



Μάθημα Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες

Το περιβάλλον των Τηλεπικοινωνιών
Βασικές έννοιες - Μάθημα 3^ο- 4^ο – 5^ο-6^ο

ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Τομέας Επικοινωνιών και Επεξεργασίας Σήματος

Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών



Περιεχόμενα Ενότητας

- Η έννοια της πληροφορίας
- Σήμα πληροφορίας
- Ψηφιακό και αναλογικό σήμα
- Φασματικό περιεχόμενο των σημάτων πληροφορίας
 - Ανάλυση Fourier
 - Η έννοια του εύρους ζώνης
- Κανάλι επικοινωνίας και Θόρυβος
 - Η μονάδα μέτρησης dB
 - SNR και BER
- Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό
 - Θεώρημα δειματοληψίας - Nyquist



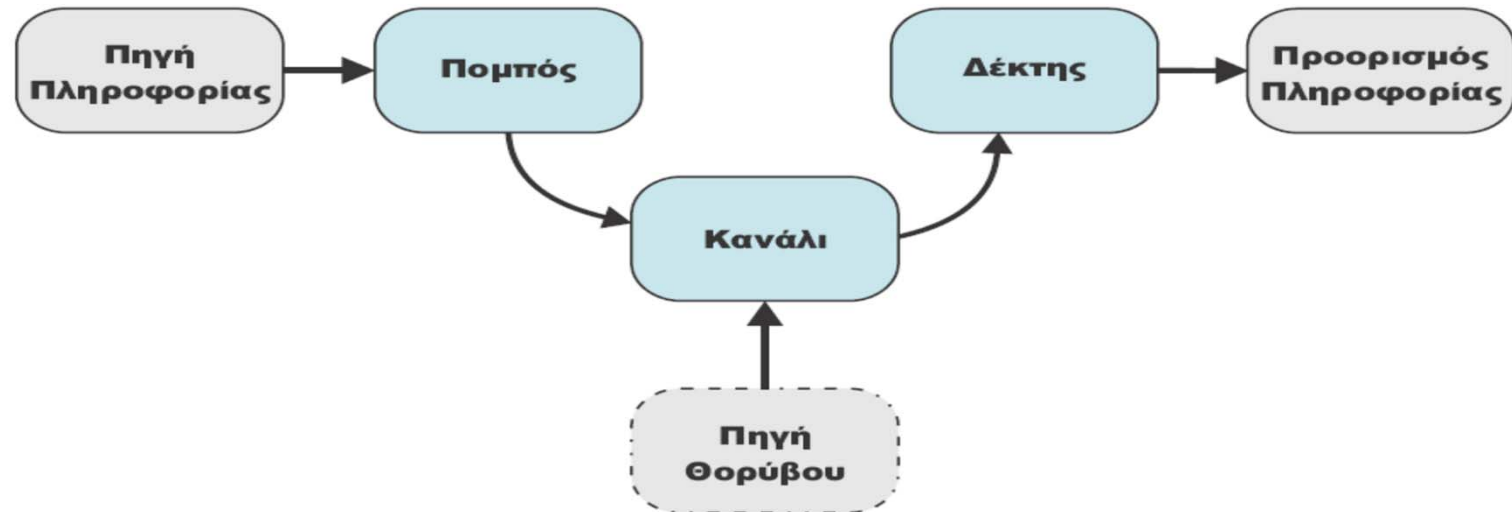
Επικοινωνία και Πληροφορία

- Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα σχεδιάζονται για να μεταφέρουν πληροφορία
- Τι είναι πληροφορία;
 - Η ποιοτική περιγραφή (γνώση για κάποιο θέμα) δεν είναι αρκετή
 - Απαιτείται ποσοτική περιγραφή
 - Η πηγή πληροφορίας παράγει εξόδους που δεν είναι γνωστές στον δέκτη εκ των προτέρων
 - Εάν μπορούσαμε να τις προβλέψουμε δεν θα υπήρχε λόγος μετάδοσης
- **C. E. Shannon-W. Weaver: «Επικοινωνία είναι όλες εκείνες οι διαδικασίες που εμπλέκονται στη μεταφορά της πληροφορίας από τον αποστολέα στον παραλήπτη...»**



Το μοντέλο επικοινωνίας C. E. Shannon-W. Weaver

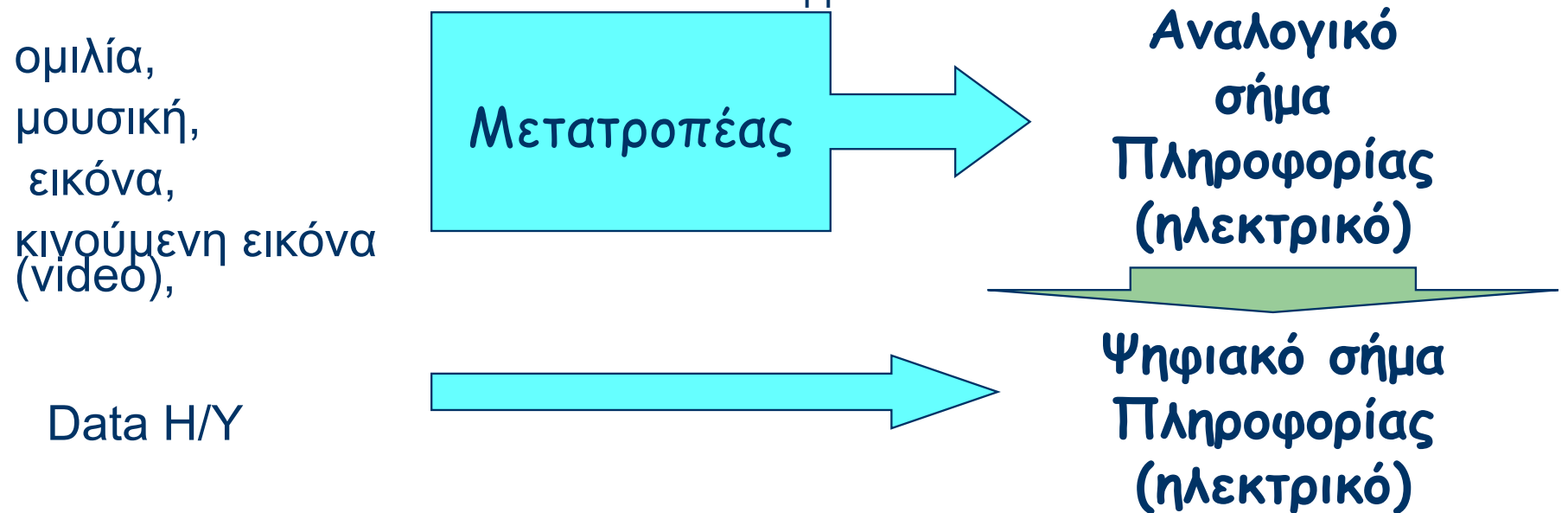
- ❑ Εισάγει τις έννοιες της πηγής πληροφορίας (information source), του μηνύματος (message), του πομπού (transmitter), του δέκτη (receiver), του καναλιού (channel), της κωδικοποίησης (coding), της πιθανότητας σφάλματος (probability of error), της χωρητικότητας καναλιού (channel capacity)
- Το μοντέλο αυτό έγινε ευρέως αποδεκτό και από διάφορες άλλες επιστήμες εκτός από τις τηλεπικοινωνίες, όπως η παιδαγωγική, η ψυχολογία, η κοινωνιολογία, κ.λ.π.





Η διαδικασία της Επικοινωνίας...στις Τηλεπικοινωνίες

- Δημιουργία **Σήματος**- μήνυμα πληροφορίας $S(t)$:
 - ομιλία, μουσική, εικόνα, κινούμενη εικόνα (video), data
- Κατάλληλη Περιγραφή $S(t)$: Μετατροπή σε Ηλεκτρικό Αναπαράσταση με τη βοήθεια συνόλου συμβόλων





Γενικό Μοντέλο Τηλεπικοινωνιακού Συστήματος



- Η πηγή παράγει το προς μετάδοση σήμα
- Ο μετατροπέας μετατρέπει το σήμα εισόδου σε μορφή κατάλληλη για τη μετάδοση από το κανάλι (ηλεκτρικό σήμα)
- Ο πομπός διαμορφώνει το ηλεκτρικό σήμα εισόδου (Αναλογικό σήμα) ή το μετατρέπει σε κατάλληλα διακριτά σύμβολα (ψηφιακό σήμα), τα διαμορφώνει και τα στέλνει στο κανάλι
- Το κανάλι εισάγει παραμόρφωση, θόρυβο και παρεμβολή
- Ο δέκτης αποδιαμορφώνει και επεξεργάζεται το ληφθέν σήμα
- Ο μετατροπέας εξόδου μετατρέπει την έξοδο του δέκτη στην αρχική μορφή της πληροφορίας



Ψηφιακές / Αναλογικές πηγές Πληροφορίας

- Ψηφιακή Πηγή: Η ψηφιακή πηγή πληροφορίας παράγει **πεπερασμένο πλήθος** πιθανών συμβόλων
- Αναλογική Πηγή: Η αναλογική πηγή πληροφορίας παράγει μηνύματα, με **συνεχές πεδίο τιμών**



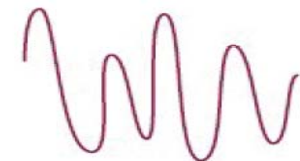
Ψηφιακή πηγή



Ψηφιακή πηγή



Αναλογική πηγή



Αναλογική πηγή

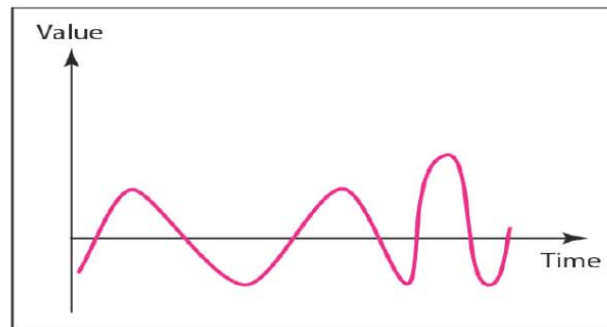


Πηγή Πληροφορίας

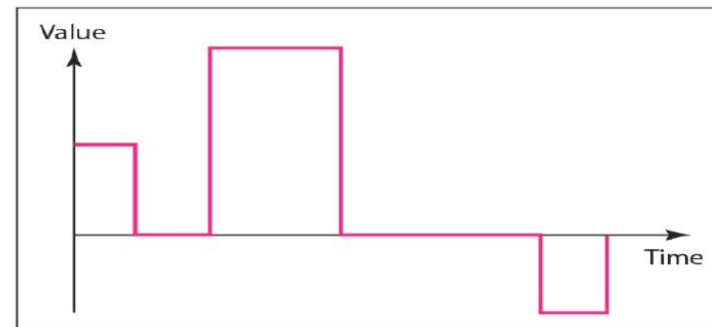
- Αναλογική
 - μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακή
 - δειγματοληψία (Nyquist)
 - κβαντιση
- Ψηφιακή
 - σύμβολα από πεπερασμένο αλφάβητο
 - μετατροπή σε δυαδική ή Μιαδική μορφή
 - πληροφορία συμβόλου
 - εντροπία: η μέση πληροφορία των συμβόλων της πηγής

Αναλογική Πηγή Πληροφορίας → σήμα συνεχούς χρόνου
Διακριτή - ψηφιακή Πηγή Πληροφορίας → Σύνολο διακριτών συμβόλων - μηνυμάτων

- Γενικά η πληροφορία αποτυπώνεται και μεταφέρεται με την βοήθεια των σημάτων σε ηλεκτρική μορφή (ηλεκτρική Τάση ή ρεύμα)
- Ως σήμα ορίζουμε την οποιαδήποτε χρονική συνάρτηση ενός φυσικού μέγεθους. Έτσι μπορεί να έχουμε σήματα τάσης, $V=V(t)$, σήματα ρεύματος $I=I(t)$ και σήματα ισχύος $P=P(t)$
- Ένα αναλογικό σήμα $x(t)$ είναι ένα **συνεχές** σήμα το οποίο μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή μέσα σε ένα πεδίο τιμών $[x_{min}, x_{max}]$ για κάθε χρονική στιγμή ενός χρονικού διαστήματος.
- Ένα ψηφιακό σήμα $y(t)$ είναι ένα σήμα το οποίο επιτρέπεται να πάρει **μόνχα συγκεκριμένες τιμές x_i μέσα σε ένα πεδίο τιμών $[x_{min}, x_{max}]$ σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές**



a. Analog signal



b. Digital signal



Η ποσοτικοποίηση της Πληροφορίας

- Πληροφοριακό περιεχόμενο I ενός συμβόλου m_i
- Η πηγή εκπέμπει i σύμβολα m_i με πιθανότητα p_i και $i=1,2,..q$

$$\sum_{i=1}^q p_i = 1$$

$$I(m_k) > I(m_j) \Leftrightarrow p_k < p_j$$

$$I(m_k) \rightarrow 0 \Leftrightarrow p_k \rightarrow 1$$

$$I(m_k) \geq 0 \Leftrightarrow 0 \leq p_k \leq 1$$

$$I(m_k \wedge m_j) = I(m_k) + I(m_j), \quad m_k \text{ και } m_j \text{ ανεξάρτητα}$$



Μέτρο της Πληροφορίας

- Η συνάρτηση που ικανοποιεί τις προηγούμενες συνθήκες είναι:

$$I(m_k) = \log(1 / p_k)$$

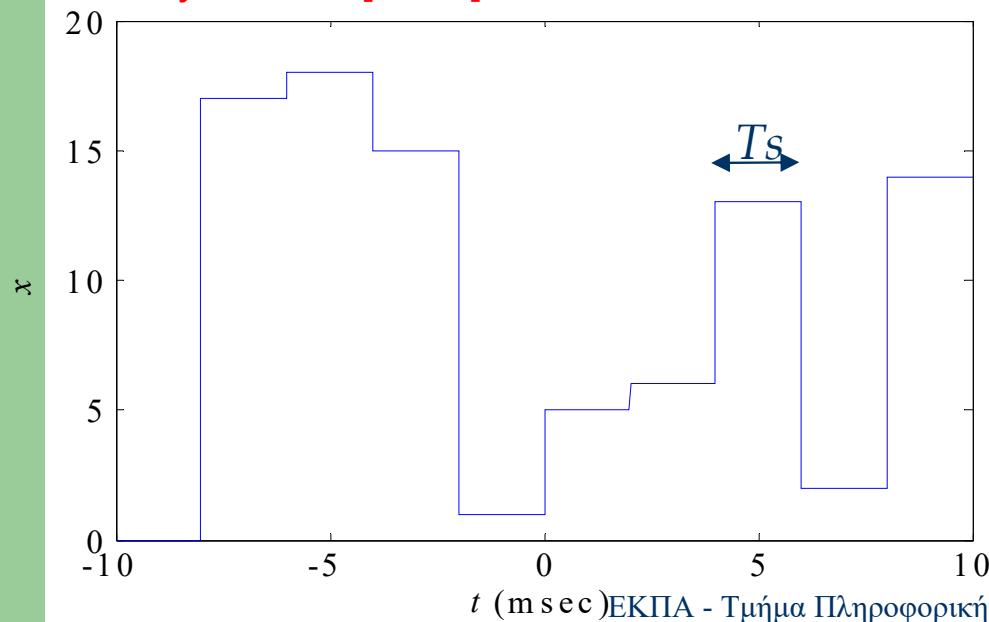
- Για να αναπαραστήσω μια πληροφορία χρειαζόμαστε **τουλάχιστον 2 σύμβολα**
- Μονάδα μέτρησης της πληροφορίας: *bit* ($i=2$)

$$I(m_1) = I(m_2) = -\log_2(p_1) = -\log_2(p_2) = \log_2 2 = 1 \text{ bit}$$



Ρυθμός Μετάδοσης

- Τα ψηφιακά σήματα είναι διακριτού χρόνου: Δηλαδή αλλάζουν τιμές σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές t_i που συνήθως απέχουν κατά Δt .
- Οι τιμές $x(t_i)$ καθορίζονται από μία σειρά συμβόλων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα τυχαίο σήμα που παράγεται από 10 διαφορετικά σύμβολα (από το 0 ως το 19).
- Η διάρκεια T_s καθορίζει και την ταχύτητα που αποτυπώνονται τα σύμβολα στο σήμα.
- Ο ρυθμός σηματοδοσίας R_s καθορίζεται από το αντίστροφο του T_s , δηλαδή $R_s=1/T_s$ και μετριέται σε symbols/s [baud]



- Στην πιο απλή περίπτωση έχουμε δύο σύμβολα 0 και 1 (bits)
- Ο ρυθμός μετάδοσης R_s τότε μετριέται σε bit/s ή bps
- Στα συστήματα επικοινωνίας μας ενδιαφέρει κυρίως με πόσο μεγάλο ρυθμό σηματοδοσίας μπορούμε να μεταδώσουμε τα σύμβολα μας και σε ποια απόσταση.



Μέση Πληροφορία

- Μέση πληροφορία – Εντροπία H
- πηγή N συμβόλων εκπέμπει πληροφορία ανά σύμβολο: H [bit/symbol]:

$$H = \frac{I_{ολικη}}{N} = \sum_{i=1}^N p_i \log_2 (1 / p_i) \text{ bits / symbol}$$

- Παρατήρηση: $H_{\max} = \log_2 N \text{ bits / symbol}$
- Ρυθμός μετάδοσης $R_b = r_s H \text{ bits/sec [bps]}$
- Όπου r_s ο Ρυθμός μετάδοσης συμβόλων [baud]

παράδειγμα

Να βρεθεί η εντροπία μιας πηγής που εκπέμπει ένα από τα τρία σύμβολα A, B και C σε στατιστικά ανεξάρτητη ακολουθία με πιθανότητα αντίστοιχα 1/2, 1/4 και 1/4.

Απάντηση:

$$H = \sum_{i=1}^N p_i \log_2(1/p_i) = \frac{1}{2} \log_2 2 + \frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{1}{4} \log_2 4 \text{ [bits / symbol]}$$



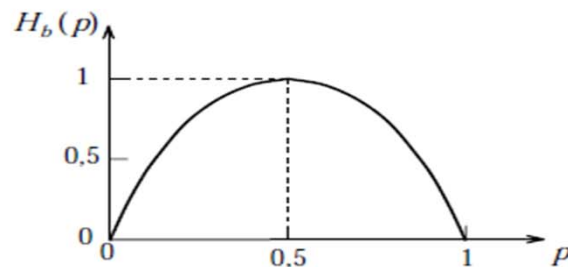
$$H = 1,5 \frac{\text{bits}}{\text{symbol}}$$

Στη δυαδική πηγή χωρίς μνήμη με πιθανότητες p και $1 - p$, αντίστοιχα έχουμε

$$H = -p \log_2(p) - (1-p) \log_2(1-p)$$

Η συνάρτηση αυτή, που συμβολίζεται με $H_b(p)$, είναι γνωστή ως *η συνάρτηση δυαδικής εντροπίας*.

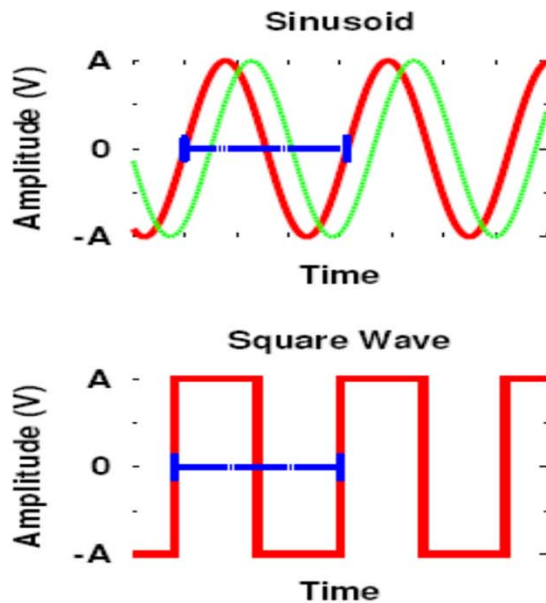
Η συνάρτηση δυαδικής εντροπίας μεγιστοποιείται όταν $p = 0,5$. Η μέγιστη τιμή της είναι $H_b(0,5) = 1$, δηλαδή, το αποτέλεσμα μπορεί να μεταφερθεί με 1 bit.



Η συνάρτηση δυαδικής εντροπίας



Περιοδικά σήματα



A **periodic** signal repeats over time

T is the **period** (s)

f is the **frequency** (Hz \equiv cycles per s) of the signal

λ (*lambda*) is the **wavelength** (m) of the signal; the distance occupied by one period

ϕ (*phi*) is the signal **phase**

v is the velocity of the signal propagation (ms^{-1})

c is the speed of light in a vacuum ($c = 3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$)

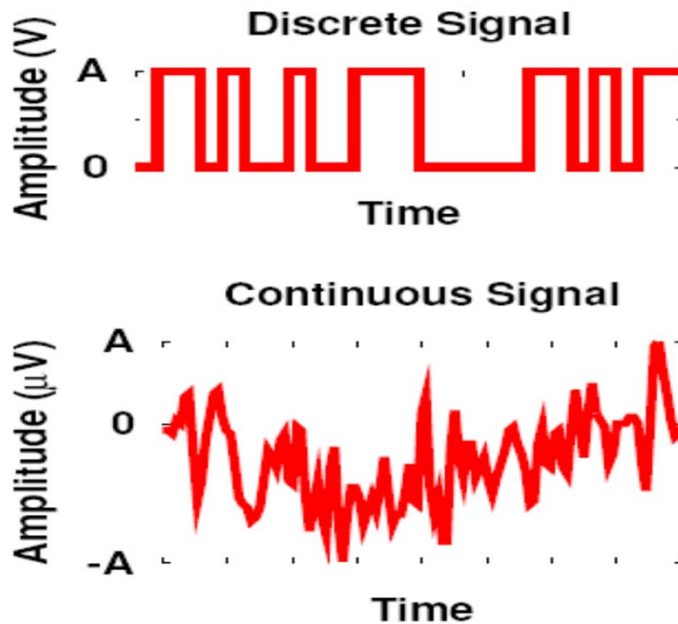
$$\lambda = vT \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

$$\lambda f = v, \quad v \leq c \quad (3)$$



Μη περιοδικά τυχαία σήματα



- **Discrete Signal** maintains a constant level, then changes to another constant level
- **Continuous Signal** varies over time with no discrete plateau in amplitude



Ισχύς και Ενέργεια Σημάτων

- Στιγμιαία ισχύς ενός σήματος $x(t)$ [w] $P(t) = x^2(t)$

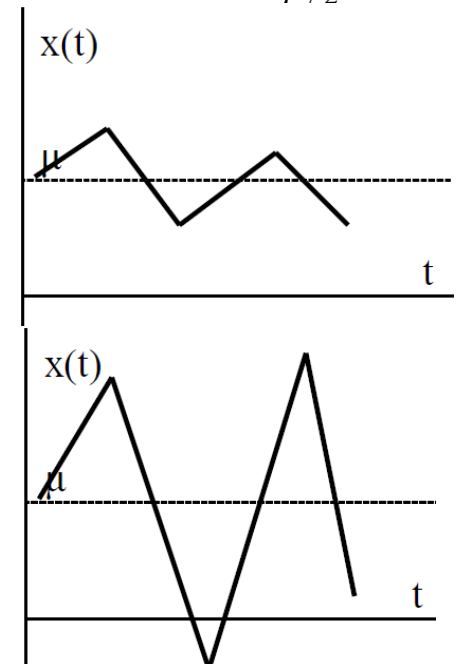
- Μέση ισχύς ενός σήματος $x(t)$ [w] $P_{av} = \mu = \langle x(t)^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt$

- Ενέργεια του σήματος $x(t)$ [J] $E = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt$

- Η τυπική απόκλιση σ εκφράζει τη μέση διαφοροποίηση ενός σήματος από τη μέση τιμή του:

$$\sigma^2 = \langle x^2(t) \rangle - \mu^2 \equiv \langle x^2(t) \rangle - \langle x(t) \rangle^2$$

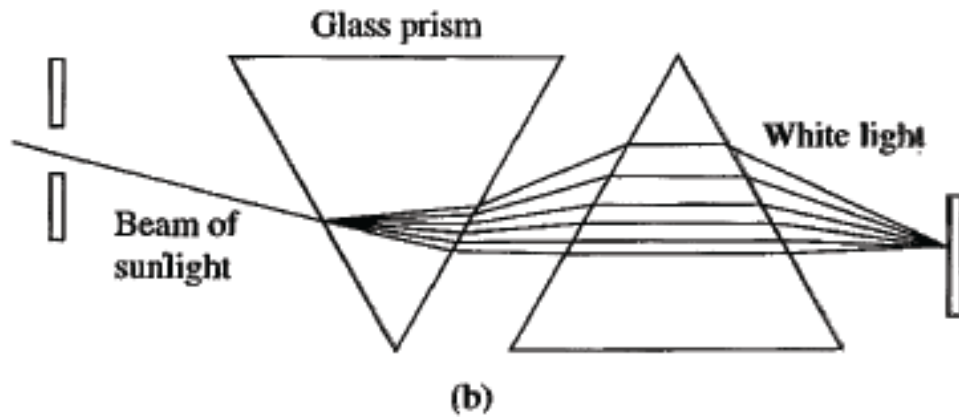
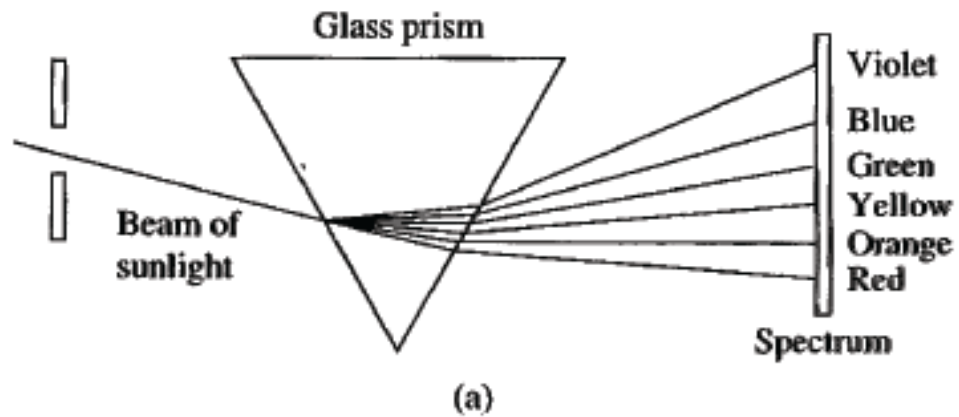
- **Παρατήρηση:** στην περίπτωση σημάτων με μηδενική μέση τιμή ($\mu = 0$), η μέση ισχύς P (άρα και η μέση τετραγωνική τιμή $\langle x^2(t) \rangle$ του σήματος $x(t)$) συμπίπτουν με το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης (σ^2): $P_{ave} = \sigma^2$



$$\mu = \langle x(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt$$



Frequency Analysis of Continuous-Time Signals

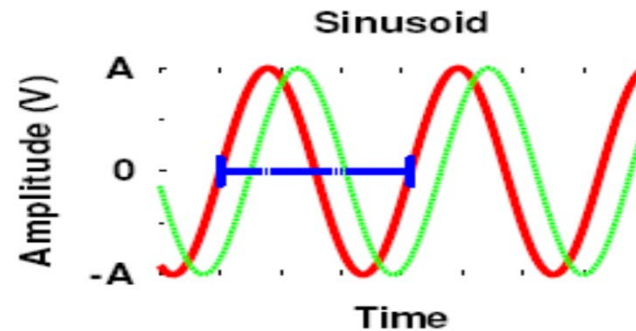


(a) Analysis and
(b) synthesis of the white light (sunlight)
using glass prisms.



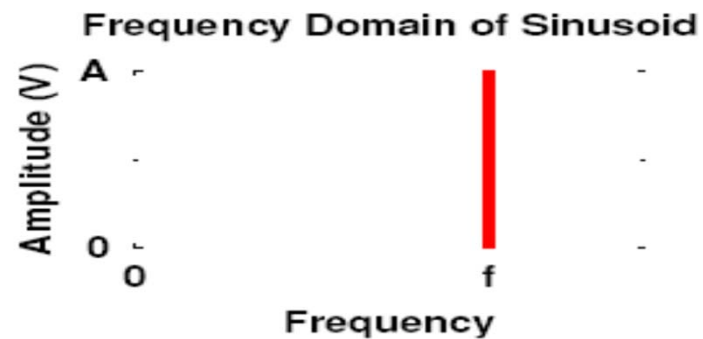
Περιγραφή σημάτων

Πεδίο χρόνου



$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$$

Πεδίο φασματικό
(συχνότητας)





Ανάλυση Fourier - περιοδικά σήματα

- Οποιοδήποτε «περιοδικό σήμα» μπορεί να αναπαρασταθεί ως:

$$h(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(2\pi n f_0 t) + B_n \sin(2\pi n f_0 t)]$$

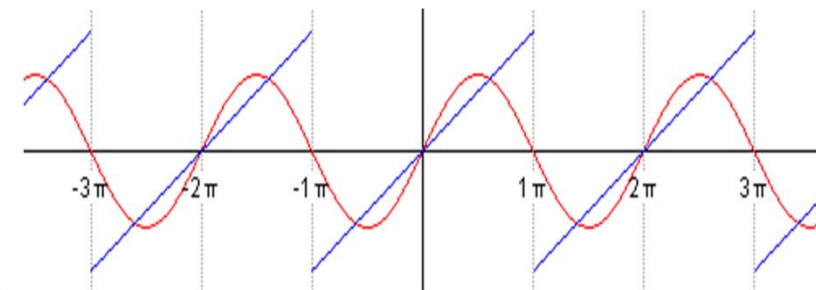
f_0 η θεμελιώδης συχνότητα

$$f_0 \equiv 1/T$$

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T h(t) dt$$

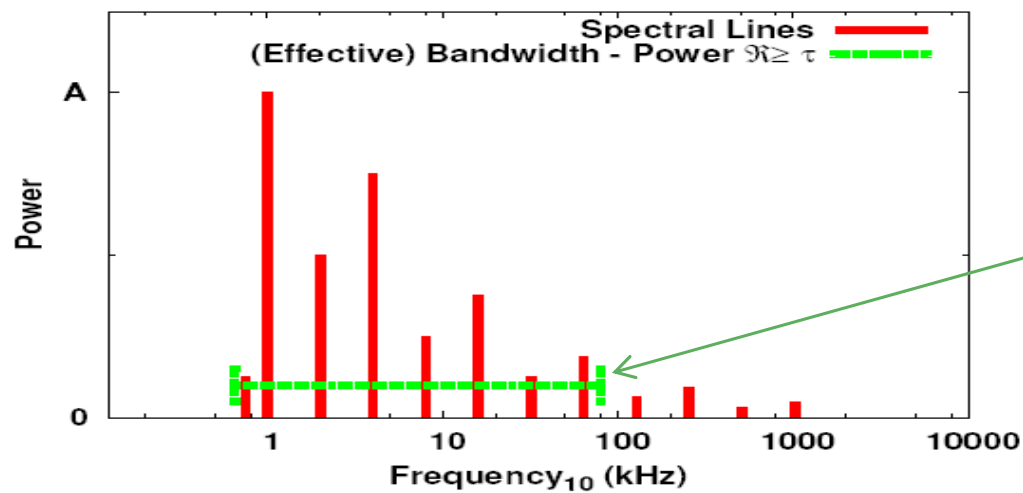
$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T h(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T h(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt$$



Εύρος ζώνης BW

- BW είναι το διάστημα των συχνοτήτων, που **πρακτικά** περιέχονται στο σήμα



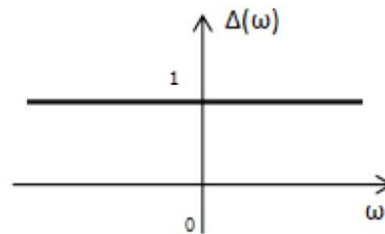
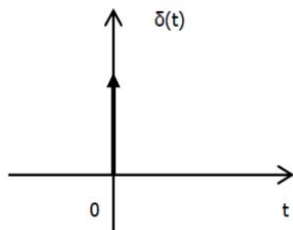
Ανάλυση Fourier- μη περιοδικά σήματα

- Δοθέντος ενός σήματος $S(t)$ στο πεδίο του χρόνου, οι φασματικές του συνιστώσες $S(f)$ προκύπτουν ως :

$$S(f) = \int s(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

Και αντιστρόφως:

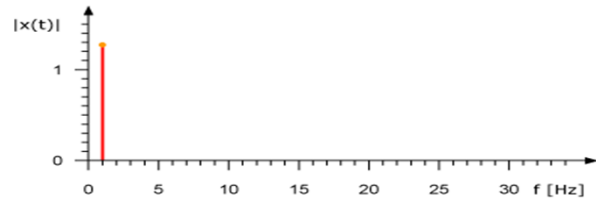
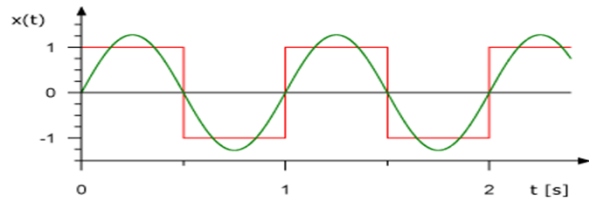
$$s(t) = \int S(f) \cdot e^{j2\pi ft} df$$



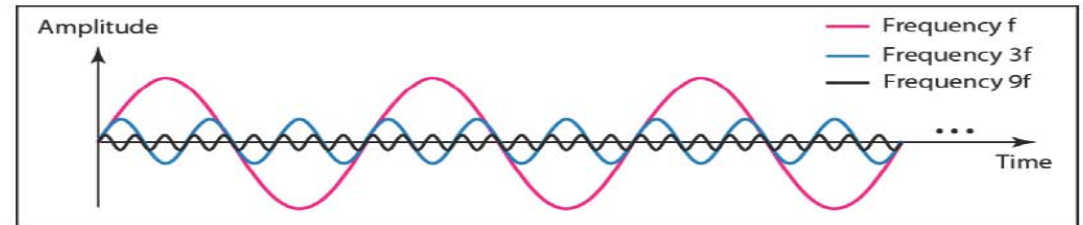
Στο φάσμα $\Delta(\omega)$ υπάρχουν άπειρες συχνότητες με μοναδιαίο πλάτος και μηδενική φάση



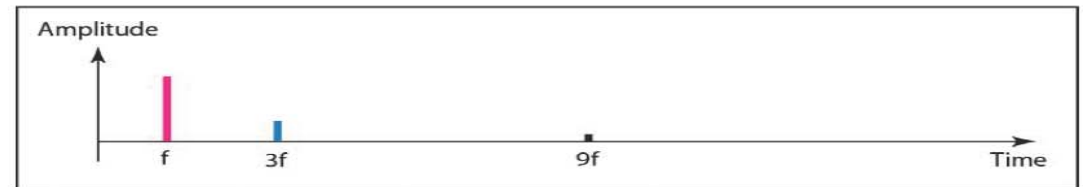
Αναλογικό σήμα και MF



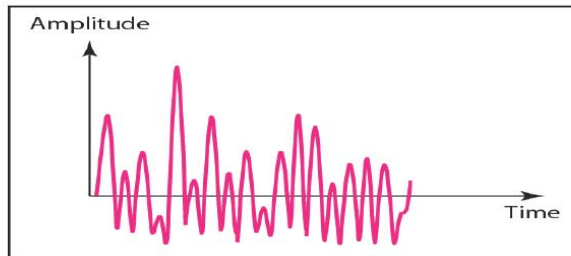
Τα περιοδικά σήματα έχουν διακριτό φάσμα



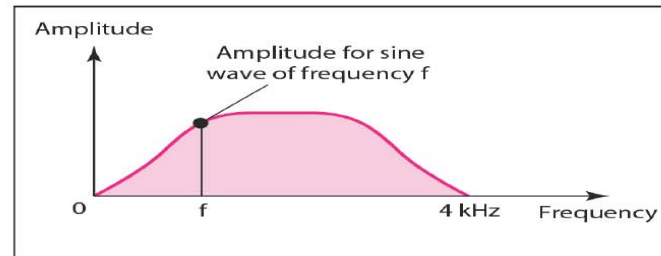
a. Time-domain decomposition of a composite signal



b. Frequency-domain decomposition of the composite signal



a. Time domain

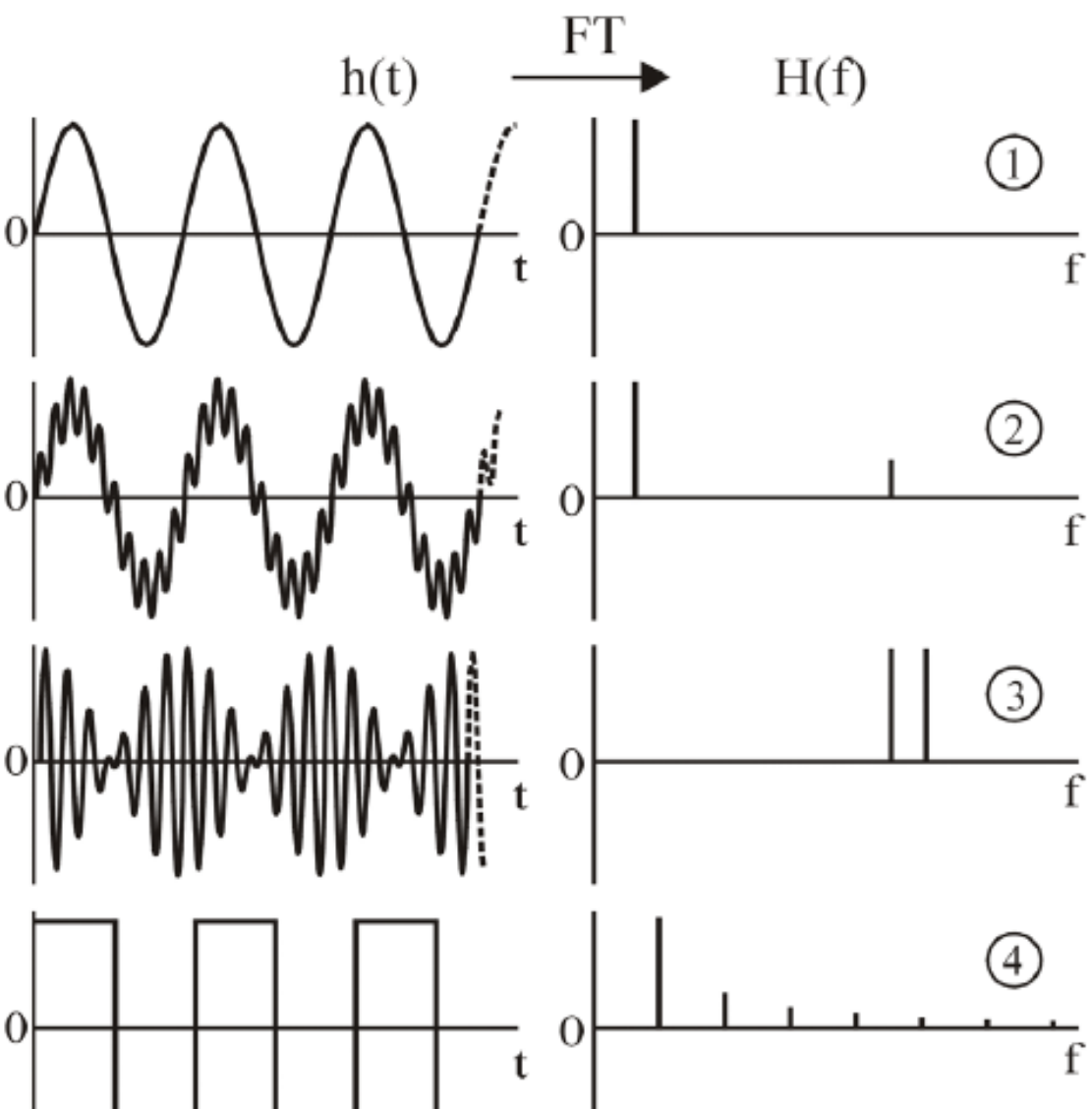


b. Frequency domain

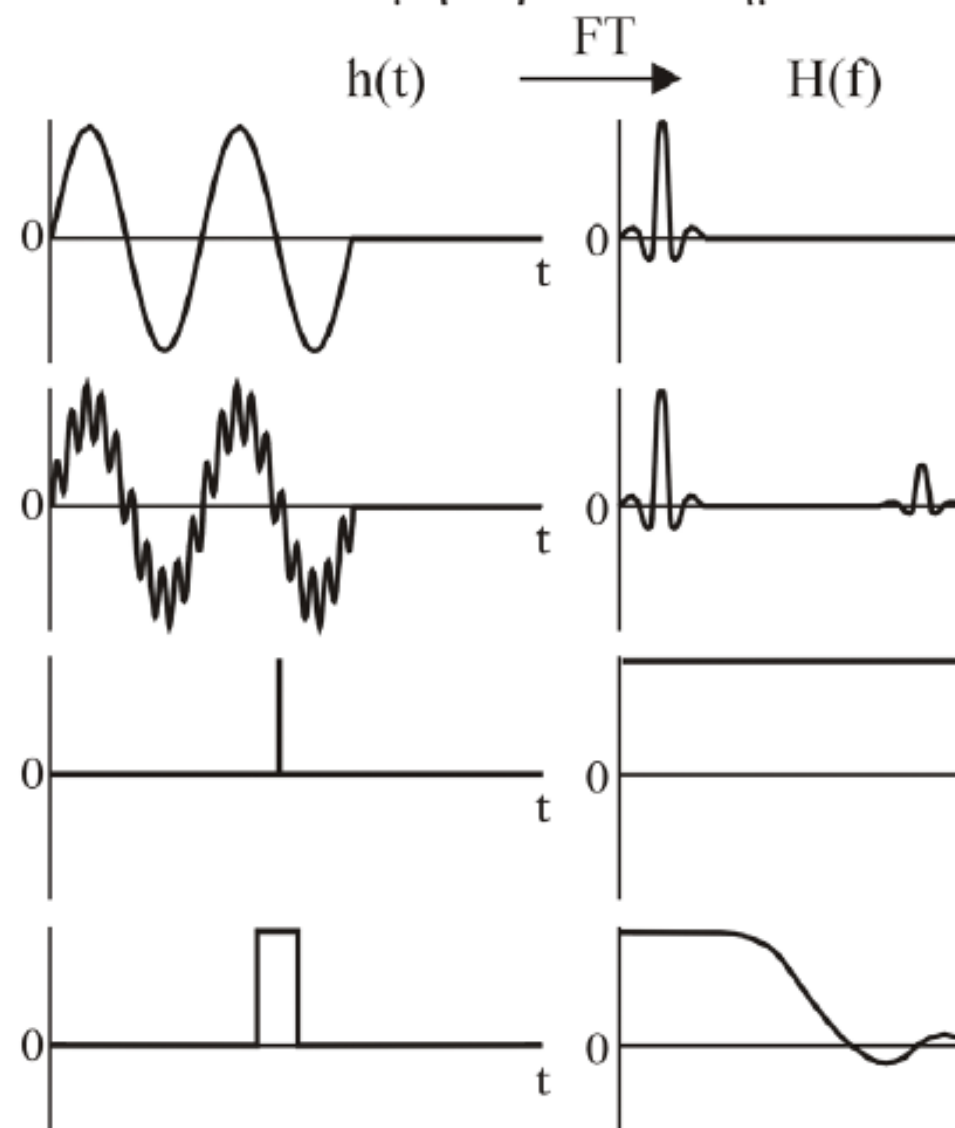
Τα μη περιοδικά σήματα έχουν συνεχές φάσμα

ΕΚΠΑ - Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών

Περιοδικά σήματα άπειρης διάρκειας

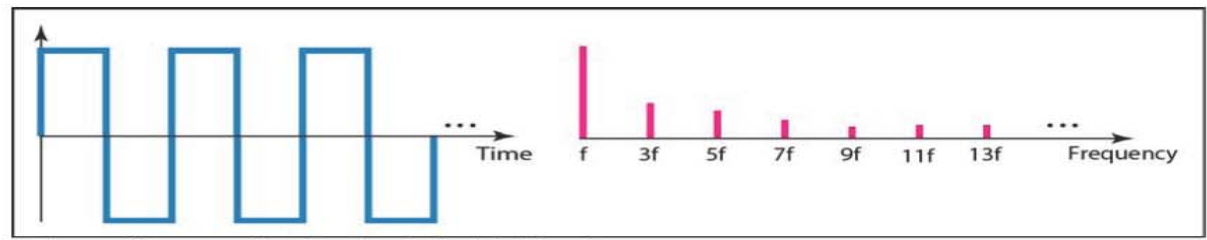
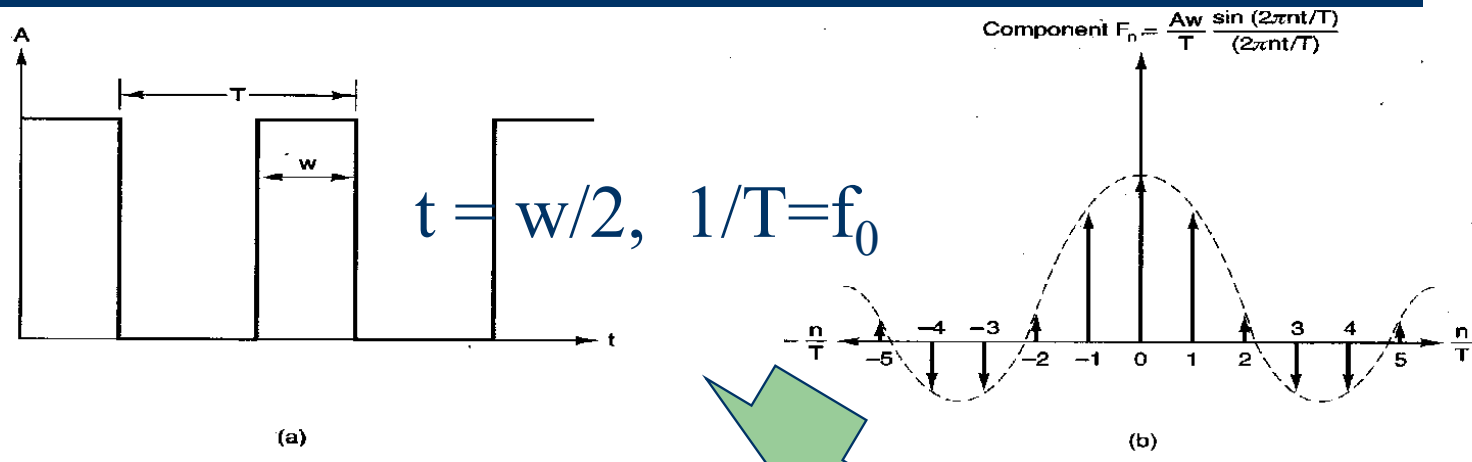


Περιοδικά σήματα πεπερασμένης διάρκειας και μη περιοδικά σήματα

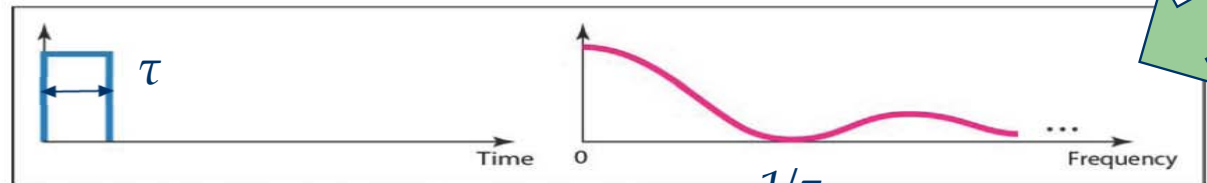




Ψηφιακό σήμα και MF



a. Time and frequency domains of periodic digital signal

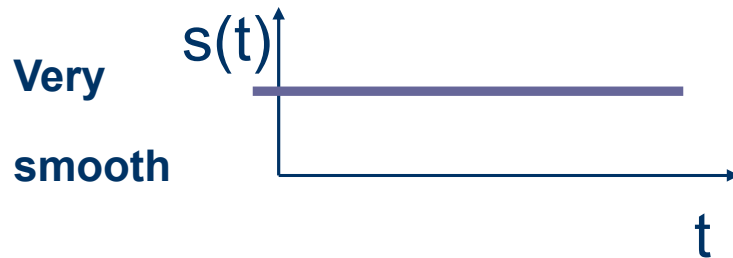


b. Time and frequency domains of nonperiodic digital signal

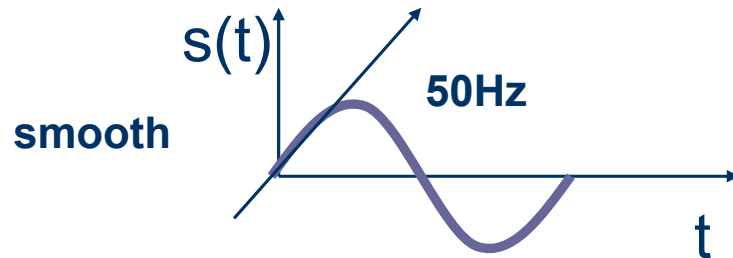
Ένα ψηφιακό σήμα είναι ισοδύναμο με ένα αναλογικό σήμα με άπειρο εύρος ζώνης
(θεωρητικά)

Εφαρμογές II

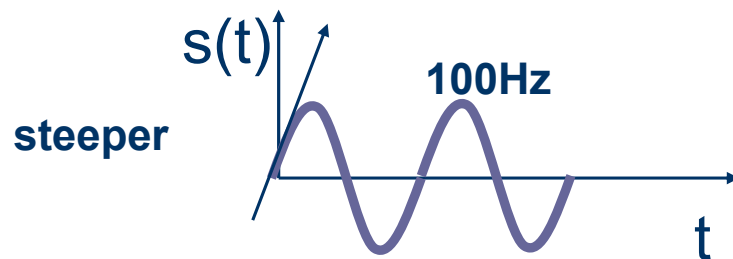
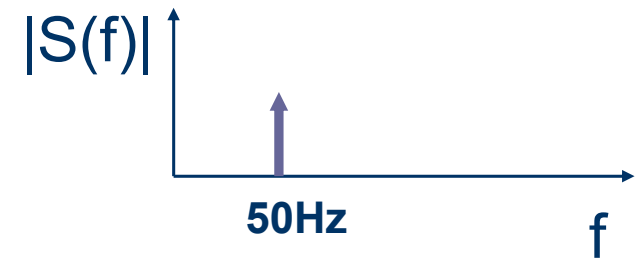
- (2) Smoothness:



FT



FT



FT

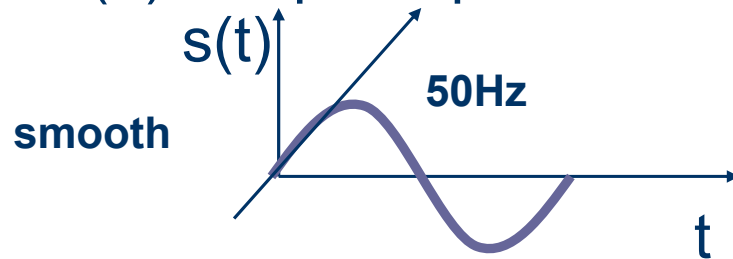


(περισσότερες

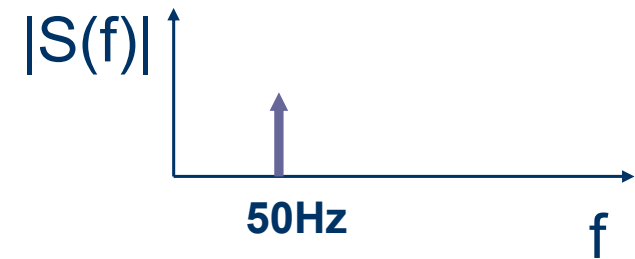
εναλλαγές/sec ΕΚΠΑ - Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών

Εφαρμογές III

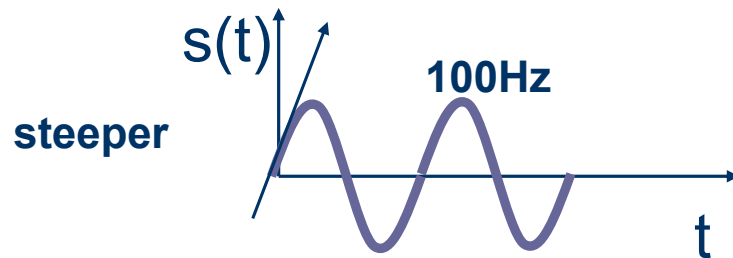
(3) Υπέρθεση



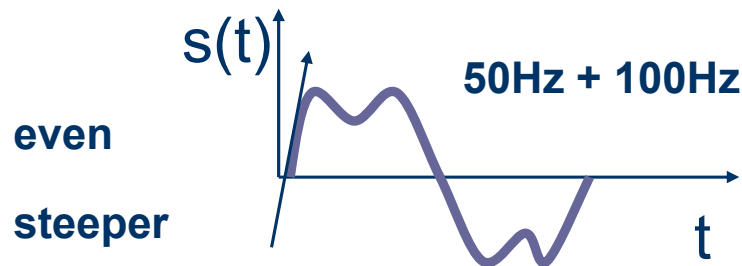
FT



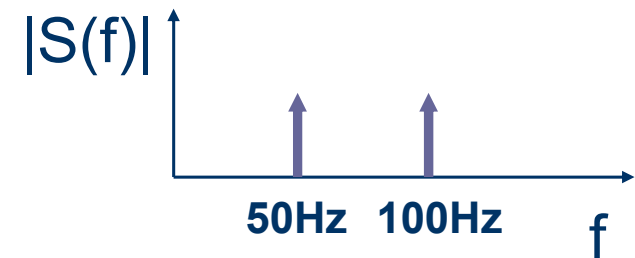
+



FT

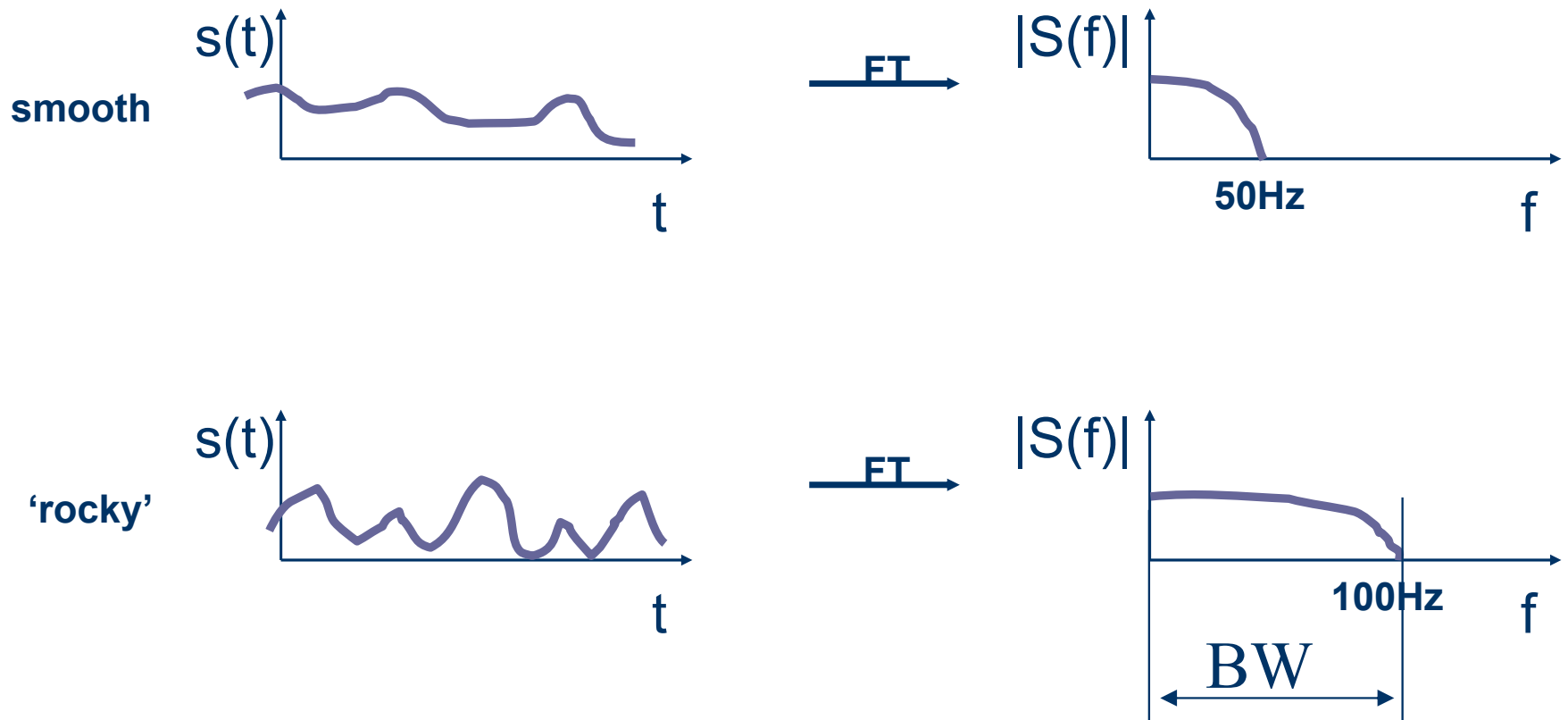


FT



Εφαρμογές IV

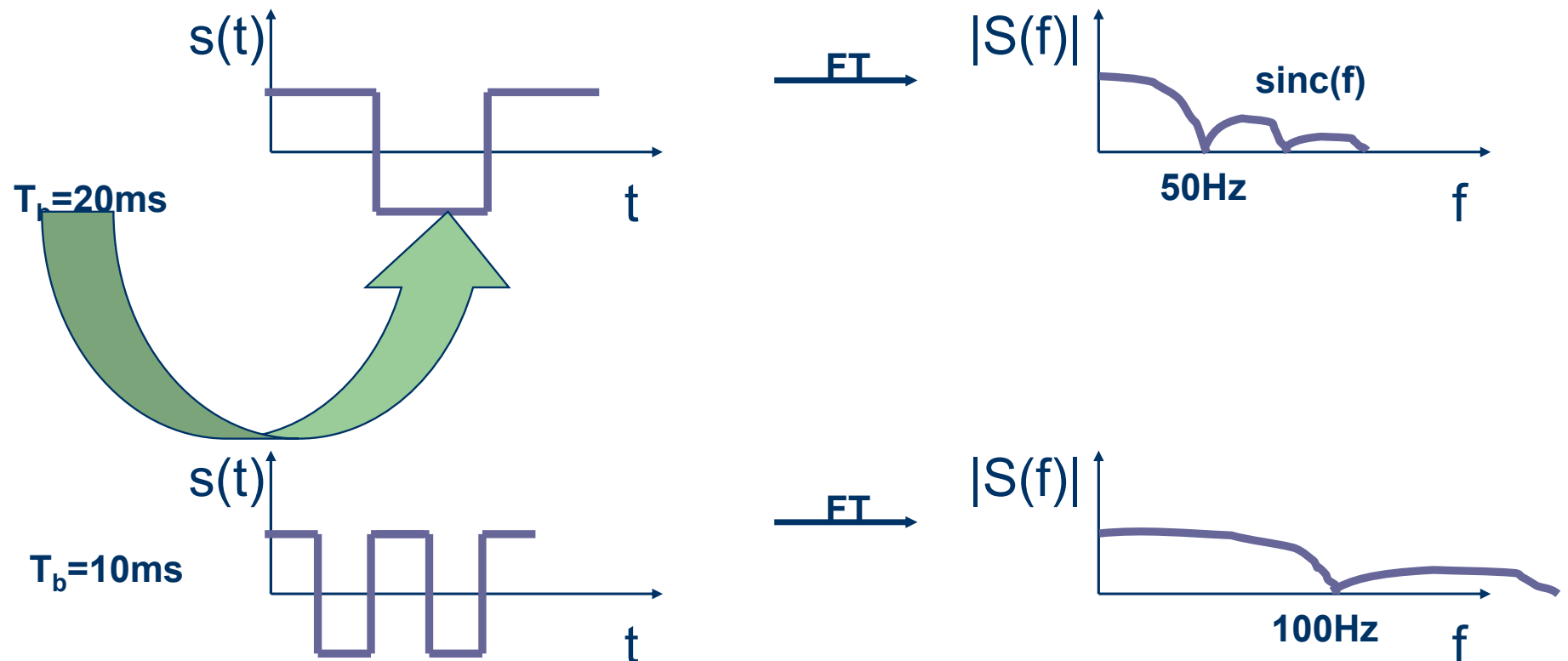
- (2) Τυχαίο αναλογικό σήμα:





Ψηφιακό σήμα και MF

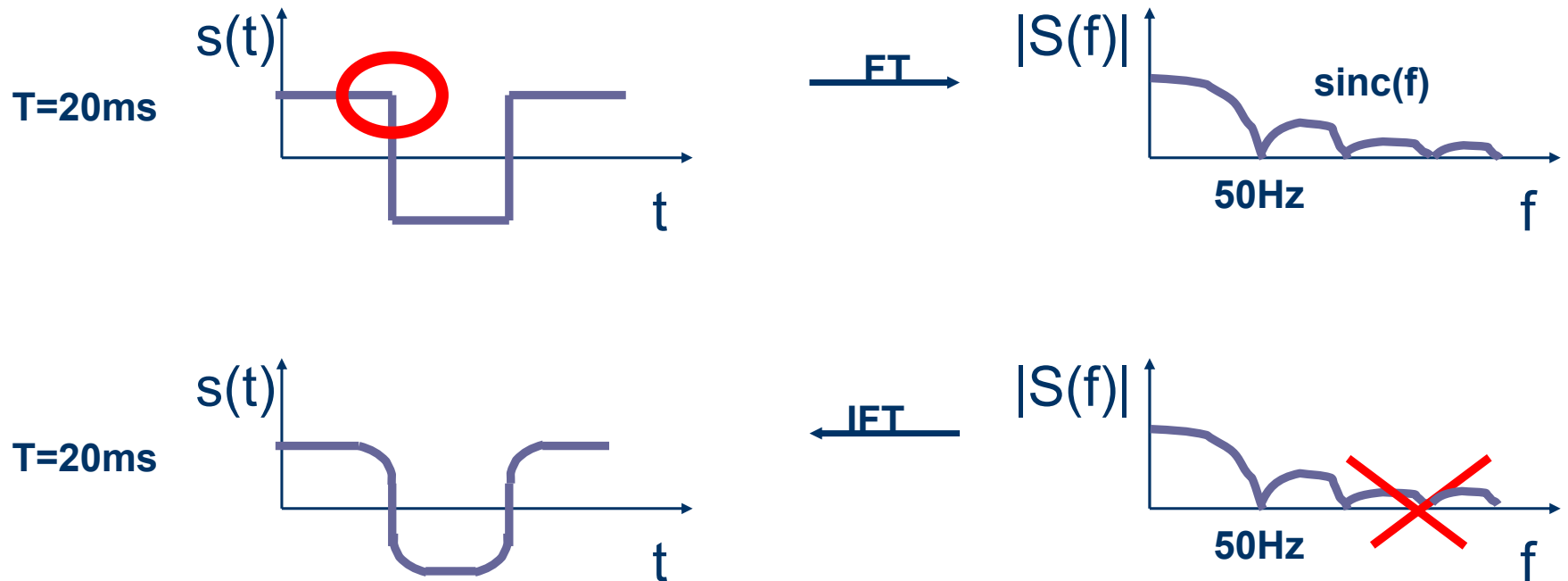
- (2) Smoothness:





Ψηφιακό σήμα και MF

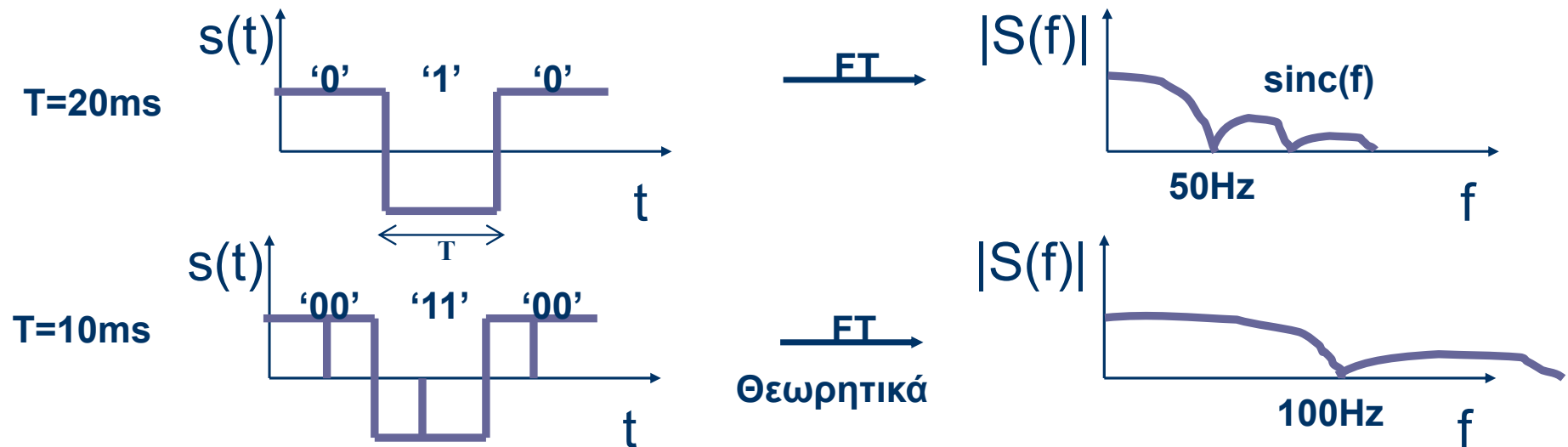
- Τι απειρίζεται το εύρος ζώνης?





Ψηφιακό σήμα και MF

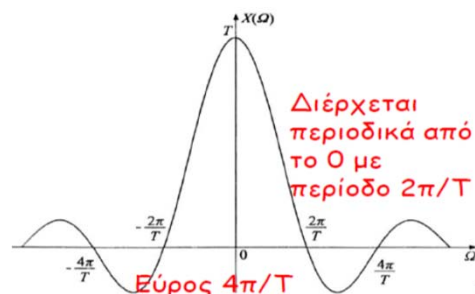
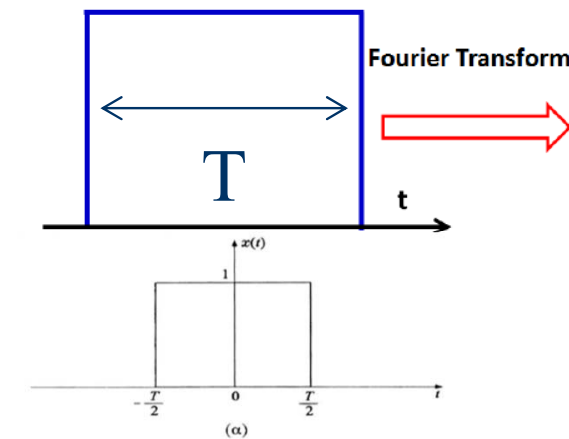
Στο MF Ολοκληρώνουμε (αθροίζουμε) σε όλο το πεδίο του χρόνου.





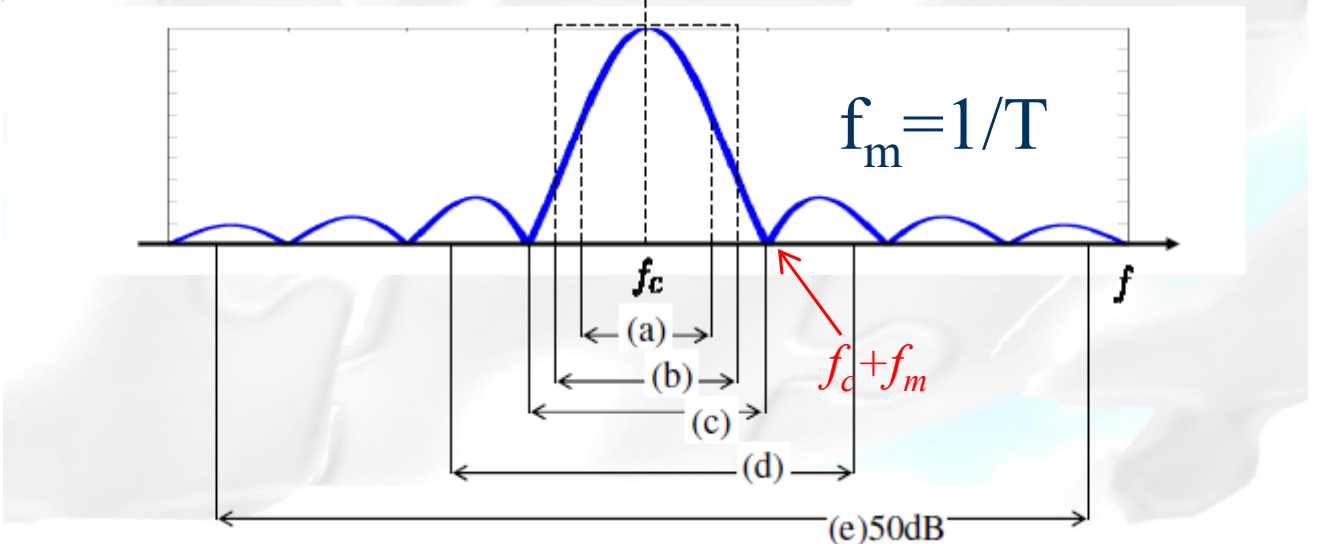
Εύρος ζώνης

- Φάσμα σήματος (spectrum): το εύρος των συχνοτήτων από τις οποίες αποτελείται το σήμα
- Εύρος ζώνης (bandwidth) B : το πλάτος του φάσματος, συνήθως μετράται στο μισό του μέγιστου πλάτους (3 dB bandwidth)



Διαφορετικοί Ορισμοί του Εύρους Ζώνης :

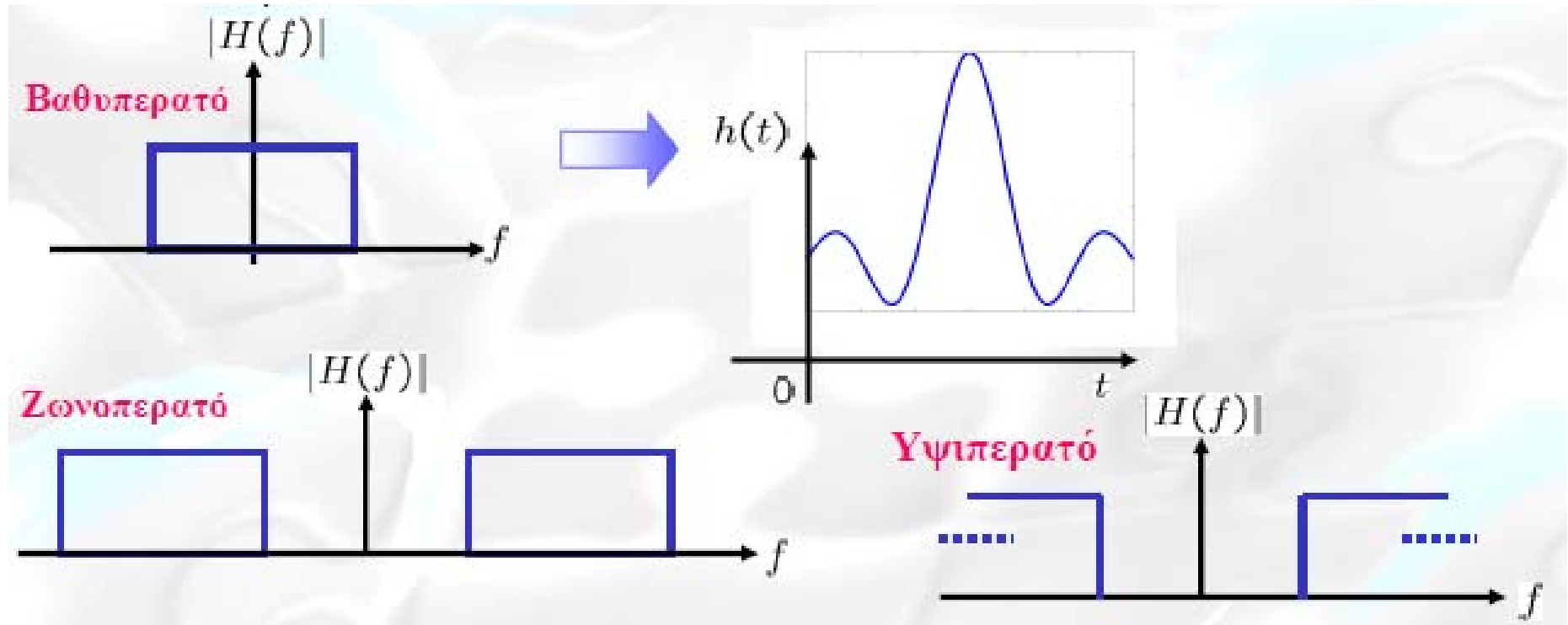
| | |
|-------------------------------------|---|
| a). Εύρος Ζώνης Μισής Ισχύος | d) Κλασματικό περιεχόμενο ισχύος εύρους ζώνης |
| b). Ισοδύναμο Εύρος Ζώνης Θορύβου | e) Φραγμένη φασματική πυκνότητα ισχύος |
| c). Από μηδέν σε μηδέν εύρος ζώνης. | f) Απόλυτο εύρος ζώνης |





Μετάδοση σημάτων - Φίλτρα

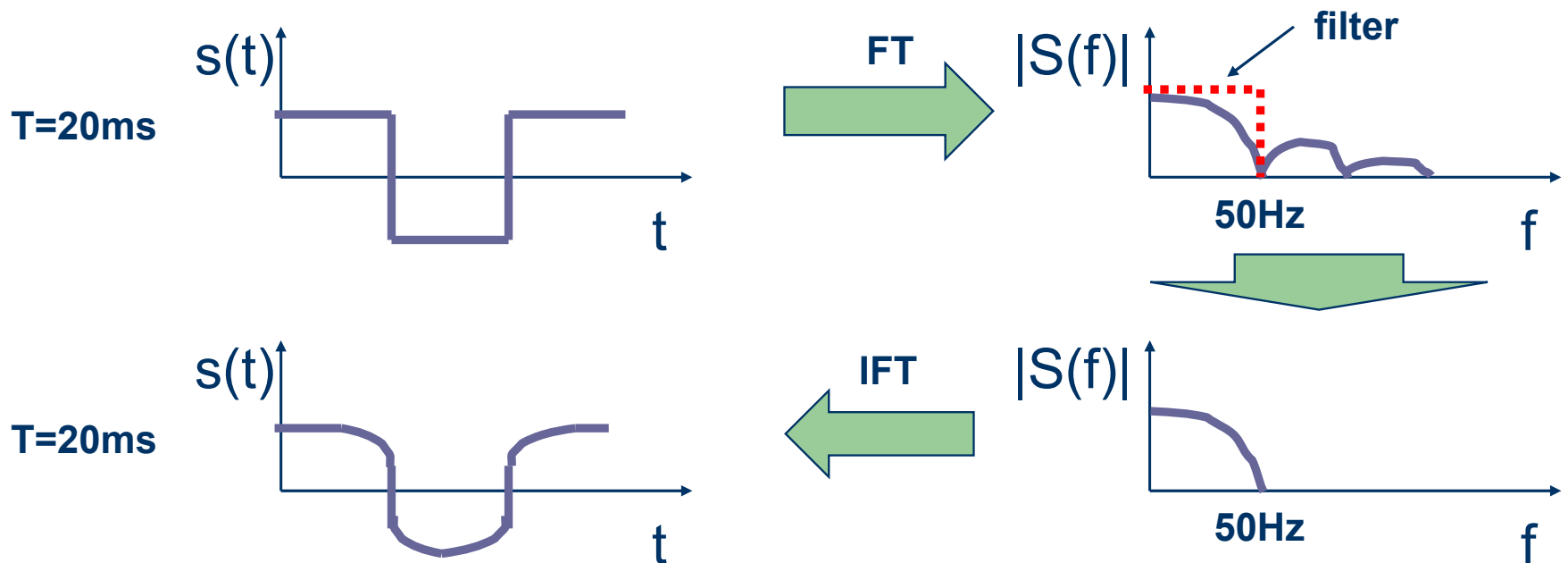
Ιδανικά φίλτρα





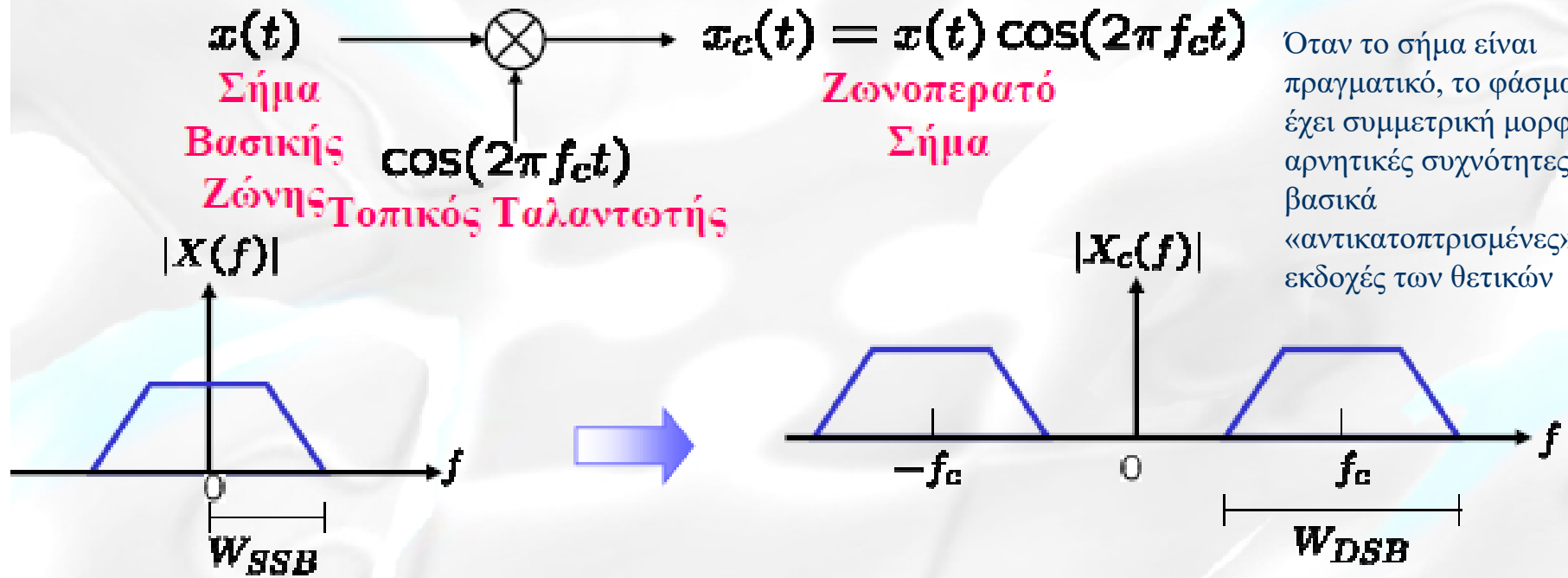
Ψηφιακό σήμα και φίλτρο

- **Φίλτρο:** Επιλογή συγκεκριμένου τμήματος του φάσματος.
Περιορισμός του <άπειρου> φάσματος μιας παλμοσειράς





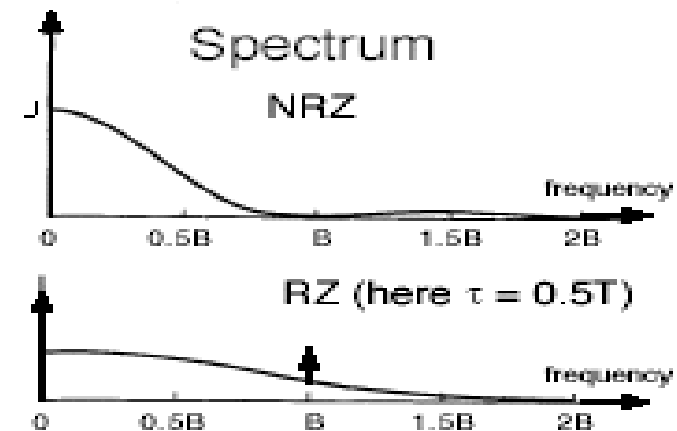
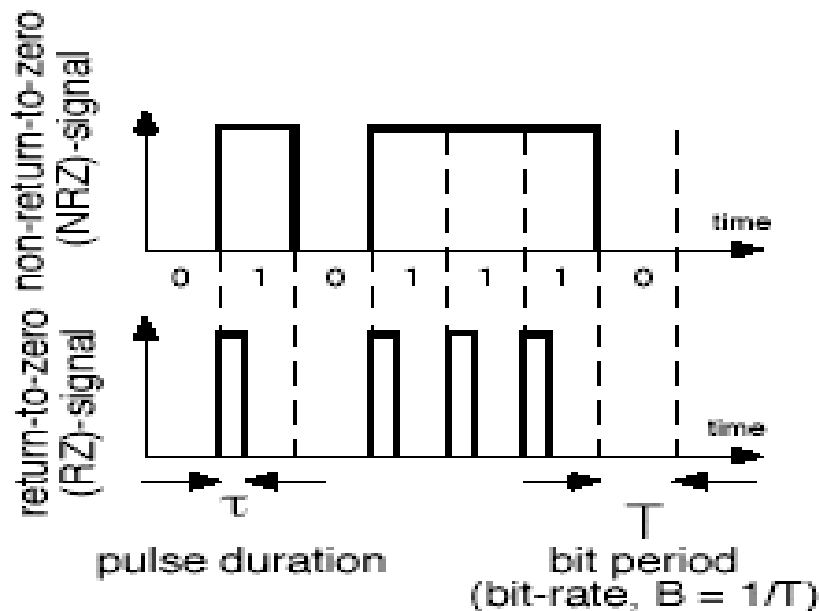
Σήμα βασικής – διέλευσης ζώνης



✓ Τα Σήματα βασικής ζώνης και διαμόρφωση

Κατά τη διαμόρφωση ένα σήμα $x(t)$ που μεταφέρει χρήσιμη πληροφορία πολλαπλασιάζεται με ένα σήμα απλής συχνότητας $\cos(2\pi f_c t)$, που ονομάζεται φέρον σήμα, με σκοπό τη μετάδοσή του μέσα από ένα κανάλι μετάδοσης.

- Συνηθίζεται στα οπτικά συστήματα τηλεπικοινωνιών



- NRZ ($\tau = T$): smaller bandwidth, clock extraction complicated
- RZ ($\tau < T$): used in some advanced systems (solitons, all-optical time-division multiplexing)



MF και θόρυβος

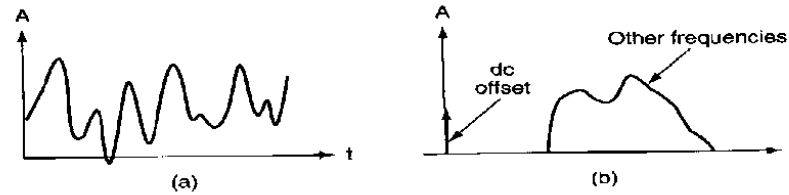


Figure 2.23 Complex signal with embedded dc offset: (a) time domain; (b) frequency domain.

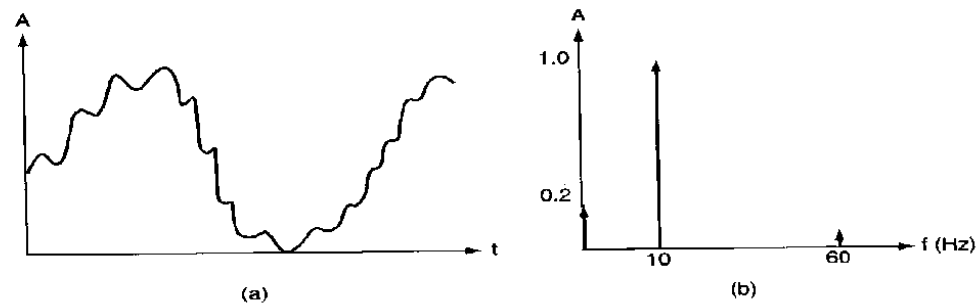


Figure 2.24 10-Hz, 1-V ac signal with 0.1-V, 60-Hz noise: (a) time domain; (b) frequency domain.

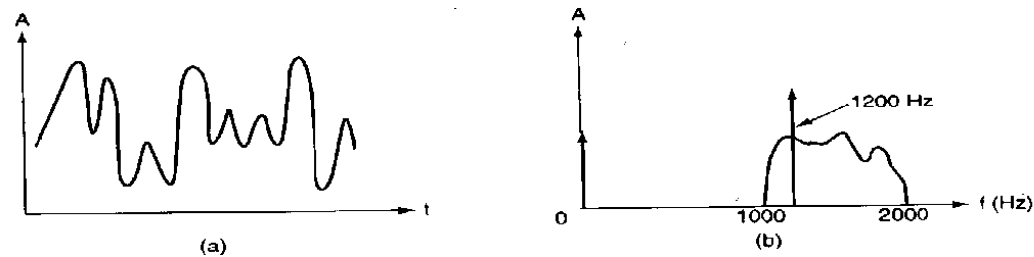


Figure 2.25 Complex signal in 1000- to 2000-Hz range, with 1200-Hz noise: (a) time domain; (b) frequency domain.



Η φύση του θορύβου

- Κάθε ηλεκτρονικό σύστημα έχει την ιδιότητα να προσθέτει *θόρυβο* στα τηλεπικοινωνιακά μας σήματα
- Ο θόρυβος $n(t)$ είναι ένα *τυχαίο σήμα*. Δεν μπορούμε να προβλέψουμε την τιμή του ούτε και των σημάτων που χρησιμοποιούμε για να μεταδώσουμε πληροφορία.
 - Ο *θόρυβος shottky* προέρχεται από το γεγονός ότι τα σήματα μεταφέρονται από διακριτές μονάδες (π.χ. ηλεκτρόνια ή φωτόνια). Αν η ισχύς του σήματος είναι μικρή, το σήμα στον δέκτη θα υπόκειται τυχαίες μεταβολές ανάλογα με τον αριθμό των μονάδων που θα λαμβάνονται. Παρατηρείται κυρίως στην επαφή ημιαγωγών των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και συνδέεται με την τυχαία εκπομπή ή άφιξη των ηλεκτρονίων
 - Ο *θερμικός θόρυβος* προέρχεται από την θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων σε έναν αγωγό, ανεξάρτητα από το αν εφαρμόζεται ή όχι τάση.

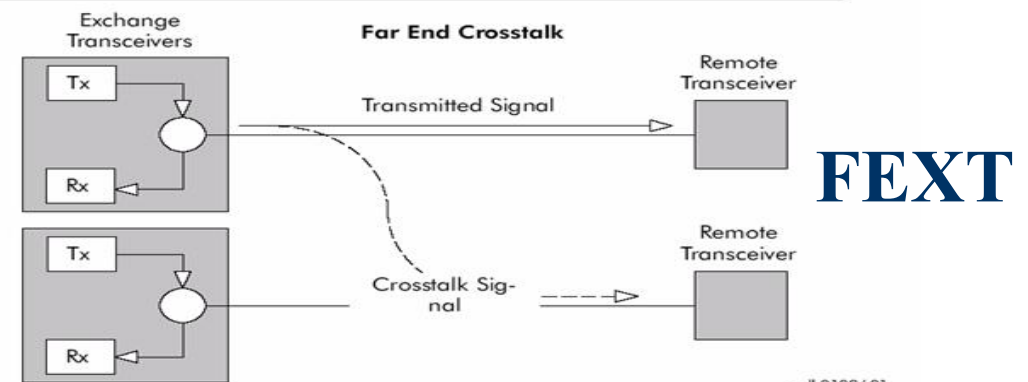
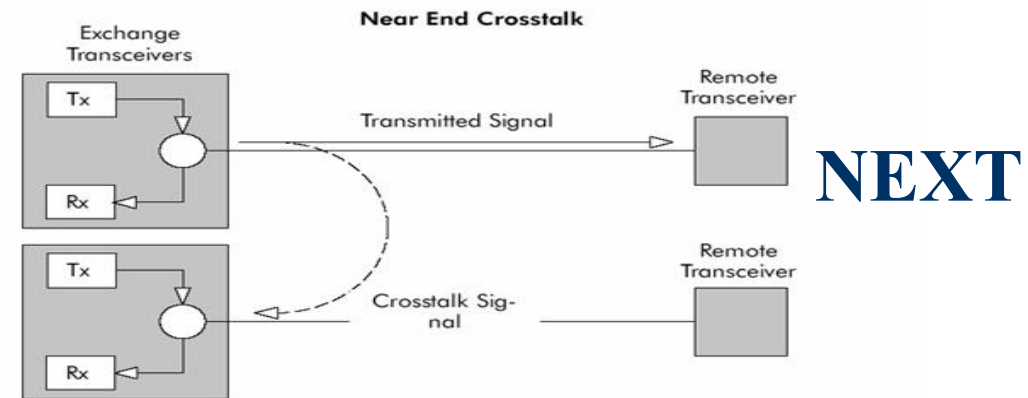


Θόρυβος λόγω παρεμβολών

Είναι ο θόρυβος του περιβάλλοντος, γνωστός και ως Παρεμβολή (Interference)

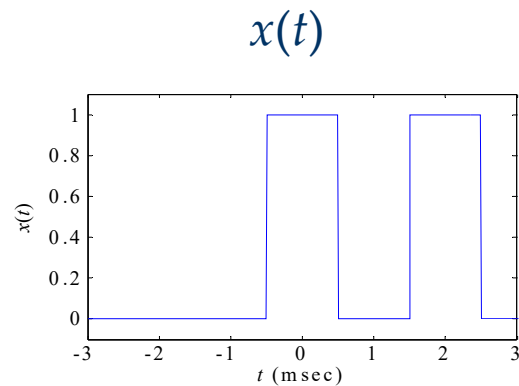
- οφείλεται σε διάφορα αίτια εκτός των ηλεκτρονικών διατάξεων που εμπλέκονται στην επικοινωνία.

Παραδείγματα παρεμβολών είναι ο θόρυβος από άλλους χρήστες, από άλλα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, από ατμοσφαιρικά παράσιτα, κ.λπ.

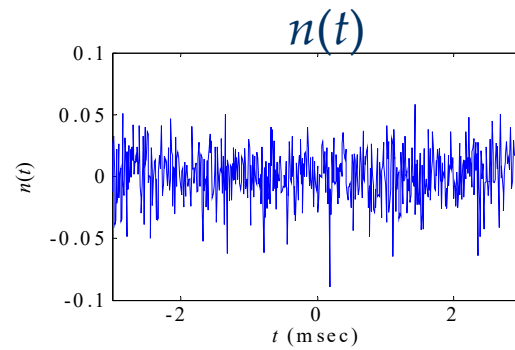




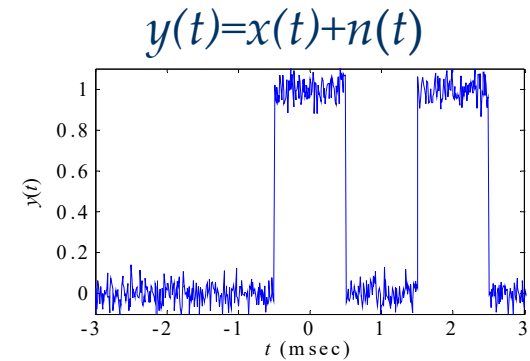
Παράδειγμα Ενθόρυβου Σήματος



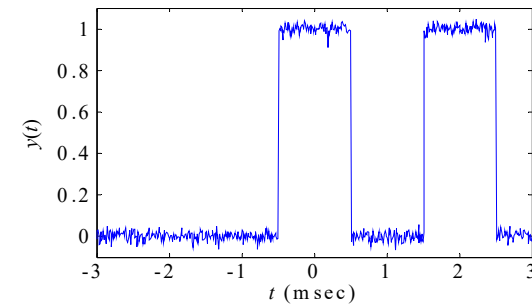
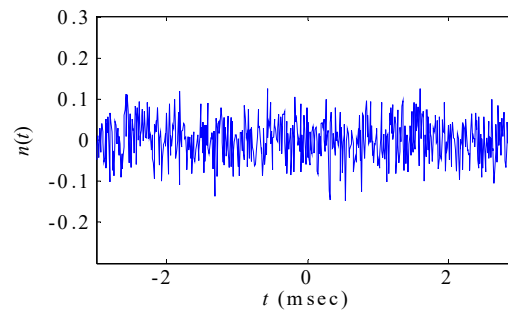
Αθόρυβο Σήμα



Θόρυβος



Ενθόρυβο Σήμα





- Ο δέκτης λαμβάνει και αποκωδικοποιεί ψηφιακά σήματα, δηλαδή bits, παρουσία θορύβου και πρέπει να αποφασίσει ποιο bit έλαβε
- Οι αποφάσεις αυτές σχετίζονται άμεσα με το πώς το σύστημα μπορεί να αντιμετωπίσει τα σφάλματα που προκύπτουν κατά τη μετάδοση λόγω θορύβου, παρεμβολών και άλλων παραγόντων
 - **Hard Decision HD** : ο δέκτης παίρνει μια απλή δυαδική απόφαση για το κάθε bit που λαμβάνει αν κάθε bit είναι "0" ή "1", βασιζόμενος σε ένα κατώφλι τιμής
 - **Soft Decision SD**: ο δέκτης χρησιμοποιεί περισσότερη πληροφορία από το σήμα που λαμβάνεται, αξιοποιώντας την ακριβή τιμή της ληφθείσας τάσης ή άλλου σήματος αντί να την απλοποιεί σε ένα μόνο bit ("0" ή "1"). Ο δέκτης διατηρεί μια κλίμακα εμπιστοσύνης σχετικά με κάθε bit, η οποία μπορεί να εκφράζει πόσο "σίγουρος" είναι ότι η ληφθείσα τιμή είναι "0" ή "1«
 - **Μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας**: χρησιμοποιείται συχνά μαζί με τη SD και αποτελεί μια βελτιστοποίηση για την αποκωδικοποίηση σημάτων με θόρυβο. Ο δέκτης επιλέγει τη *σειρά των bits που μεγιστοποιεί την πιθανοφάνεια*, δηλαδή επιλέγει εκείνη τη λύση που είναι πιο πιθανή να είναι η σωστή σύμφωνα με το θορυβώδες σήμα που έλαβε. Για να το κάνει αυτό, υπολογίζει πιθανότητες για κάθε πιθανή ακολουθία των bits, βασιζόμενος στις πληροφορίες που περιέχονται.
 - Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων για τις τιμές που λαμβάνει ένας δέκτης βασίζεται κυρίως στη στατιστική κατανομή του θορύβου που προστίθεται στο σήμα



Gaussian Κατανομή

- ο θόρυβος $n(t)$ είναι ένα τυχαίο σήμα και για να τον χαρακτηρίσουμε χρησιμοποιούμε τις πιθανότητες
- ο θόρυβος $n(t)$ μάλιστα χαρακτηρίζεται ως *συνεχής στοχαστική μεταβλητή*
- Η πυκνότητα πιθανότητας $f_N(x)$ του $n(t)$ για την παράμετρο x στην οποία επιδρά, είναι η πιθανότητα να πάρει το $n(t)$ μία τιμή σε ένα πολύ μικρό διάστημα γύρω από το x δια το μήκος του διαστήματος

$$P(a \leq N \leq b) = \int_a^b f_N(x) dx$$

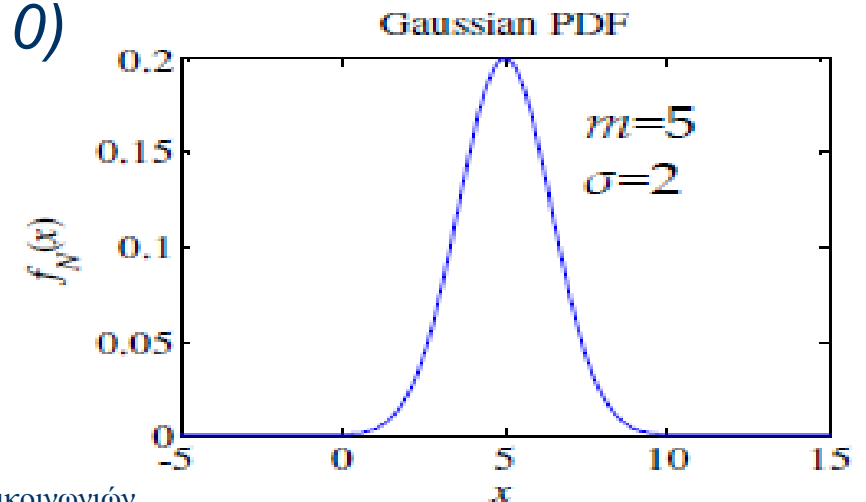


- Στις τηλεπικοινωνίες συχνά η τιμή θόρυβου ακολουθεί Gaussian στατιστική, δηλαδή η πυκνότητα πιθανότητας της είναι:

$$f_N(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

- Το x είναι το αντίστοιχο ηλεκτρικό ρεύμα i ή η τάση u
- μ είναι η μέση τιμή του N (συνήθως 0)
- σ^2 είναι η διακύμανση του N :

$$E\{(N - \mu)^2\} = \sigma^2$$



Θόρυβος βολής

- Οφείλεται στη σωματιδιακή φύση των ηλεκτρονίων. Επειδή το ηλ. ρεύμα αποτελείται από ηλεκτρόνια που η διάδοση τους γίνεται με στατιστικό τρόπο, για μικρές τιμές του θα προκληθούν αυξομειώσεις. Η διακύμανση υπολογίζεται από το:

$$\sigma_s^2 = \langle i_s^2(t) \rangle = 2qI_p \Delta f$$

↑
average signal current

←
effective noise bandwidth of the receiver

Θερμικός θόρυβος

Ο θερμικός θόρυβος παράγεται από τις τυχαίες κινήσεις των ηλεκτρονίων που οφείλονται στην θερμότητα. Μοντελοποιείται σαν λευκός θόρυβος, και η ισχύς του θορύβου θα εξαρτάται από την αντίσταση του φορτίου που παράγεται από :

$$\sigma_T^2 = \langle i_T^2(t) \rangle = \frac{4k_B T \Delta f}{R_L}$$

Boltzmann's constant
Temperature
Load resistance

Επιπλέον, στους ηλεκτρικούς ενισχυτές, ο θερμικός θόρυβος παράγεται σύμφωνα με:

$$\sigma_T^2 = \frac{4k_B T F_n \Delta f}{R_L}$$

Amplifier noise figure

Εκφράσεις για το θερμικό θόρυβο

- Η ισχύς του θερμικού θόρυβου ανά 1Hz bandwidth εκφράζεται ως:

$$N_0 = kT_K$$

όπου:

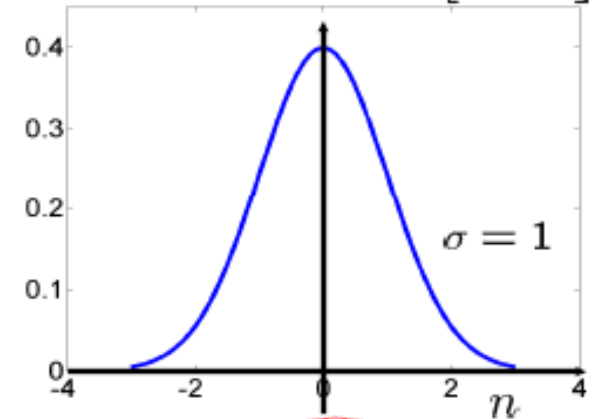
- N_0 πυκνότητα ισχύος θορύβου, [watts ανα Hz, ή W/Hz]. Όταν το bandwidth του μέσου αυξάνεται, αυξάνεται και ο Θ . Θόρυβος
- k σταθερά του Boltzmann = 1.38×10^{-23} J/K
- T_K Θερμοκρασία σε βαθμούς kelvin (absolute temperature).
- $0 \text{ K} = -273^\circ\text{C}$, $\Rightarrow T_K = t^\circ\text{C} + 273$
- Εάν το bandwidth είναι B , η ισχύς του θερμικού θορύβου θα είναι \therefore

$$\langle N \rangle = kT_K B$$

$N_0 = 10^{-21}$ W/Hz, σε θερμοκρασία δωματίου

ΕΚΠΑ - Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών

$$p(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right]$$



Probability density function
Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας

Power spectral
Density

Φασματική
Πυκνότητα
Ισχύος

$$f_N(f) = N_0/2 \text{ [w/Hz]}$$





Αξιολόγηση Τ.Σ. και θόρυβος

- Αναλογικά συστήματα: S/N
- Ψηφιακά συστήματα: E_b/N_0 : energy per bit
 - related to $SNR \rightarrow$ 'energy per bit' = E_b
 - as E_b/N_0 rises, the bit error rate decreases

$$E_b = S t_b$$

or

$$E_b/N_0 = \frac{S t_b}{k T_K} = \frac{S}{k T_K R_b}$$

where

| | |
|-------|-----------------------------|
| E_b | energy per bit |
| N_0 | baseline thermal noise |
| S | signal power |
| R_b | data rate ($R_b = 1/t_b$) |
| t_b | time to send 1 bit |
| T_K | temperature in kelvins |

$$\frac{S}{R_b}$$

is the part which is controllable

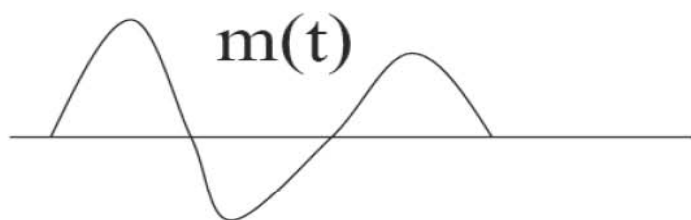


The dB units

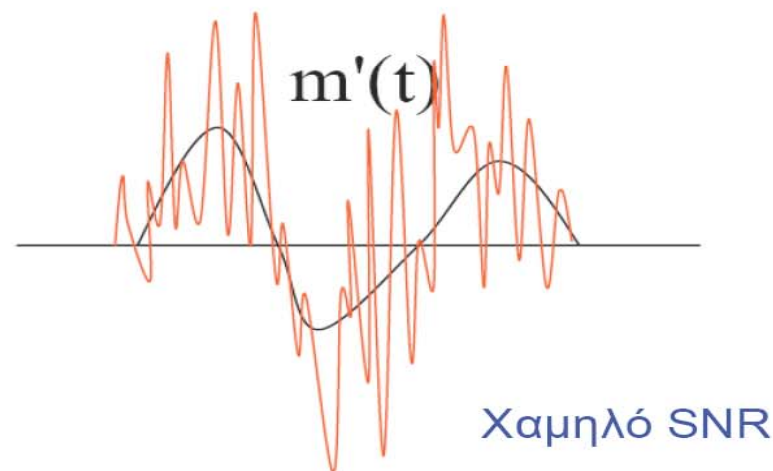
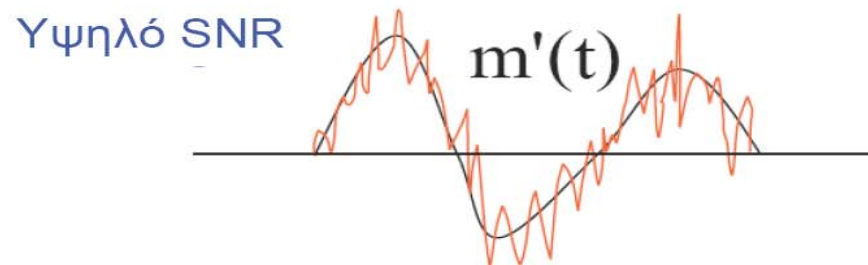
- decibel (dB) expresses power ratios as $10 \log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$
 - Optical power generates a photo-current in a detector
($i_{\text{det}} \sim P_{\text{opt}} \rightarrow P_{\text{el}} \sim P_{\text{opt}}^2$)
 - Therefore: $\text{dB}_{\text{opt}} \neq \text{dB}_{\text{el}}$
(3 dB optical power difference \Leftrightarrow 6 dB electrical power difference)
- dBm expresses the absolute power on a log scale relative to 1 mW: $P_{\text{dBm}} = 10 \log_{10}(P_{\text{mW}})$
 - 1 mW=0 dBm, 2 mW= 3 dBm, 4mW=6 dBm, 8mW=9 dBm
 - 10 mW= 10 dBm, 20 mW=13 dBm
 - 100 mW=20dBm, 400 mW=26



Ανάκτηση σήματος- Αναλογικό σύστημα



$$\text{SNR} = \frac{\text{Μέση ισχύς σήματος}}{\text{Μέση ισχύς θορύβου}}$$





Ανάκτηση σήματος- Αναλογικό σύστημα

- Στα αναλογικά συστήματα για να γίνει σωστά η ανάκτηση του σήματος πρέπει ο λόγος S/N να είναι μεγαλύτερες από μια τιμή ανάλογα με το σύστημα (πχ τηλεφωνία S/N > 30 dB, TV S/N >50 dB)
- Κυριώτερες πηγές θορύβου
- Θερμικός
- βολής οπότε:

Ρεύμα που αντιστοιχεί
στο σήμα πληροφορίας

$$I(t) = I_p + i_s(t) + i_T(t)$$

The Signal to Noise Ratio (SNR) of an electrical signal is defined as

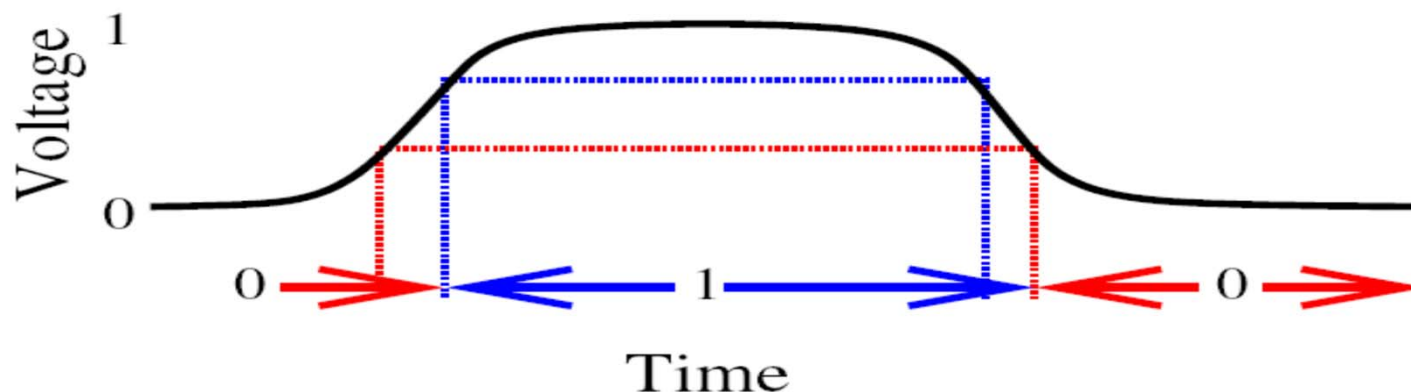
$$SNR = \frac{\text{signal power}}{\text{noise power}} = \frac{I_p^2}{\sigma^2}$$

με

$$\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_T^2 \approx \sigma_T^2 = \frac{N_0}{2} B$$



Ανάκτηση σήματος- Ψηφιακό σύστημα



- difference must be adequate to distinguish between levels
- duration of pulse must be sufficient to allow sampling at stable level
- sample must be taken near “middle” of pulse → need for **clock** to synchronize sampling

Errors Introduced By Receiver:

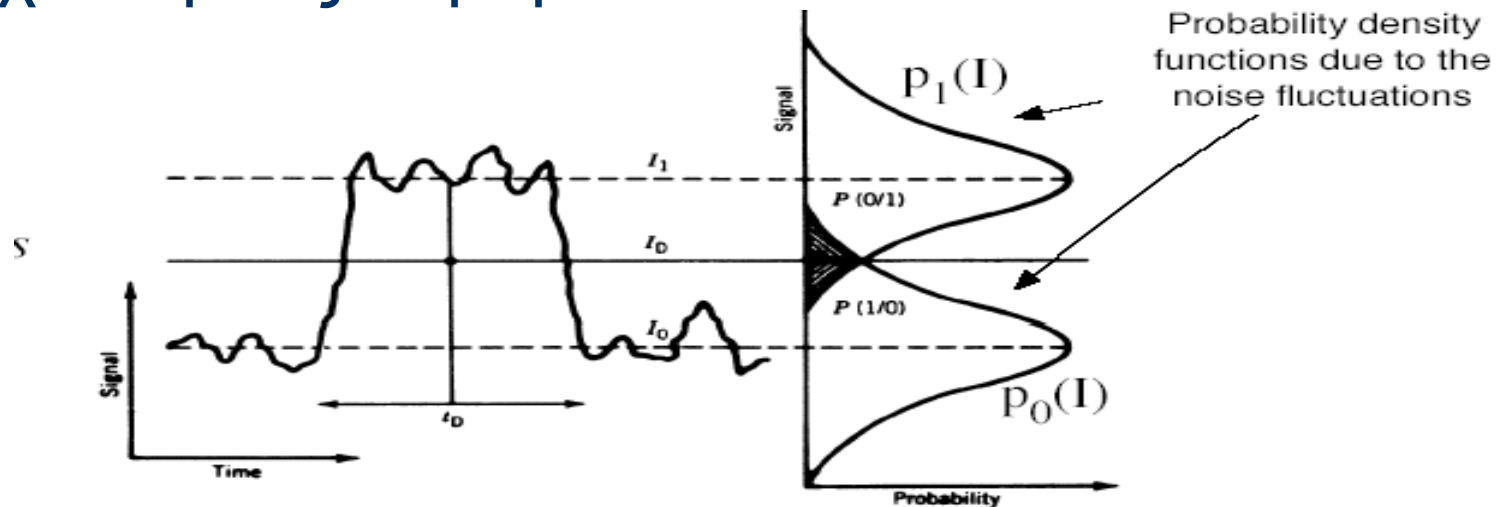
Bias Distortion - thresholds

Synchronization Distortion - clock



Ανάκτηση σήματος- Ψηφιακό σύστημα

- Το ψηφιακό σήμα εισέρχεται στο δέκτη (κύκλωμα απόφασης) παραμορφωμένο από τους διάφορους μηχανισμούς θορύβου



(point of decision: $t = t_d I = I_D$)

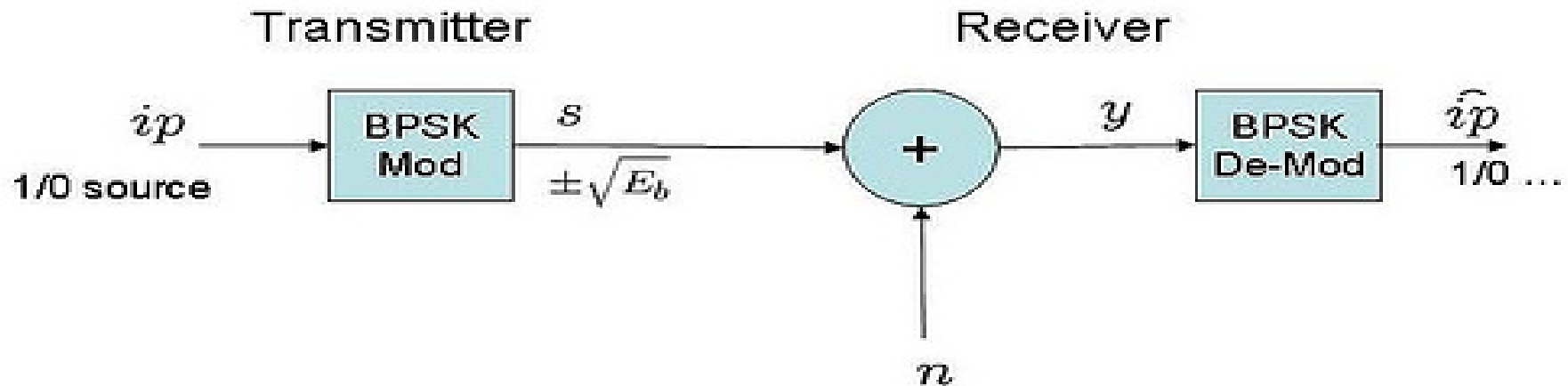
- Στο κύκλωμα απόφασης αποφασίζεται αν έγινε λήψη 0 ή 1 ($I < I_D$ ή $I > I_D$ αντίστοιχα)



Το μοντέλο του καναλιού

- Θεωρούμε ότι στη μεταδιδόμενη κυματομορφή πληροφορίας επιδρά θόρυβος n , γνωστός ως **Additive White Gaussian Noise** (AWGN).
- **Additive** : ο θόρυβος “προστίθεται” (μη πολ/στικός) στο σήμα λήψης
- **White** : Η ισχύς του n κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλες τις συχνότητες του εύρους ζώνης **B**.
- **Gaussian** : οι τιμές του θορύβου x ακολουθούν την Gaussian probability distribution function:
$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$
- με $\mu=0$ and $\sigma^2 = \frac{N_0}{2} B$, αφού ο θόρυβος θεωρείται θερμικός

Υπολογισμός της πιθανότητας σφάλματος



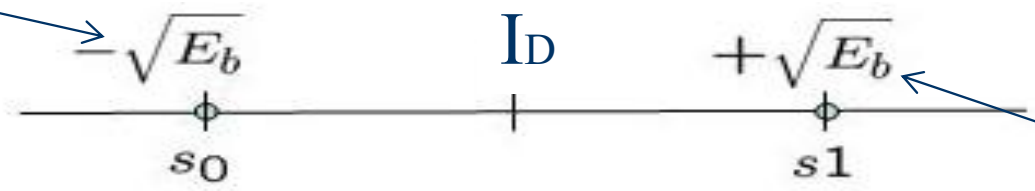
- The received signal:
 - $y = s1 + n$ when bit 1 is transmitted and
 - $y = s0 + n$ when bit 0 is transmitted



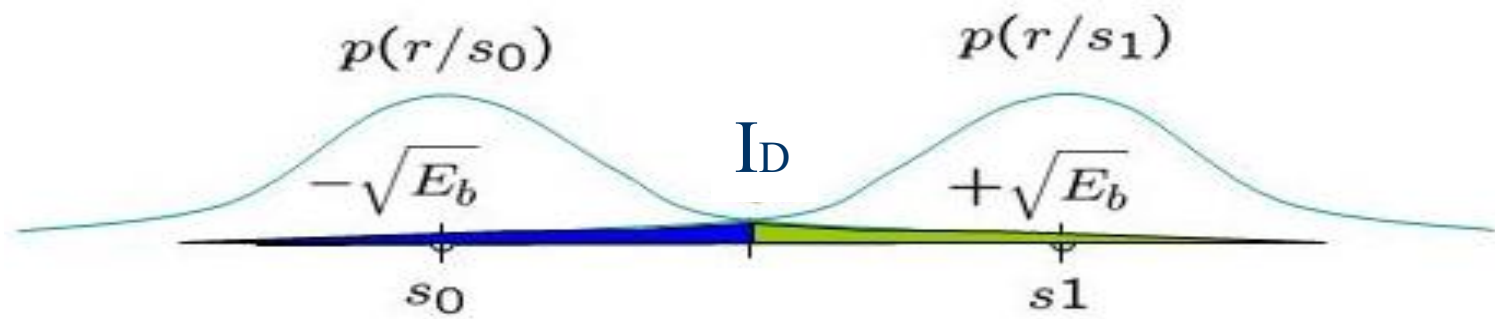
$$p(i | s_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0 B}} e^{-\frac{(i+I_0)^2}{2\sigma_0^2}}$$

$$p(i | s_1) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0 B}} e^{-\frac{(i-I_1)^2}{2\sigma_1^2}}$$

Ηλ. Ρεύμα I_0 που αντιστοιχεί στο σύμβολο s_0



Ενέργεια ανά σύμβολο





Ρυθμός σφάλματος - BER

- BER: αριθμός εσφαλμένων bits / συνολικά ληφθέντα bits
- $BER > 10^{-7}$
- Σφάλματα παρουσιάζονται για $y=i = (\sqrt{E_b})$ όταν:

$I < I_D$ for a “1” bit, or if $I > I_D$ for a “0” bit.



Υπολογισμός BER

$$BER = p(1)P(0/1) + p(0)P(1/0)$$

Probability of transmitting a "1" (usually=1/2)

Probability of detecting a "0" given that a "1" was sent

Assuming Gaussian PDFs with variances $\sigma_{0,1}$

we find $BER = p(1) \int_{-\infty}^{I_D} p_1(I) dI + p(0) \int_{I_D}^{\infty} p_0(I) dI = \frac{1}{4} (\text{erfc}(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}}) + \text{erfc}(\frac{I_D - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}}))$

$p(0)=p(1)=1/2$

where erfc denotes the complimentary error function:

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2) dy$$

note that in general, σ_0 and σ_1 are not equal. For example the shot noise in the "1"s is larger than in the zeroes.

Σημείο απόφασης:

$$I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$$

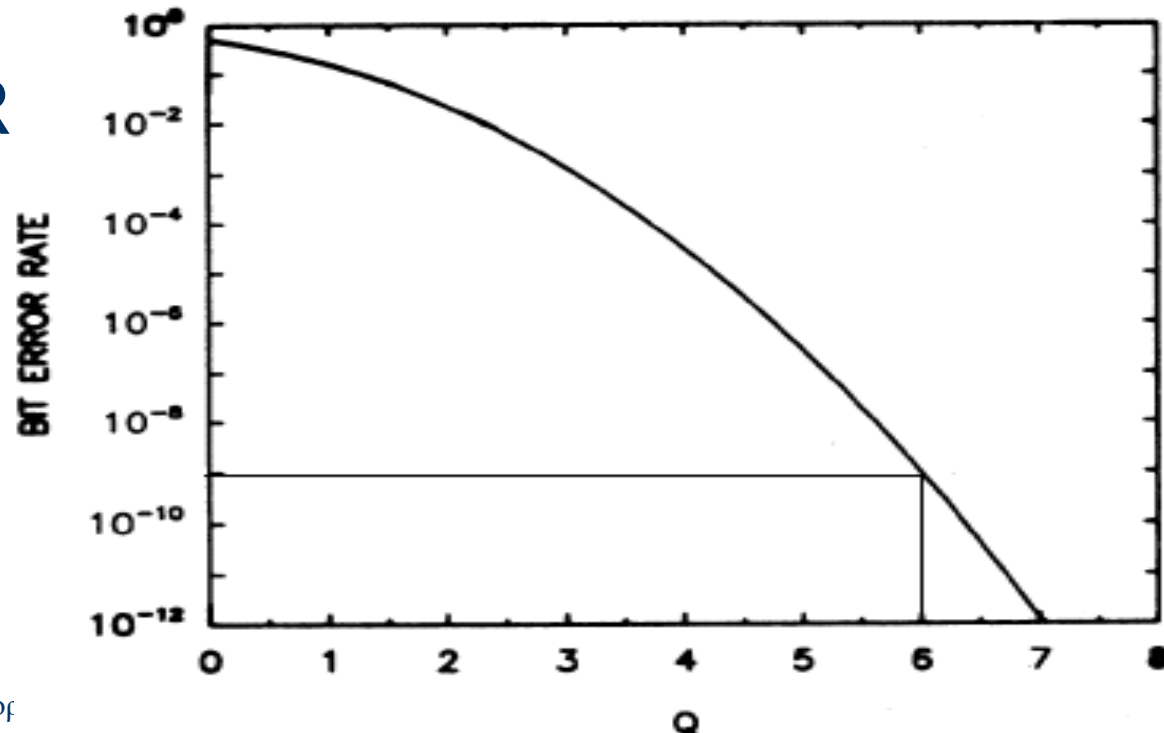


Η παράμετρος Q

- Ορίζοντας: $Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \sim \sqrt{\frac{S}{N}} \sim \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$
- Προκύπτει: $BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{Q}{\sqrt{2}} \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}$
- Με γνωστά τα $I_{0,1}$ και $\sigma_{0,1}$ Υπολογίζεται το BER

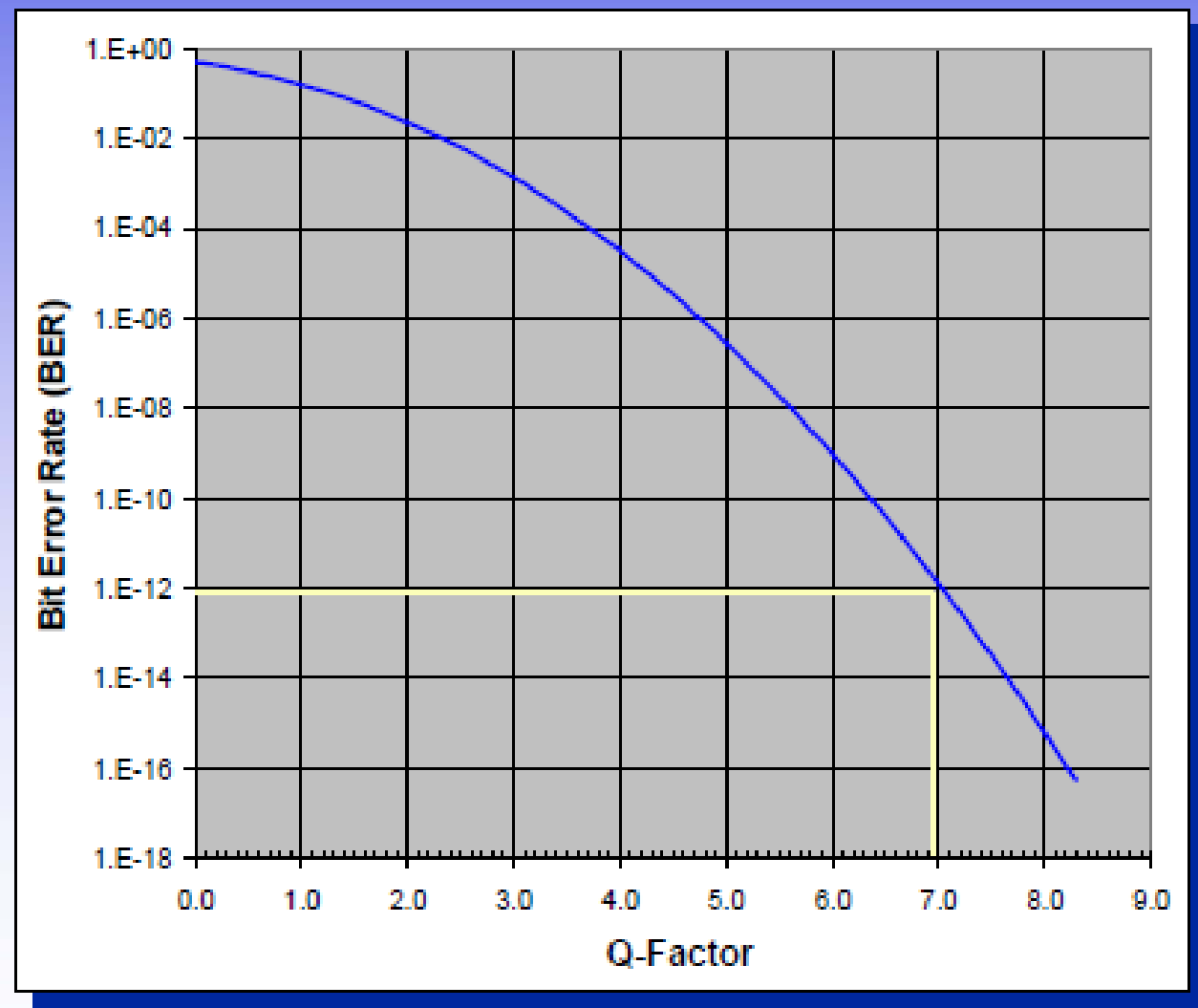


Για δεδομένο BER υπολογίζεται
Η μεση τιμή του ρεύματος I
(ευαισθησία του δέκτη)





BER και Q Factor



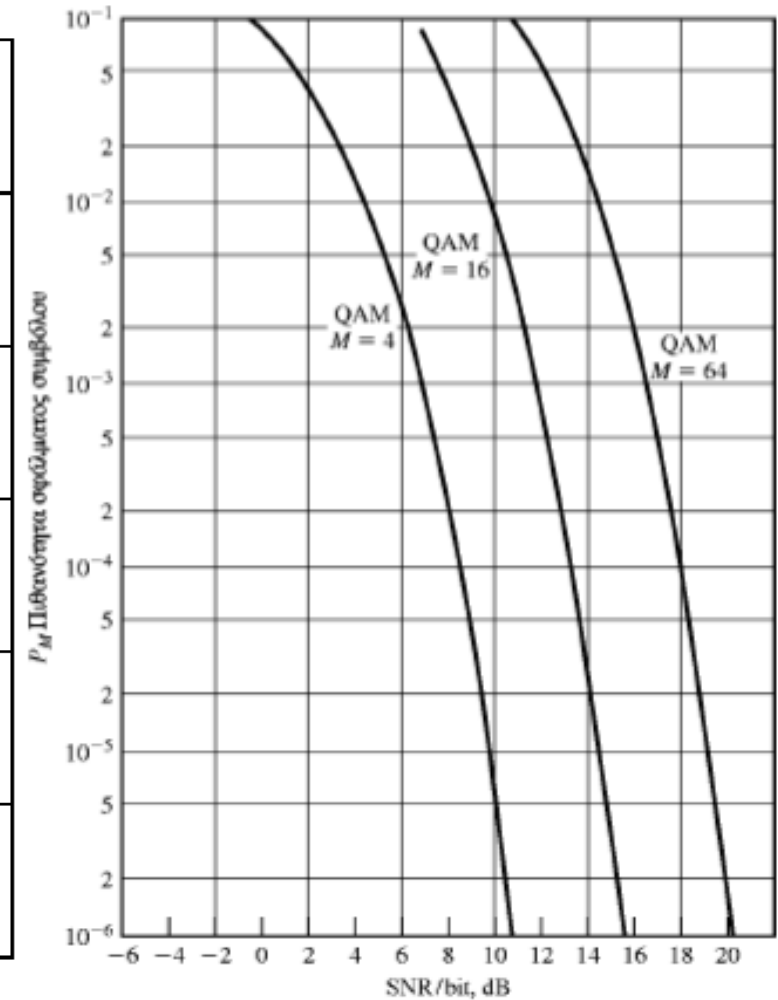


Το BER εξαρτάται από τον τύπο διαμόρφωσης που χρησιμοποιούμε

Probabilities of Symbol and Bit Errors

| | | |
|--------|---|--|
| BPSK | $P(E) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_{\text{avg}}}{N_0}}\right)$ | $P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$ |
| QPSK | $P(E) \approx 2Q\left(\sqrt{\frac{E_{\text{avg}}}{N_0}}\right)$ | $P_b \approx Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$ |
| 8PSK | $P(E) \approx 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_{\text{avg}}}{N_0}} \sin \frac{\pi}{8}\right)$ | $P_b \approx \frac{2}{3}Q\left(\sqrt{\frac{6E_b}{N_0}} \sin \frac{\pi}{8}\right)$ |
| MPSK | $P(E) \approx 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_{\text{avg}}}{N_0}} \sin \frac{\pi}{M}\right)$ | $P_b \approx \frac{2}{k}Q\left(\sqrt{\frac{2kE_b}{N_0}} \sin \frac{\pi}{M}\right)$ |
| 16QASK | $P(E) \approx 3Q\left(\sqrt{\frac{E_{\text{avg}}}{5N_0}}\right)$ | $P_b \approx \frac{3}{4}Q\left(\sqrt{\frac{4E_b}{5N_0}}\right)$ |
| 64QASK | $P(E) \approx \frac{7}{2}Q\left(\sqrt{\frac{E_{\text{avg}}}{21N_0}}\right)$ | $P_b \approx \frac{7}{12}Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{7N_0}}\right)$ |

M-QAM





Παράδειγμα

Ένας πομπός BPSK μπορεί να παράγει μέση ισχύ 1 nW στην είσοδο ενός δέκτη που έχει πυκνότητα ισχύος θορύβου $0,5 \times 10^{-12} \text{ Watts/Hz}$. Αν ο ρυθμός αποστολής συμβόλων είναι 100 symbols/s ποια είναι η πιθανότητα εμφάνισης εσφαλμένων bit για έναν αποκωδικοποιητή DPSK στο δέκτη;

Απάντηση:

- Η ενέργεια συμβόλων στην είσοδο του δέκτη δίνεται από το γινόμενο της ισχύος του σήματος επί την περίοδο των συμβόλων. Επομένως προκύπτει:

- $E_b = 1 \text{ nW} \times 1/100 = 1 \times 10^{-11} \text{ W/Hz}$
 $N_0 = 0.5 \times 10^{-12} \text{ w/Hz}$

$$\left. \begin{array}{l} E_b = 1 \text{ nW} \times 1/100 = 1 \times 10^{-11} \text{ W/Hz} \\ N_0 = 0.5 \times 10^{-12} \text{ w/Hz} \end{array} \right\} Q = \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} = \sqrt{40} \approx 6,3$$

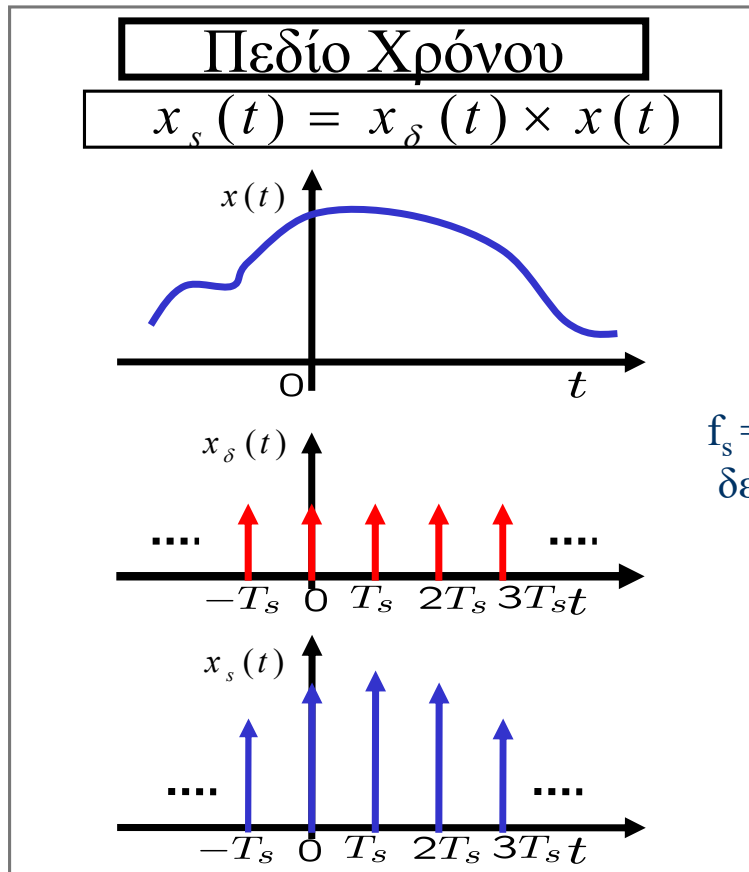
- Από το σχήμα της Δ56, προκύπτει BER= 10^{-10}



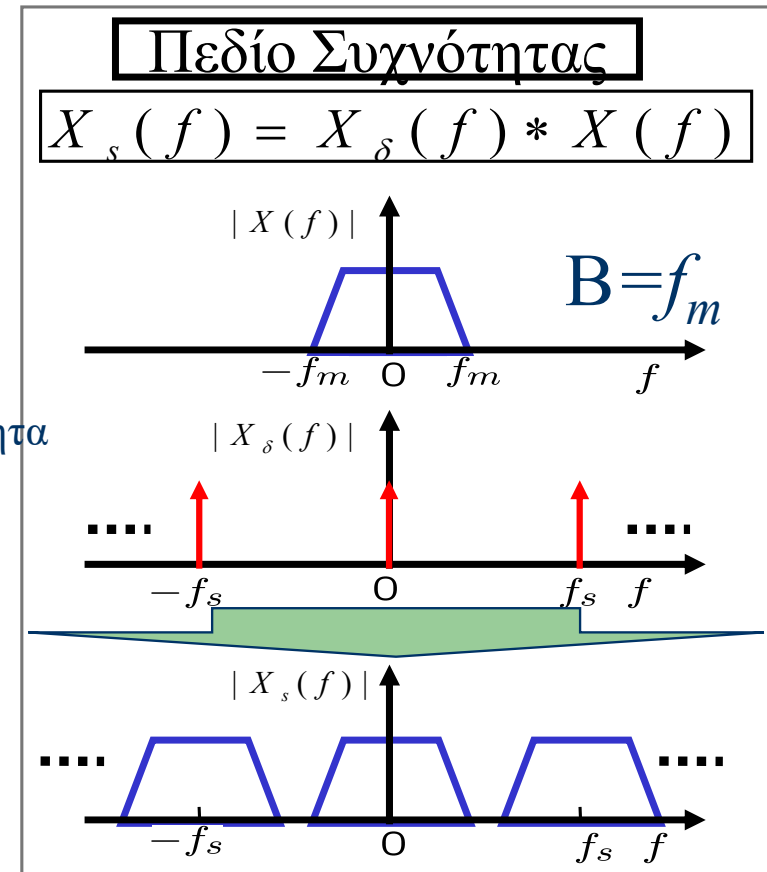
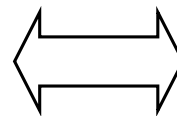
ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΨΗΦΙΑΚΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΔΕΙΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ



Ιδανική Δειγματοληψία



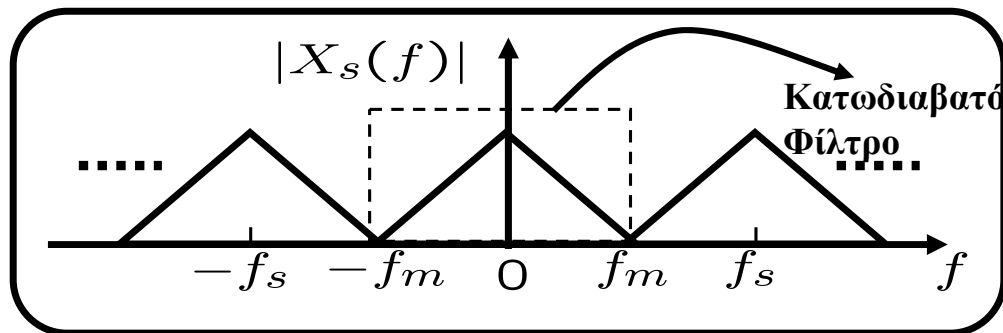
$f_s = 1/T_s$ η συχνότητα δειγματοληψίας



Ο MF σήματος διακριτού χρόνου $x(n)$, που αντιστοιχεί στην περιοδική δειγματοληψία του αναλογικού σήματος $x_s(t)$ με περίοδο T_s , προκύπτει από την περιοδική επανάληψη του MF του αναλογικού σήματος με περίοδο επανάληψης $f_s = 1/T_s$

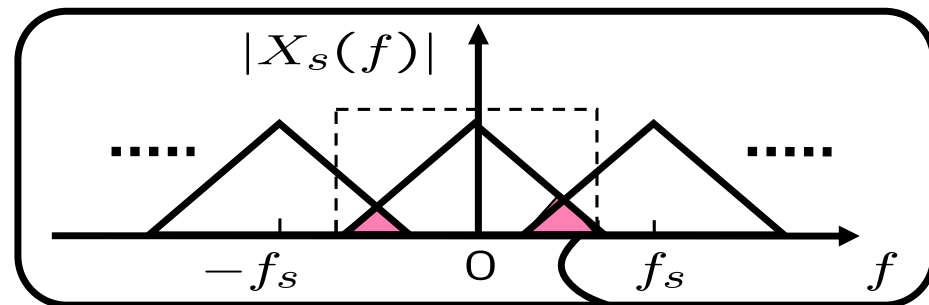


Φαινόμενο Αναδίπλωσης (Aliasing Effect)



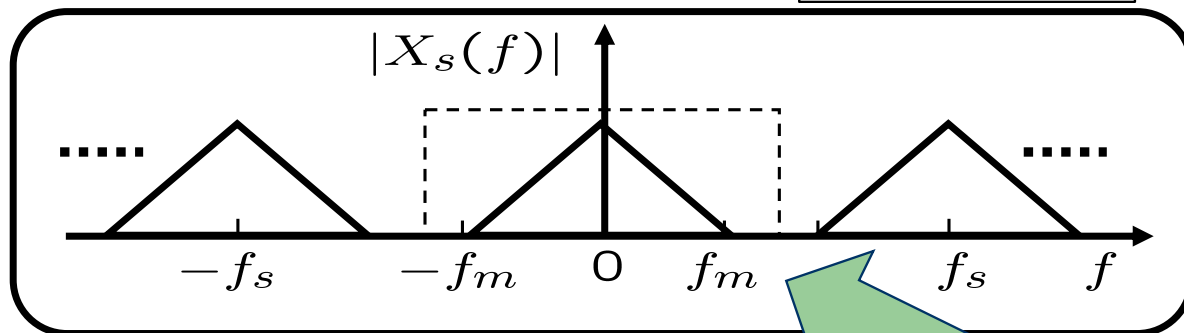
$$f_s = 2f_m$$

Συχνότητα Nyquist



$$f_s < 2f_m$$

Παραμόρφωση(aliasing)

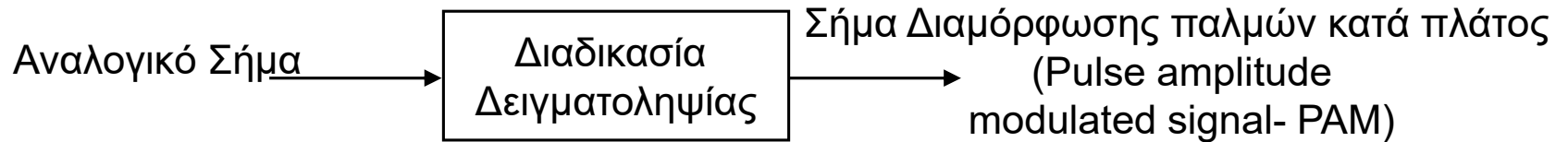


$$f_s > 2f_m$$

Ανάκτηση αρχικού σήματος με χαμηλοπερατό φίλτρο



Θεώρημα Δειγματοληψίας (Sampling theorem)



• **Θεώρημα Δειγματοληψίας:** Ένα σήμα περιορισμένης ζώνης χωρίς άλλα φασματικά στοιχεία, μπορεί να καθοριστεί μοναδικά με δειγματοληψία σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα όπως φαίνεται:

$$T_s \leq \frac{1}{2f_m}$$

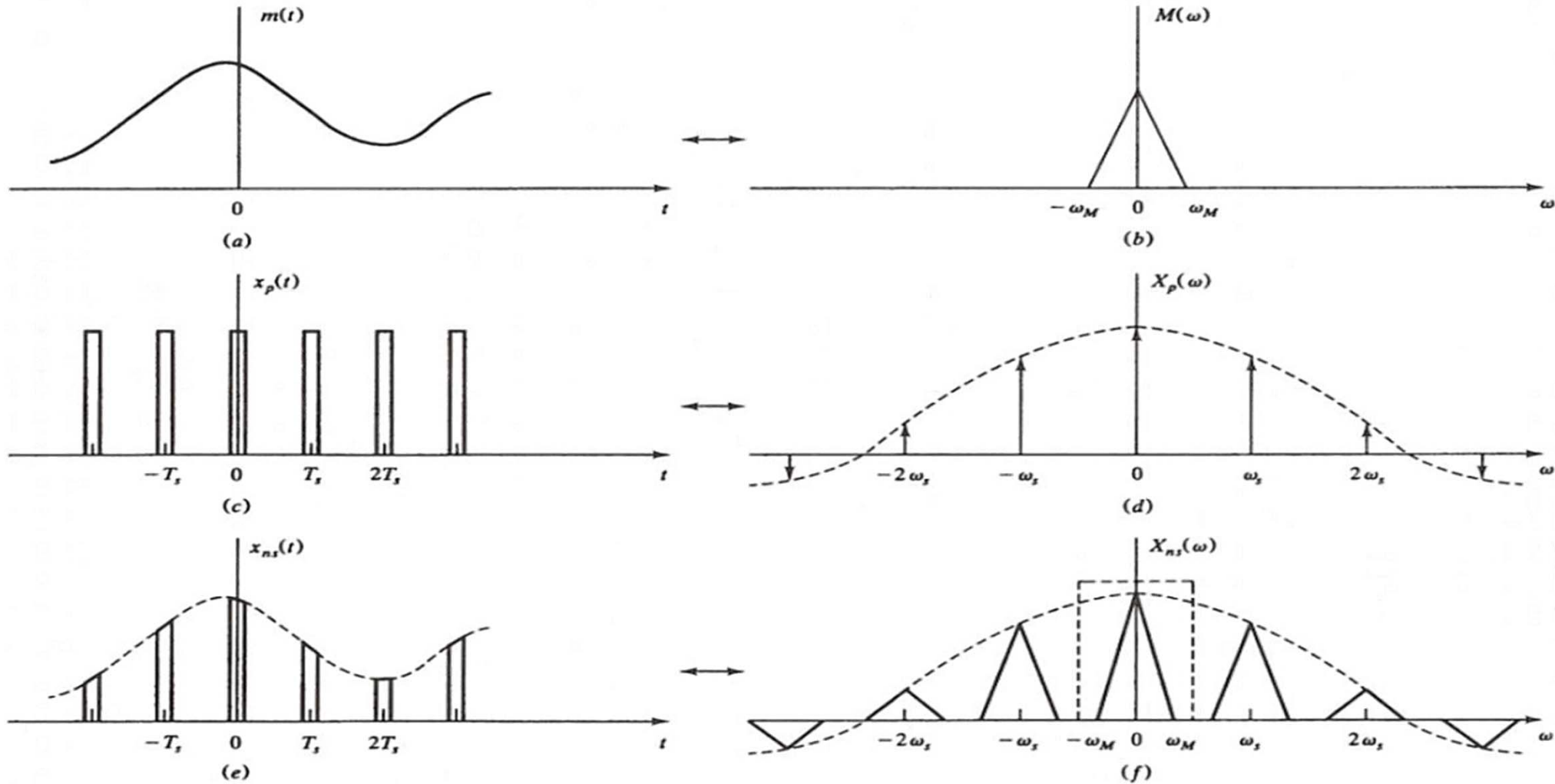
$$f_s = \frac{1}{T_s} = 2f_m$$

• Η συχνότητα δειγματοληψίας καλείται και *Nyquist*.

✓ f_m : η μέγιστη συχνότητα του αναλογικού σήματος (=BW εύρος ζώνης)

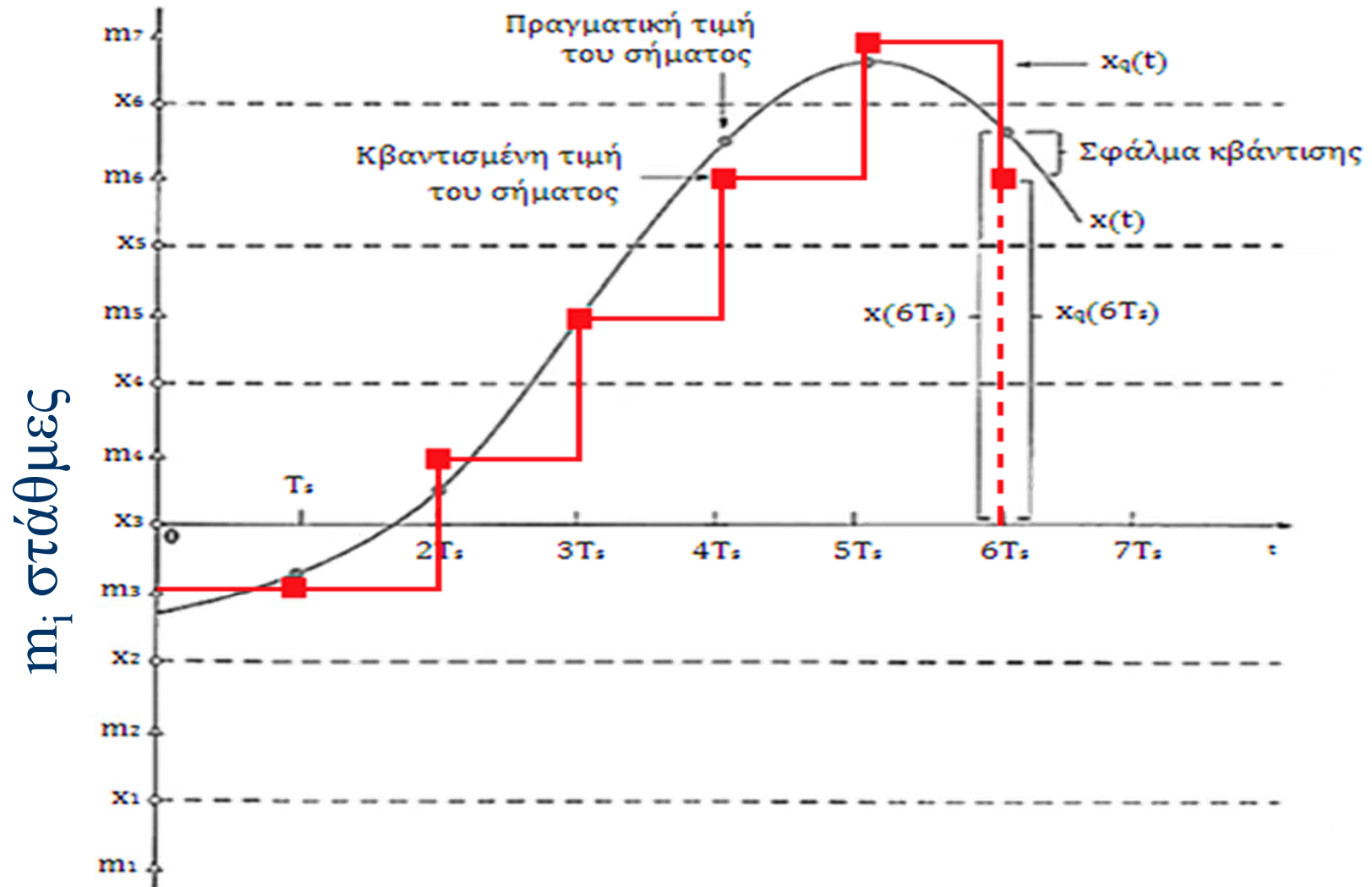


Φυσική Δειγματοληψία





Ομοιόμορφη Κβάντιση

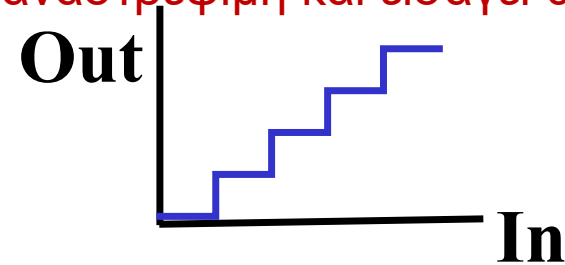
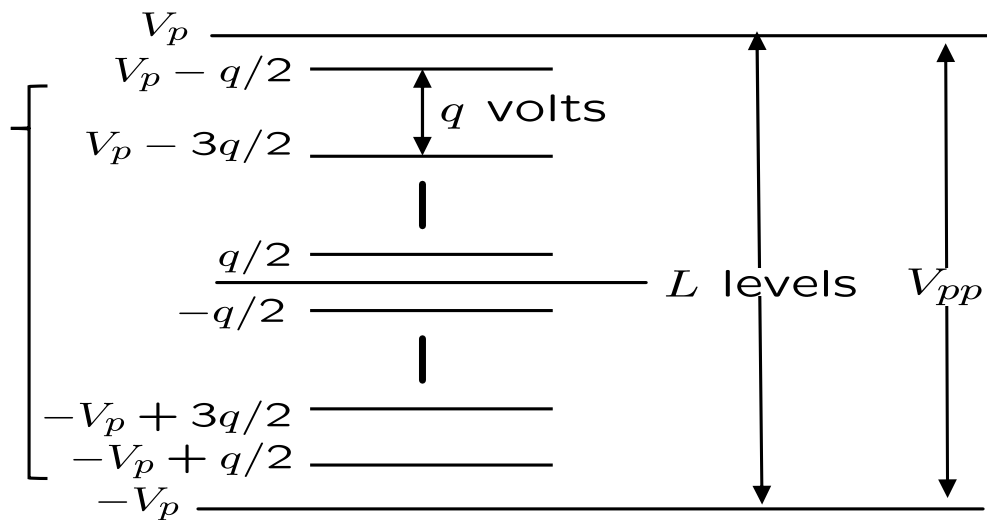




Κβάντιση (Quantization)

Κβάντιση Πλάτους (Amplitude quantizing): Απεικόνιση δειγμάτων της κυματομορφής συνεχούς πλάτους, χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο σύνολο τιμών πλάτους. Η κβάντωση είναι διαδικασία μη αναστρέψιμη και εισάγει θόρυβο

$$L = \frac{2V_p}{q}$$



- Μέση Ισχύς Θορύβου Κβάντισης

$$\sigma^2 = \frac{q^2}{12}$$

- Μέγιστη Ισχύς Σήματος

$$V_p^2 = \frac{L^2 q^2}{4}$$

- Ισχύς Σήματος προς Μέση Ισχύ Θορύβου Κβαντισης

$$\left(\frac{S}{N}\right)_q = \frac{V_p^2}{\sigma^2} = 3L^2$$

- Κάθε κβαντισμένη στάθμη $m(n)$ αναπαρίσταται με μία κωδική λέξη.
- Αν L είναι το πλήθος των σταθμών κβάντισης, τότε κάθε δείγμα περιγράφεται με $\log_2 L = B$ ψηφία (bits), όπου το B είναι ακέραιος αριθμός.

- **Ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας:**

$$R = f_s \log_2 L = f_s B \text{ (bits/s), όπου } f_s \text{ η συχνότητα δειγματοληψίας}$$

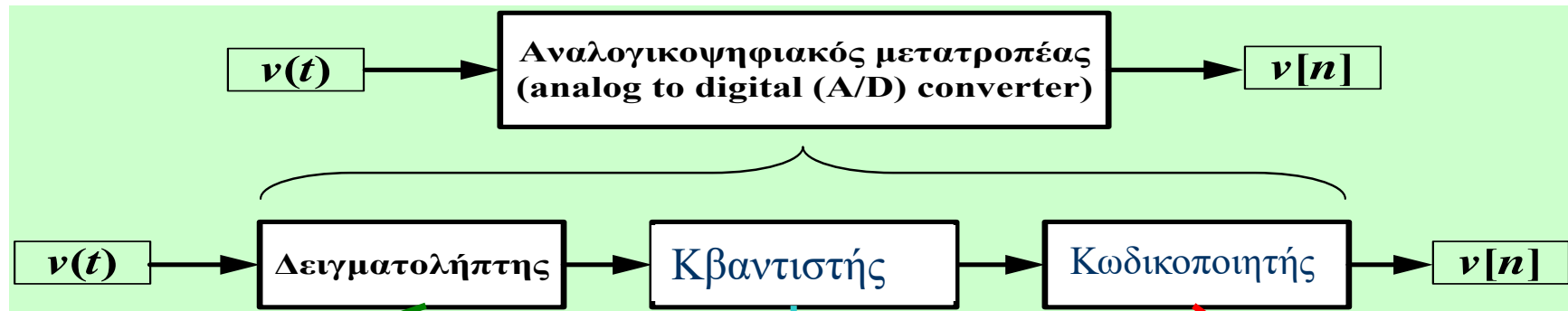
- ✓ Αν s ο αριθμός των δειγμάτων ανά sec ($=f_s$) τότε για τη διαδικασία ADC πρέπει να ισχύει:

$$f_s > 2 BW \text{ Θεώρημα Nyquist-Shannon}$$

με BW το εύρος ζώνης του αναλογικού σήματος

Μετατροπή σήματος

Ένα αναλογικό σήμα μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακό (και αντίστροφα)



Επιλέγουμε ένα αριθμό διακριτών τιμών από το σύνολο των άπειρων τιμών του σήματος

Βρίσκουμε την πλησιέστερη στάθμη κάθε τιμής που προέκυψε από τη δειγματοληψία

Επιλέγονται οι στάθμες με τις οποίες θέλουμε να αντιπροσωπεύσουμε το σήμα (ανάλογα με την ακρίβεια που θέλουμε)

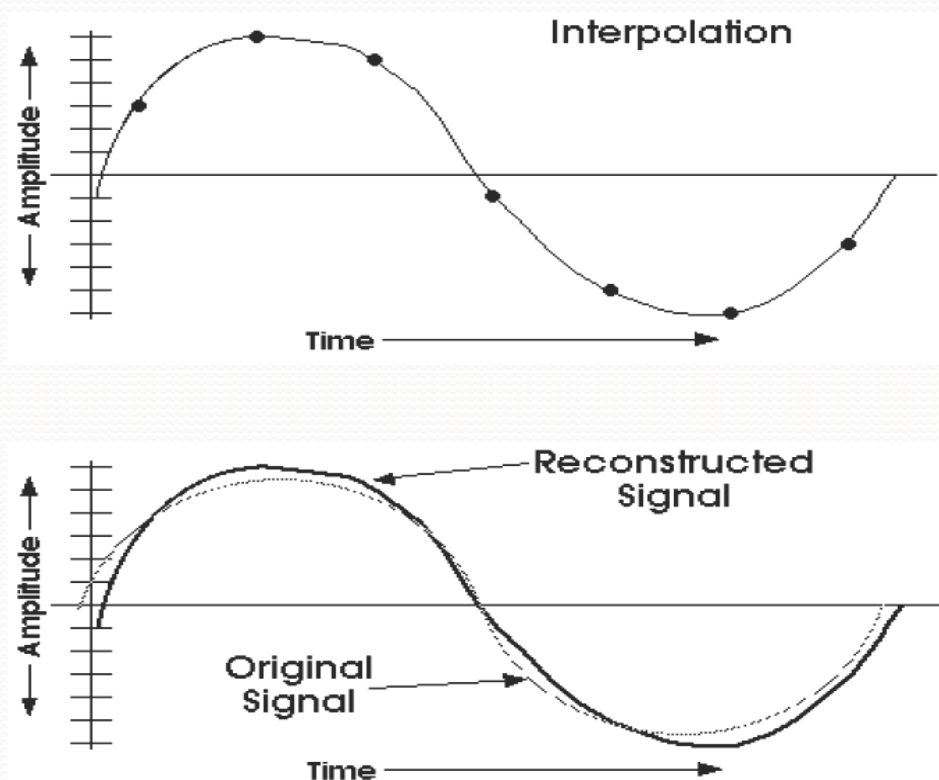
Μετατροπείς ADC



Μετατροπή ψηφιακού σήματος σε αναλογικό

Μετατροπείς DAC

- Παρεμβολή (interpolation) δημιουργεί ενδιάμεσες τιμές και να αναγεννά το αρχικό αναλογικό σήμα κατά μεγάλη προσέγγιση
- Η ποιότητα του αναπαραγόμενου σήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον μέγεθος δείγματος και τη συχνότητα δειγματοληψίας





Άσκηση

● Να βρεθεί ο ρυθμός Nyquist του σήματος $m(t) = 5 \cos 1000\pi t \cos 4000\pi t$

Απάντηση:

Από την ιδιότητα $\cos A \cdot \cos B = \frac{1}{2} [\cos(A + B) + \cos(A - B)]$, έχουμε:

$$\begin{aligned} m(t) &= \frac{5}{2} (\cos(1000\pi t + 4000\pi t) + \cos(1000\pi t - 4000\pi t)) \\ &= 2.5 (\cos 5000\pi t + \cos 3000\pi t) \end{aligned}$$

Έτσι, το $m(t)$ είναι ένα σήμα ζώνης με $f_{max} = 2.500 \text{ Hz}$. Κατά συνέπεια, ο ρυθμός Nyquist είναι $2 \times 2.500 = 5.000 \text{ Hz}$, και το διάστημα (περίοδος) Nyquist είναι $1/5000 \text{ sec} = 0,2 \text{ ms}$



Άσκηση

Αναλογικό σήμα κβαντίζεται και μεταδίδεται με χρήση συστήματος PCM. Αν κάθε δείγμα στο δέκτη του συστήματος πρέπει να είναι γνωστό με ακρίβεια $\pm 0.5\%$ της τιμής κορυφής προς κορυφή με πόσα δυαδικά ψηφία θα πρέπει να παρίσταται κάθε δείγμα;

Απάντηση:

Έστω ότι η τιμή κορυφής προς κορυφή του σήματος είναι $2V_p$. Τότε το μέγιστο σφάλμα είναι $0,005 (2V_p) = 0,01 V_p$, και το σφάλμα κορυφής είναι $2(0,01V_p) = 0,02 V_p$ (το μέγιστο μέγεθος βήματος q).

Ο απαιτούμενος αριθμός σταθμών κβάντισης είναι:

$$L = \frac{2V_p}{q} = \frac{2 V_p}{0,02 V_p} = 100 \leq 2^n$$

Κατά συνέπεια, ο αριθμός των δυαδικών ψηφίων που χρειάζονται για κάθε δείγμα είναι $n = 7$.

Παράδειγμα

Μία πηγή πληροφορίας μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια διαδικασία περιορισμένου εύρους-ζώνης 6000 Hz. Η διαδικασία αυτή δειγματοληπτείται με ρυθμό μεγαλύτερο από του Nyquist ώστε να δημιουργηθεί ζώνη προστασίας 2000 Hz. Παρατηρείται ότι οι τιμές των δειγμάτων που προκύπτουν ανήκουν στο σύνολο $\mathcal{A} = \{-4, -3, -1, 2, 4, 7\}$ με αντίστοιχες πιθανότητες $\{0.2, 0.1, 0.15, 0.05, 0.3, 0.2\}$. Πόση είναι η εντροπία της πηγής διακριτού χρόνου σε bits/έξοδο (δείγμα); Ποια είναι η εντροπία σε bits/sec;



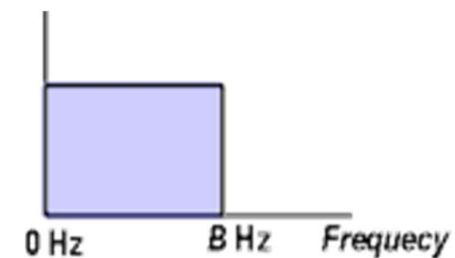
Άσκηση

Διαθέτουμε ασύρματο κανάλι με απόσβεση $L=37$ dB και φασματική πυκνότητα θορύβου $N_0/2=10^{-10}$ Watt/Hz. Το σήμα βασικής ζώνης $m(t)$ που διαβιβάζουμε έχει $W=10$ KHz και θέλουμε στην έξοδο του δέκτη να έχει ποιότητα $(SNR)_R=47$ dB. Να υπολογίσετε την ισχύ εκπομπής και το εύρος ζώνης που απαιτεί ένα σύστημα DSB.



Εύρος ζώνης, bitrate, χωρητικότητα καναλιού

- Κάθε σήμα πληροφορίας έχει εύρος ζώνης Δf η ρυθμό R_b
- Το κανάλι – τηλεπικοινωνιακό σύστημα έχει συγκεκριμένο εύρος ζώνης B . (Ένα ιδανικό χωρίς θόρυβο κανάλι **βασικής ζώνης** (baseband) λειτουργεί σαν ένα χαμηλοδιαβατό φίλτρο (LPF) με εύρος ζώνης $0 - B$ (Hz))
- Σχεδόν πάντα $B < \Delta f$
- Η παράμετρος χρόνος
- Χωρητικότητα καναλιού και R_b





Εύρος ζώνης και χωρητικότητα

- Ποσότητα πληροφορίας που μπορεί να μεταδοθεί σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.
- Εύρος ζώνης Bandwidth [Hz]
 - ❖ **Signal bandwidth:** the difference between the highest and lowest frequency in the signal spectrum.
 - ❖ **Channel bandwidth:** the difference between highest and lowest frequency that can be transmitted by a analog transmission channel.
- Χωρητικότητα - Capacity [bit/s - bps]
 - ❖ **Signal capacity:** a bit speed of a signal
 - ❖ **Channel capacity:** a maximum bit speed that can be transmitted at a digital channel

Χωρητικότητα αθόρυβου καναλιού

- Κανάλι με $BW = B$

- ❖ υποστηρίζει τη μετάδοση **αναλογικού** σήματος (**BaseBand**) με μέγιστη συχνότητα: $f_{\max} = B$

- ❖ υποστηρίζει τη μετάδοση **ψηφιακού** σήματος με μέγιστο ρυθμό σηματοδοσίας (Πολλαπλών σταθμών (multilevel): R_s

- $R_s = 2B$ ή

- Ρυθμό πληροφορίας: $R_b = C = R_s \log_2 M = 2B \log_2 M$

- Δυαδικό (binary $M=2$): $R_b = C(\text{bps}) = 2B(\text{Hz})$

Ρυθμός
συμβόλων

Πλήθος
διαφορετικών
συμβόλων

- **Αυτός είναι θεωρητικά ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (για ιδανικές συνθήκες = απουσία θορύβου)**

- **Χωρητικότητα καναλιού (C - Channel Capacity)** είναι ο μέγιστος ρυθμός (Maximum Data Rate) **μετάδοσης** του καναλιού



χωρητικότητα καναλιού απουσία θορύβου

- **Παράδειγμα:** Για κανάλι με εύρος ζώνης $B = 10$ KHz και μετάδοση:
 - Δυαδική ($M = 2$): $C = 2 \cdot 10.000 \log_2 2 = 20.000$ bps
 - Τετραδική ($M = 4$): $C = 2 \cdot 10.000 \log_2 4 = 40.000$ bps
 - Παρατηρούμε ότι η αύξηση των επιπέδων μετάδοσης (**M** διαφορετικών συμβόλων) βελτιώνει τον ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας (bps)
- Κρίσιμοι παράγοντες για τον προσδιορισμό **M** για επικοινωνία απαλλαγμένη από σφάλματα:
 - Ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου (Signal to Noise Ratio, S/N ή SNR), επειδή η ικανότητα του δέκτη να διακρίνει τα σύμβολα μεταξύ τους επηρεάζεται από την ύπαρξη παραμορφώσεων (θόρυβος, παρεμβολές, κλπ)
 - Η διάρκεια κάθε συμβόλου, επειδή τα μακρά σύμβολα δίνουν περισσότερο χρόνο στο δέκτη να μετριάσει την επίδραση του θορύβου



Χωρητικότητα Καναλιού AWGN

Θεώρημα: Η χωρητικότητα ενός καναλιού AWGN με εύρος ζώνης B είναι

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

- Το παραπάνω είναι γνωστό ως Θεώρημα Shannon-Hartley
- Είναι το **άνω όριο** ρυθμού μετάδοσης για οποιοδήποτε τηλεπικοινωνιακό κανάλι
- Είναι δυνατή η αξιόπιστη μετάδοση (δηλαδή, με πιθανότητα σφάλματος μικρότερη από δεδομένη τιμή) πληροφορίας σε δίαυλο – κανάλι με θόρυβο, αρκεί ο ρυθμός μετάδοσης να είναι μικρότερος από τη χωρητικότητα του διαύλου (Shannon 1948)
- Ο βασικός περιορισμός που εισάγει ο θόρυβος στο δίαυλο - κανάλι επικοινωνίας δεν τίθεται στην *αξιοπιστία* μετάδοσης αλλά στο *ρυθμό* μετάδοσης



Συνέπειες του Θεωρήματος S-H

- Μας δίνει ένα ανώτατο όριο αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων μέσα από AWGN κανάλι.
- Προσφέρει τη δυνατότητα για ανταλλαγή (trade-off) σήματος-προς-θόρυβο (SNR) με εύρος ζώνης
- «Συμπίεση» εύρους ζώνης μεταδιδόμενου σήματος



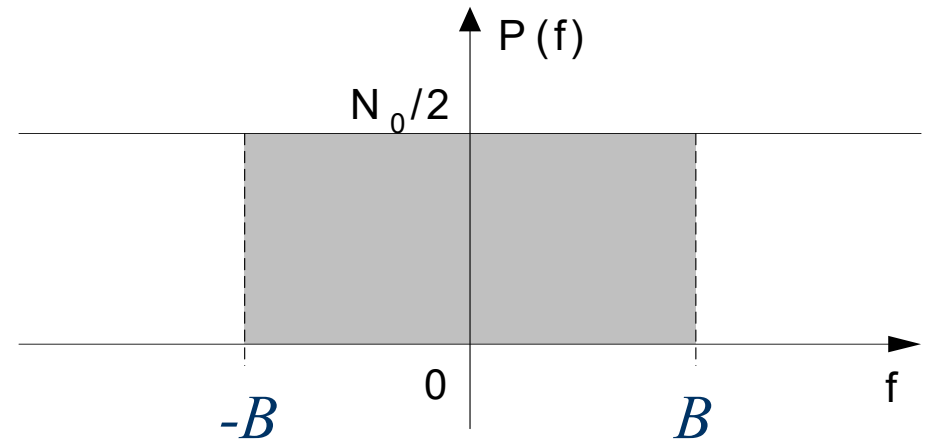
Shannon-Hartley + Ισχύς Θορύβου

- Αντί της μέσης ισχύος θορύβου N , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η πυκνότητα φάσματος ισχύος, N_0
- Οπότε:

$$N = N_0 B$$

- Άλλη διατύπωση του Shannon-Hartley

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right)$$



Όριο Shannon

- Ένα αθόρυβο κανάλι έχει άπειρη χωρητικότητα
- Όταν υπάρχει θόρυβος και η ισχύς του μεταδιδόμενου σήματος είναι σταθερή τότε η χωρητικότητα του καναλιού τείνει σε ένα πεπερασμένο ανώτατο όριο καθώς το εύρος ζώνης τείνει στο άπειρο.

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right) = \left(\frac{S}{N_0} \right) \left(\frac{N_0 B}{S} \right) \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right) = \left(\frac{S}{N_0} \right) \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right)^{\left(\frac{N_0 B}{S} \right)}$$

- Επειδή όμως $\lim_{x \rightarrow 0} (1 + x)^{\frac{1}{x}} = e$ καταλήγουμε ότι

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \left(\frac{S}{N_0} \right) \log_2 e = 1.44 \left(\frac{S}{N_0} \right)$$



Σχέση χωρητικότητας – εύρους ζώνης- θορύβου

- Ποιος ο μεγιστος ρυθμός μετάδοσης $\max R_b$ σε ένα ενθόρυβο κανάλι;

Πρέπει: $R_b < C$

Όπου C , η χωρητικότητα του καναλιού

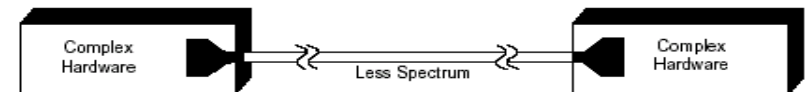
$$C = B \log_2(1+S/N)$$

Νόμος Hartley-Shannon

- Προσθετικός Gaussian θόρυβος ($N=N_0B$)

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = 1.44 \frac{S}{N_0}$$

- Ανταλλαγή εύρους ζώνης - ισχύος





Παράδειγμα 1

Telephone channel (3400 Hz) at 40 dB SNR

$$C = W \log_2 (1 + \text{SNR}) \text{ b/s}$$

$$\text{SNR} = 40 \text{ dB} ; 40 = 10 \log_{10} (\text{SNR}) ;$$

$$4 = \log_{10} (\text{SNR}) ; \text{SNR} = 10,000$$

$$C = 3400 \log_2 (10001) = 44.8 \text{ kbps}$$



Παράδειγμα 2

Για μετάδοση μέσα από ενθόρυβο κανάλι, εύρους ζώνης **B=10 KHz** και με: (α) **SNR = 31 dB** και (β) **SNR = 63 dB**, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (χωρητικότητα), σύμφωνα με το θεώρημα Shannon – Hartley, είναι:

$$1) C = 10.000 \log_2(1 + 10^{3,1}) = 10.000 \times 10.30 = 100.300 \text{ bits/sec}$$

$$2) C = 10.000 \log_2(1 + 10^{6,3}) = 10.000 \times 20.92 = 209.200 \text{ bits/sec}$$

Παρατηρούμε ότι η ύπαρξη θορύβου στο κανάλι **υποβιβάζει σημαντικά** τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.



η χωρητικότητα στην πράξη

- η επίτευξη της μέγιστης θεωρητικής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων που προβλέπει ο νόμος του Shannon είναι πρακτικώς αδύνατη διότι:
 - προϋποθέτει μηνύματα απείρου μήκους και με καθαρά *Gaussian* τυχαία κατανομή
 - δε λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής
- ο μέγιστος πρακτικά βασικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί με απλή δυαδική σηματοδосία και χωρίς κωδικοποίηση διόρθωσης σφαλμάτων κυμαίνεται από $C/2$ έως $C/10$



Προσέγγιση του ορίου Shannon

- Για την προσέγγιση της θεωρητικής μέγιστης τιμής του Shannon υιοθετούνται διάφορες τεχνικές:
 - κωδικοποίηση πηγής, ώστε τα παραγόμενα δεδομένα να προσομοιάζουν σε τυχαίες ακολουθίες με κανονική κατανομή
 - κωδικοποίηση καναλιού, που επιτρέπει την ανίχνευση και επιδιόρθωση των σφαλμάτων
 - σηματοδοσία πολλών επιπέδων, ώστε να μεταδίδονται ταυτόχρονα περισσότερα από ένα bits
 - χρήση κατάλληλων τεχνικών διαμόρφωσης (ASK, FSK, PSK) και των παραλλαγών τους (π.χ. GMSK)

Παράδειγμα 3

If a given channel is assigned between 2.2675Ghz and 2.2725Ghz, and the ratio of signal to noise on this channel is expected to be around 12.6 dB, how many signalling levels are required to reach capacity?

$$\begin{aligned} B &= 2.2675\text{Ghz} - 2.2725\text{Ghz} = 0.0050\text{Ghz} = 5.0\text{Mhz} \\ \text{SNR} &= 10^{\text{SNR}_{\text{dB}}/10} = 10^{12.6/10} \approx 18.2 \\ C &= B \log_2(1 + \text{SNR}) = 5.0 \log_2(19.2) = 21\text{Mbps}^a \\ M &= \left\lceil 2^{\frac{C}{2B}} \right\rceil = \left\lceil 2^{\frac{21}{2 \cdot 5.0}} \right\rceil = \left\lceil 2^{2.1} \right\rceil = \lceil 4.3 \rceil = 4 \end{aligned}$$

αφού πρέπει: $R_s \log_2 M = 2B \log_2 M \leq C$

$$\left[x = \log_{\beta} \alpha \Leftrightarrow x = \frac{\log_{\gamma} \alpha}{\log_{\gamma} \beta} \right] \text{ and } \left[x = \log_{\alpha} y \Leftrightarrow y = \alpha^x \right]$$



Παράδειγμα 4

Σε τηλεφωνική ζεύξη με εύρος ζώνης $B = 3 \text{ kHz}$ και μέσο λόγο σήματος προς θόρυβο $SNR = 30 \text{ dB}$. Ποιος είναι ο μέγιστος ρυθμός αποστολής δεδομένων άνευ σφαλμάτων που μπορεί να υποστηριχθεί από το κανάλι και πόσες καταστάσεις σηματοδοσίας πρέπει να χρησιμοποιηθούν;

$$C = 3000 \log_2 (10^3 + 1) = 29.9 \text{ kbps}$$

Προσοχή! Ο SNR πρέπει να μετατραπεί από dB σε καθαρό αριθμό, π.χ. τα 30 dB είναι 10^3 .

Για να καθοριστεί το πλήθος των καταστάσεων σηματοδοσίας που απαιτούνται για να υποστηριχθεί αυτός ο ρυθμός δεδομένων, θα εφαρμόσουμε τη σχέση:

$$C = 2B \log_2 M \text{ (για κανάλι βασικής ζώνης)}$$

Έτσι απαιτούνται : $M = 2^{C/2B} = 31.6 \rightarrow 32$ καταστάσεις σηματοδοσίας



Απόδοση Ισχύος και Εύρους Ζώνης

Για ένα σύστημα που εκπέμπει στη μέγιστη χωρητικότητα C , η **μέση ισχύς θήματος** S , που μετριέται στην είσοδο του δέκτη, γράφεται ως $S = E_b C$, όπου E_b είναι η μέση λαμβανόμενη ενέργεια ανά bit.

Η **μέση ισχύς θορύβου** N μπορεί επίσης να οριστεί ως $N = N_0 B$, όπου N_0 είναι η πυκνότητα ισχύος θορύβου (Watt/Hz).

Έτσι, το θεώρημα Shannon – Hartley μπορεί να γραφεί ως:

$$C/B = \log_2 \left(1 + \frac{E_b C}{N_0 B} \right)$$

- Ο όρος C/B αντιπροσωπεύει τη **φασματική απόδοση** (bit/s/Hz) του συστήματος.
- Ο λόγος E_b/N_0 αποτελεί μέτρο της **απόδοσης ισχύος** του συστήματος. Όσο μικρότερος είναι, τόσο λιγότερη ενέργεια χρησιμοποιείται από κάθε bit (και κάθε σύμβολο), ώστε αυτό να ανιχνευθεί σωστά παρουσία μίας δεδομένης ποσότητας θορύβου.



Γραφική Απεικόνιση Θεωρήματος Shannon - Hartley

- Η φασματική απόδοση σχετίζεται και άρα μπορεί να ανταλλαχθεί με την απόδοση ισχύος, και αντίστροφα.
- Το θεώρημα Shannon – Hartley θεωρεί ότι ο θόρυβος που συνυπάρχει με το σήμα, είναι λευκός, προσθετικός και γκαουσιανής μορφής (Additive White Gaussian Noise - AWGN).
- Αυτό γενικά ισχύει αν το εύρος ζώνης λειτουργίας ενός συστήματος επικοινωνίας είναι μικρό σε σύγκριση με την κεντρική συχνότητα του καναλιού.
- Στην πράξη, κανένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνιών δεν μπορεί να επιτύχει τη χωρητικότητα που προβλέπεται από την εξίσωση Shannon, και τα περισσότερα υπολείπονται κατά 3 dB ή περισσότερο.

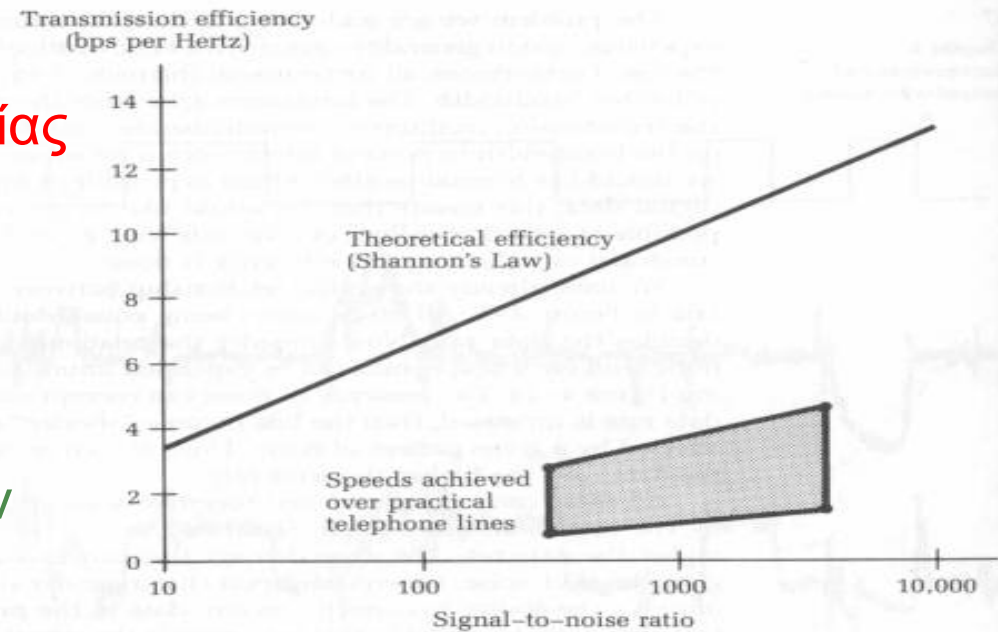


FIGURE 4-15 Theoretical and Actual Transmission Efficiency

Ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνιών λειτουργεί με φασματική απόδοση 4 bit/s/Hz, να χωρά ικανό αριθμό χρηστών.

A) Ποια είναι η ελάχιστη τιμή του λόγου E_b/N_0 ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι χρήστες στις παρυφές της περιοχής κάλυψης θα έχουν επικοινωνία απαλλαγμένη από σφάλματα;

B) Αν είναι επιθυμητός ο διπλασιασμός των χρηστών, πόσο περισσότερη ισχύ θα πρέπει να ακτινοβολεί ο σταθμός βάσης και οι συσκευές των χρηστών, ώστε να διατηρηθεί η υπάρχουσα κάλυψη και η επικοινωνία να είναι απαλλαγμένη από σφάλματα;

Απάντηση:

A) Θέτουμε $C/B = 4$ στη σχέση Shannon – Hartley και έχουμε $4 = \log_2(1 + 4E_b/N_0)$. Λύνουμε ως προς E_b/N_0 και βρίσκουμε:

$$E_b/N_0 = (2^4 - 1)/4 = 3,75 \text{ ή } 5,74 \text{ dB}$$

B) Για να διπλασιαστεί ο αριθμός χρηστών στο δίκτυο για το ίδιο εύρος ζώνης λειτουργίας, θα πρέπει να αυξηθεί η φασματική απόδοση σε 8 bit/s/Hz. Επομένως:

$$E_b/N_0 = (2^8 - 1)/8 = 31,87 \text{ ή } 15,03 \text{ dB}$$

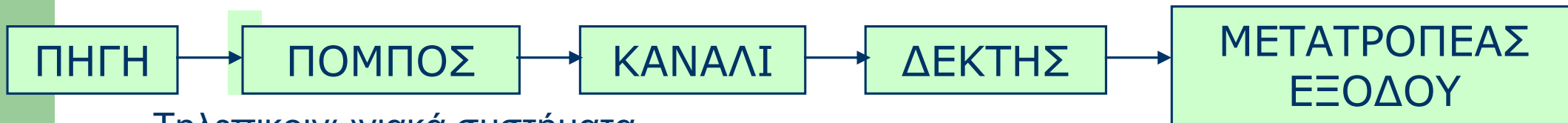
Άρα η εκπεμπόμενη ισχύς θα πρέπει να αυξηθεί κατά $15,03 - 5,74 = 9,29 \text{ dB}$.



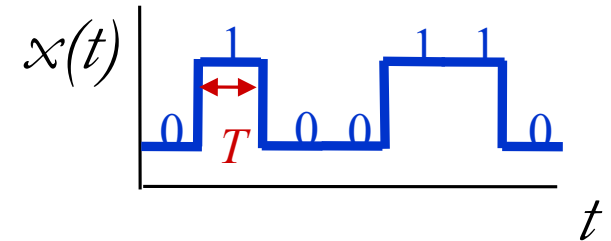
ΣΥΝΕΠΩΣ.....



Είδη Συστημάτων και Σημάτων



- Τηλεπικοινωνιακά συστήματα
 - πολλά διαφορετικά συστήματα
 - πολλοί διαφορετικοί τύποι πληροφορίας
- Σχεδιαστικές προκλήσεις σε θέματα
 - υλικού
 - συστήματος
 - δικτύου
- Αναπαράσταση πληροφορίας
 - αναλογικά σήματα
 - bits



Κριτήρια Απόδοσης

- Αναλογικά Συστήματα Επικοινωνίας

- κριτήριο είναι η πιστότητα

$$m(t) \approx \hat{m}(t)$$

- Ψηφιακά Συστήματα Επικοινωνίας

- κριτήρια είναι

- ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (R bps)

$$P_b = P(b \neq \hat{b})$$

- πιθανότητα σφάλματος bit

- για ιδανικό κανάλι και απουσία θορύβου δεν εμφανίζονται σφάλματα

- παρουσία θορύβου, η P_b εξαρτάται

- από την ισχύ σήματος και την ισχύ θορύβου
- το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων
- τα χαρακτηριστικά του καναλιού

Περιορισμοί

- Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων R_b για δεδομένη πιθανότητα σφάλματος bit περιορίζεται από
 - ισχύ του σήματος και του θορύβου
 - την παραμόρφωση
- Απουσία παραμόρφωσης και θορύβου, μπορεί να επιτευχθεί άπειρος ρυθμός μετάδοσης με μηδενική πιθανότητα σφάλματος
- Το θεώρημα **Shannon-Hartley** ορίζει το μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για συστήματα με θόρυβο *
- για κανάλι AWGN, ισχύει:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{BN_0} \right) \text{ bits/sec}$$

* δεν προτείνει όμως δέκτες για πρακτικά συστήματα



Κριτήρια επίδοσης

- **Bandwidth (Εύρος Ζώνης):** Το εύρος των συχνοτήτων που περιέχεται σε ένα σήμα ή το εύρος των συχνοτήτων που μπορεί να μεταδώσει ένα κανάλι (Hertz). Καταχρηστικά, μπορεί να αναφέρεται στο bit rate (bits/sec) που μπορεί να μεταδώσει ένα κανάλι (χωρητικότητα)
- **Throughput:** αποτελεί μέτρο της (πραγματικής) ταχύτητας μετάδοσης πληροφορίας σε ένα δίκτυο και είναι μικρότερο από το bandwidth.
- **Latency (Delay):** χαρακτηρίζει το χρόνο που χρειάζεται ένα σήμα για να μεταδοθεί από την πηγή στον προορισμό
 - **Bandwidth-delay product:** καθορίζει τον αριθμό των bits που μπορούν να μεταδοθούν από το κανάλι
- **Jitter:** δημιουργείται όταν διάφορα πακέτα πληροφορίας υφίστανται διαφορετική καθυστέρηση και η πληροφορία που μεταδίδεται αφορά time-sensitive εφαρμογή



ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

- **καθυστέρηση μετάδοσης** (Transmission delay) οφείλεται στο ρυθμό μετάδοσης του καναλιού ($t_t \sim 1/R_b$)
- **καθυστέρηση διάδοσης** (Propagation delay) εξαρτάται από την ταχύτητα διάδοσης στο συγκεκριμένο μέσο και την απόσταση μεταξύ πηγής και προορισμού ($t_p = 3L/2C$)
- **καθυστέρηση αναμονής** (Queuing delay) εξαρτάται από το μέγεθος του buffer
- **καθυστέρηση επεξεργασίας** (Processing delay) Π.χ. σε packet switched networks, header processing, error check, κλπ]

Delay = Transmission + Processing + Queuing + Propagation



Υπολογισμός συνιστωσών καθυστέρησης

- Transmission delay: μήκος πακέτου προς μετάδοση (bits) / data rate (bits/sec)
- Propagation delay: μήκος καλωδίου / ταχύτητα σήματος στο καλώδιο
- Queuing delay: ποσοστό του transmission delay

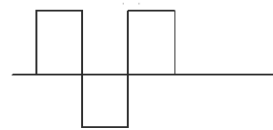
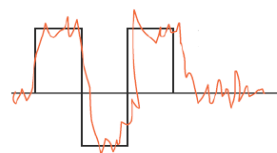
Παράδειγμα:

- Γραμμή μήκους 500 μέτρα. Ταχύτητα διάδοσης (copper wire) $200 * 10^6$ μέτρα ανά δευτερόλεπτο ($\sim 2/3$ of speed of light)
- Πακέτο μήκους 512 bits. Data rate 1 Mbps.
- Καθυστέρηση επεξεργασίας και αναμονής ίση με τη καθυστέρηση μετάδοσης
- Delay = Trans + Proc + Queuing + Prop =
 $3 * (512/1,000,000) \text{ sec} + [500/(200 * 10^6)] \text{ sec} =$
 $(1536 + 2.5)/10^6 \text{ sec} = 1538.5/10^6 \text{ sec} = 1538.5 \text{ } \mu\text{sec}$



Προτιμάμε τα ψηφιακά συστήματα γιατί ...

- ❑ Μπορούμε πιο εύκολα **να αφαιρέσουμε** τον “θόρυβο”
- ❑ Η πιστότητα του σήματος ελέγχεται πιο εύκολα στην ψηφιακή μετάδοση
- ❑ Το ψηφιακό σήμα μπορεί να αναγεννηθεί εξαλείφοντας έτσι την επίδραση θορύβου. Το αναλογικό σήμα ενισχύεται οπότε ο θόρυβος δρα προσθετικά
- ❑ Μπορούμε να εξαλείψουμε την πλεονάζουσα πληροφορία του αναλογικού σήματος(κωδικοποίηση MPEG)
- ❑ Μικρότερες απαιτήσεις εύρους ζώνης (συμπίεση)
- ❑ Τα ψηφιακά συστήματα είναι συνήθως πιο φθηνά





Πλεονεκτήματα των ψηφιακών έναντι των αναλογικών σημάτων

- ❑ Ομοιομορφία (όλα τα είδη πληροφορίας μπορούν να μετατραπούν σε ψηφιακή μορφή και να επεξεργαστούν με τον ίδιο τρόπο και το ίδιο υλικό). Πολυμεσικές (multimedia) πηγές (φωνή, βίντεο, δεδομένα) μπορούν να συνυπάρξουν και να μεταδοθούν διαμέσου ενός κοινού ψηφιακού συστήματος
- ❑ Πιο εύκολη κρυπτογράφηση πληροφορίας
- ❑ Μπορεί να υλοποιηθεί διαδικασία ανίχνευσης και διόρθωσης λαθών



Μειονεκτήματα των ψηφιακών έναντι των αναλογικών σημάτων

- ❑ Παραμόρφωση του σήματος λόγω της διαδικασίας δειγματοληψίας και κβαντισής
- ❑ Χρειάζονται μεγαλύτερο εύρος ζώνης (χωρίς τη συμπίεση)
- ❑ Χρειάζονται μηχανισμούς συγχρονισμού στον πομπό και το δέκτη



Συγχρονισμός των ψηφιακών συστημάτων

- Τα ψηφιακά συστήματα απαιτούν έλεγχο χρονισμού (Αναγνώριση bit rate, αρχή και τέλος κάθε bit)
- Τα bits αποστέλλονται ως ομάδες (blocks)
- Προσθήκη bits ελέγχου -χρονισμού

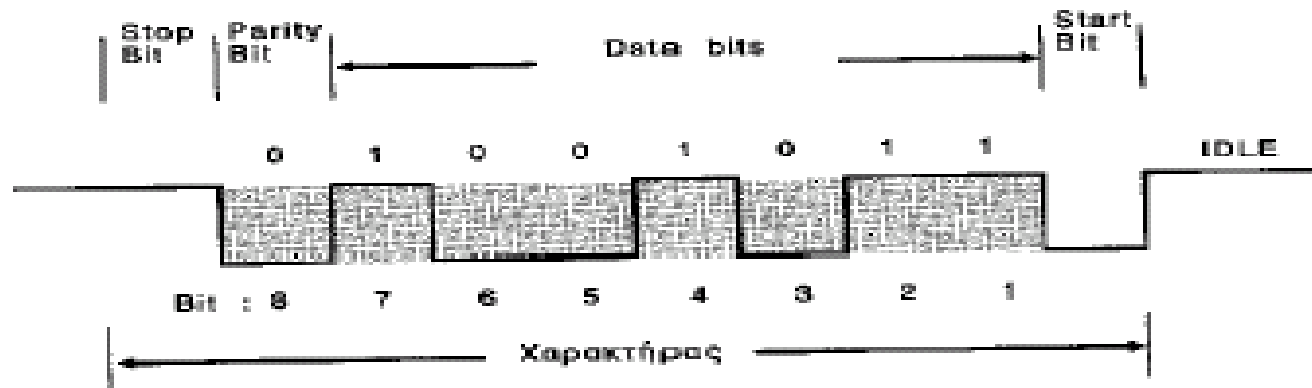
- **Ασύγχρονα συστήματα**

- **Σύγχρονα συστήματα**



Ασύγχρονα Συστήματα

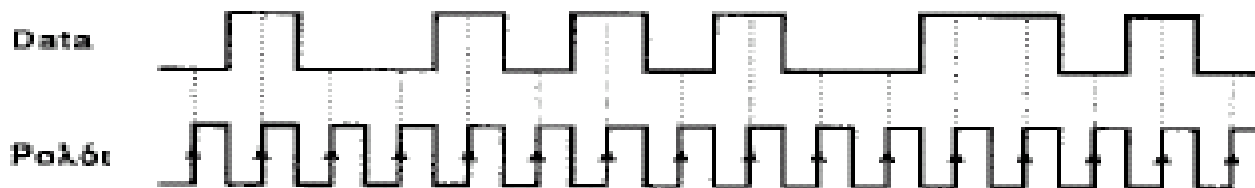
- Αποστολή δεδομένων υπό μορφή χαρακτήρων (8bits - Bytes)
- Χρονικό διάστημα διαχωρισμού
- Προσθήκη bits ελέγχου: start bit, parity bit, stop bit (idle)





Σύγχρονα συστήματα

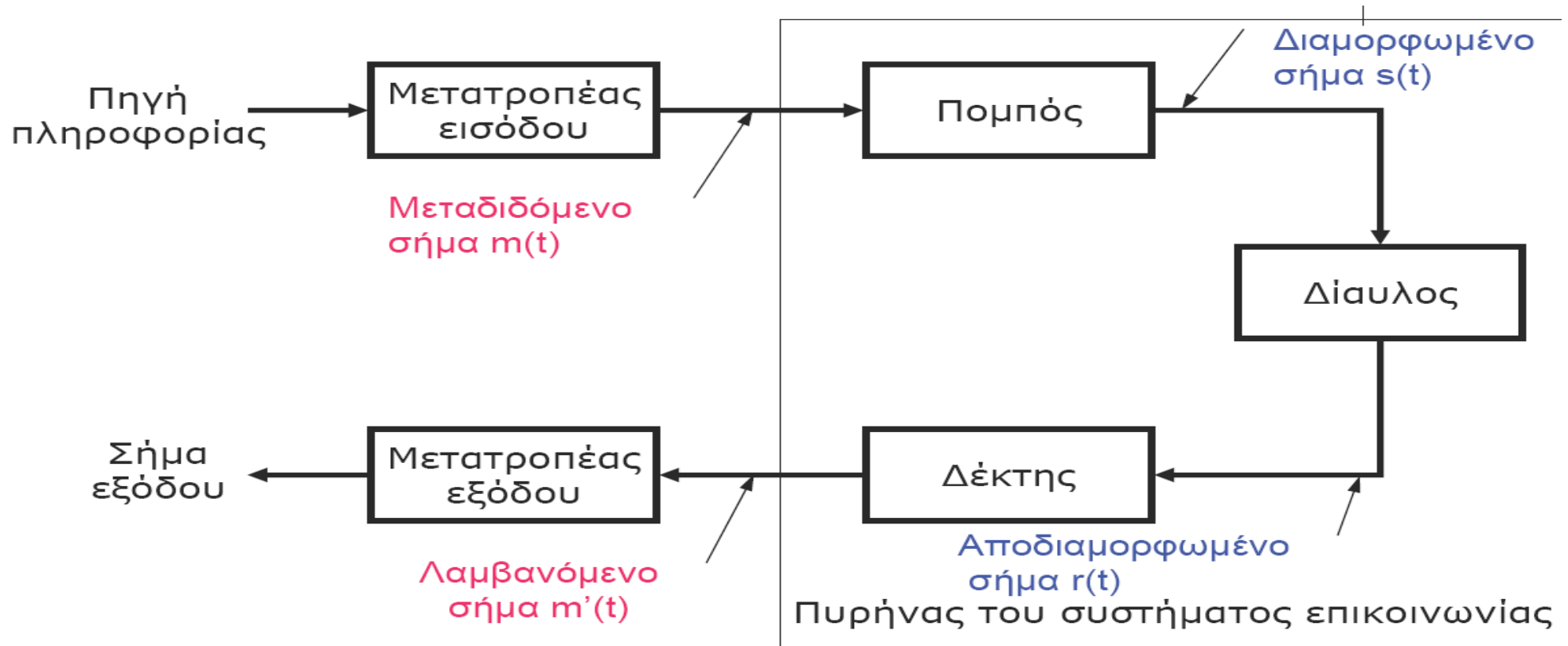
- Οι χαρακτήρες ομαδοποιούνται σε blocks
- Τα δεδομένα συνοδεύονται από ένα σήμα χρονισμού (Clock) = τετραγωνική κυματομορφή με συχνότητα ίση με το ρυθμό μετάδοσης
- Ανεξάρτητα clocks για εκπομπή και λήψη
- Δυο χαρακτήρες συγχρονισμού για την αναγνώριση της αρχής και του τέλους του block



ΕΚΠΙΑ - Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών

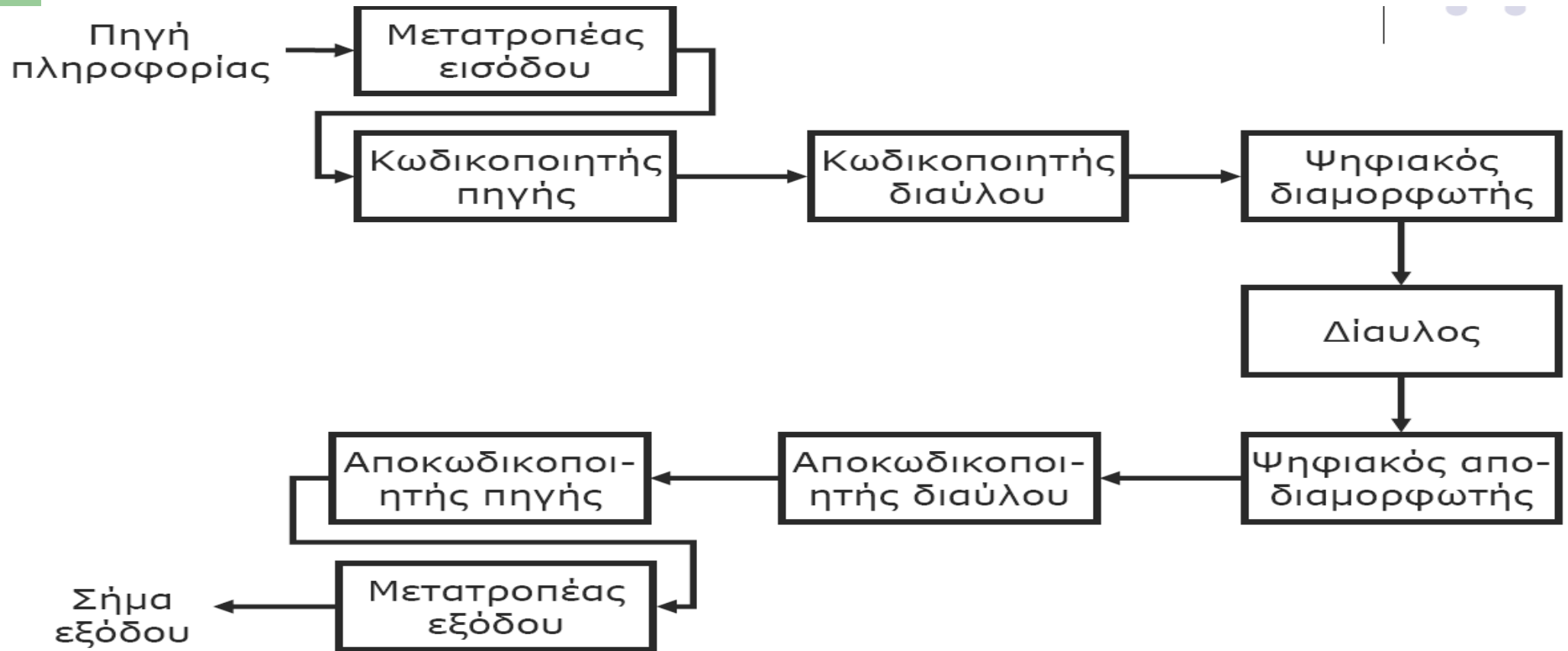


Αναλογικό Τηλεπικοινωνιακό σύστημα





Ψηφιακό Τηλεπικοινωνιακό σύστημα





Τα επιμέρους...

- Η έξοδος της πηγής πληροφορίας μπορεί να είναι ένα αναλογικό σήμα (π.χ. φωνή ή video) ή ένα ψηφιακό (π.χ. η έξοδος από ένα PC).
- Τα μηνύματα που παράγονται από την πηγή μετατρέπονται συνήθως σε ακολουθίες από δυαδικά ψηφία (0 και 1).
- Ο *κωδικοποιητής πηγής* αναλαμβάνει να μετατρέψει τα δυαδικά ψηφία αυτά σε άλλες ακολουθίες ψηφίων που είναι πιο κατάλληλες για την μετάδοση (π.χ. κάνει κάποιο είδος συμπίεσης).
- Ο *κωδικοποιητής καναλιού* αναλαμβάνει να αυξήσει την αξιοπιστία των δεδομένων με την χρήση πλεονασμού: Π.χ. θα μπορούσε να επαναλαμβάνει δύο φορές κάθε σύμβολο που έρχεται από τον κωδικοποιητή πηγής ώστε να μπορούμε να ανιχνεύουμε τα σφάλματα κατά την μετάδοση.
- Ο *ψηφιακός διαμορφωτής* αντιστοιχεί μία ακολουθία από δυαδικά ψηφία σε μία κυματομορφή.
- Στον δέκτη υπάρχουν τα αντίστροφα επιμέρους στοιχεία.

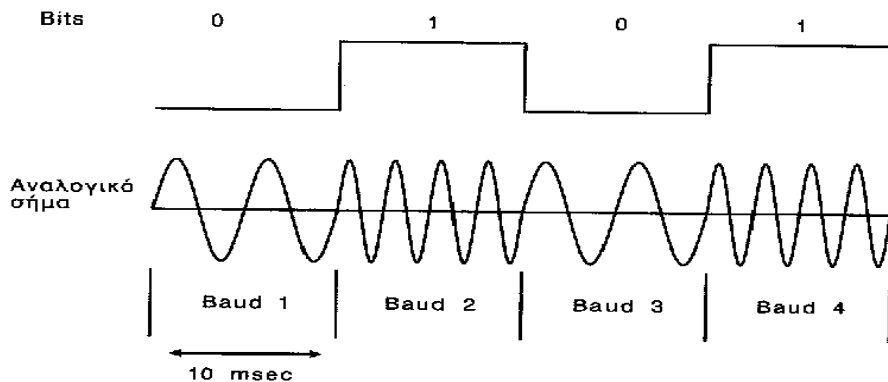


Στοιχεία μετάδοσης στα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

- Μορφές μετάδοσης: Σειριακή-Παράλληλη
- Τύποι διαμόρφωσης
- Κωδικοποίηση Πηγής -καναλιού
- Συγχρονισμός: Ασύγχρονα - Σύγχρονα Συστήματα
- Τρόποι επικοινωνίας: Simplex, Half/Full Duplex
- Τρόποι Σύνδεσης: point to point, Multipoint
- Ρυθμοί μετάδοσης
- Τύποι Μεταγωγής: Μεταγωγή κυκλώματος, Μεταγωγή Πακέτου

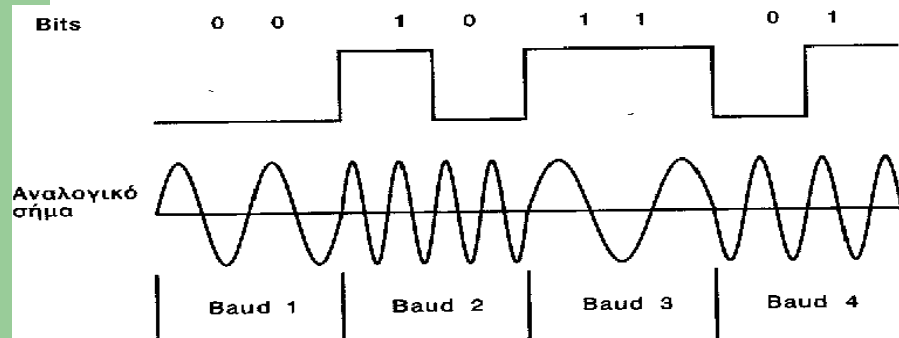


Ρυθμός μετάδοσης διαμορφωμένου σήματος



• Ρυθμός μετάδοσης διαμορφωμένου σήματος: $1/0.010 = 100$ bauds

• Ρυθμός μετάδοσης data : $1/0.010 = 100$ bps



• Ρυθμός μετάδοσης διαμορφωμένου σήματος: $1/0.010 = 100$ bauds

• Ρυθμός μετάδοσης data : $1/0.0050 = 200$ bps



Τυποποιημένοι ρυθμοί Μετάδοσης

Τα ψηφιακά σήματα πολυπλέκονται κατά TDM και σύμφωνα με τα πρότυπα:

- **SONET/SDH rates:**

- OC-3, STM-1: 155.52 Mb/s
- OC-12, STM-4: 622.08 Mb/s
- OC-48, STM-16: 2488.32 Mb/s
- OC-192, STM-64: 9953.28 Mb/s

- **Datacom rates:**

- FDDI: 125 (100) Mb/s
- FireWire: 100 - 800 Mb/s
- Fibre Channel: 266 - 1063 Mb/s
- Ethernet: 10 or 100 Mb/s
- G-Ethernet: 1250 Mb/s-100Gbps

- **PDH:**

North America:

- DS1: 1.544 Mb/s
- DS2: 6.312 Mb/s
- DS3: 44.736 Mb/s
- DS4: 139.264 Mb/s

Europe:

- E1 2.048 Mb/s
- E2: 8.448 Mb/s
- E3: 34.368 Mb/s
- E4: 139.264 Mb/s