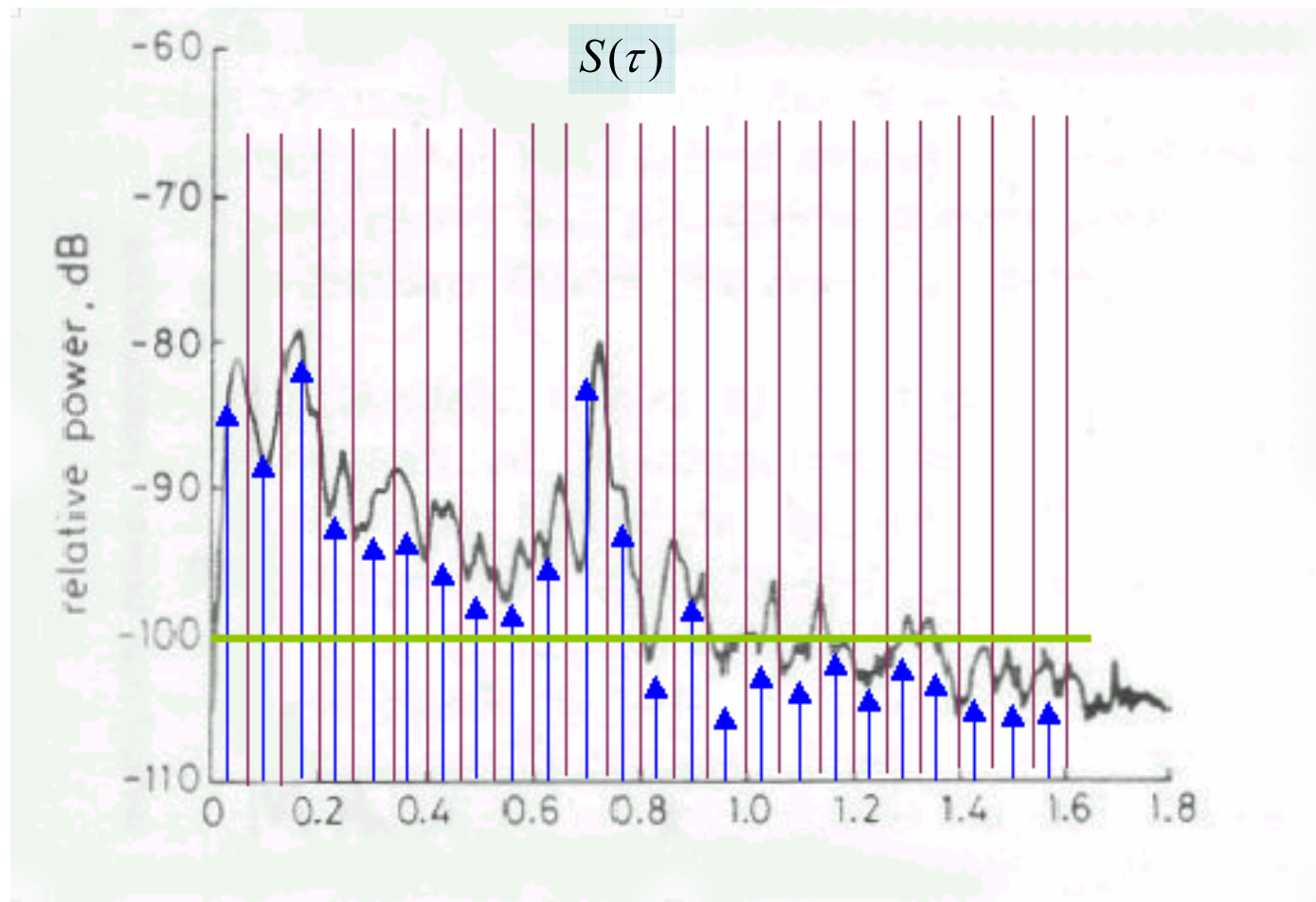
- Αν το πλήθος των μονοπατιών είναι περιττός αριθμός και καμία γωνία άφιξης δεν ισούται με  $\pm\pi/2$  διασφαλίζεται η στασιμότητα

- Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης  $\frac{1}{N_s} \sum_{i=0}^{N_s-1} e^{j2\pi f_m \tau \cos \alpha_i}$  μοιάζει με τη συνάρτηση Bessel και η προσέγγιση πρακτικά είναι αρκετά καλή



## Προφίλ κατανομής ισχύος

- Για έναν εκπεμπόμενο κρουστικό παλμό, πώς μεταβάλλεται η μέση λαμβανόμενη ισχύς ως συνάρτηση της χρονικής καθυστέρησης





## Βασικές παράμετροι της πολυδιόδευσης

- Μέγιστη επιπλέον καθυστέρηση  $T_m$
- **Εύρος καθυστερήσεων RMS** : η τυπική απόκλιση από τη μέση επιπλέον καθυστέρηση (όπου η κάθε  $\tau_n$  είναι “ζυγισμένη” με την αντίστοιχη ισχύ)

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \quad \overline{\tau^p} = \frac{\sum_n S(\tau_n) \tau_n^p}{\sum_n S(\tau_n)}$$

- Συνθήκη για αμελητέο ISI  $T \gg \sigma_\tau$  όπου  $T$  η περίοδος συμβόλου
- **Rule of thumb**: αν  $T > 10 \sigma_\tau$ , τότε δεν χρειάζεται ισοστάθμιση για BER τουλάχιστον  $10^{-3}$
- Τυπικές τιμές:
  - μακροκυψέλη: 0.1-10  $\mu\text{s}$  ( $< 25 \mu\text{s}$ )
  - μικροκυψέλη: 10-100 ns ( $< 3 \mu\text{s}$ )
  - indoor, μεγάλο κτίριο με πολλά μεταλλικά τμήματα και ανοίγματα: ( $< 400 \text{ ns}$ )
  - indoor, μικρό κτίριο: 30-60 ns ( $< 250 \text{ ns}$ )





# Βασικές παράμετροι της πολυδιόδευσης



- Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης στον χώρο των συχνοτήτων: συσχέτιση μεταξύ δύο συχνοτικών συνιστωσών απόστασης  $\Delta f$

$$S(\tau) \leftrightarrow R(\Delta f)$$

σχέση του προφίλ κατανομής ισχύος με την  $R(\Delta f)$

- **Εύρος Ζώνης Συνοχής:** μέτρο του εύρους συχνοτήτων κατά το οποίο το κανάλι περνά όλες τις φασματικές συνιστώσες με περίπου ίσο κέρδος και γραμμική φάση

$$B_c \approx \frac{1}{50\sigma_\tau}$$

σταθερό μέτρο στο  
90% (αριστερά) και στο  
50% (δεξιά) του εύρους

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau}$$

εύρος ζώνης συνοχής:  $B_c$

εύρος ζώνης σήματος:  $B$

- Έχουμε Frequency-nonselective (flat) fading  
όταν ισχύει  $B \ll B_c$

- Αλλιώς έχουμε Frequency-selective fading  $\Rightarrow$  ISI



# Η χρονικά μεταβαλλόμενη φύση του διαύλου πολυδιόδευσης



- συνάρτηση αυτοσυσχέτισης στο πεδίο του χρόνου: συσχέτιση της απόκρισης του καναλιού σε δύο ίδια ημίτονα με χρονική διαφορά  $\Delta t$

$$R(\Delta t) = J_0(2\pi f_m \Delta t) \quad J_0(2\pi f_m \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j2\pi f_m \tau \cos(\alpha)} d\alpha$$

- **Χρόνος Συνοχής**: μέτρο του αναμενόμενου χρόνου κατά τον οποίο η απόκριση του καναλιού είναι ουσιαστικά αμετάβλητη

$$T_c \approx \frac{0.423}{f_m}$$

όπου  $f_m$  η μέγιστη μετατόπιση Doppler

- Doppler power spectrum:

Το φάσμα ισχύος του λαμβανόμενου σήματος όταν μεταδίδεται ένα «καθαρό» ημίτονο με συχνότητα  $f_c$

$$R(\Delta t) \leftrightarrow S(\nu) \quad S(\nu) = \frac{1}{\pi f_m \sqrt{1 - \left(\frac{\nu - f_c}{f_m}\right)^2}}$$

- Doppler spread  $B_d$ : το εύρος του Doppler power spectrum

$$B_d \approx \frac{1}{T_c}$$

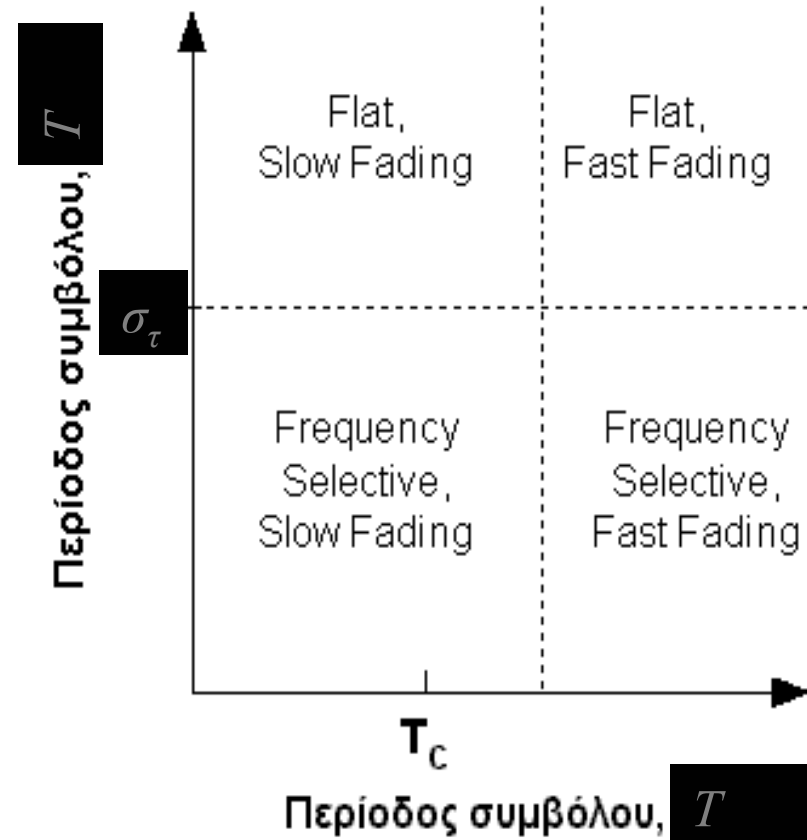
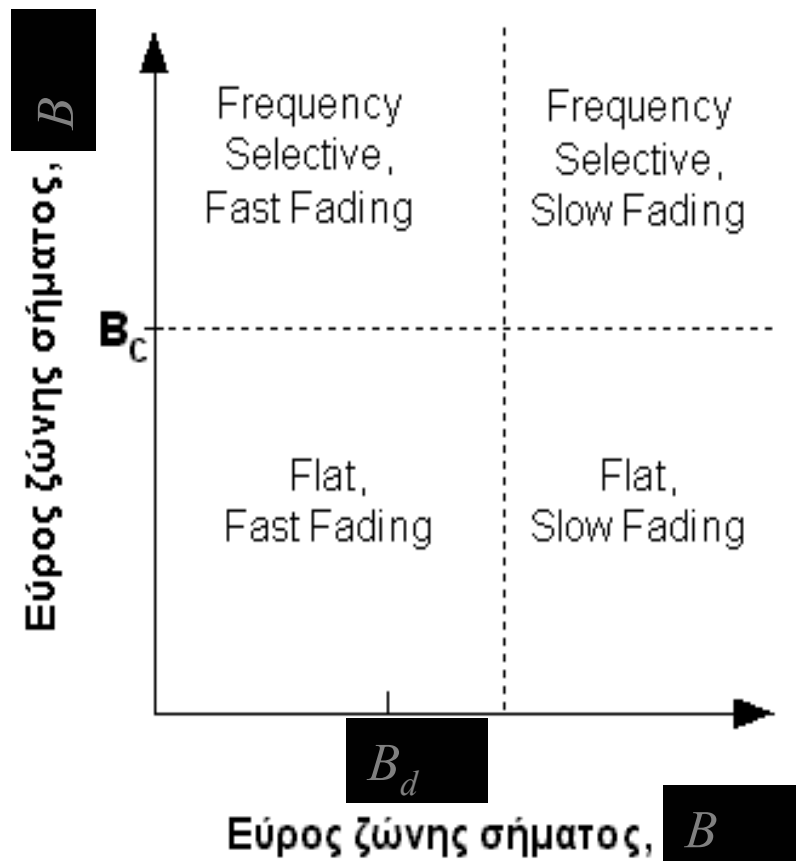
Το σύμβολο  $\Leftrightarrow$  υποδηλώνει ισοδυναμία

- slow fading :  $T \ll T_c \Leftrightarrow B \gg B_d$

- fast fading :  $T > T_c \Leftrightarrow B < B_d$



# Είδος εξασθένησης σε σχέση με T and B





# Ανασκόπηση χαρακτηριστικών

## Παράδειγμα:

flat fading + slow fading condition :

$$\sigma_{\tau} \ll T \ll T_c$$

$$B_c \gg B \gg B_d$$

$$v=100 \text{ km/h}, \quad f_c=1800 \text{ MHz} \Rightarrow \lambda=17 \text{ cm}$$

$$B_d=163 \text{ Hz (GSM: } B=200 \text{ KHz)}, \quad B_d = (27.7 \text{ m/sec}) / (0.17 \text{ m})$$

$$\sigma_{\tau}=1.5 \text{ } \mu\text{s} \Rightarrow B_c=1/(5*1.5 \mu\text{s})=133 \text{ KHz}$$

$$\Rightarrow B \gg B_d \text{ (slow fading) and } B_c \approx B \text{ (tends to be frequency selective)}$$

- Rule of thumb for insignificant ISI

$$T > 10 \sigma_{\tau}$$

## Παράδειγμα:

$$2 \text{ Mbits/s} \Rightarrow T_{bit}=500 \text{ ns}$$

$$1 \text{ symbol}=4 \text{ bits} \Rightarrow T=2000 \text{ ns} \Rightarrow \text{πρέπει } \sigma_{\tau} < 200 \text{ ns}$$