



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Κινητές και Δορυφορικές Επικοινωνίες

Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας

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

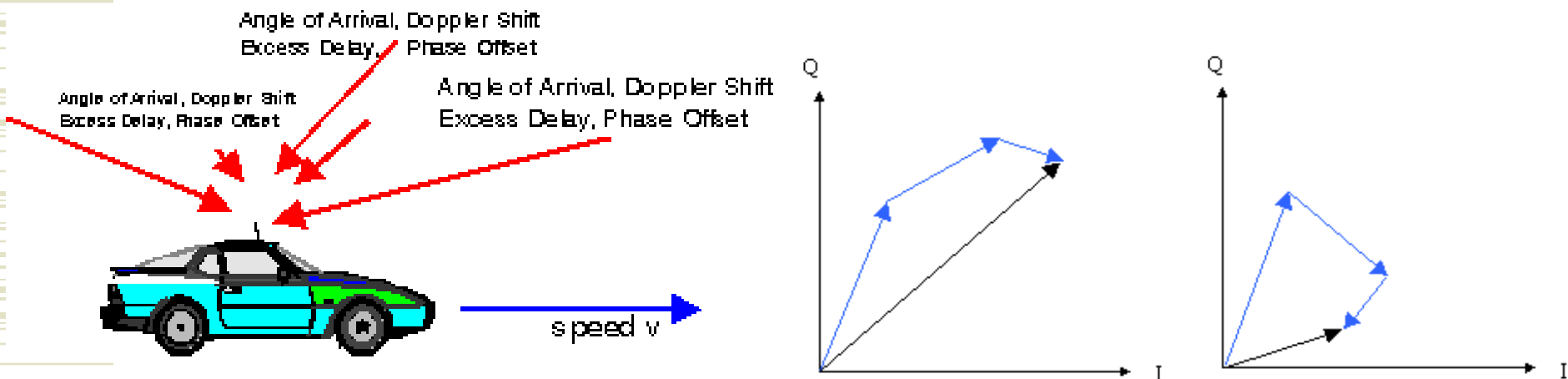


Δομή της Διάλεξης

- ◆ Συνάρτηση Μεταφοράς & Κρουστική Απόκριση
- ◆ Χωρικά Μεταβαλλόμενη Κρουστική Απόκριση
- ◆ Παράμετροι Χαρακτηρισμού Ραδιο-Διαύλου
- ◆ Τυχαία Χρονικά Μεταβαλλόμενος Δίαυλος & Συναρτήσεις Συσχέτισης
- ◆ Δίαυλος WSSUS
- ◆ Παράμετροι Χαρακτηρισμού Ραδιο-Διαύλου
- ◆ Κατανομή Rayleigh
- ◆ Κατανομή Ricean
- ◆ Level Crossing Rate & Average Fade Duration

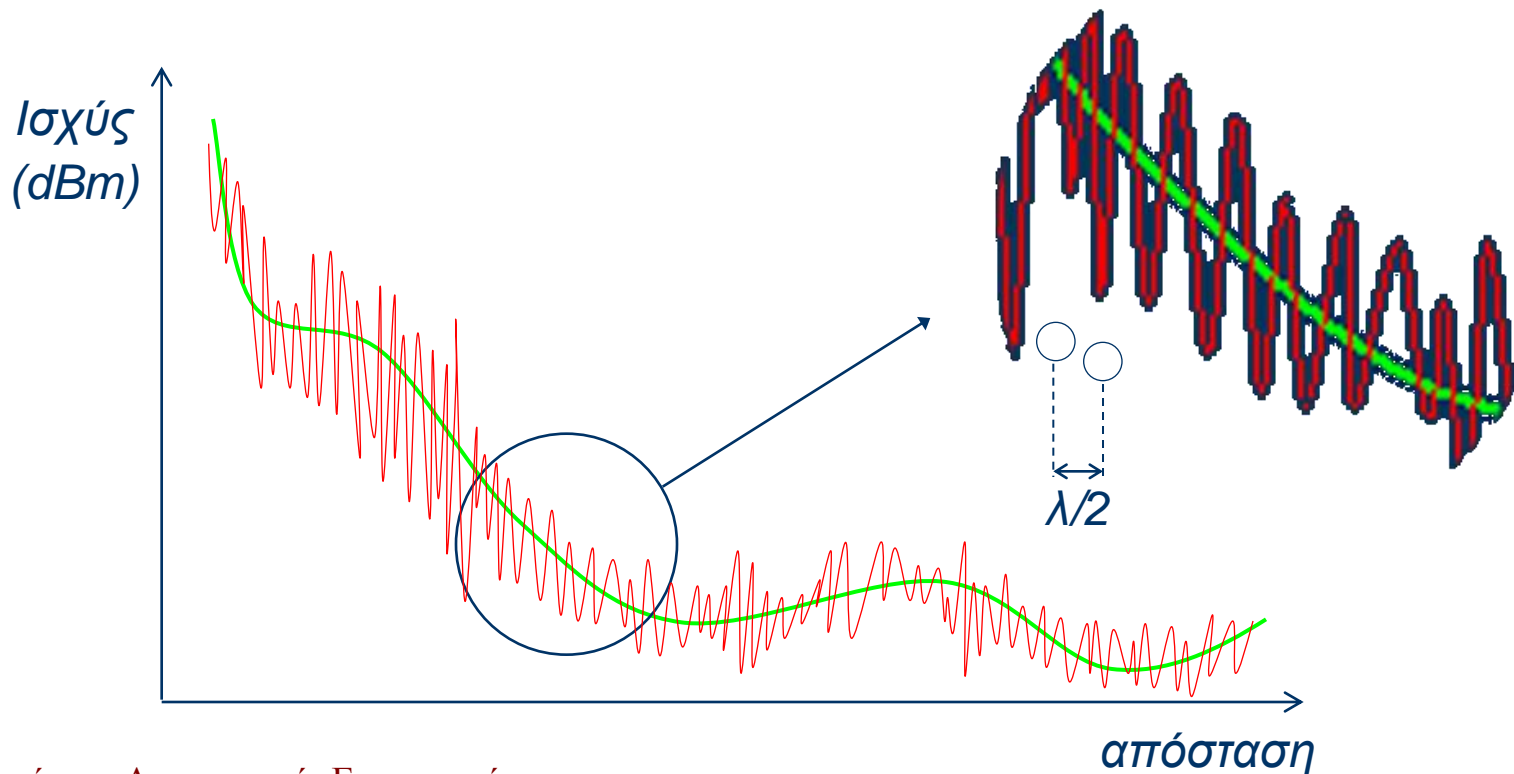
Διαλείψεις μικρής κλίμακας (*small-scale fading*)

- ♦ 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) ερχόμενων από διαφορετικές κατευθύνσεις με τυχαίες φάσεις.

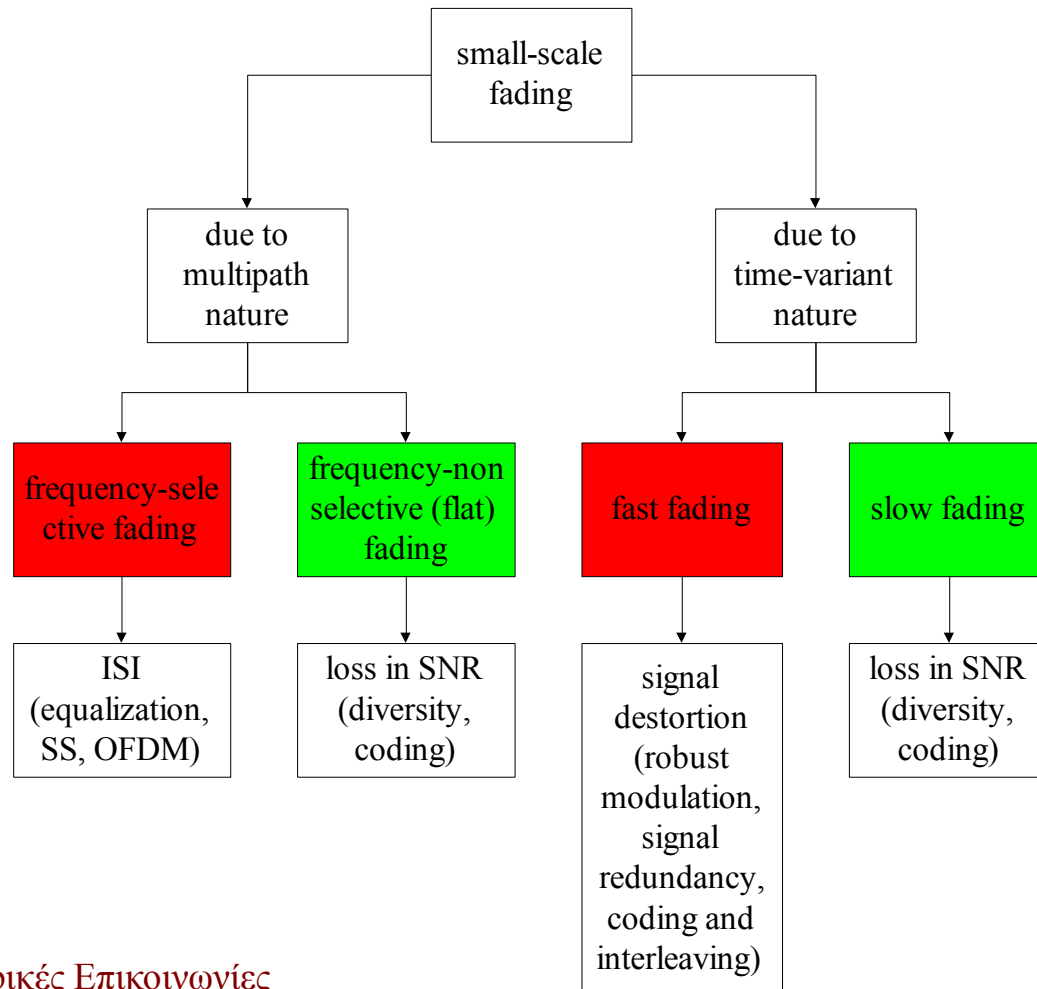


Διαλείψεις μικρής κλίμακας (*small-scale fading*)

Η απόσταση μεταξύ διαλείψεων (*fading incidents*) μικρής κλίμακας στο χώρο είναι της τάξης του $\lambda/2$.



Διαλείψεις μικρής κλίμακας (*small-scale fading*)



Πολυδιαδρομική διάδοση (*Multipath*)

- ◆ Το μήκος κύματος του φέροντος σε ένα κυψελοειδές σύστημα είναι 15 - 40 cm. Μικρές αλλαγές στις διαφορές των διαδρομών λόγω της **κίνησης** του χρήστη προκαλούν **μεγάλες** αλλαγές στην διαφορά φάσης επίπεδων κυμάτων που προσπίπτουν στην κεραία, με αποτέλεσμα:
 - Την συμβολή επίπεδων *κυμάτων με μεταβαλλόμενη φάση* που συνεπάγεται μεγάλες διακυμάνσεις του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος .
 - Την *μεταβαλλόμενη μετατόπιση συχνότητας* λόγω Doppler (*Doppler shift*) των συνιστωσών multipath που δημιουργεί τυχαίες διακυμάνσεις της συχνότητας.
 - Την *μεταβαλλόμενη καθυστέρηση διάδοσης* που προκαλεί χρονική διασπορά του σήματος - Time dispersion (*echoes*).

Μοντέλο καναλιού

- ♦ Το κανάλι μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα ζωνοπερατό φίλτρο με χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται με τυχαίο τρόπο.
- ♦ Η κρουστική απόκριση $h(t, \tau)$ είναι συνάρτηση της θέσης (απόστασης) ($d = v \cdot t$)

$$h(t, \tau) = h\left[t, (d/v)\right] = h(t, d)$$

Όπου

t η στιγμή παρατήρησης

$\tau - t$ η στιγμή εκπομπής παλμού

τ ο χρόνος διαδρομής παλμού (καθυστέρηση)

- ♦ Το λαμβανόμενο σήμα (BS/MS) είναι:

$$c(t, \tau) = h(t, \tau) * x(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} x(\lambda) h(t, \tau - \lambda) d\lambda$$

Όπου για αιτιατό (causal) σύστημα είναι: $h(t, \tau) = 0$ για $t < 0$

Ραδιοβόληση Καναλιού: *Sounding*

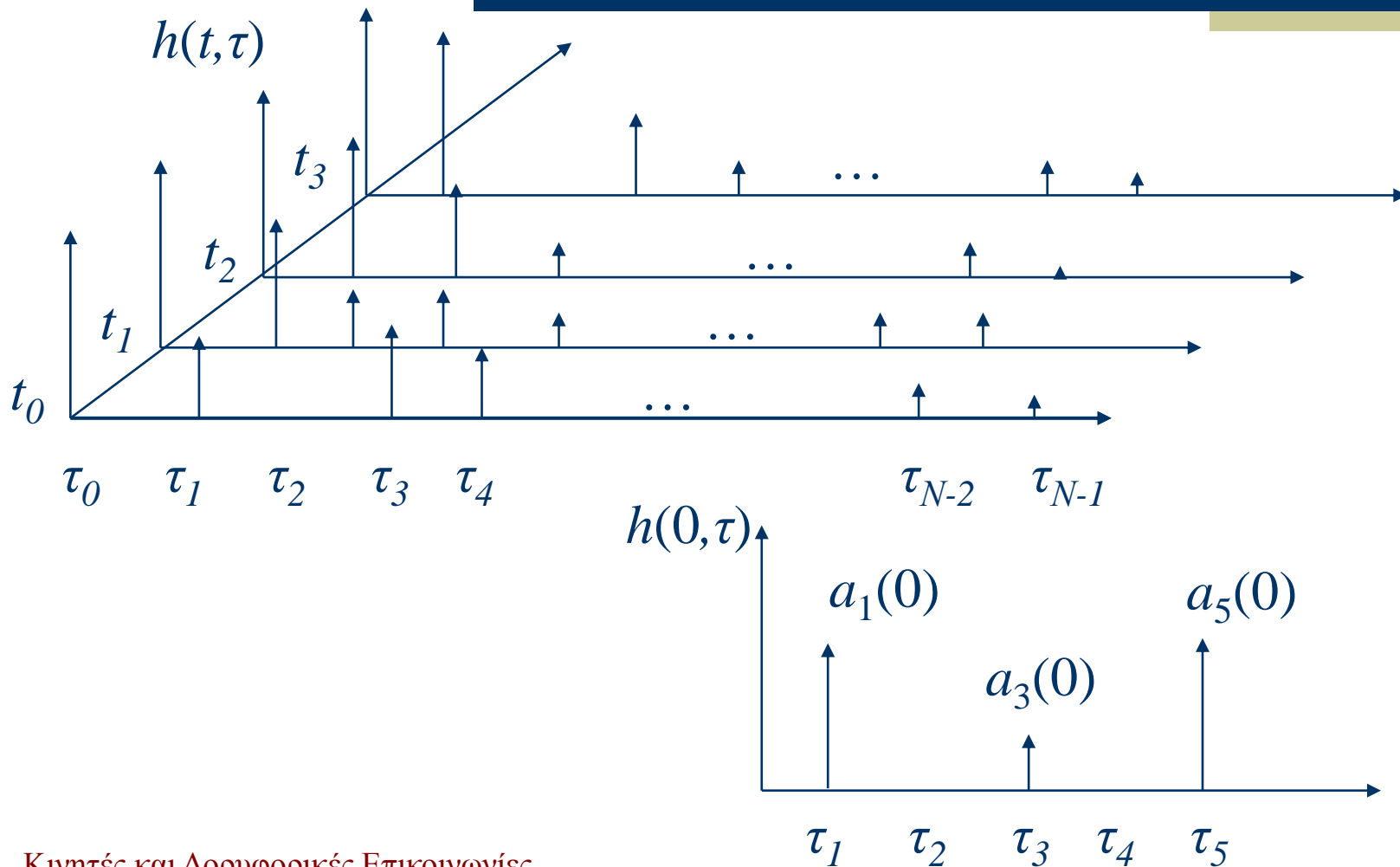
- ◆ Σήμα συνεχούς κύματος (*Continuous wave: CW*) συχνότητας f_o
 - Μέτρηση της απόκρισης συχνότητας στην f_o
- ◆ Εκπομπή ακολουθίας παλμών
 - Κρουστική απόκριση – ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Κρουστική απόκριση του καναλιού multipath (Channel Impulse Response – CIR)

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i e^{j\psi_i} \delta(t - \tau_i(t))$$

- δηλαδή, η κρουστική απόκριση σε απόσταση $\mathbf{d} = \mathbf{v} \cdot t$ και στο χρόνο t αποτελείται από την συνισταμένη των i αποκρίσεων που φθάνουν την χρονική στιγμή t με καθυστέρηση τ στο σημείο \mathbf{d} , με πλάτος a_i και με μετατόπιση φάσης ψ_i

Απόκριση καναλιού

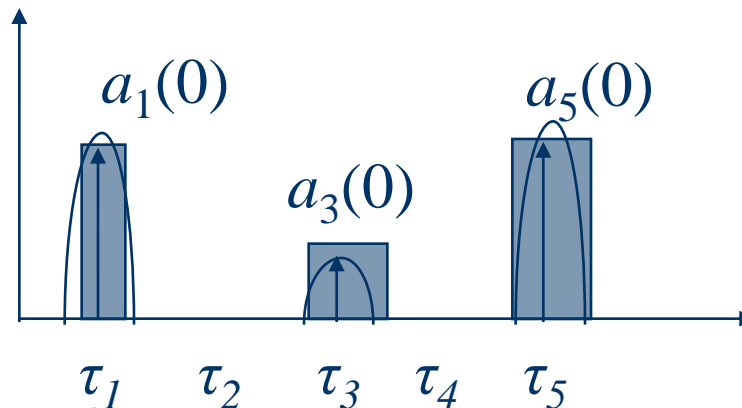


Απόκριση καναλιού

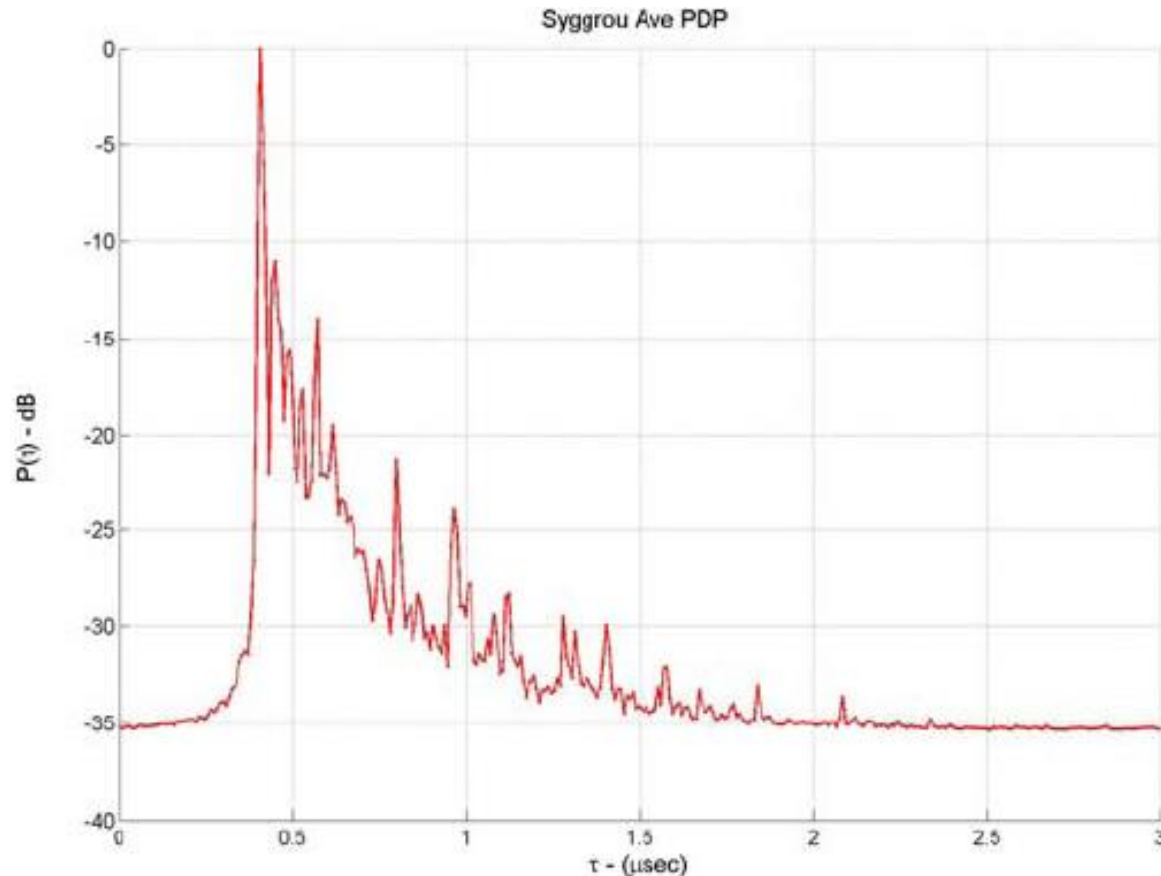
- ◆ Η συνολική λαμβανόμενη ισχύς όταν εκπέμπεται ένας παλμός και λαμβάνονται αποκρίσεις από multipath είναι:

$$|r(t_0)|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} |a_k(t_0)|^2$$

- ◆ Συνήθως το κανάλι υφίσταται διερεύνηση με σχετικά στενούς παλμούς αντί με κρουστικούς (είναι σχετικά εύκολα υλοποιήσιμοι!)
- ◆ Έχουμε μικρότερη διακριτική ικανότητα

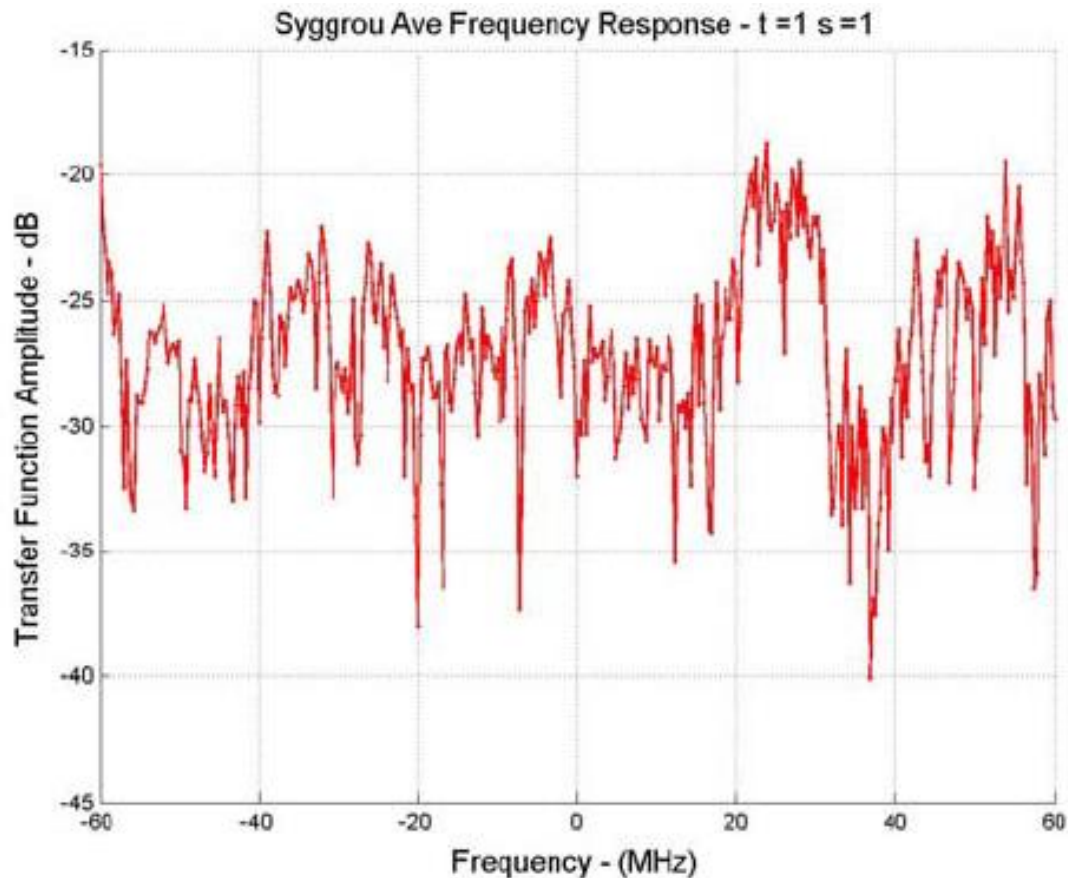


Παράδειγμα Κρουστικής Απόκρισης



- ◆ Εμφανής η χρονική διασπορά (delay spread)

Παράδειγμα Συνάρτησης Μεταφοράς

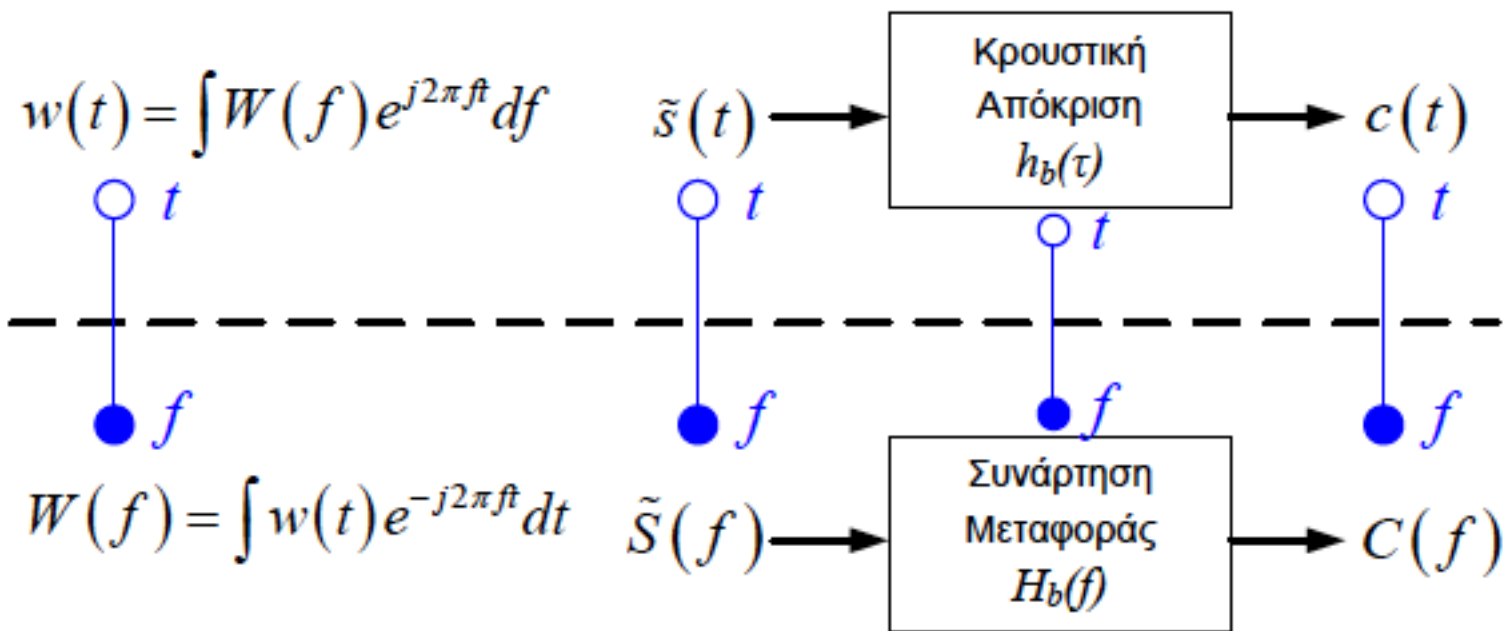


- ◆ Εμφανής η επιλεκτική συμπεριφορά ως προς τη συχνότητα

Σχέση Εισόδου-Εξόδου στα Δύο Πεδία

Πεδίο Χρόνου

$$\int h_b(\tau) \tilde{s}(t-\tau) d\tau = c(t)$$

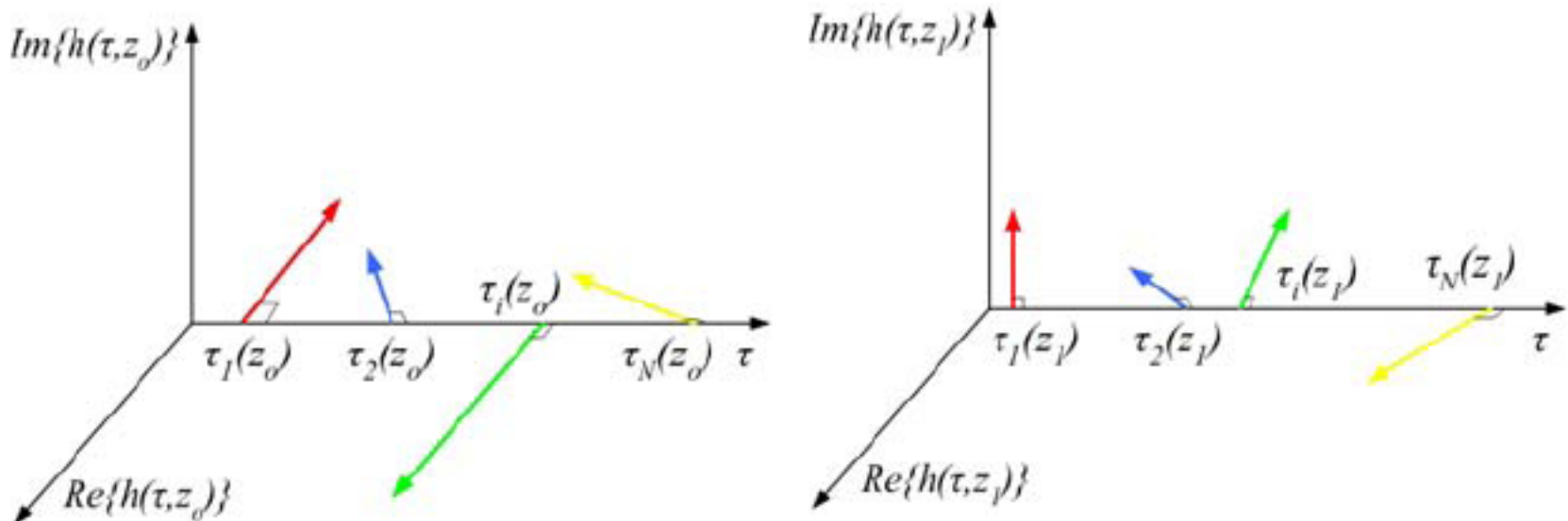


Πεδίο Συχνότητας

$$\tilde{S}(f) H_b(f) = C(f)$$

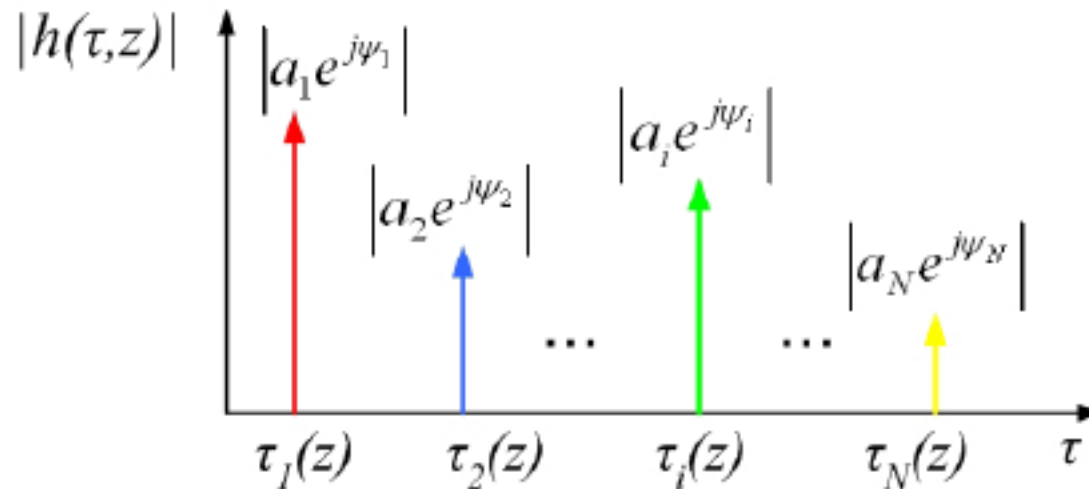
Space-Variant Channel Impulse Response (CIR)

- ◆ Σε μια άλλη θέση από την z_0 , οι συνιστώσες θα εμφανίζονται σε **άλλη τιμή της καθυστέρησης** και θα έχουν **άλλη φάση**, η οποία εξαρτάται από τη χωρική ολίσθηση Doppler



Space-Variant CIR

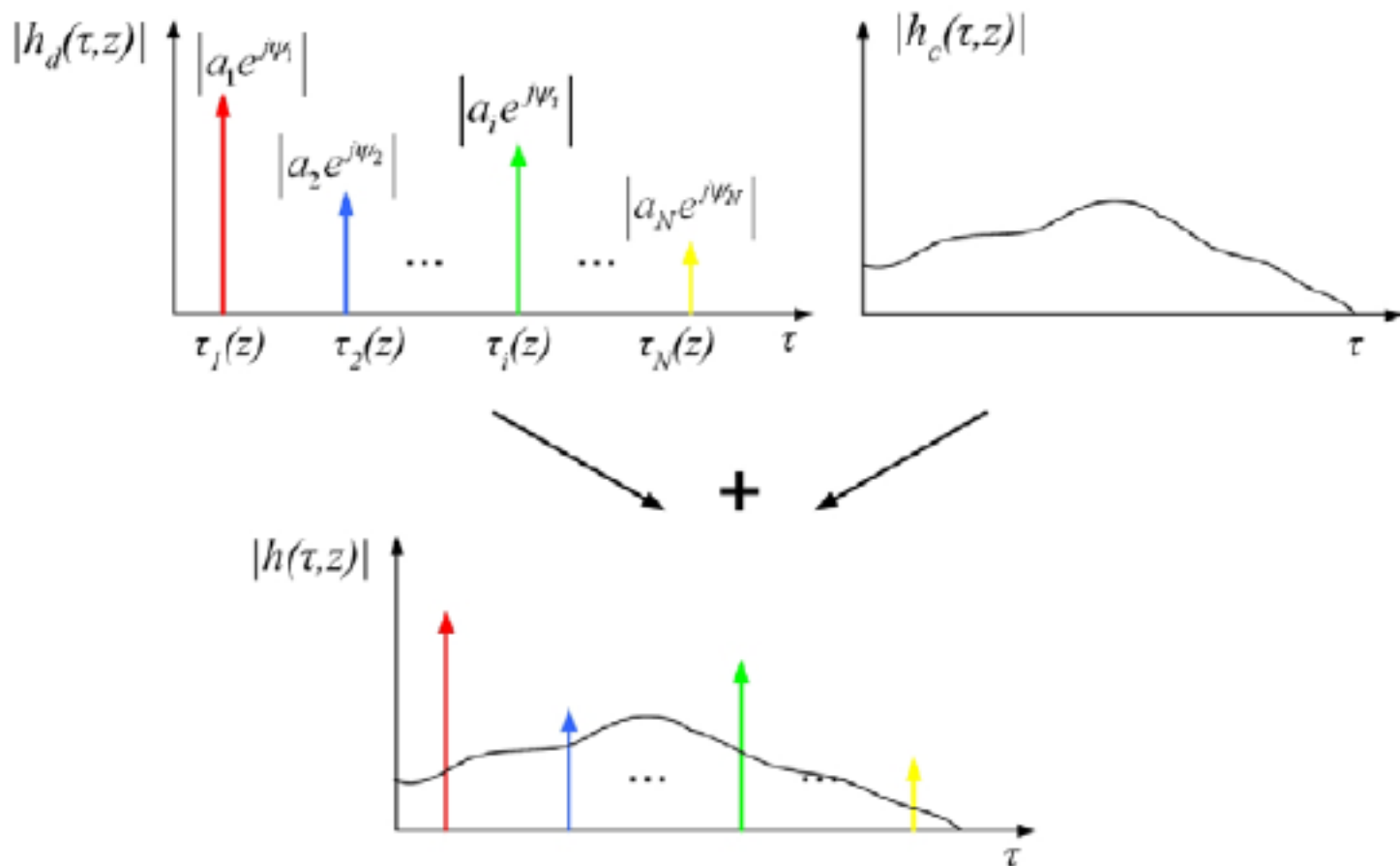
- ◆ Το μέτρο της CIR σε μια θέση z απεικονίζεται στο σχήμα



Space-Variant CIR

- ◆ Στην πραγματικότητα, δεν έχουμε μόνο διακριτές τιμές στην CIR. Υπάρχει πάντα και μια συνέχεια από συνιστώσες οι οποίες δεν μπορούν να διαχωριστούν στο δέκτη.
- ◆ Οι συνιστώσες αυτές οφείλονται είτε σε σκεδαστές που βρίσκονται πολύ κοντά, και δεν είναι διαχωρίσιμοι από το σύστημα, είτε σε σκεδάσεις με μικρή διαφορά στο πλάτος και την καθυστέρηση.

Space-Variant CIR



Σχέση Εισόδου – Εξόδου

- ♦ Όταν εκπέμπεται ένα ζωνοπερατό σήμα

$$s(t) = \text{Re}\{\tilde{s}(t)e^{j\omega_c t}\}$$

- ♦ Το λαμβανόμενο ζωνοπερατό σήμα είναι

$$y(t, z) = \text{Re}\{c(t, z)e^{j\omega_c t}\} = \text{Re}\left\{\sum_{i=1}^N a_i e^{j\psi_i} e^{j\nu_i z} \tilde{s}(t - \tau_i(z))e^{j\omega_c t}\right\}$$

Χωρική Ολίσθηση
Doppler λόγω κίνησης
του δέκτη

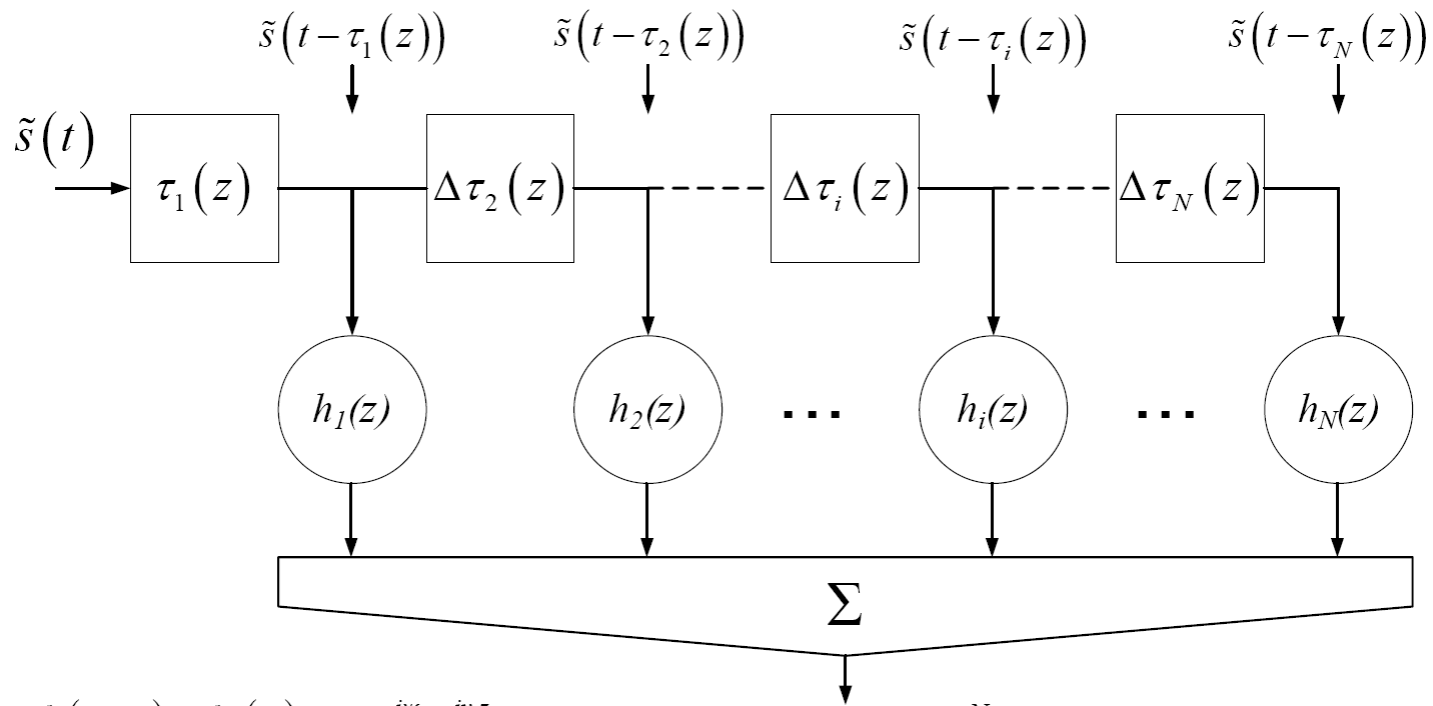
- ♦ Δηλαδή η λαμβανόμενη μιγαδική περιβάλλουσα είναι

$$c(t, z) = \sum_{i=1}^N a_i e^{j\psi_i} e^{j\nu_i z} \tilde{s}(t - \tau_i(z))$$

- ♦ Και η σχέση εισόδου-εξόδου είναι

$$c(t, z) = \int h_b(\tau, z) \tilde{s}(t - \tau) d\tau$$

Σχέση Εισόδου – Εξόδου



$$h(\tau_i, z) = h_i(z) = a_i e^{j\psi_i} e^{j\nu_i z}$$

$$\Delta\tau_i(z) = \tau_i(z) - \tau_{i-1}(z)$$

$$c(t, z) = \sum_{i=1}^N a_i e^{j\psi_i} e^{j\nu_i z} \tilde{s}(t - \tau_i(z))$$

Χρονικά Μεταβαλλόμενος Δίαυλος

- ◆ Η συνάρτηση $h_b(t, \tau)$ είναι η απόκριση του διαύλου τη χρονική στιγμή t σε μια κρουστική που εκπέμπεται τη χρονική στιγμή $t-\tau$.
- ◆ Η σχέση εισόδου – εξόδου είναι (για $z=ut$):

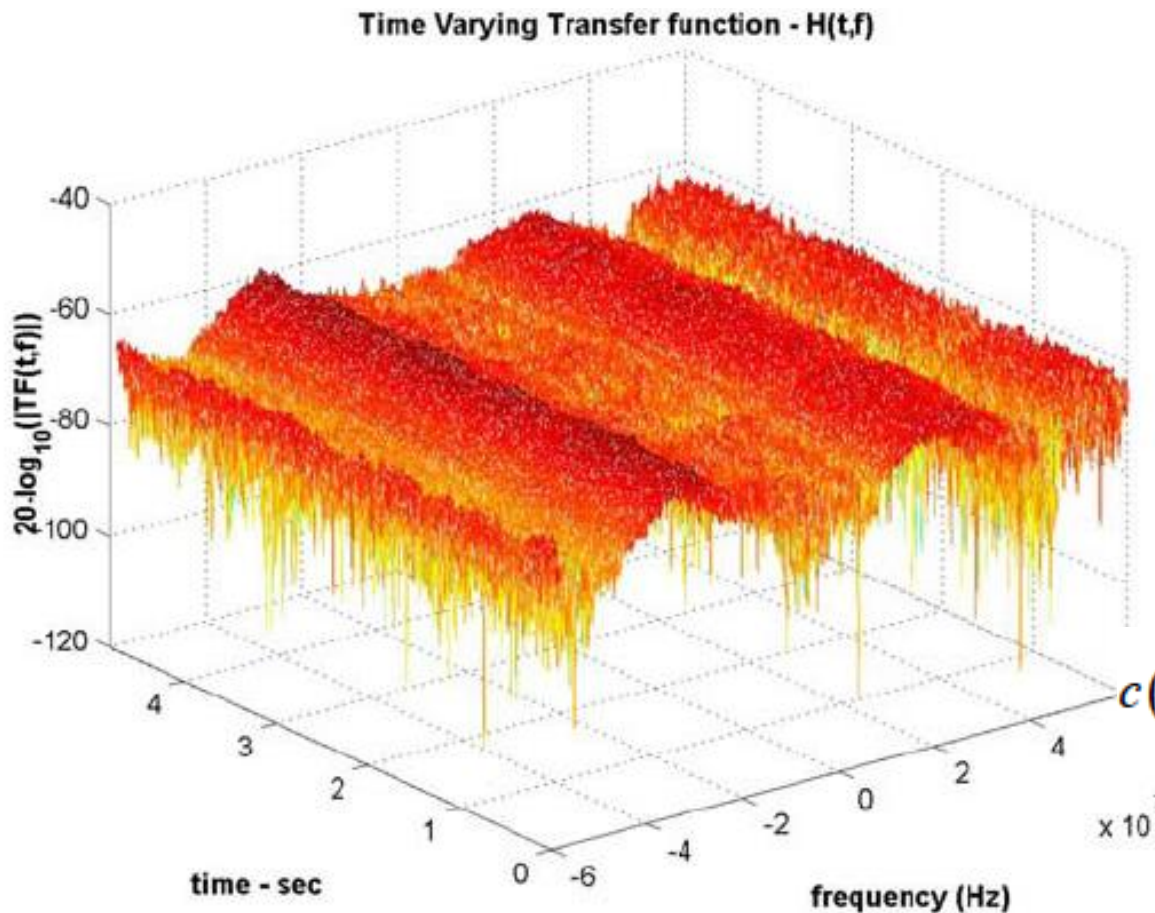
$$c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_b(t, \tau) \tilde{s}(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} h_b(t, t - \tau) \tilde{s}(\tau) d\tau$$

- ◆ Η σχέση δεν είναι η γνωστή συνέλιξη.
- ◆ Επειδή το σύστημα είναι αιτιατό : $h_b(t, \tau) = 0$ για $\tau < 0$.
- ◆ Δηλαδή κανονικά το κάτω όριο στο ολοκλήρωμα είναι 0.

Χρονικά Μεταβαλλόμενος Δίαυλος

- ◆ Συνήθως υπάρχουν και άλλες αιτίες χρονικής μεταβολής του διαύλου, π.χ. Κινούμενοι σκεδαστές ή και σκεδαστές με χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά, όπως οι λάμπες φθορισμού.
- ◆ Ο διάυλος δηλαδή είναι γραμμικό (όπως θα δούμε τυχαία) χρονικά μεταβαλλόμενο φίλτρο.
- ◆ Να σημειώσουμε ότι επειδή το σύστημα είναι μεν γραμμικό αλλά χρονικά μεταβαλλόμενο, στο φάσμα του σήματος εξόδου θα υπάρχουν φασματικές συνιστώσες που δεν υπήρχαν στο φάσμα του σήματος εισόδου.

Παράδειγμα $H(t,f)$



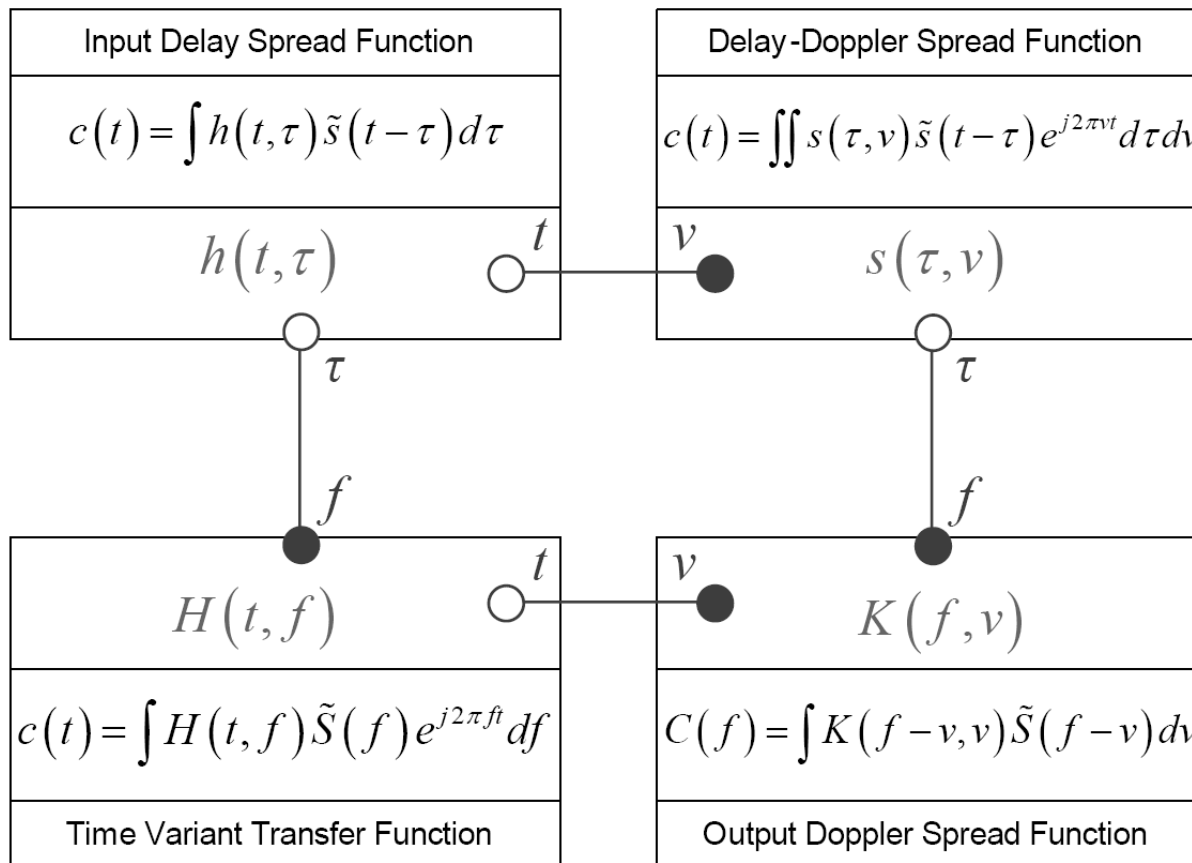
Με μετασχηματισμό Fourier μπορούμε να μεταπηδήσουμε στη χρονικά μεταβαλλόμενη συνάρτηση μεταφοράς $H(t,f)$.

$$H_b(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} h_b(t,\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$



$$c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_b(t,f) \tilde{S}(f) e^{j2\pi ft} df$$

Συναρτήσεις Συστημάτων και Σχέσεις Εισόδου-Εξόδου



- ◆ $s(\tau, \nu)$: χωρική κατανομή των σημάτων λόγω σκεδαστών
- ◆ ν : χωρική ολίσθηση doppler
- ◆ $K(f, \nu)$ συνάρτηση μεταφοράς υποθετικών στοιχειωδών φίλτρων στην είσοδο του διαύλου

Τυχαία Χρονικά Μεταβαλλόμενος Δίαυλος

- ◆ Το περιβάλλον σκέδασης είναι τυχαίο αφού τα χαρακτηριστικά των σκεδαστών (θέση, διάσταση, ηλεκτρικές ιδιότητες) είναι τυχαία.
- ◆ Η διακριτικότητα των συστημάτων είναι περιορισμένη και στο δέκτη καταφθάνουν κύματα τα οποία δεν μπορούμε να ξεχωρίσουμε.
- ◆ Η κίνηση του δέκτη είναι τυχαία.
- ◆ Συνεπώς οι συναρτήσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως είναι στην πράξη στοχαστικές ανελίξεις.
- ◆ Για τον ακριβή χαρακτηρισμό του διαύλου απαιτείται η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των συναρτήσεων του συστήματος.

Τυχαία Χρονικά Μεταβαλλόμενος Δίαυλος

- ◆ Επειδή η από κοινού pdf δεν είναι πρακτικά ποτέ γνωστή, αρκεί ο προσδιορισμός των μέσων τιμών (ροπές πρώτης τάξης) και των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης των συναρτήσεων του συστήματος (ροπές δεύτερης τάξης).
- ◆ Ιδιαίτερα αν θεωρήσουμε Gaussian φαινόμενο, τότε οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης είναι αρκετές, αν υποθέσουμε μηδενικές μέσες τιμές των στοχαστικών ανεξίτηλων.

$$E[h(t, \tau)] = E[H(t, f)] = E[K(f, \nu)] = E[s(\tau, \nu)] = 0$$

Τυχαία Χρονικά Μεταβαλλόμενος Δίαυλος

- ◆ Οι συναρτήσεις συσχέτισης γράφονται:

$$R_h(t_1, t_2; \tau_1, \tau_2) = \frac{1}{2} E \left[h^*(t_1, \tau_1) h(t_2, \tau_2) \right]$$

$$R_H(t_1, t_2; f_1, f_2) = \frac{1}{2} E \left[H^*(t_1, f_1) H(t_2, f_2) \right]$$

$$R_s(\tau_1, \tau_2; \nu_1, \nu_2) = \frac{1}{2} E \left[s^*(\tau_1, \nu_1) s(\tau_2, \nu_2) \right]$$

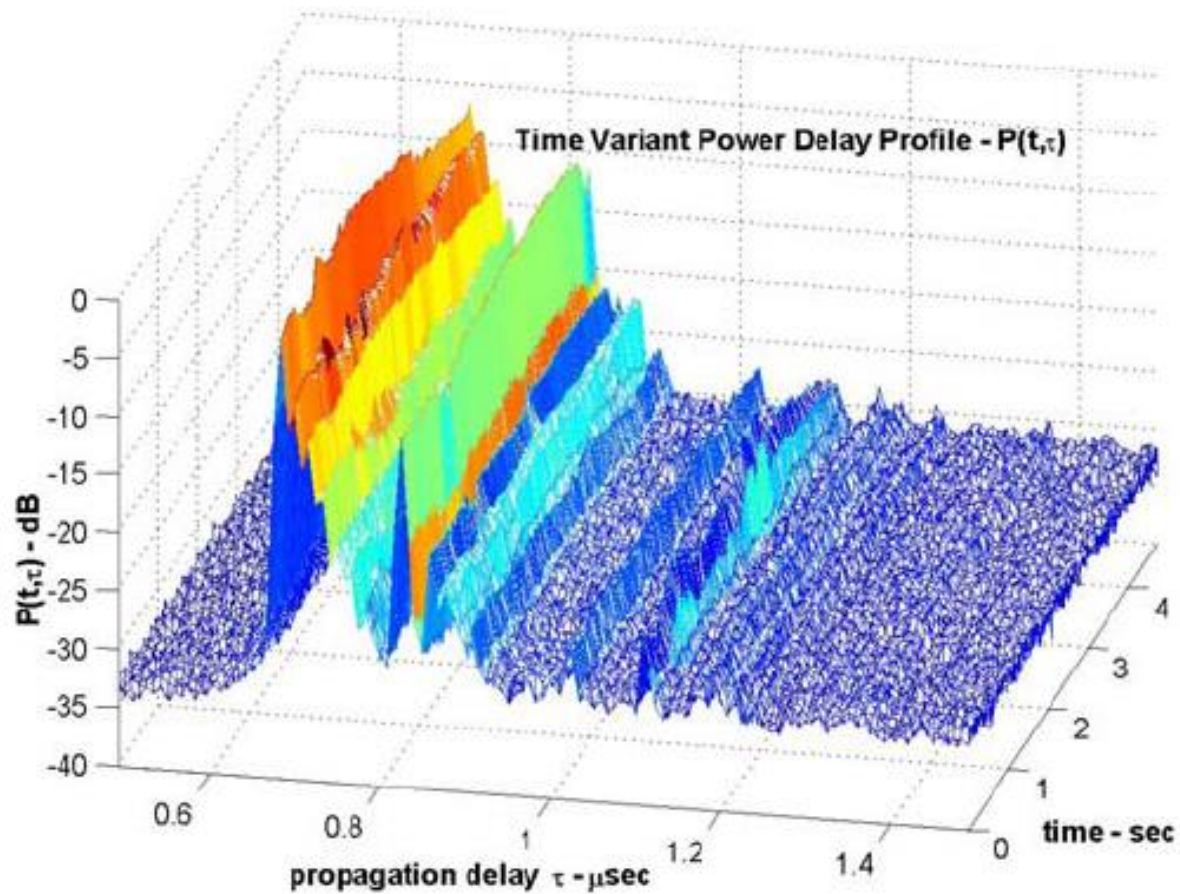
$$R_K(f_1, f_2; \nu_1, \nu_2) = \frac{1}{2} E \left[K^*(f_1, \nu_1) K(f_2, \nu_2) \right]$$

Delay Cross-Power Spectral Density

- ◆ Η συνάρτηση $Q(\Delta t; \tau)$ καλείται Delay Cross-Power Spectral Density ή από πολλούς και Wideband Time Correlation Function.
- ◆ Για $\Delta t=0$ προκύπτει η γνωστή συνάρτηση **Power Delay Profile (PDP)** $Q(0; \tau) = Q(\tau)$.
- ◆ Αυτή η συνάρτηση (PDP) χρησιμοποιείται πάρα πολύ για το χαρακτηρισμό των ραδιο-διαύλων και περιγράφει την κατανομή της μέσης λαμβανόμενης ισχύος συναρτήσει της καθυστέρησης.

$$Q(0; \tau) = Q(\tau) = E \left[|h(t, \tau)|^2 \right] = \int S(\tau, \nu) d\nu$$

Παράδειγμα PDP



Time-Frequency Correlation Function

- ◆ Η συνάρτηση $R_H(\Delta t; \Delta f)$ καλείται **Time-Frequency Correlation Function** και για $\Delta t=0$ προκύπτει η **Frequency Correlation Function** $R_H(0; \Delta f)=R_H(\Delta f)$.
- ◆ Αυτή περιγράφει την επιλεκτική συμπεριφορά του διαύλου ως προς τη συχνότητα.
- ◆ Συνδέεται με την PDP με σχέση μετ/σμού Fourier

$$Q(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\Delta f) e^{j2\pi\tau\Delta f} d\Delta f$$

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ♦ **Mean Excess Delay** (ή Average Delay) (η ροπή πρώτης τάξης του PDP)

$$\mu_\tau = \frac{\int_0^\infty \tau Q(\tau) d\tau}{\int_0^\infty Q(\tau) d\tau} = \frac{\int_0^\infty \tau Q(\tau) d\tau}{\int_0^\infty \int_{-\nu_{\max}}^{\nu_{\max}} S(\tau, \nu) d\nu d\tau}$$

PDP

Συνάρτηση Σκέδασης (ΦΠΙ)

- ♦ Ή αν χρησιμοποιήσουμε το κανονικοποιημένο PDP

$$Q_n(\tau) = \frac{Q(\tau)}{\iint S(\tau, \nu) d\nu d\tau} \quad \left(\Rightarrow \int_0^\infty Q_n(\tau) d\tau = 1 \right)$$

$$\mu_\tau = \int_0^\infty \tau Q_n(\tau) d\tau$$

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ◆ **RMS Delay Spread** (η τετραγωνική ρίζα της κεντρικής ροπής δεύτερης τάξης του PDP)

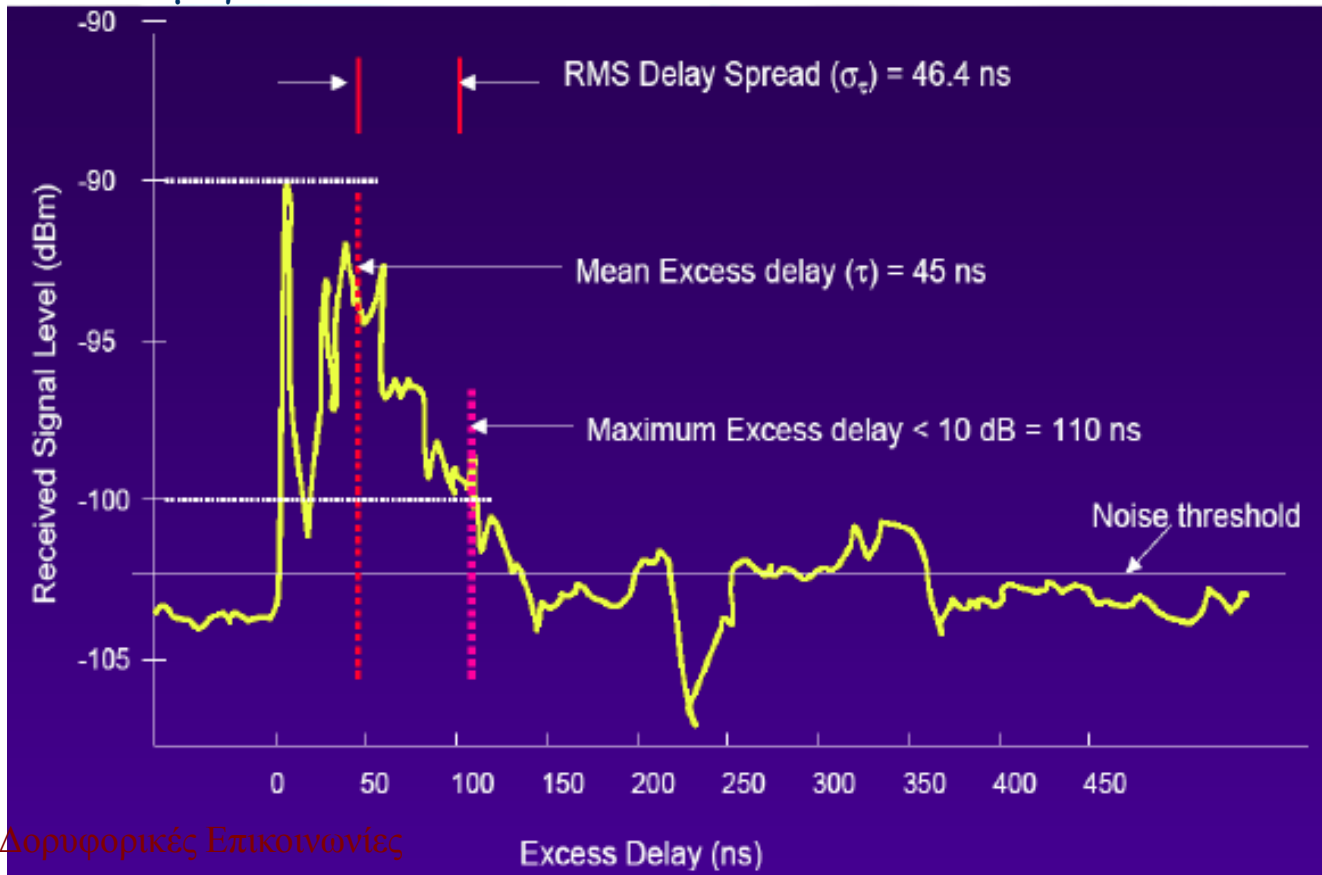
$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (\tau - \mu_{\tau})^2 Q(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} Q(\tau) d\tau}}$$

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\int_0^{\infty} (\tau - \mu_{\tau})^2 Q_n(\tau) d\tau}$$

Για κανονικοποιημένο PDP

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

Maximum Excess Delay (X dB): η μέγιστη επιπλέον χρονική καθυστέρηση κατά την οποία η ενέργεια από τις πολλαπλές διαδρομές πέφτει κατά X dB κάτω από το μέγιστο



Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

Typical Measured Values of RMS Delay Spread

Environment	Frequency (MHz)	RMS Delay Spread (σ_r)	Notes	Reference
Urban	910	1300 ns avg. 600 ns st. dev. 3500 ns max.	New York City	[Cox75]
Urban	892	10–25 μ s	Worst case San Francisco	[Rap90]
Suburban	910	200–310 ns	Averaged typical case	[Cox72]
Suburban	910	1960–2110 ns	Averaged extreme case	[Cox72]
Indoor	1500	10–50 ns 25 ns median	Office building	[Sal87]
Indoor	850	270 ns max.	Office building	[Dev90a]
Indoor	1900	70–94 ns avg. 1470 ns max.	Three San Francisco buildings	[Sei92a]

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ◆ Συνήθως η ισχύς των συνιστωσών αυξανομένης της καθυστέρησης μειώνεται εκθετικά.
- ◆ Στη μελέτη του **GSM** χρησιμοποιήθηκαν οι εξής μορφές PDP

- **Rural**

$$Q(\tau) = \begin{cases} e^{-9.2\tau} & 0\mu s < \tau < 0.7\mu s \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$$

- **Hilly Terrain**

$$Q(\tau) = \begin{cases} e^{-3.5\tau} & 0\mu s < \tau < 2\mu s \\ 0.1e^{15-\tau} & 15\mu s < \tau < 20\mu s \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$$

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ◆ Στη μελέτη του **GSM** χρησιμοποιήθηκαν οι εξής μορφές PDP

- Urban

$$Q(\tau) = \begin{cases} e^{-\tau} & 0 \mu s < \tau < 7 \mu s \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$$

- Hilly Urban

$$Q(\tau) = \begin{cases} e^{-\tau} & 0 \mu s < \tau < 5 \mu s \\ 0.5e^{5-\tau} & 5 \mu s < \tau < 10 \mu s \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$$

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ♦ Άρα για Urban περιβάλλον

$$\mu_\tau = \frac{\int_0^7 \tau Q(\tau) d\tau}{\int_0^7 Q(\tau) d\tau} = \frac{\int_0^7 \tau e^{-\tau} d\tau}{\int_0^7 e^{-\tau} d\tau} = \frac{[e^{-\tau}(-\tau-1)]_0^7}{[-e^{-\tau}]_0^7} = \frac{0.9927}{0.991} = 0.9936$$

$$\begin{aligned} \sigma_\tau &= \sqrt{\frac{\int_0^7 (\tau - \mu_\tau)^2 Q(\tau) d\tau}{\int_0^7 Q(\tau) d\tau}} = \sqrt{\frac{\int_0^7 (\tau - \mu_\tau)^2 e^{-\tau} d\tau}{\int_0^7 e^{-\tau} d\tau}} = \sqrt{\frac{\int_0^7 (\tau)^2 e^{-\tau} d\tau + (0.9936)^2 \int_0^7 e^{-\tau} d\tau - 2 * 0.9936 \int_0^7 \tau e^{-\tau} d\tau}{0.9991}} \\ &= \sqrt{\frac{[-\tau^2 e^{-\tau} - 2\tau e^{-\tau} - 2e^{-\tau}]_0^7 + (0.9936)^2 * 0.9991 - 2 * 0.9936 * 0.9927}{0.9991}} \\ &= \sqrt{\frac{2 - 65e^{-7} + (0.9936)^2 * 0.9991 - 2 * 0.9936 * 0.9927}{0.9991}} = \sqrt{\frac{0.9543}{0.9991}} = 0.9773 \end{aligned}$$

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ♦ Για διακριτές τιμές καθυστέρησης στο PDP μπορούμε να γράψουμε

$$\mu_{\tau} = \frac{\sum_k Q(\tau_k) \tau_k}{\sum_k Q(\tau_k)}$$

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k Q(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k Q(\tau_k)}$$

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\overline{\tau^2} - \mu_{\tau}^2}$$

- ♦ Οι καθυστερήσεις υπολογίζονται ως προς την πρώτη αφιχθείσα συνιστώσα ($\tau_0=0$)

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

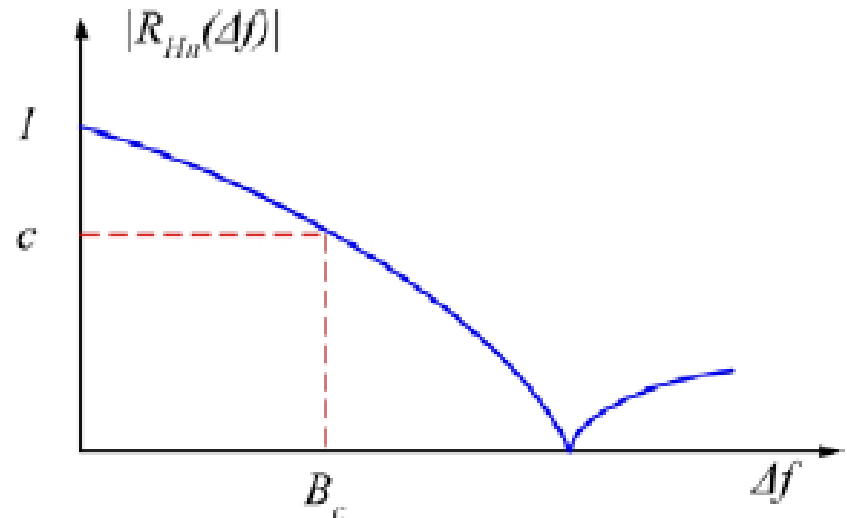
- ◆ Η $R_{Hn}(\Delta f)$ αναπαριστά τη συσχέτιση της απόκρισης του καναλιού σε δύο σήματα ως συνάρτηση της απόστασης στη συχνότητα που έχουν τα δύο σήματα.
- ◆ Το εύρος συσχέτισης (coherence bandwidth) είναι ένα στατιστικό μέτρο του εύρους συχνοτήτων για το οποίο το κανάλι “περνά” όλες τις φασματικές συνιστώσες με σχεδόν ίδιο κέρδος και γραμμική φάση.
- ◆ Στο εύρος αυτό οι φασματικές συνιστώσες του σήματος επηρεάζονται παρόμοια από το κανάλι.
- ◆ Πολλές φορές συγκρίνουμε το εύρος του συστήματος με το B_c για να αποφανθούμε αν ο δίαυλος είναι wideband ή narrowband.

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ♦ Εύρος ζώνης συνοχής (Coherence Bandwidth) B_c σε ένα επίπεδο συσχέτισης $c \in [0, 1)$.
- ♦ Κανονικοποιούμε την συνάρτηση συσχέτισης συχνότητας

$$R_{H_n}(\Delta f) = \frac{R_H(\Delta f)}{\iint S(\tau, \nu) d\nu d\tau}$$

$(R_{H_n}(0) = 1)$



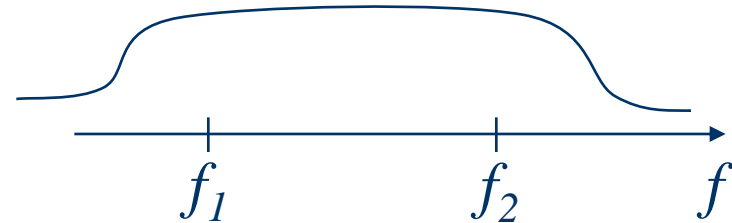
$$B_c = \arg \min \{ \Delta f > 0 : |R_{H_n}(\Delta f)| = c \}$$

c : επίπεδο συσχέτισης

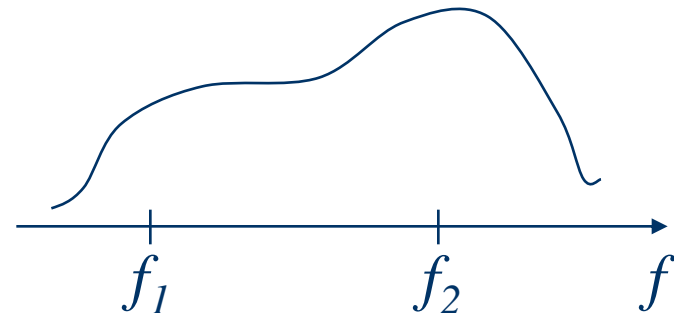
Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ◆ Εύρος ζώνης συνοχής B_c είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ συχνοτήτων που συνεχίζουν να επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο από το κανάλι.

- Τα σήματα στην f_1 και f_2 επηρεάζονται κατά τον ίδιο τρόπο από το κανάλι



- Τα σήματα στην f_1 και f_2 δεν επηρεάζονται όμοια από το κανάλι



Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ♦ Σύμφωνα με τον Fleury υπάρχει μια σχέση αβεβαιότητας που συνδέει το coherence BW με το RMS delay spread

$$\sigma_\tau B_c \geq \frac{1}{2\pi} \arccos(c)$$

- ♦ Μια εμπειρική σχέση που τα συνδέει δίνει και ο Rappaport. Για συνάρτηση συσχέτισης $c=0.9$, τότε:

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

- ♦ Ενώ για $c=0.5$:

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

Διάκριση Διαύλων

- ♦ Αν B_S συμβολίζει το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος και αντίστοιχα T_S τη διάρκεια συμβόλου,
- ♦ Για να έχω επίπεδες διαλείψεις πρέπει

$$B_S \ll B_c \quad \text{και} \quad T_S \gg \sigma_\tau$$

- ♦ Ενώ για διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα πρέπει

$$B_S > B_c \quad \text{και} \quad T_S < \sigma_\tau$$

- ♦ Ένας εμπειρικός κανόνας μας λέει ότι όταν $T_S \geq 10\sigma_\tau$ έχω επίπεδες διαλείψεις.

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ◆ Mean Excess Doppler

$$\mu_v = \frac{\int vP(v)dv}{\int P(v)dv} = \frac{\int vP(v)dv}{\iint S(\tau, v)dv d\tau}$$

Συνάρτηση ΦΠ
Doppler ή Doppler
Scattering Function

- ◆ Ή αν χρησιμοποιήσουμε την κανονικοποιημένη

$$P_n(v) = \frac{P(v)}{\iint S(\tau, v)dv d\tau} \quad \left(\Rightarrow \int P_n(v)dv = 1 \right)$$

$$\mu_v = \int vP_n(v)dv$$

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ◆ RMS Doppler Spread

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\int (v - \mu_v)^2 P(v) dv}{\int P(v) dv}}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\int (v - \mu_v)^2 P_n(v) dv}$$

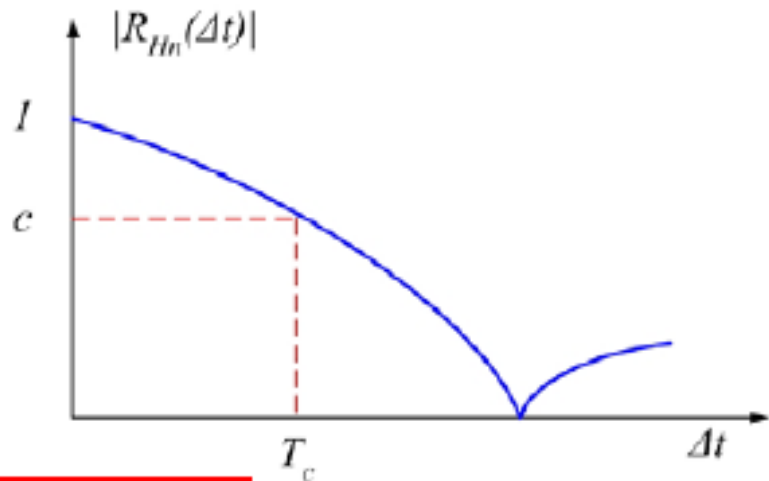
Για κανονικοποιημένο PDP

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ♦ **Χρόνος συνοχής** (Coherence Time) T_c σε ένα επίπεδο συσχέτισης $c \in [0, 1)$.
- ♦ Κανονικοποιούμε την συνάρτηση συσχέτισης χρόνου

$$R_{Hn}(\Delta t) = \frac{R_H(\Delta t)}{\iint S(\tau, \nu) d\nu d\tau}$$

$$(R_{Hn}(0) = 1)$$



$$T_c = \arg \min \{ \Delta t > 0 : |R_{Hn}(\Delta t)| = c \}$$

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ◆ Η $R_{Hn}(\Delta t)$ περιγράφει τη χρονική έκταση για την οποία υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των αποκρίσεων του διαύλου σε ένα ημιτονοειδές που στάλθηκε τη χρονική στιγμή t_1 και ενός την t_2 , όπου $\Delta t = t_2 - t_1$.
- ◆ Ο χρόνος συσχέτισης T_c είναι ένα μέτρο της αναμενόμενης χρονικής περιόδου για την οποία η απόκριση του διαύλου είναι αμετάβλητη.
- ◆ Είναι εξαιρετικά σημαντική παράμετρος για το δίαυλο γιατί χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της επίδοσης των τεχνικών κωδικοποίησης και διεμπλοκής (interleaving).

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ♦ Σύμφωνα με τον Fleury υπάρχει μια σχέση αβεβαιότητας που συνδέει το coherence time με το RMS Doppler spread

$$\sigma_v T_c \geq \frac{1}{2\pi} \arccos(c)$$

- ♦ Γενικά το T_c είναι αντιστρόφως ανάλογο της μέγιστης ολίσθησης Doppler

$$T_c \approx \frac{1}{f_{\max D}}$$

- ♦ Μια εμπειρική σχέση για $c=0.5$

$$T_c \approx \frac{9}{16\pi f_{\max D}}$$

Παράμετροι Χαρακτηρισμού Διαύλου

- ◆ Πολλές φορές χρησιμοποιείται ο γεωμετρικός μέσος των δύο προηγούμενων, δηλαδή

$$T_c = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_{\max D}^2}} = \frac{0.423}{f_{\max D}}$$

- ◆ Πολλές φορές συγκρίνουμε το χρόνο συσχέτισης του διαύλου με τη διάρκεια συμβόλου του συστήματος για να αποφανθούμε αν το σύστημα υπόκειται σε γρήγορες ή αργές διαλείψεις.
- ◆ Αν ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων είναι μεγαλύτερος του $1/T_c$ (ισοδύναμα η διάρκεια συμβολών $\tau_s < T_c$) το κανάλι δεν προκαλεί παραμόρφωση λόγω κίνησης

Διάκριση Διαύλων

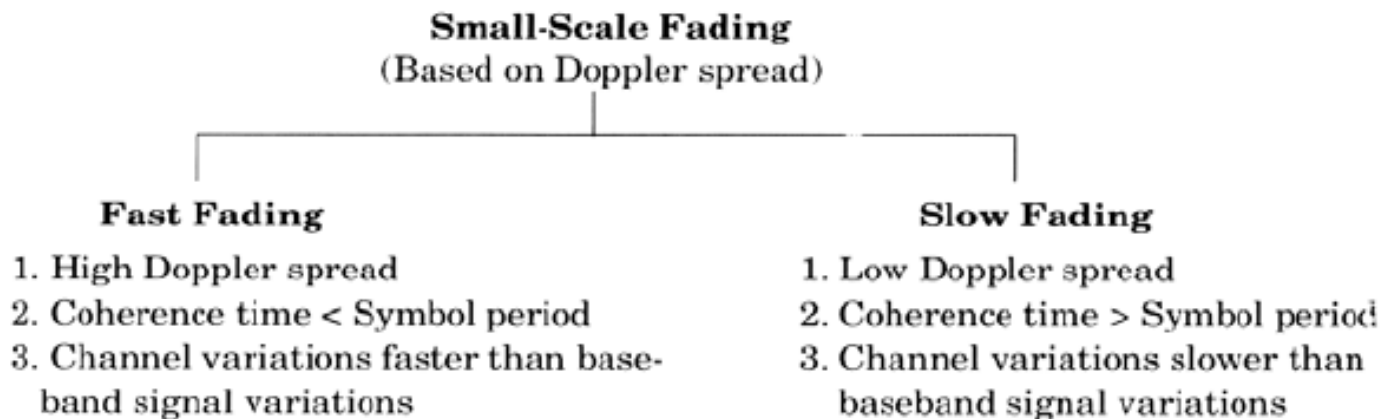
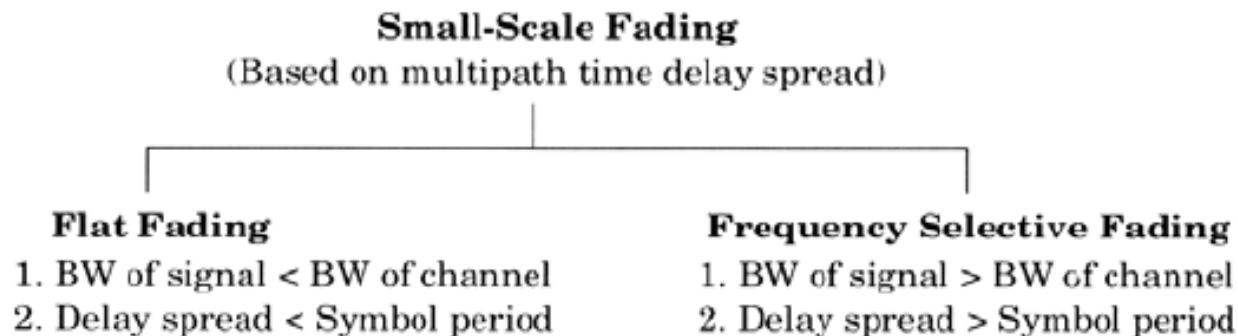
- ♦ Αν B_S συμβολίζει το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος και αντίστοιχα T_S τη διάρκεια συμβόλου, τότε
- ♦ Για να έχω γρήγορες διαλείψεις πρέπει

$$B_S < \sigma_v \quad \text{και} \quad T_S > T_c$$

- ♦ Ενώ για αργές διαλείψεις πρέπει

$$B_S \gg \sigma_v \quad \text{και} \quad T_S \ll T_c$$

Τύποι Διαλείψεων Μικρής Κλίμακας



Οι 4 τύποι διαλείψεων μικρής κλίμακας

- ♦ Από τα προηγούμενα μπορούμε να χαρακτηρίσουμε 4 φαινόμενα διαλείψεων ως εξής:
- ♦ Η διασπορά Doppler προκαλεί

T_c = χρόνος συνοχής,
 τ_s = διάρκεια συμβόλων

Γρήγορες διαλείψεις
Μεγάλη διασπορά Doppler
 $T_c < \tau_s$

ή

Αργές διαλείψεις
Μικρή διασπορά Doppler
 $T_c > \tau_s$

- ♦ Η διασπορά της καθυστέρησης των multipath προκαλεί
 σ_τ = διασπορά καθυστέρησης

Flat Fading
BW σήματος < εύρος συνοχής BW
Διασπορά καθυστέρησης $\sigma_\tau < \tau_s$

Συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις
BW σήματος > εύρος συνοχής BW
Διασπορά καθυστέρησης $\sigma_\tau > \tau_s$

Είδη Διαύλων

◆ Δίαυλος WSS

- Ένας διάυλος καλείται **WSS (Wide Sense Stationary)** όταν τα στατιστικά μεγέθη των διαλείψεων παραμένουν σταθερά για μικρές χρονικές περιόδους.
- Συνεπώς οι συναρτήσεις συσχέτισης εξαρτώνται από τις χρονικές μεταβλητές t_1 και t_2 μόνο μέσω της διαφοράς τους $\Delta t = t_1 - t_2$.
- Αποδεικνύεται ότι όταν ο διάυλος είναι WSS τότε έχουμε σκεδάσεις με ασυσχέτιστες ολισθήσεις Doppler.
- Δηλαδή οι εξασθενίσεις και οι ολισθήσεις φάσης συνιστωσών που έχουν διαφορετικές ολισθήσεις Doppler είναι ασυσχέτιστες.

Είδη Διαύλων

- ◆ Δίαυλος US
 - Ένας διάυλος καλείται **US (Uncorrelated Scattering)** όταν οι εξασθενίσεις και οι ολισθήσεις φάσης συνιστωσών που έχουν διαφορετικές καθυστερήσεις, είναι ασυσχέτιστες.
- ◆ Δίαυλος WSSUS
 - Οι **WSSUS** διάυλοι έχουν ασυσχέτιστες σκεδάσεις τόσο στο πεδίο της καθυστέρησης όσο και στο πεδίο της ολίσθησης Doppler.
 - Η υπόθεση WSSUS είναι ρεαλιστική για την περιγραφή των μεταβολών μικρής κλίμακας του διαύλου.
 - Λόγω της γοργής μεταβολής της φάσης του ηλεκτρικού πεδίου των προσπίπτοντων κυμάτων, δύο συνιστώσες από διαφορετικά προσπίπτοντα κύματα θεωρούνται ασυσχέτιστα.

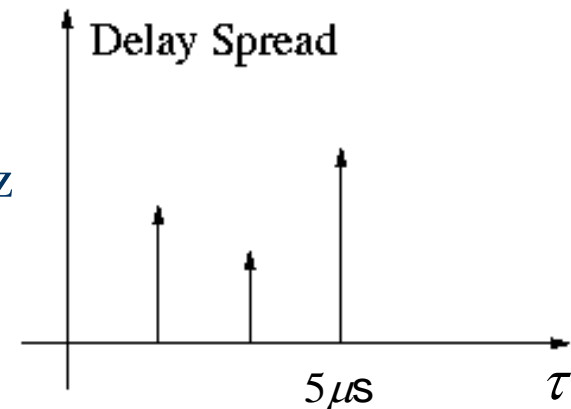
Παράδειγμα

- ◆ Δίνεται το κανάλι του σχήματος:

- Διασπορά καθυστέρησης: $\tau_m = 5\mu\text{s}$
- $B_c = (\text{εύρος συνοχής BW}) = 1/(5\mu\text{s}) = 200\text{kHz}$

- Χρειάζεται το κανάλι ισοσταθμιστή (equalizer) για το AMPS?

- Το εύρος καναλιού του AMPS είναι 30 kHz → δεν απαιτείται ισοσταθμιστής.
- Για το GSM?
- Το εύρος καναλιού του GSM είναι 200 kHz → απαιτείται ισοσταθμιστής



Παράδειγμα GSM - Urban

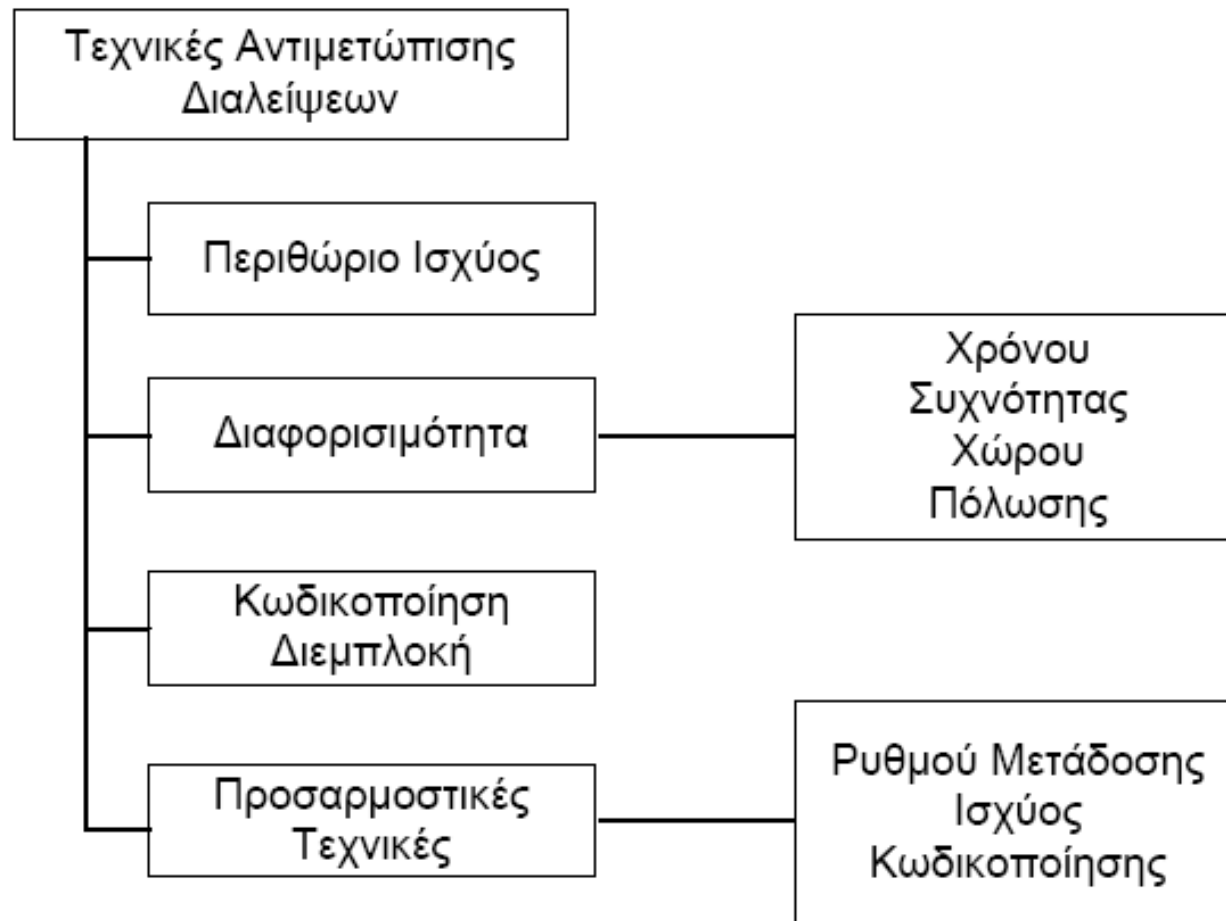
$$Q(\tau) = e^{-\tau} \quad 0 \leq \tau \leq 7 \mu\text{sec}$$

$$\begin{aligned} R(\Delta f) &= \int_0^7 Q(\tau) e^{-j2\pi\tau\Delta f} d\tau = \int_0^7 e^{-\tau} e^{-j2\pi\tau\Delta f} d\tau \\ &= \int_0^7 e^{-(1+j2\pi\Delta f)\tau} d\tau = \left[\frac{-e^{-(1+j2\pi\Delta f)\tau}}{1+j2\pi\Delta f} \right]_0^{7=\tau_{\max}} \\ &= \frac{1 - e^{-(1+j2\pi\Delta f)\tau_{\max}}}{1 + j2\pi\Delta f} \end{aligned}$$

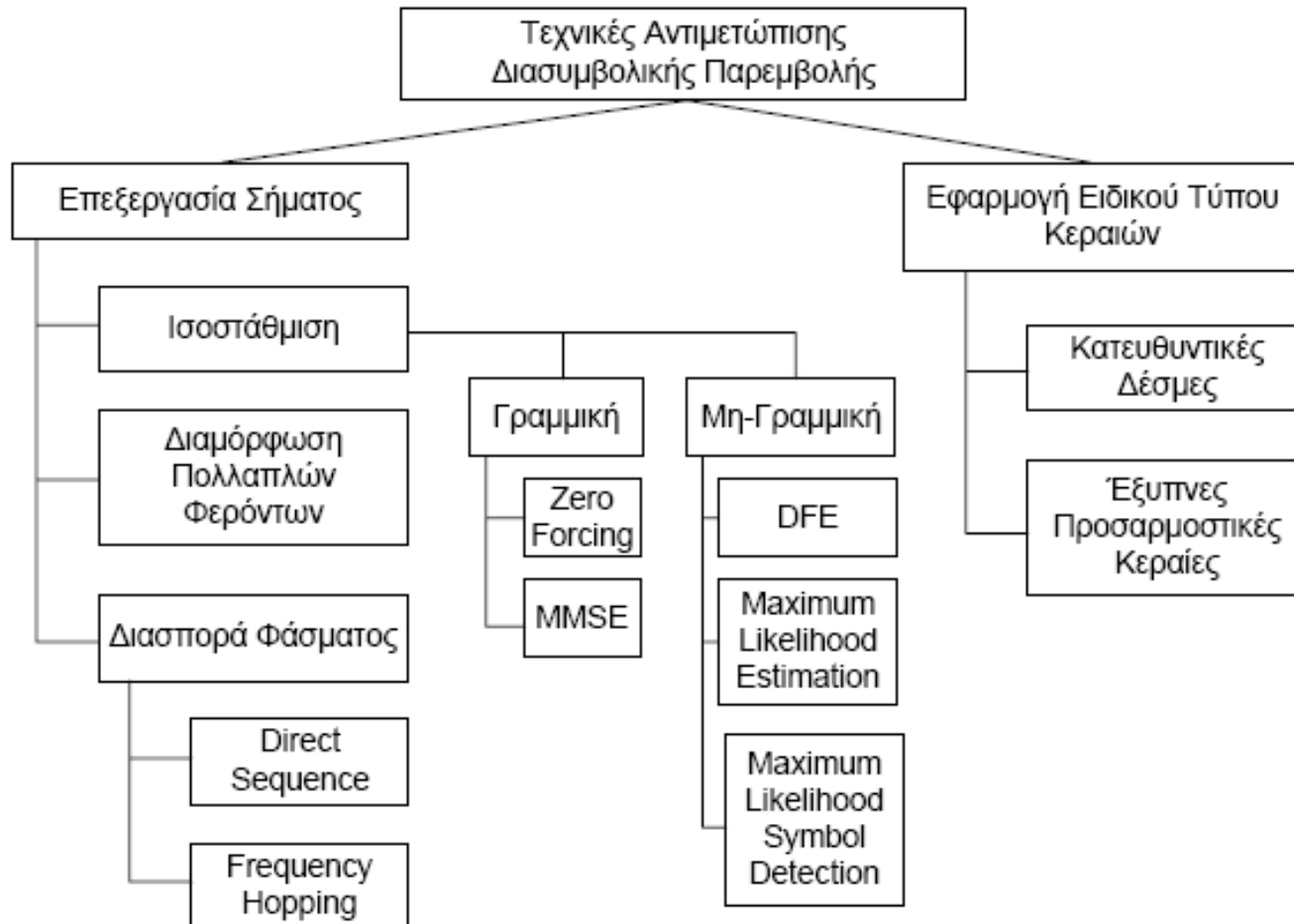
Παράδειγμα GSM - Urban

- ◆ Για $c=0.5$ ($-3dB$) προκύπτει $B_c=275KHz$
- ◆ Όμως το εύρος του σήματος είναι $200KHz$
- ◆ Το rms delay spread είναι $\sigma_\tau=0.9773\mu sec$
- ◆ Άρα $B_c * \sigma_\tau = 0,9773\mu s * 0,275MHz = 0,269$, δηλ. $B_c = 1/3,7\sigma_\tau$
- ◆ Η διάρκεια συμβόλου στο GSM είναι $3.7\mu sec$, δηλαδή $T_s < 10\sigma_\tau$.
- ◆ Άρα ο διάυλος είναι ευρείας ζώνης και οι διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα.
- ◆ Για $f_{maxD}=100Hz$, προκύπτει χρησιμοποιώντας τον τύπο με τον γεωμετρικό μέσο $T_c=4.23msec$
- ◆ Άρα $T_s \ll T_c$ άρα έχω αργές διαλείψεις.

Τρόποι Αντιμετώπισης

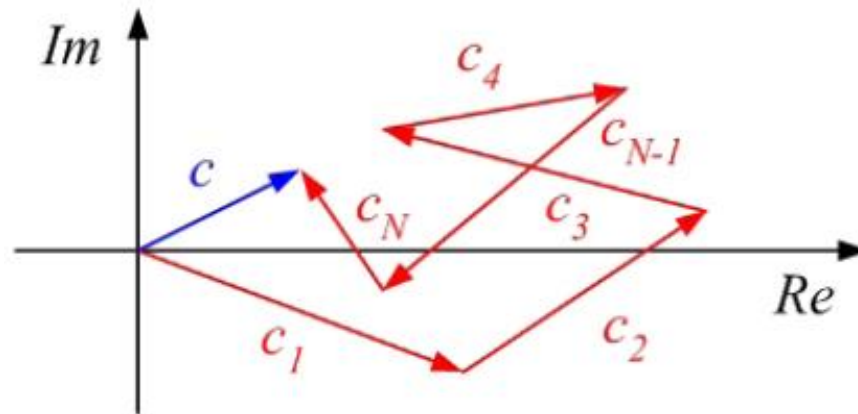


Τρόποι Αντιμετώπισης



Κατανομή Rayleigh

- ◆ Το λαμβανόμενο σήμα (μιγαδική περιβάλλουσα) είναι άθροιση πολλών τυχαίων μιγαδικών φασιθετών (**NLOS**), με παρόμοιο πλάτος. Το πλάτος ακολουθεί κατανομή Rayleigh. Η φάση είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο διάστημα $[0, 2\pi)$.



Κατανομή Rayleigh

- ♦ Ο λόγος που το πλάτος της μιγαδικής περιβάλλουσας ακολουθεί Rayleigh κατανομή, είναι ότι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος, σύμφωνα με το Κ.Ο.Θ., είναι ανεξάρτητες Gaussian τυχαίες μεταβλητές, με μηδενική μέση τιμή και ίδια διασπορά (σ^2).

$$c(t) = I(t) + jQ(t) = r(t)e^{j\theta(t)}$$

$$r(t) = \sqrt{[I(t)]^2 + [Q(t)]^2}$$

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{Q(t)}{I(t)}\right)$$

Κατανομή Rayleigh

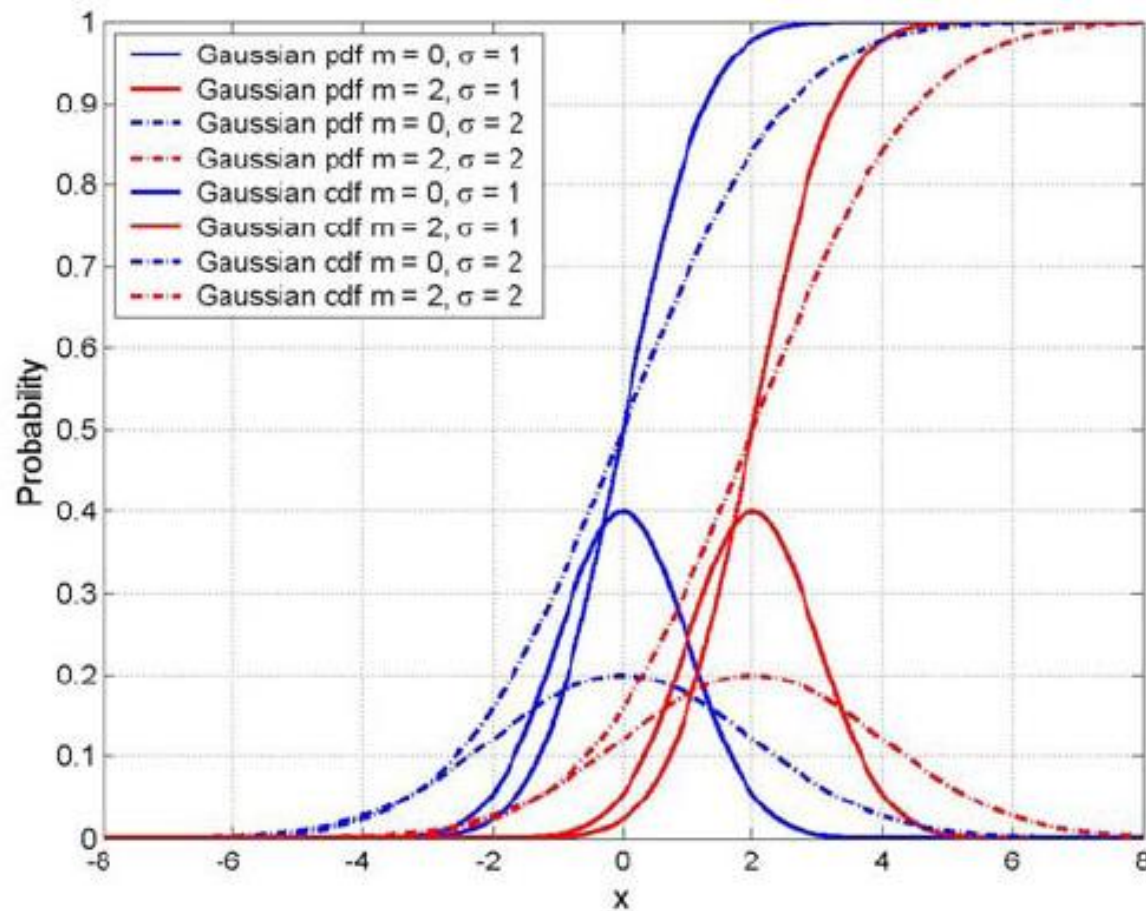
- ◆ Στην περίπτωση αυτή η $c(t)$ που είναι μιγαδική τυχαία μεταβλητή, καλείται **circularly symmetric Gaussian**.
- ◆ Gaussian pdf

$$p_I(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad p_Q(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}$$

- ◆ Gaussian cdf

$$F(x_o) = \Pr(x \leq x_o) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x_o}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] = Q \left(\frac{x_o}{\sigma} \right)$$

Κατανομή Rayleigh



Κατανομή Rayleigh

- ◆ Η pdf της Rayleigh γράφεται

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$

- ◆ Η cdf της Rayleigh γράφεται

$$F_r(R) = \Pr(r \leq R) = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right)$$

Κατανομή Rayleigh

- ◆ Είναι προφανές ότι η κατανομή Rayleigh εφαρμόζεται σε θετικές συνεχείς μεταβλητές.

$$\text{Μέση Τιμή} = E\{r\} = \int_0^{\infty} rp(r) dr = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1.2533\sigma$$

$$\text{Μεσαία Τιμή} = r_{median} = 1.1774\sigma$$

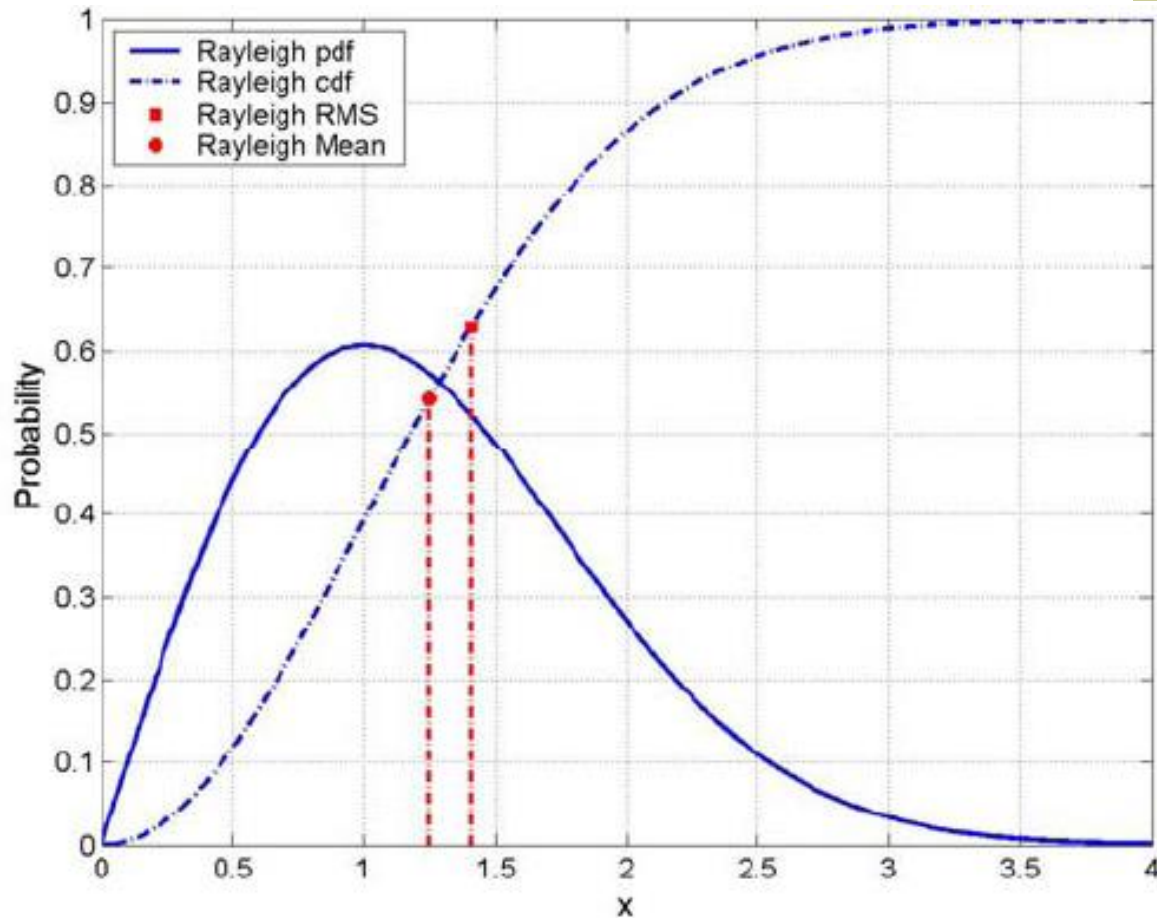
$$\text{Μέση Τετραγωνική} = E\{r^2\} = \int_0^{\infty} r^2 p(r) dr = 2\sigma^2$$

$$\text{RMS Τιμή} = \sigma\sqrt{2} = 1.4142\sigma$$

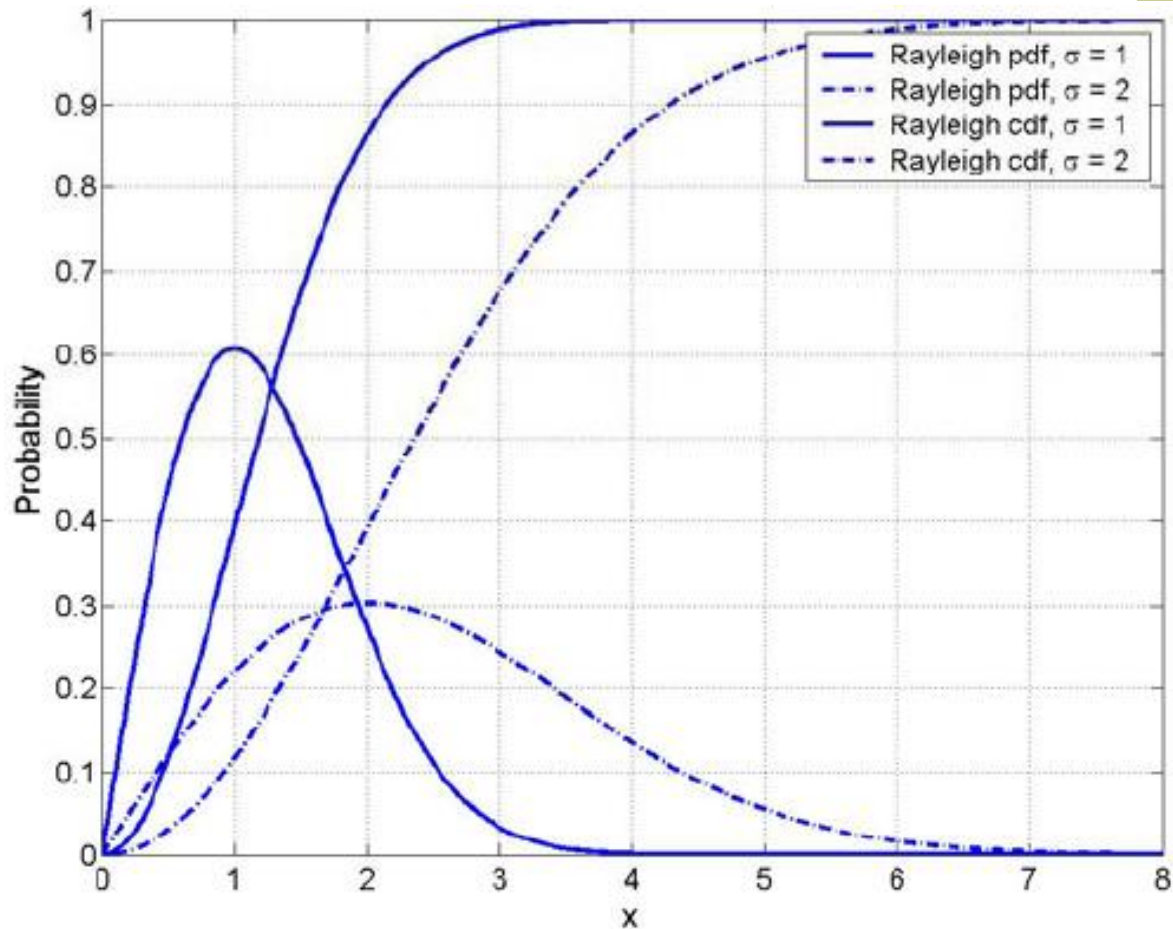
$$\text{Διασπορά} = \sigma_r^2 = E\{r^2\} - (E\{r\})^2 = 2\sigma^2 - \sigma^2 \frac{\pi}{2} = 0.4292\sigma^2$$

$$\text{Τυπική Απόκλιση} = \sigma \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}} = 0.655\sigma$$

Κατανομή Rayleigh

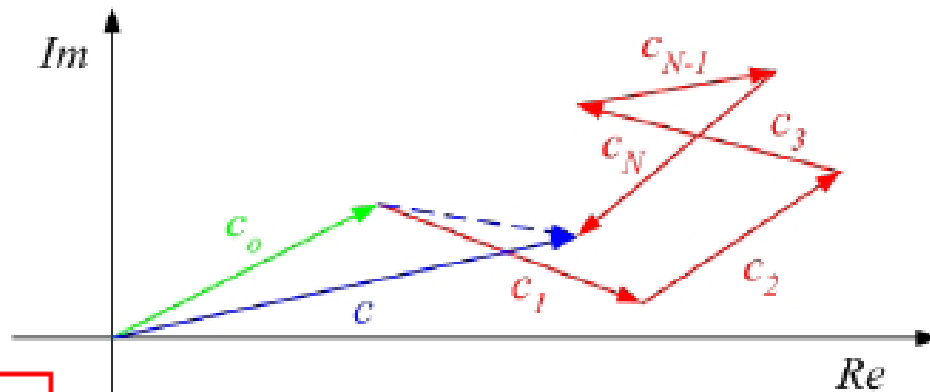


Κατανομή Rayleigh



Κατανομή Rice

- ◆ Σε περίπτωση ύπαρξης και μιας σταθερής συνιστώσας με ισχυρό πλάτος (συνήθως LOS ή μια ισχυρή ανάκλαση), οι κατανομές πλάτους και φάσης της μιγαδικής περιβάλλουσας είναι διαφορετικές.



$$c(z) = c_o + \sum_{i=1}^N c_i(z)$$

Κατανομή Rice

- ◆ Το πραγματικό και φανταστικό μέρος της $c(z)$ είναι πάλι Gaussian με την ίδια διασπορά αλλά δεν έχουν μηδενική μέση τιμή.
- ◆ Το πλάτος της μιγαδικής περιβάλλουσας ακολουθεί κατανομή Rice, της οποίας η pdf είναι.

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + |c_o|^2}{2\sigma^2}\right) I_o\left(\frac{r|c_o|}{\sigma^2}\right)$$

- ◆ Όπου

$$I_o(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{x \cos(\theta)} d\theta$$

- ◆ η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης

Κατανομή Rice

- ♦ Ο λόγος της ισχύος της απευθείας συνιστώσας προς την ισχύ των πολυδιαδρομικών συνιστωσών καλείται **Ricean Factor** και συμβολίζεται συνήθως K

$$K = \frac{|c_o|^2}{2\sigma^2}$$

$$K(dB) = 10 \log \left(\frac{|c_o|^2}{2\sigma^2} \right)$$

- ♦ Είναι προφανές ότι όταν δεν υπάρχει ισχυρή συνιστώσα τότε $K=0$, δηλαδή $K(dB) \rightarrow -\infty$ και η κατανομή εκφυλίζεται στη Rayleigh.

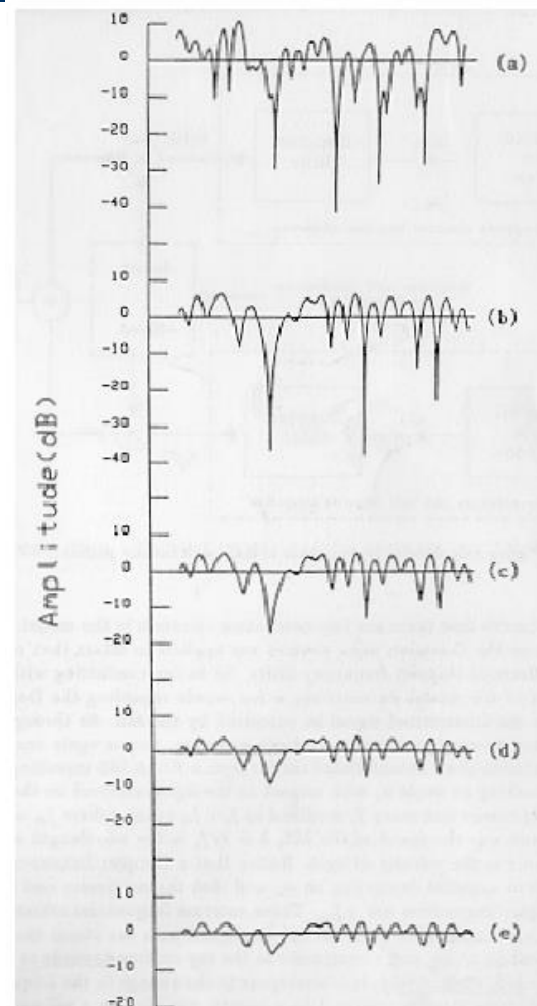
Κατανομή Rice

Ο παράγοντας K

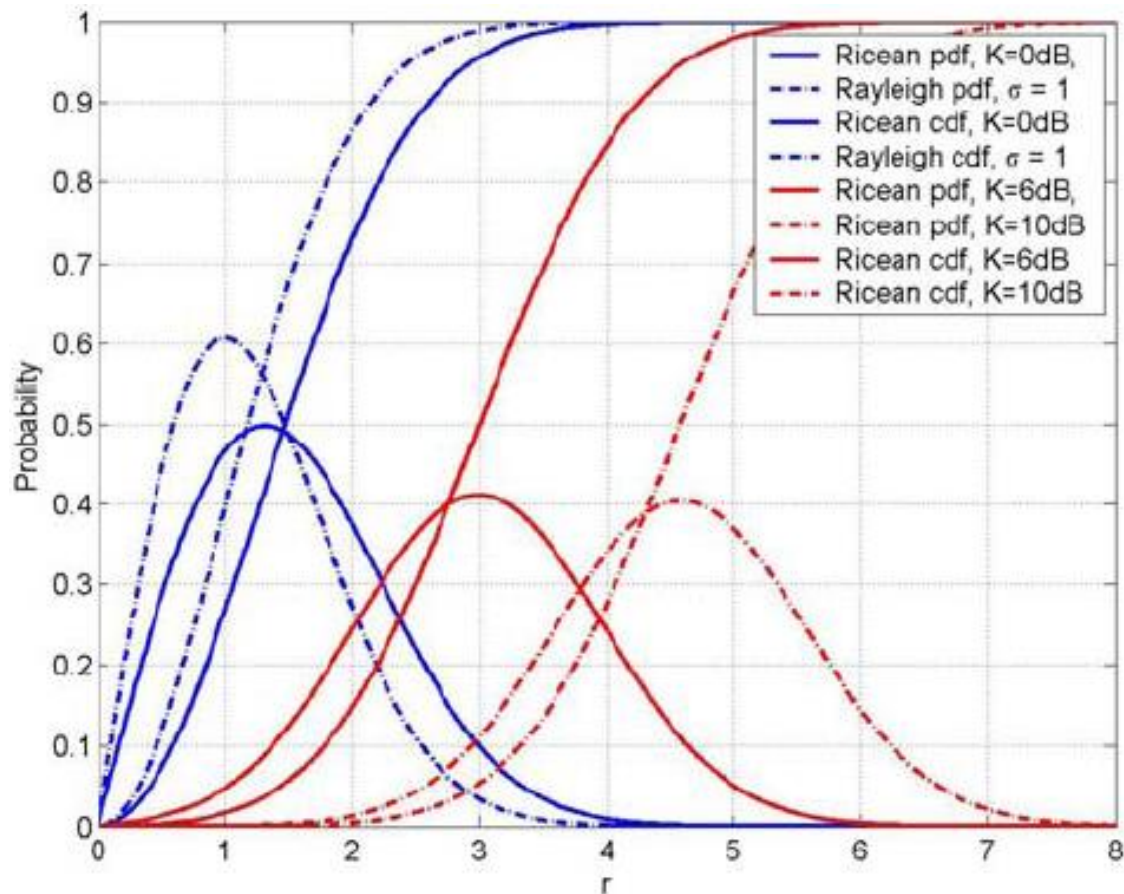
$$K = \frac{\text{power in the dominant path}}{\text{power in the scattered paths}}$$

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

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



Κατανομή Rice

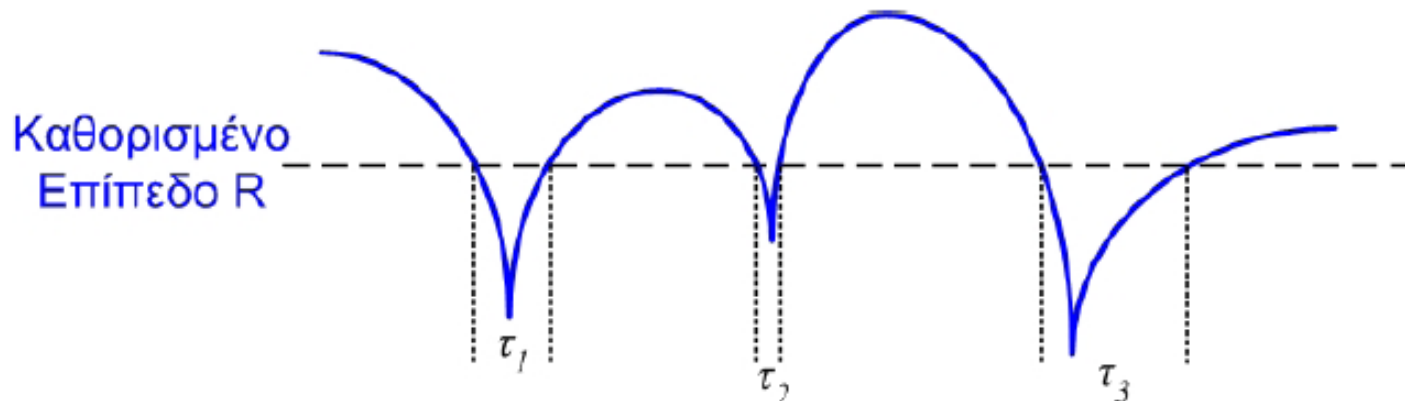


Στατιστικά Μεγέθη 2ης Τάξης

- ◆ Η κατανομή Rayleigh περιγράφει τα 1ης τάξης στατιστικά μεγέθη της περιβάλλουσας, για μικρές αποστάσεις στις οποίες η μέση τιμή θεωρείται σταθερή.
- ◆ Υπάρχουν δύο πολύ χρήσιμα μεγέθη 2ης τάξης της περιβάλλουσας, τα οποία αξίζει να αναφερθούν
- ◆ **Level Crossing Rate** (πόσο συχνά η περιβάλλουσα τέμνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι)
- ◆ **Average Fade Duration** (πόσο χρονικό διάστημα παραμένει η περιβάλλουσα κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι)

Στατιστικά Μεγέθη 2ης Τάξης

- ◆ Σε τι χρησιμεύουν τα μεγέθη αυτά
 - Επιλογή bit rate
 - Επιλογή Μήκους λέξεων
 - Επιλογή Σχήματος Κωδικοποίησης



LCR (για δεδομένο R) : Ο ρυθμός με τον οποίο η περιβάλλουσα τέμνει το επίπεδο R κατά τη θετική κατεύθυνση

AFD (για δεδομένο R) : Η μέση διάρκεια των $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$

Level Crossing Rate

- ♦ Για τον υπολογισμό του LCR απαιτείται, ο καθορισμός του επιπέδου R , η γνώση της κλίσης της περιβάλλουσας

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

- ♦ Και η από κοινού p.d.f.
- ♦ Η μέση τιμή των τμήσεων του επιπέδου R ανά sec

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

- ♦ Υπολογίζεται (Rice) ότι για ισοτροπική σκέδαση και διαλείψεις Rayleigh

$$N_R = \sqrt{\frac{\pi}{\sigma^2}} R f_{\max D} e^{-\frac{R^2}{2\sigma^2}}$$

Level Crossing Rate

◆ Όμως $\sigma\sqrt{2} = R_{rms}$

◆ Θέτω $\rho = \frac{R}{R_{rms}}$

◆ Άρα

$$N_R = \sqrt{2\pi} f_{\max D} \rho e^{-\rho^2}$$

◆ Πολλές φορές για ανεξαρτησία από την ταχύτητα διαιρούμε με $f_{\max D}$ και προκύπτει ο LCR ως μέση τιμή τμήσεων ανά μήκος κύματος.

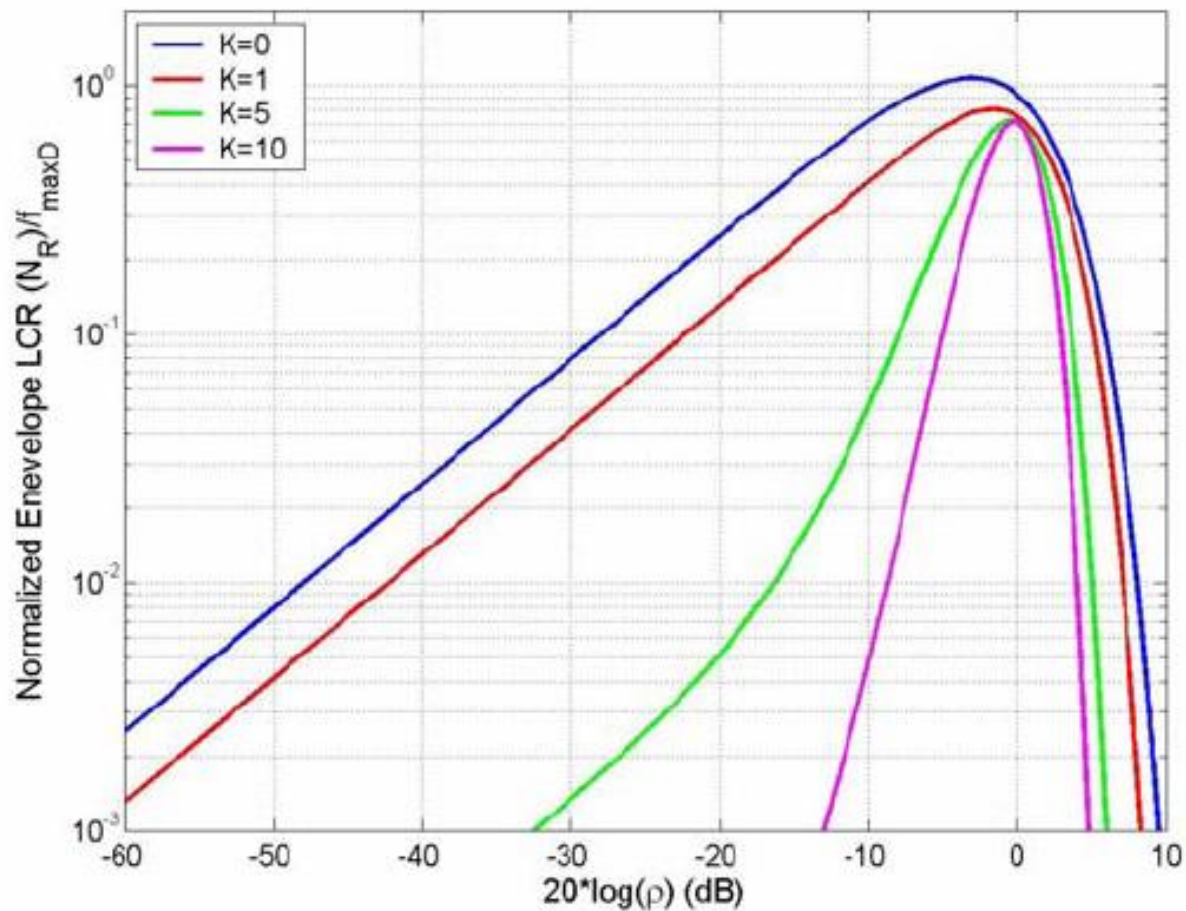
Level Crossing Rate

- ◆ Για διαλείψεις Rice προκύπτει η πιο γενική σχέση

$$N_R = \sqrt{2\pi(K+1)} f_{\max D} \rho e^{-K-(K+1)\rho^2} I_0\left(2\rho\sqrt{K(K+1)}\right)$$

- ◆ Όπου $I_0(x)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης

Level Crossing Rate



Average Fade Duration

- ◆ Θεωρούμε ένα μεγάλο διάστημα παρατήρησης T . Η μέση διάρκεια των διαλείψεων για προκαθορισμένο επίπεδο R

$$\bar{\tau} = \frac{\Pr(r \leq R)}{N_R} = \frac{\frac{1}{T} \sum_i \tau_i}{N_R}$$

- ◆ Αν θεωρήσουμε διαλείψεις Rice

$$\Pr(r \leq R) = 1 - Q\left(\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1)\rho^2}\right)$$

- ◆ Αν θεωρήσουμε διαλείψεις Rayleigh

$$\Pr(r \leq R) = 1 - e^{-\rho^2}$$

Average Fade Duration

- ◆ Άρα για Rice

$$\bar{\tau} = \frac{1 - Q\left(\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1)}\rho\right)}{\sqrt{2\pi(K+1)}f_{\max D}\rho e^{-K-(K+1)\rho^2} I_0\left(2\rho\sqrt{K(K+1)}\right)}$$

- ◆ Ενώ για Rayleigh

$$\bar{\tau} = \frac{e^{\rho^2} - 1}{\sqrt{2\pi}f_{\max D}\rho}$$

Average Fade Duration

