

# Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

---

- Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα έχουν στόχο την **μετάδοση πληροφορίας** από ένα σημείο σε ένα άλλο.
- Για την αποθήκευση και μετάδοση της πληροφορίας χρησιμοποιούν **μεταβαλλόμενα ρεύματα και τάσεις (μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία)**.
- Χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα για τη μετάδοση των σημάτων, όπως
  - ✓ χάλκινα καλώδια (συστρεφόμενου ζεύγους, ομοαξονικά καλώδια...)
  - ✓ κυματοδηγοί
  - ✓ οπτικές ίνες
  - ✓ ασύρματα
- Τα σήματα προσαρμόζονται στο μέσο μετάδοσης μέσω της **διαμόρφωσης (modulation)** και της **κωδικοποίησης (coding)**.
- Οι τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης επιλέγονται με βάση
  - ✓ το μέσο μετάδοσης
  - ✓ Την πηγή πληροφορίας (στατιστική, τον ρυθμό μετάδοσης (rate) – ποιότητα επικοινωνίας (Quality of Service-QoS))

# Παράμετροι στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα

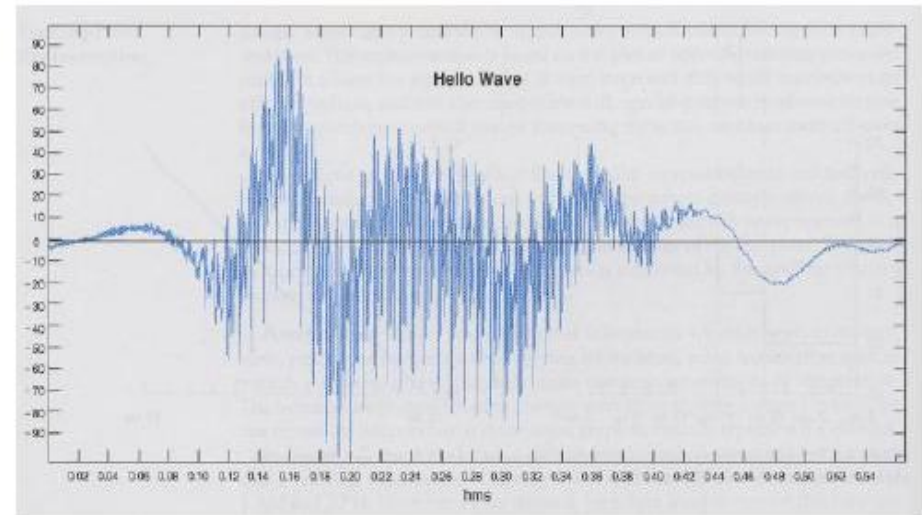
---

- ✓ Χρόνος μετάδοσης του μηνύματος (1 msec, 1 sec). Π.χ. η φωνή μέσω κινητής τηλεφωνίας μεταδίδεται σε msec. Μέσω δορυφόρου ο χρόνος μετάδοσης αυξάνεται σημαντικά
- ✓ Ποσότητα μεταδιδόμενης πληροφορίας (1 λέξη, ένα κείμενο, μια φωτογραφία κλπ.)
- ✓ Ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας (ποσότητα πληροφορίας στη μονάδα του χρόνου). π.χ. Με τα σήματα Morse μεταδίδουμε 10 λέξεις ανά sec. Με Ethernet μερικές εκατοντάδες Mb/sec
- ✓ Ποιότητα επικοινωνίας (Quality-of-Service, QoS)
- ✓ Δυνατότητα διόρθωσης λαθών
- ✓ Κατανάλωση ενέργειας

# Πηγές πληροφορίας

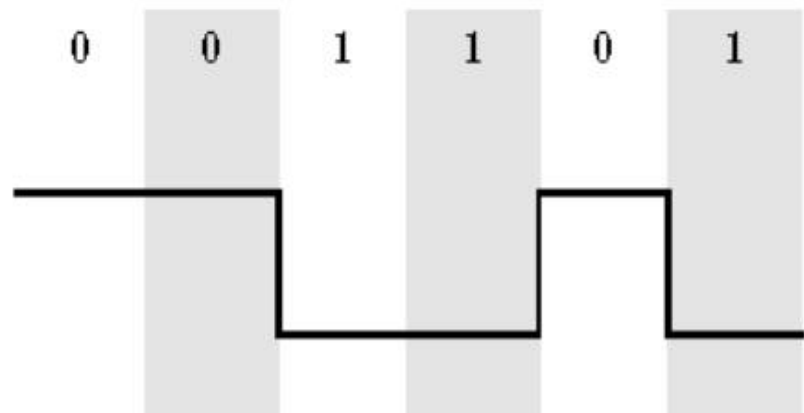
## • Αναλογικές πηγές πληροφορίας:

- ✓ Το σήμα ενός μικροφώνου
- ✓ Το σήμα μιας αναλογικής τηλεοπτικής κάμερας.



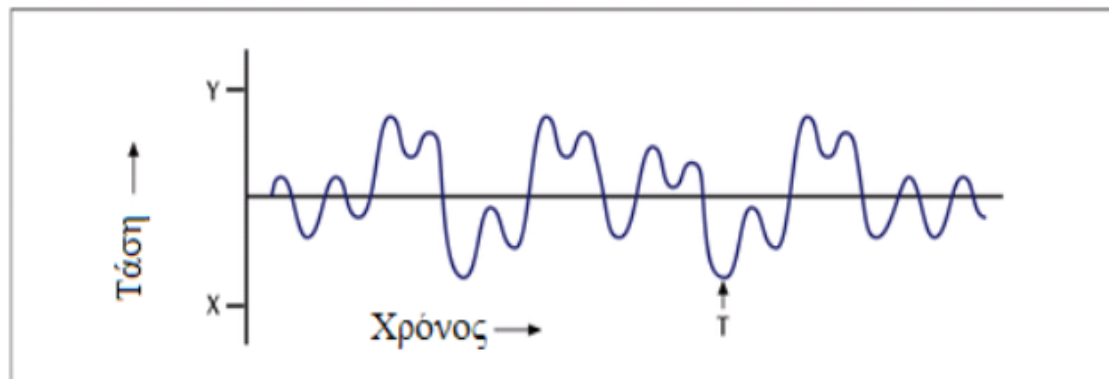
## • Ψηφιακές πηγές πληροφορίας:

- ✓ Υπολογιστές
- ✓ Ψηφιακή λήψη

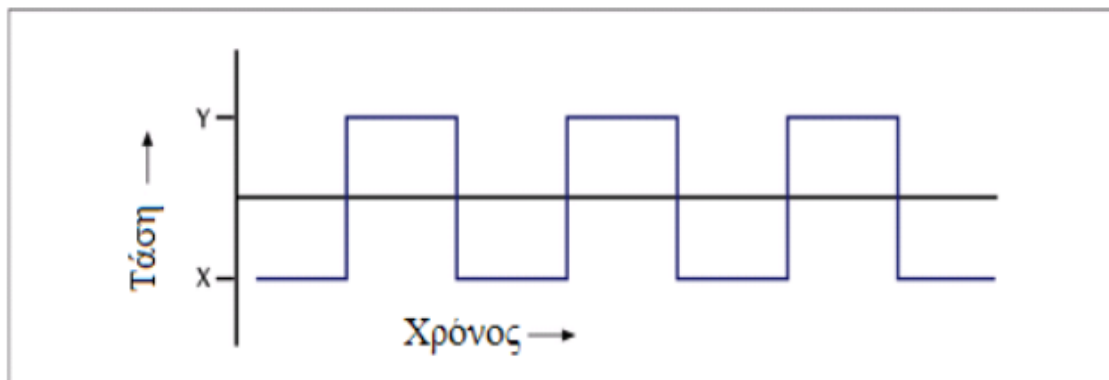


# Αναλογικά σήματα-Ψηφιακά σήματα

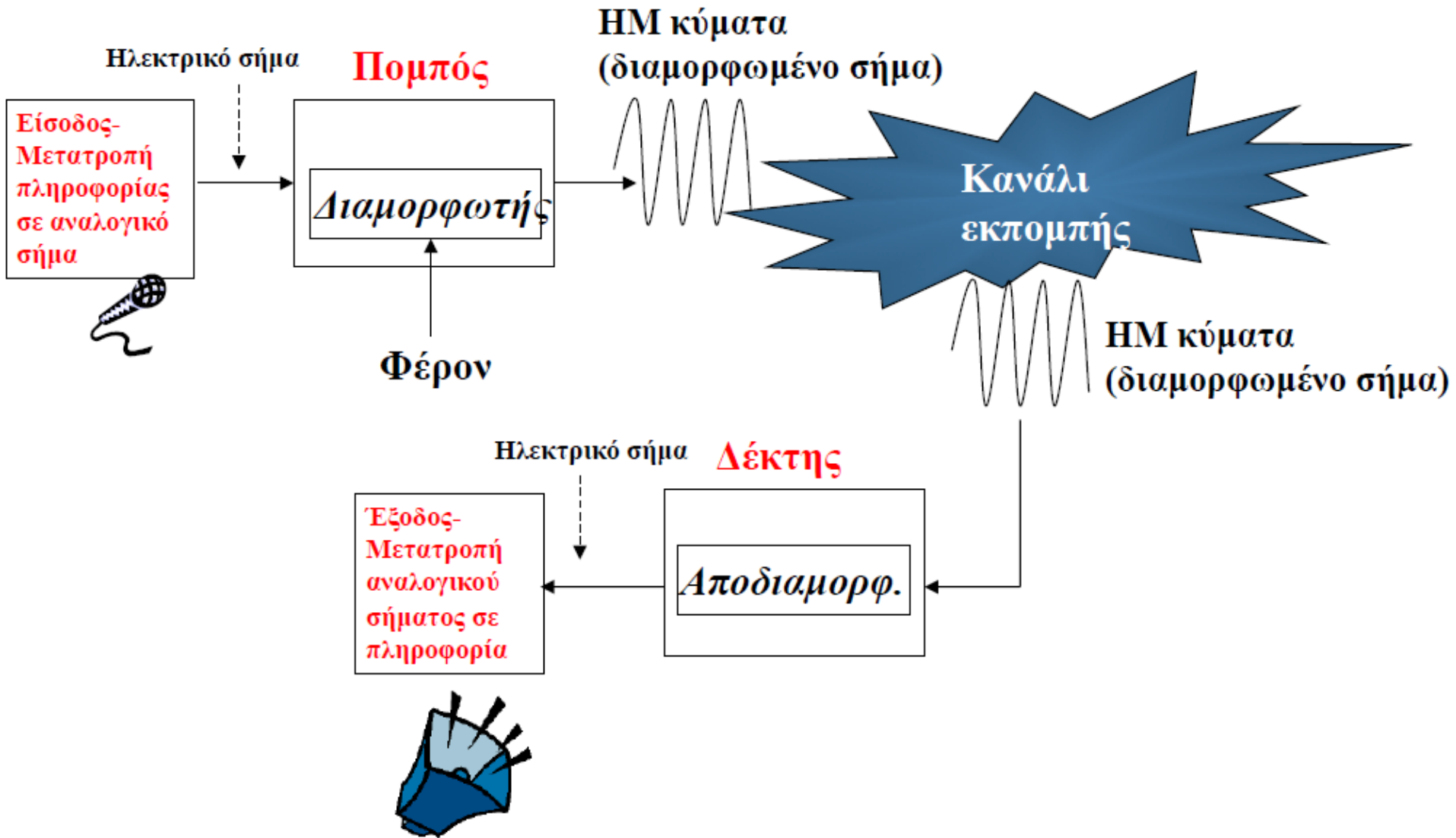
Το αναλογικό σήμα είναι μια συνεχής κυματομορφή, όπως π.χ. η μουσική και το video.



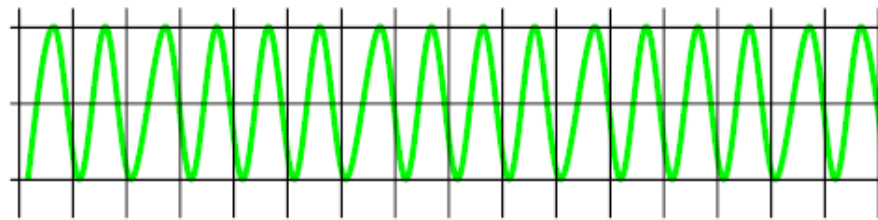
Το ψηφιακό σήμα αντιπροσωπεύει μια διακριτή κυματομορφή, όπως π.χ. Τα 0 και 1 των Η/Υ.



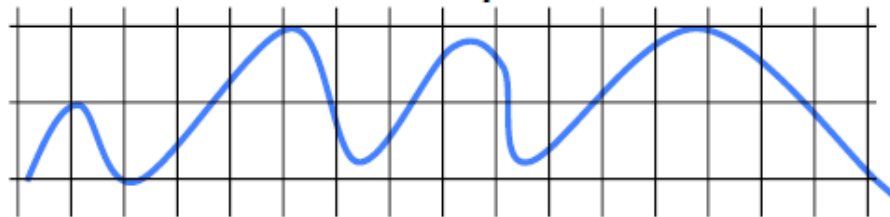
# Βασικό αναλογικό σύστημα επικοινωνίας



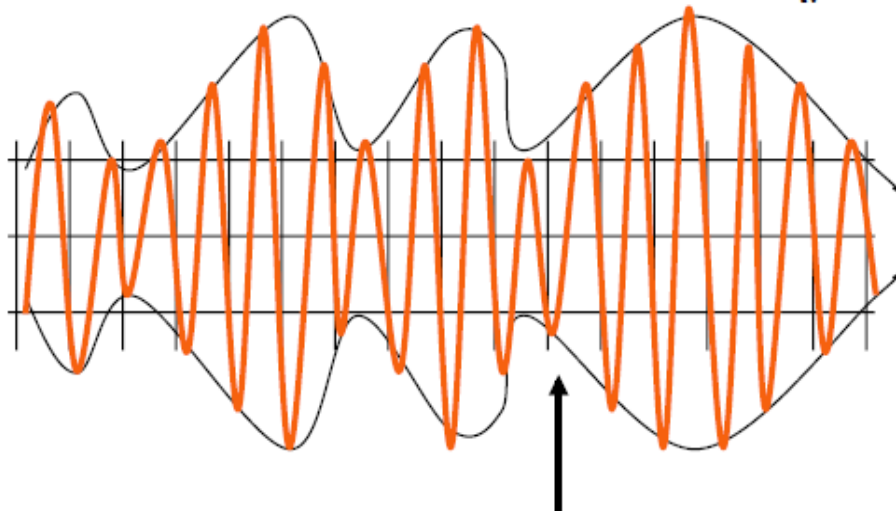
# Αναλογικές Διαμορφώσεις AM- FM



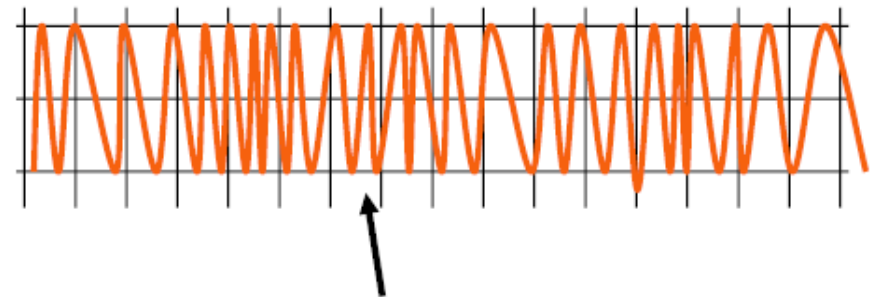
Φέρον



Σήμα Βασικής ζώνης



Σταθερή Συχν. Μεταβαλλ. Πλάτος, AM



Σταθερό πλάτος. Μεταβαλλ. Συχνότητα, FM

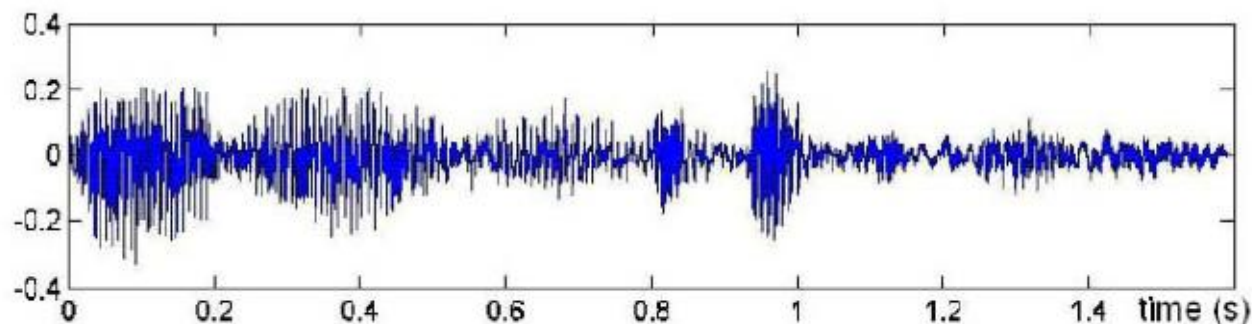
# Διαμόρφωση

---

- **Γιατί είναι απαραίτητη η διαμόρφωση;** Για να γίνει εφικτή η μετάδοση του σήματος στο μέσο διάδοσης.
  - ✓ Ενσύρματη μετάδοση
    - ❖ Προσαρμογή στο μέσο διάδοσης.
  - ✓ Ασύρματη μετάδοση
    - ❖ Γίνεται εφικτή η μετάδοση ΗΜ κυμάτων με κεραίες μικρών διαστάσεων. Ένα ΗΜ κύμα απαιτεί κεραία με μήκος συγκρίσιμου του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου/λαμβανόμενου σήματος.
    - ❖ Επομένως η μετάδοση ΗΜ κυμάτων με χαμηλή συχνότητα θα απαιτούσε τεράστιες κεραίες.

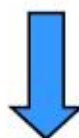
# Σήματα: Βασικής ζώνης και Ζωνοπερατό

- Σήμα βασικής ζώνης (*baseband*) είναι το σήμα με μη-μηδενικό φασματικό περιεχόμενο στην περιοχή γύρω από την συχνότητα  $f = 0$  και σχεδόν μηδενικό περιεχόμενο στην υπόλοιπη περιοχή του φάσματος.



- Ζωνοπερατό (*bandpass*) είναι το σήμα με μη-μηδενικό φασματικό περιεχόμενο συγκεντρωμένο γύρω από μία κεντρική συχνότητα  $f = \pm f_c$  (με  $f_c \gg 0$ ) και με σχεδόν μηδενικό περιεχόμενο στην υπόλοιπη περιοχή του φάσματος.

$$X(f) = 0, |f - f_c| \geq 2W.$$



$$x(t) = Am(t) \cos 2\pi f_c t$$



# Διαμόρφωση

**Διαμόρφωση**, είναι η διαδικασία αντιστοίχισης της πληροφορίας που μεταφέρει το σήμα βασικής ζώνης  $m(t)$  σε ένα χαρακτηριστικό ενός ζωνοπερατού σήματος, κατάλληλου για μετάδοση στο κανάλι

•Ανθρώπινη ομιλία (εύρος συχνοτήτων 20 Hz με 5 KHz).  
•Δεν υπάρχουν κεραίες για συχνότητες αυτής της τάξης (μήκος κύματος της τάξης των 100 Km)

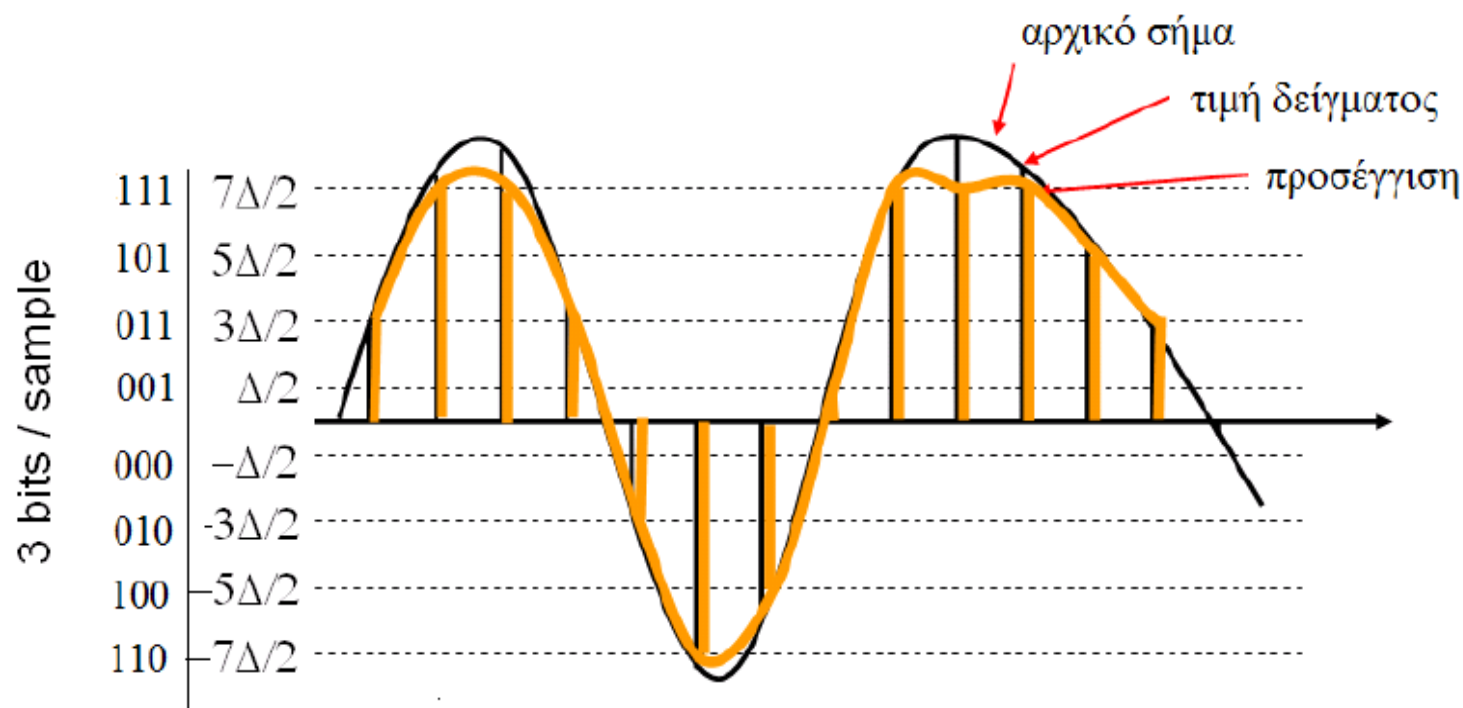
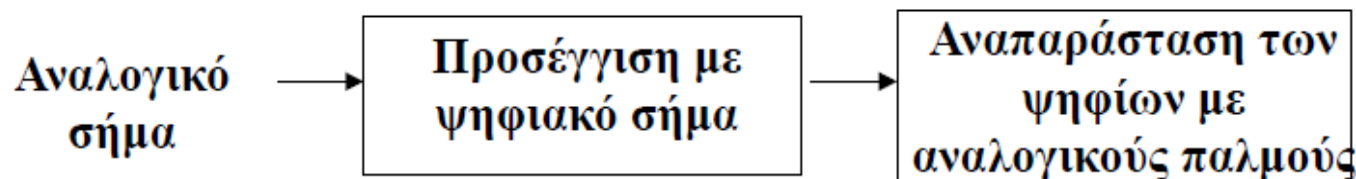
- ✓ Χαμηλή πολυπλοκότητα διατάξεων εκπομπή-λήψης Η/Μ ακτινοβολίας
- ✓ Πολυπλεξία
- ✓ Αντιμετώπιση των περιορισμών που επιβάλλει το κανάλι
- ✓ Διαμόρφωση για περιορισμό θορύβου και παρεμβολών
- ✓ Απονομή συχνοτήτων

Κινητή τηλεφωνία

Ραδιοφωνία-Τηλεόραση

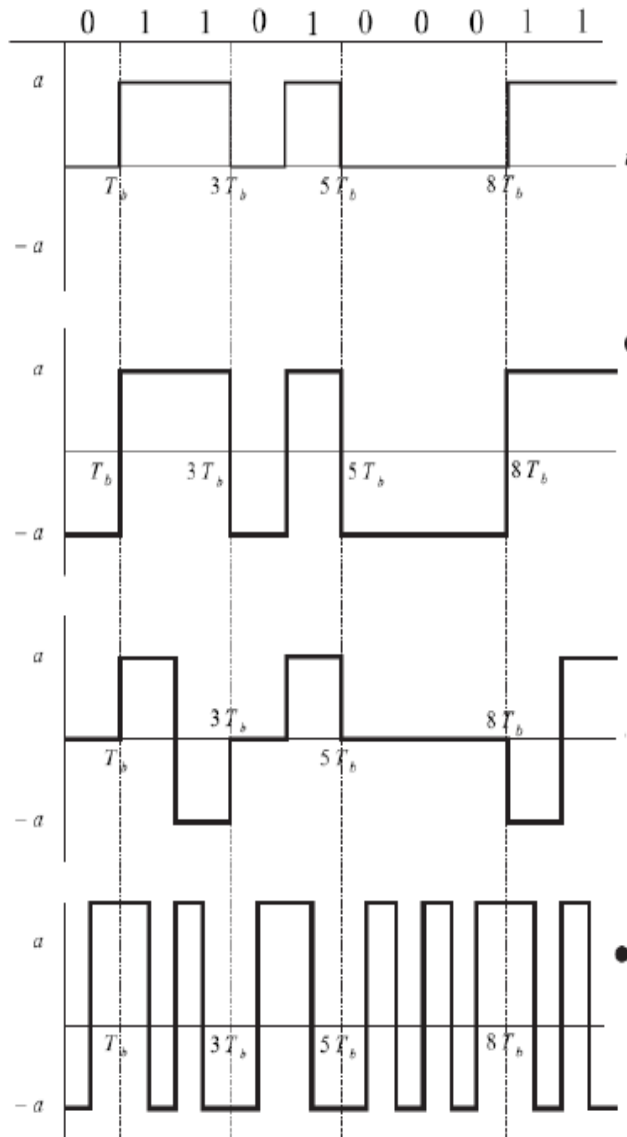
# Ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας

- Η βασική διαφορά με τα αναλογικά συστήματα:





# Αντιστοιχία bits σε κυματομορφές



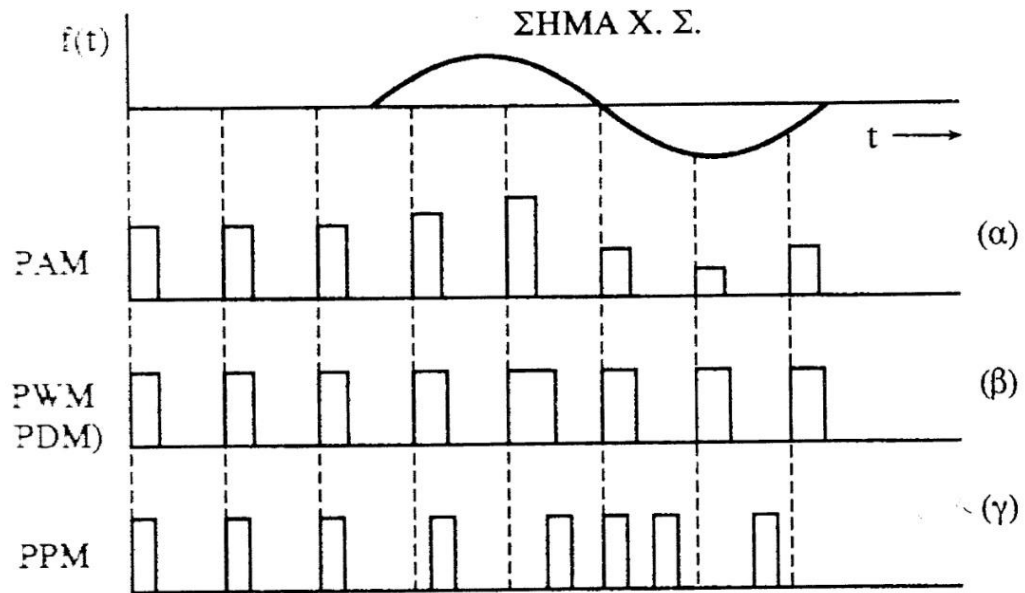
- **Unipolar ή On-Off.** Το 1 αντιστοιχεί σε ένα παλμό ενώ το 0 σε παύση της εκπομπής. Η τεχνική αυτή δημιουργεί DC συνιστώσα η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ανεπιθύμητη.

- **Polar,** όπου χρησιμοποιείται ένας θετικός παλμός για το 1 και ένας αρνητικός για το 0. Εδώ δεν υπάρχει DC συνιστώσα με την προϋπόθεση ότι τα 0 και 1 στην ακολουθία εισόδου φτάνουν με την ίδια πιθανότητα.

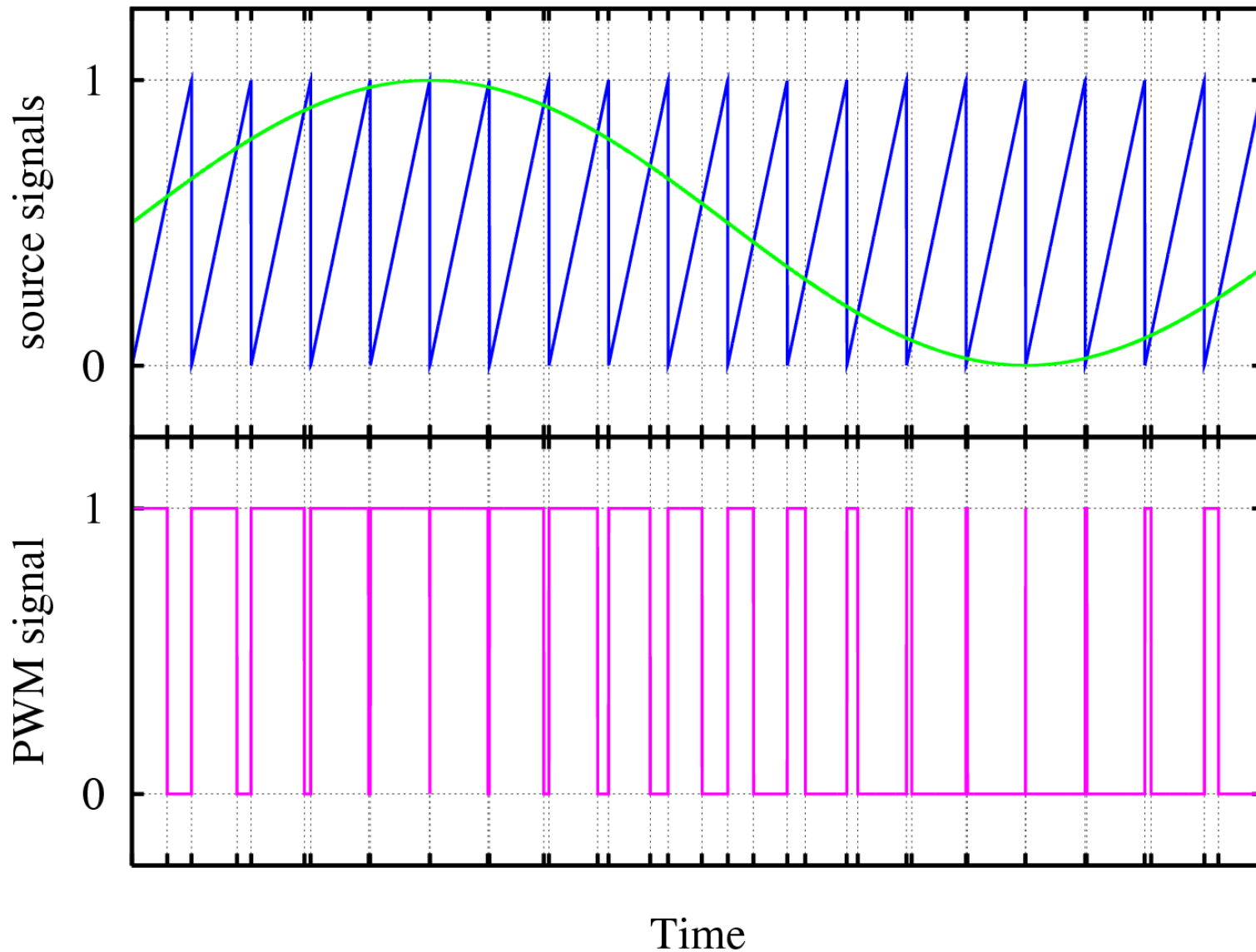
- **Bipolar ή Alternate Mark Inversion, AMI.** Στην περίπτωση του κώδικα AMI χρησιμοποιούνται εναλλάξ θετικοί και αρνητικοί παλμοί για το 1 (με την αλλαγή να πραγματοποιείται σε κάθε εμφάνιση του bit 1) ενώ δεν υπάρχει παλμός για το 0. Με τον τρόπο αυτό υπάρχουν τρία επίπεδα: +1, 0, -1.

- **Manchester.** Το 1 κωδικοποιείται με τη μετάδοση ενός θετικού παλμού για το μισό της περιόδου του συμβόλου και με ένα αρνητικό παλμό για το υπόλοιπο μισό. Για το ψηφίο 0 οι δύο παλμοί μεταδίδονται σε αντίστροφη σειρά.

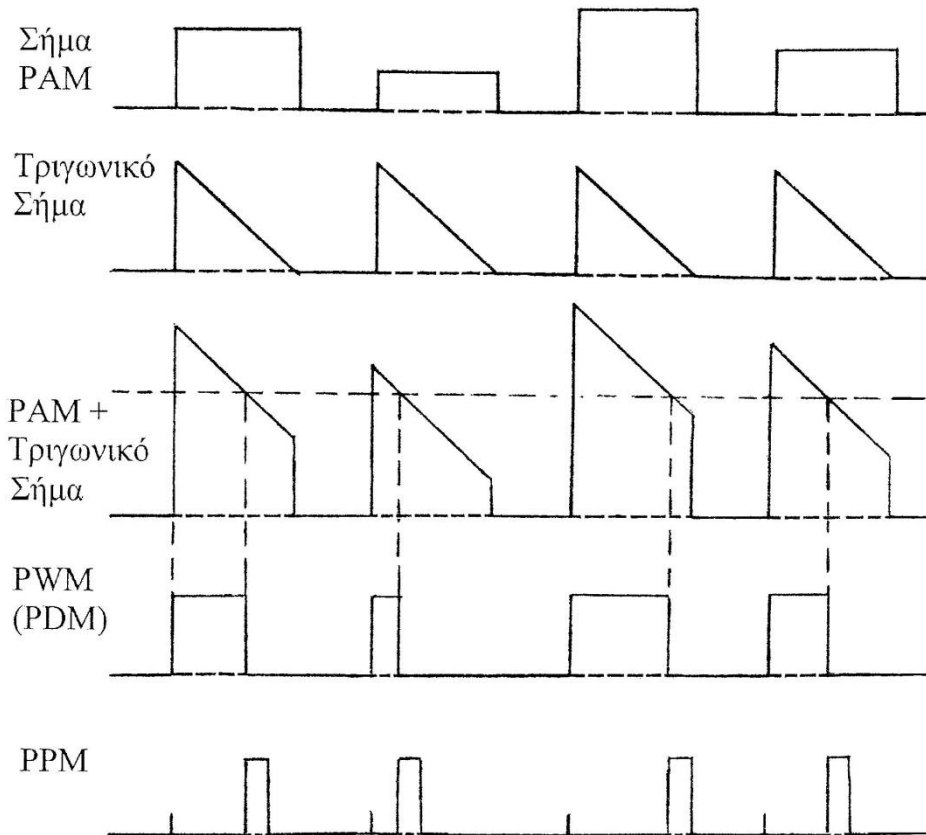
# PAM – PWM (PDM) - PPM



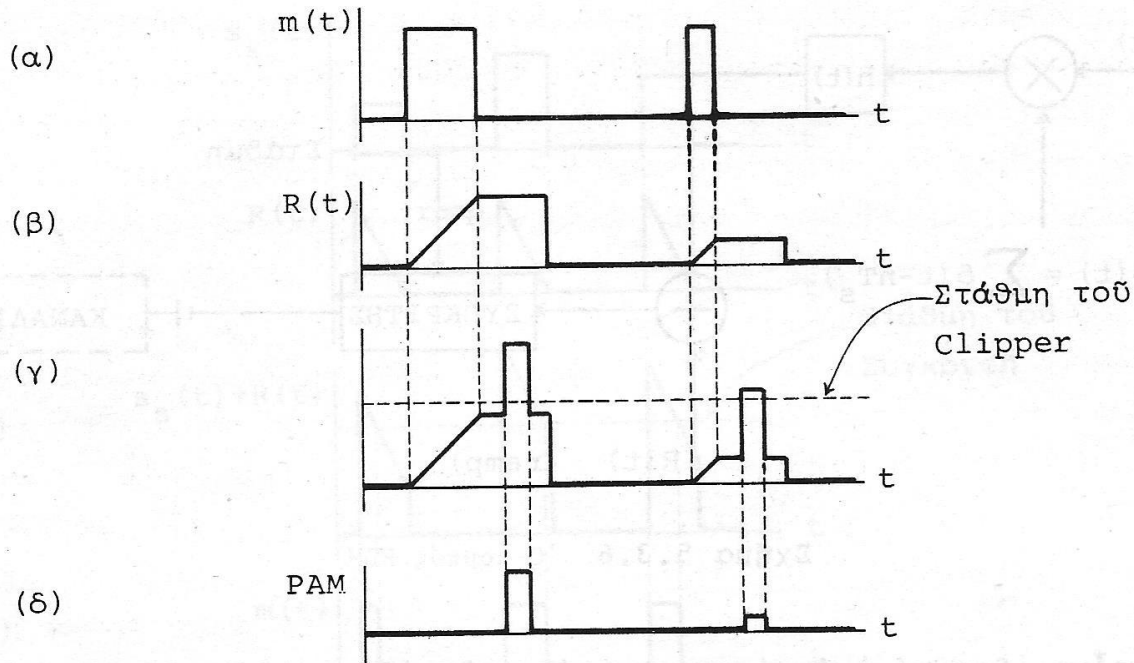
# Διαδικασία Διαμόρφωσης παλμών κατά διάρκεια



# Μετατροπή ΡΑΜ σε ΡWΜ (ΡDΜ) και ΡΡΜ



# ΑΠΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΡDΜ – ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΕ ΡΑΜ



Σχήμα 5.3.7 (α) Τό PDM  $m(t)$

(β) Παραγωγή της ramp

(γ) Άθροισμα του σήματος του (β)

μέ έναν περιοδικό παλμό

(δ) Τό σήμα PAM



# Πλεονεκτήματα των ψηφιακών συστημάτων επικοινωνίας

---

- ✓ Αντοχή στο θόρυβο
- ✓ Καλύτεροι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης
- ✓ Αξιόπιστη επεξεργασία σήματος.
- ✓ Εύκολος σχεδιασμός (προγραμματιζόμενοι μικροεπεξεργαστές).
- ✓ Ευελιξία (modular architecture)
- ✓ Παρόμοια αντιμετώπιση, ανεξάρτητα του είδους της πληροφορίας
- ✓ Ευκολότερη πολυπλεξία σημάτων.
- ✓ Συμπίεση
- ✓ Αποθήκευση και ανάκτηση

# Μειονεκτήματα των ψηφιακών συστημάτων

---

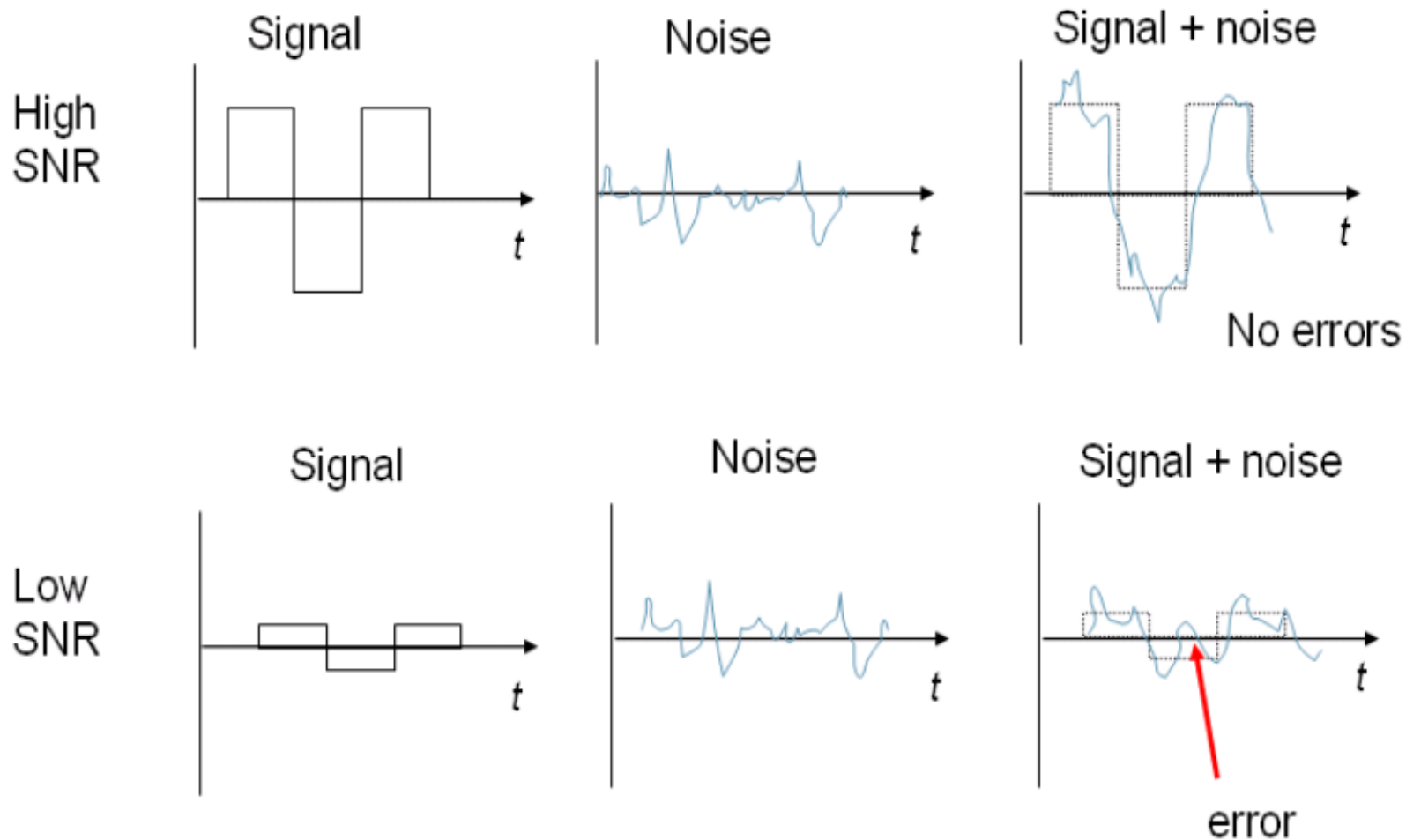
- ✓ Συγχρονισμός

# Κριτήρια αξιολόγησης

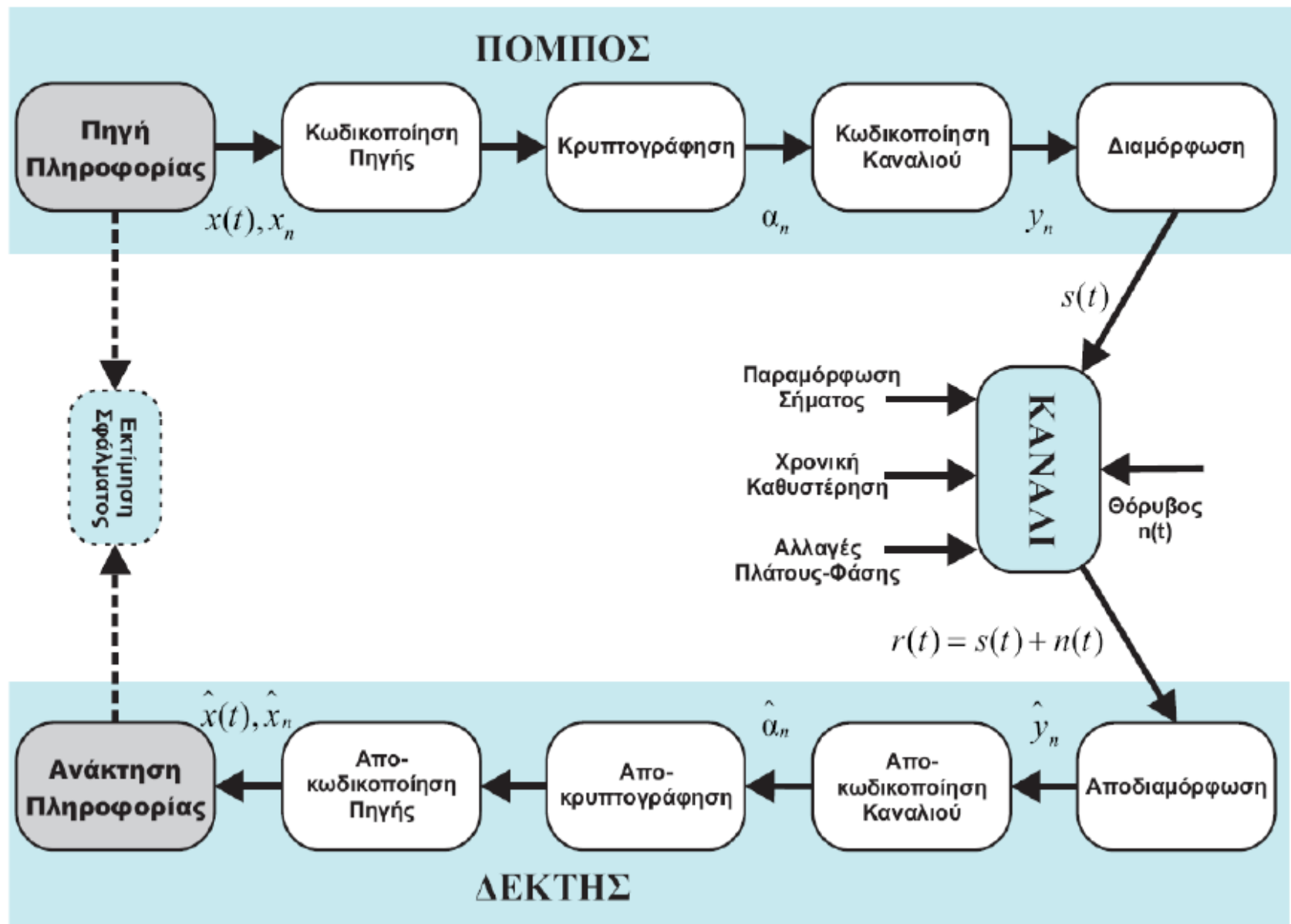
---

- ✓ Λόγος σήματος προς θόρυβο  $\text{SNR} = \frac{P_r}{P_N}$ 
  - Ασύρματες επικοινωνίες  $\text{ASNR} = \mathbb{E}[\text{SNR}]$
- ✓ Λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο  $\text{SINR} = \frac{P_r}{P_N + P_I}$   $\text{ASINR} = \mathbb{E}[\text{SINR}]$
- ✓ Ρυθμός σφάλματος bit ή συμβόλου (BER ή SER)
- ✓ Αποδοτικότητα ισχύος (Power efficiency)
- ✓ Φασματική Αποδοτικότητα (Bandwidth efficiency)  $N_{BW} = \frac{R}{W}$ , bps/Hz.
- ✓ Ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας (bit rate) ή χωρητικότητα καναλιού (capacity)  $C = W \log_2(1 + \text{SNR})$ , bps
- ✓ Πιθανότητα διακοπής επικοινωνίας (outage probability)

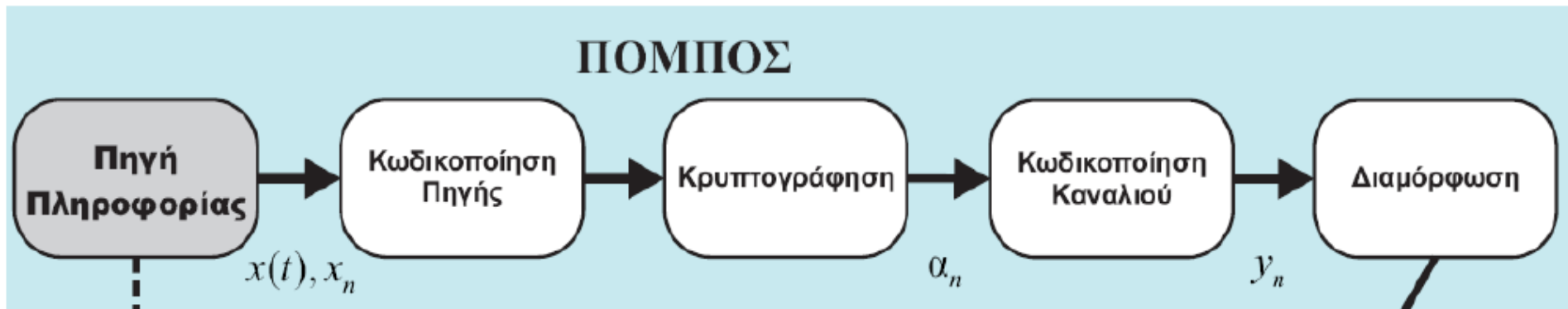
# Κριτήρια αξιολόγησης



# Ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας



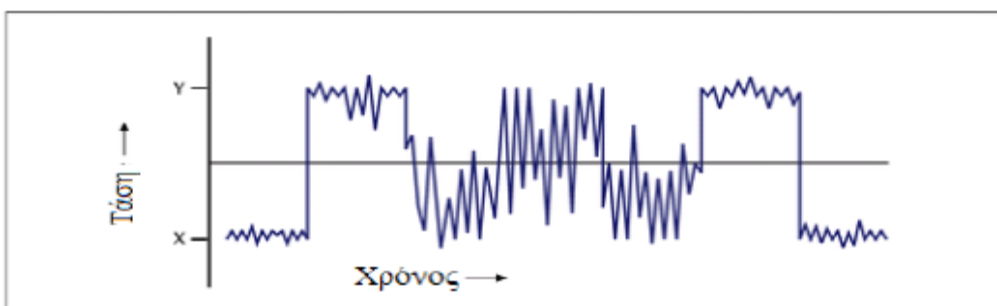
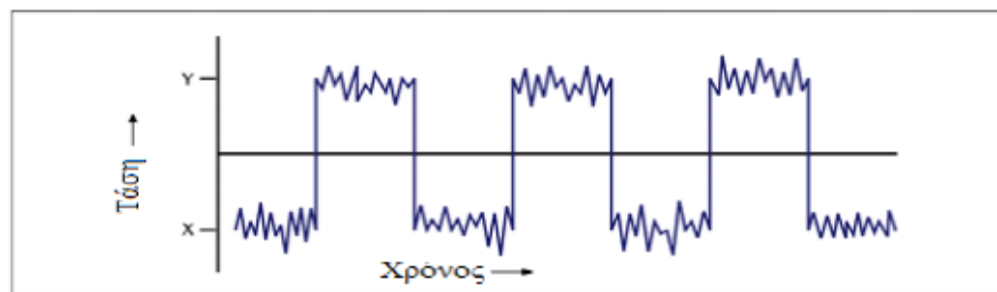
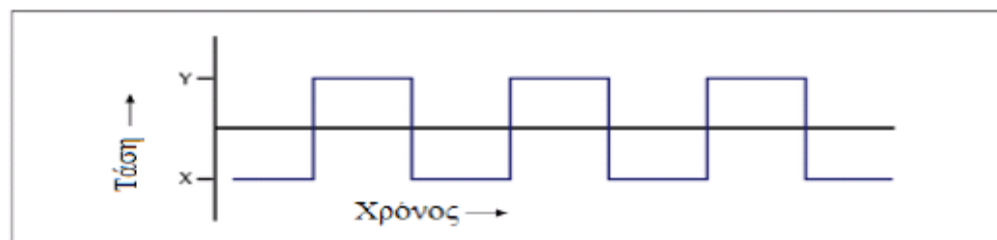
# Ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας-Πομπός



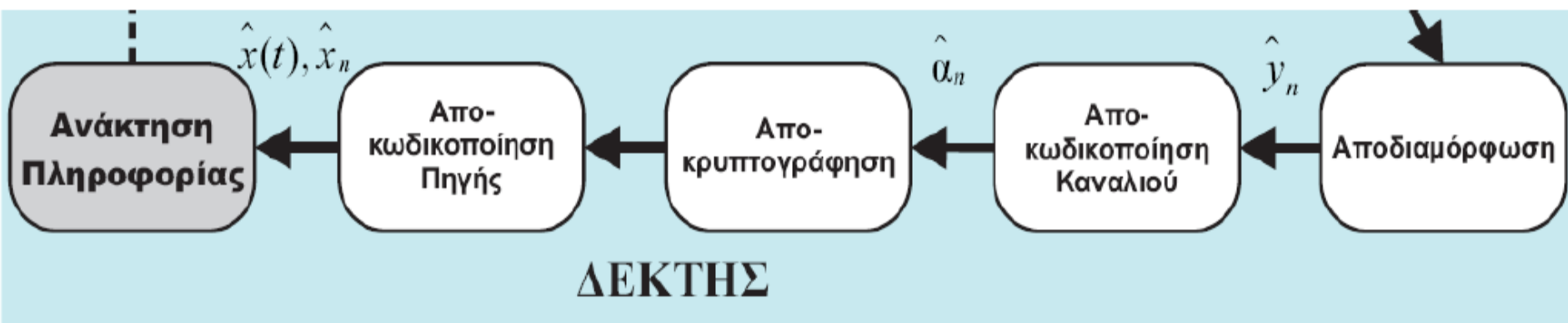
- Πηγή πληροφορίας
- Κωδικοποίηση πηγής
- Κρυπτογράφηση
- Κωδικοποίηση καναλιού
- Διαμόρφωση

# Κανάλι

- ✓ Πρόσθεση θορύβου
- ✓ Παραμόρφωση
- ✓ Χρονική καθυστέρηση



# Ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας-Δέκτης

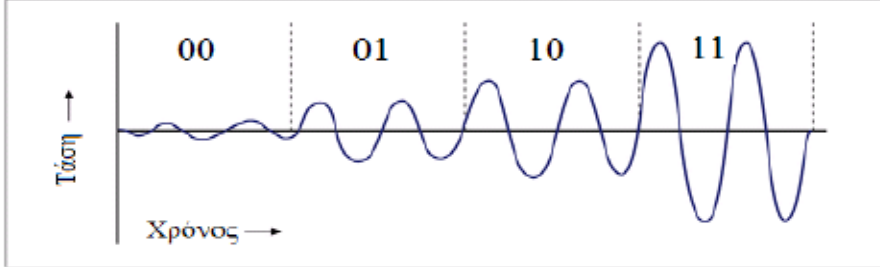
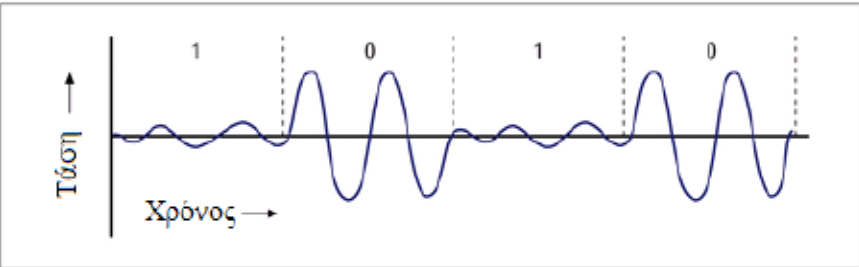


- Αποδιαμόρφωση
- Αποκωδικοποίηση καναλιού
- Αποκρυπτογράφηση
- Αποκωδικοποίηση πηγής

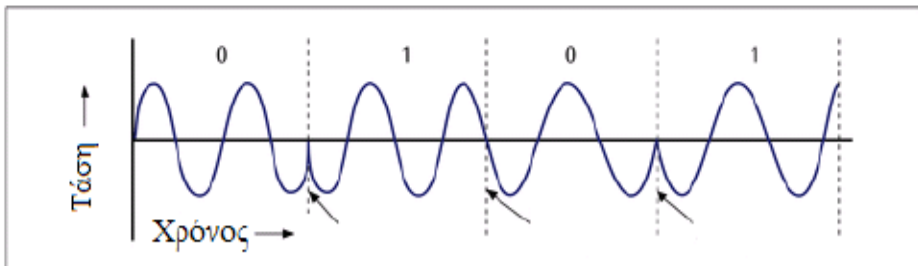
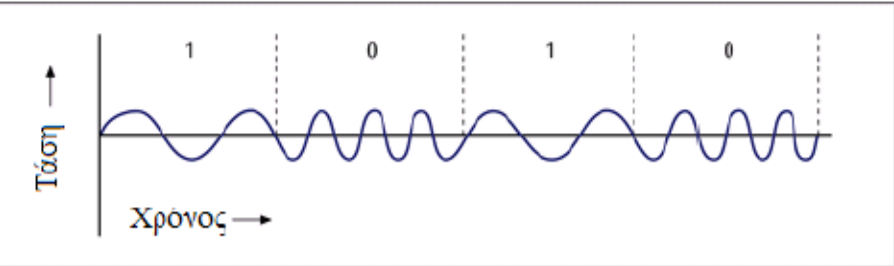


# Ψηφιακές Διαμορφώσεις-Πρώτη γεύση

Στα ψηφιακά συστήματα, η πηγή πληροφορίας (αν δεν είναι ήδη ψηφιακή, δηλαδή 0 και 1) μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα. Έπειτα κάθε bit ή μπλοκ από bits αναπαρίσταται από αναλογικούς παλμούς.



Κάθε bit αναπαρίσταται από έναν ημιτονοειδή παλμό διαφορετικού πλάτους και ίδιας συχνότητας.



Κάθε bit αναπαρίσταται από έναν παλμό διαφορετικής συχνότητας ή φάσης.

# Ψηφιακές Διαμορφώσεις (συνέχεια 1)

- Στην είσοδο του διαμορφωτή έρχονται δυαδικά δεδομένα (0, 1), που παρίστανται με ένα διάνυσμα διαστάσεων  $K_b \times 1$ .
- Οι  $2^{K_b}$  διαφορετικές λέξεις απαριθμούνται με έναν δείκτη  $i: i = 0, 1, 2, \dots, 2^{K_b} - 1$
- Γενικά, αυτές οι λέξεις των  $K_b$  bits δεν εμφανίζονται ισοπίθانا στην μετάδοση, αλλά σε κάθε μία, αντιστοιχεί διαφορετική πιθανότητα  $p_i$ .
- Στον διαμορφωτή το διάνυσμα  $K_b \times 1$  αντιστοιχίζεται σε μία από  $2^{K_b}$  αναλογικές κυματομορφές  $x_i(t)$ .
- Αν  $T$  είναι η (μέγιστη) διάρκεια των  $x_i(t)$ , τότε προκύπτει ότι ο ρυθμός (ταχύτητα) μετάδοσης των bits είναι  $W_b = K_b / T$
- Οι μεταδιδόμενες (αναλογικές) κυματομορφές περνώντας μέσα από το κανάλι υφίστανται παραμόρφωση (π.χ. λόγω του θορύβου).
- *Μετάδοση δεδομένων:*
  - Βασικής ζώνης (π.χ. από CPU Η/Υ στον σκληρό δίσκο, ή σε CD).
  - Με Διαμόρφωση Φέροντος (π.χ. στα ασύρματα LAN, μέσω modem ραδιοκυμάτων).

## Ψηφιακές Διαμορφώσεις (συνέχεια 2)

- Παράδειγμα ενός συνόλου 4 σημάτων που μπορεί να μεταδώσει 2 bits πληροφορίας, αφού  $2^2 = 4$ , δηλ. (00, 01, 10, 11):

$$x_0(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{4\pi t}{T_p}\right) & 0 \leq t \leq T_p \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad x_1(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T_p \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$$
$$x_2(t) = \begin{cases} -\sin\left(\frac{\pi t}{T_p}\right) & 0 \leq t \leq T_p \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad x_3(t) = \begin{cases} \frac{2t}{T_p} & 0 \leq t \leq T_p / 2 \\ 2 - \frac{2t}{T_p} & T_p / 2 \leq t \leq T_p \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$$

Η ταχύτητα μετάδοσης είναι :  $W_b = 2 / T_p$

# Απόδοση Ψηφιακής Μετάδοσης

- **Πιστότητα (fidelity)**

- Πόσο συχνά γίνονται λάθη στην μετάδοση, υπό δεδομένη ισχύ μετάδοσης – συνάρτηση του SNR.
- Η αξιοπιστία της μετάδοσης μπορεί να αυξηθεί, μειώνοντας την ταχύτητα μετάδοσης.
- Μικρότερη ταχύτητα σημαίνει γενικά μικρότερο εύρος ζώνης του σήματος και επομένως του δέκτη.
- Ο SNR θέλουμε να αυξηθεί. Επιζητείται ένα μέτρο του SNR που να μην είναι άμεση συνάρτηση του εύρους ζώνης.
- Τέτοιο μέτρο είναι, ο λόγος της μέσης λαμβανομένης ενέργειας ανά bit, προς την φασματική πυκνότητα του θορύβου:  $E_b / N_0$ .

# Μέση ενέργεια ανά bit - $E_b$

- Η μέση ενέργεια ανά bit ενός λαμβανόμενου σήματος των  $K_b$  bits, είναι:

$$E_b = \frac{E[E_{R_z}]}{K_b} = \frac{1}{K_b} E \left[ \int_{-\infty}^{\infty} |R_z(t)|^2 dt \right] = \frac{L_p^2}{K_b} E \left[ \int_{-\infty}^{\infty} |X_z(t)|^2 dt \right]$$

όπου  $L_p$  είναι η απώλεια διάδοσης. Αν  $\tau_p$  είναι η καθυστέρηση διάδοσης, το σήμα, και  $X_c(t)$  και  $R_c(t)$  το σήμα στην είσοδο και έξοδο του καναλιού, αντιστοίχως, τότε:

$$R_c(t) = L_p X_c(t - \tau_p)$$

- Στις ψηφιακές επικοινωνίες θεωρούμε ότι τα bits μεταδίδονται τυχαία (αυτή είναι η μεγάλη διαφορά από τις αναλογικές επικοινωνίες).
- Επομένως, η γενική έκφραση για την μέση λαμβανομένη ενέργεια ανά bit είναι:

$$E_b = \frac{L_p^2}{K_b} \sum_{i=0}^{2^{K_b}-1} \pi_i \left[ \int_{-\infty}^{\infty} |x_i(t)|^2 dt \right] = \frac{L_p^2}{K_b} \sum_{i=0}^{2^{K_b}-1} \pi_i E_i$$

- Για το παράδειγμα του συνόλου των 4 σημάτων, η μέση ενέργεια ανά bit υπολογίζεται ως:

$$E_b = (L_p^2 / 2) [(E_0 + E_1 + E_2 + E_3)/4] = T_p L_p^2 (0,5 + 1 + 0,5 + 0,5) / 8 = 2,5/8 T_p L_p^2$$

# Απόδοση Ψηφιακής Μετάδοσης (συνέχεια)

- **Πολυπλοκότητα (complexity)** – σχετίζεται με το κόστος των συστημάτων
- **Αποδοτικότητα εύρους ζώνης (bandwidth efficiency)**

Αν η ταχύτητα μετάδοσης της πληροφορίας είναι  $W_b$  bits/sec (bps) και το εύρος ζώνης μετάδοσης  $B_T$  Hz, τότε το μέτρο της αποδοτικότητας εύρους ζώνης είναι η **φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency)**

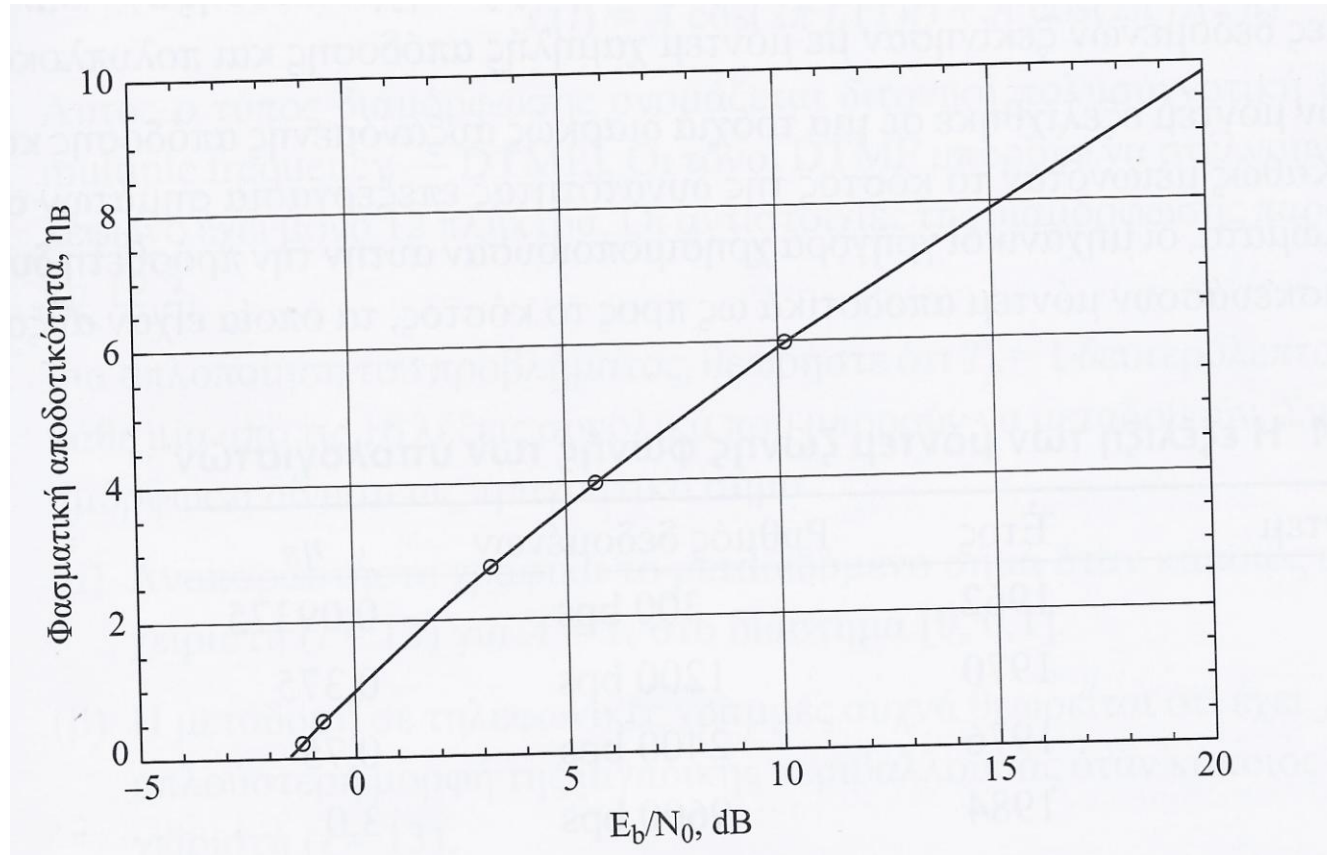
$$W_b / B_T \text{ (bps/Hz)}$$

- Σημασία: Αν ένα σύστημα έχει διπλάσια αποδοτικότητα εύρους ζώνης από ένα άλλο, σημαίνει ότι μπορεί να υποστηρίξει διπλάσιους χρήστες, και επομένως να έχει διπλάσια έσοδα...

# Όριο φασματικής απόδοσης (spectral efficiency)

- Κατά Shannon,  $\max W_b = C = B_T \log_2(1 + \text{SNR})$   
 $\eta_B = W_b / B_T < \log_2(1 + \text{SNR})$
- Δηλαδή, για γραμμική αύξηση της φασματικής απόδοσης, θα πρέπει να επιτύχει εκθετική αύξηση του SNR (στον δέκτη).
- Η λαμβανομένη ισχύς θορύβου είναι άμεση συνάρτηση του εύρους ζώνης μετάδοσης. Αν π.χ. έχουμε ένα φίλτρο εύρους ζώνης  $B_T$ , η ισχύς του θορύβου θα είναι  $N_0 B_T$ .
- Αν η ισχύς του πληροφοριακού σήματος είναι  $P_s = E_b W_b$  τότε  
 $\text{SNR} = P_s / (N_0 B_T) = E_b W_b / (N_0 B_T)$
- $\eta_B = W_b / B_T < \log_2(1 + \text{SNR}) = \log_2(1 + E_b W_b / (N_0 B_T))$
- $\eta_B < \log_2(1 + (E_b / N_0) \eta_B)$

# Όριο φασματικής απόδοσης (spectral efficiency) (συνέχεια)



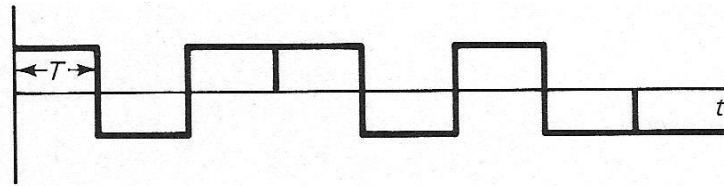
$$E_b / N_0 > 10 \text{ dB}$$

$$\begin{aligned} \text{Από } \eta_B = \log_2(1 + (E_b/N_0)\eta_B) &\leftrightarrow 2^{\eta_B} = 1 + (E_b/N_0)\eta_B \leftrightarrow (E_b/N_0) = (2^{\eta_B} - 1)/\eta_B \\ &\leftrightarrow (E_b/N_0)_{\min} = \lim_{\eta_B \rightarrow 0} (2^{\eta_B} - 1)/\eta_B \text{ (όταν } \eta_B \rightarrow 0) \leftrightarrow (E_b/N_0)_{\min} = \ln(2) = -1,59 \text{ dB.} \end{aligned}$$



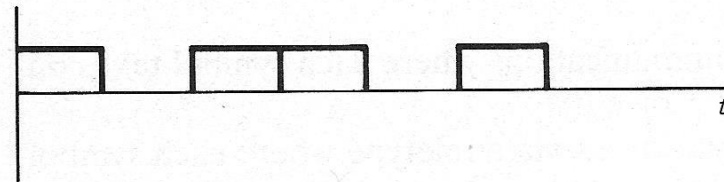
# Διάφορα ψηφιακά σήματα (binary)

Τύποι παλμών  
Διάρκειας  $T$



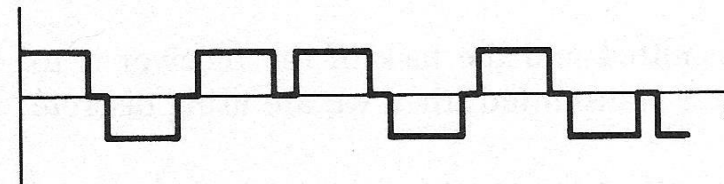
Bipolar - NRZ

(a)



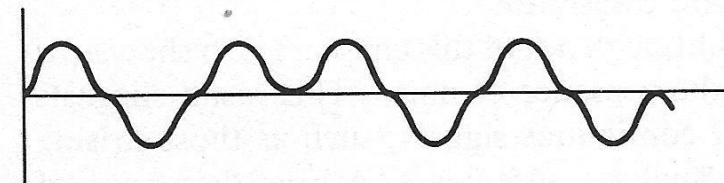
Monopolar

(b)



Bipolar - RZ

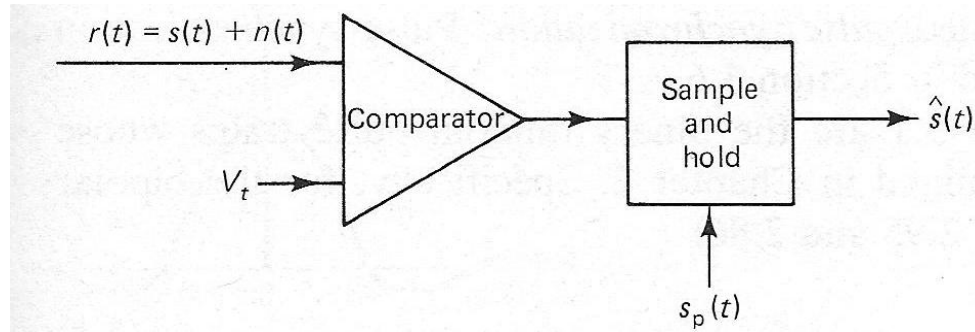
(c)



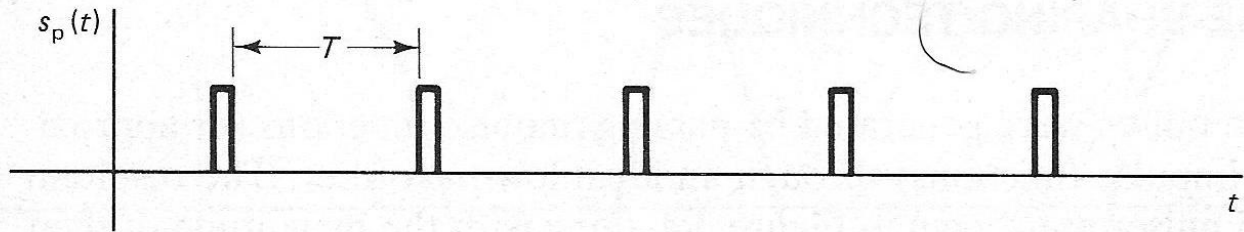
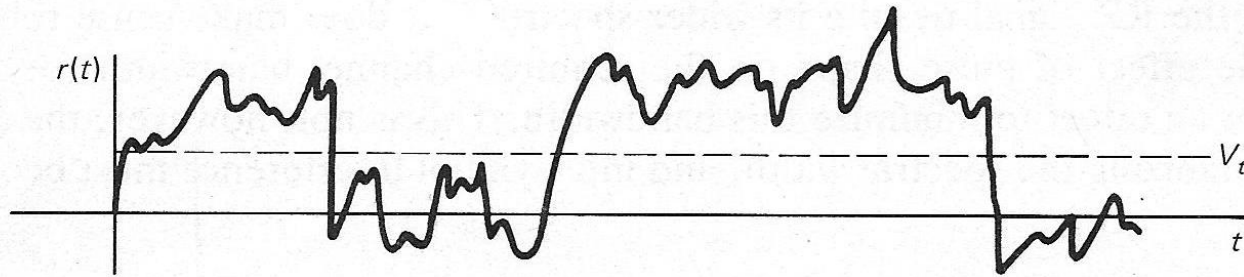
Raised-cosine-shaped

(d)

# Ψηφιακός Δέκτης (binary)



Είσοδος  
στον  
Ψηφιακό  
Δέκτη



Έξοδος  
του  
Ψηφιακού  
Δέκτη

