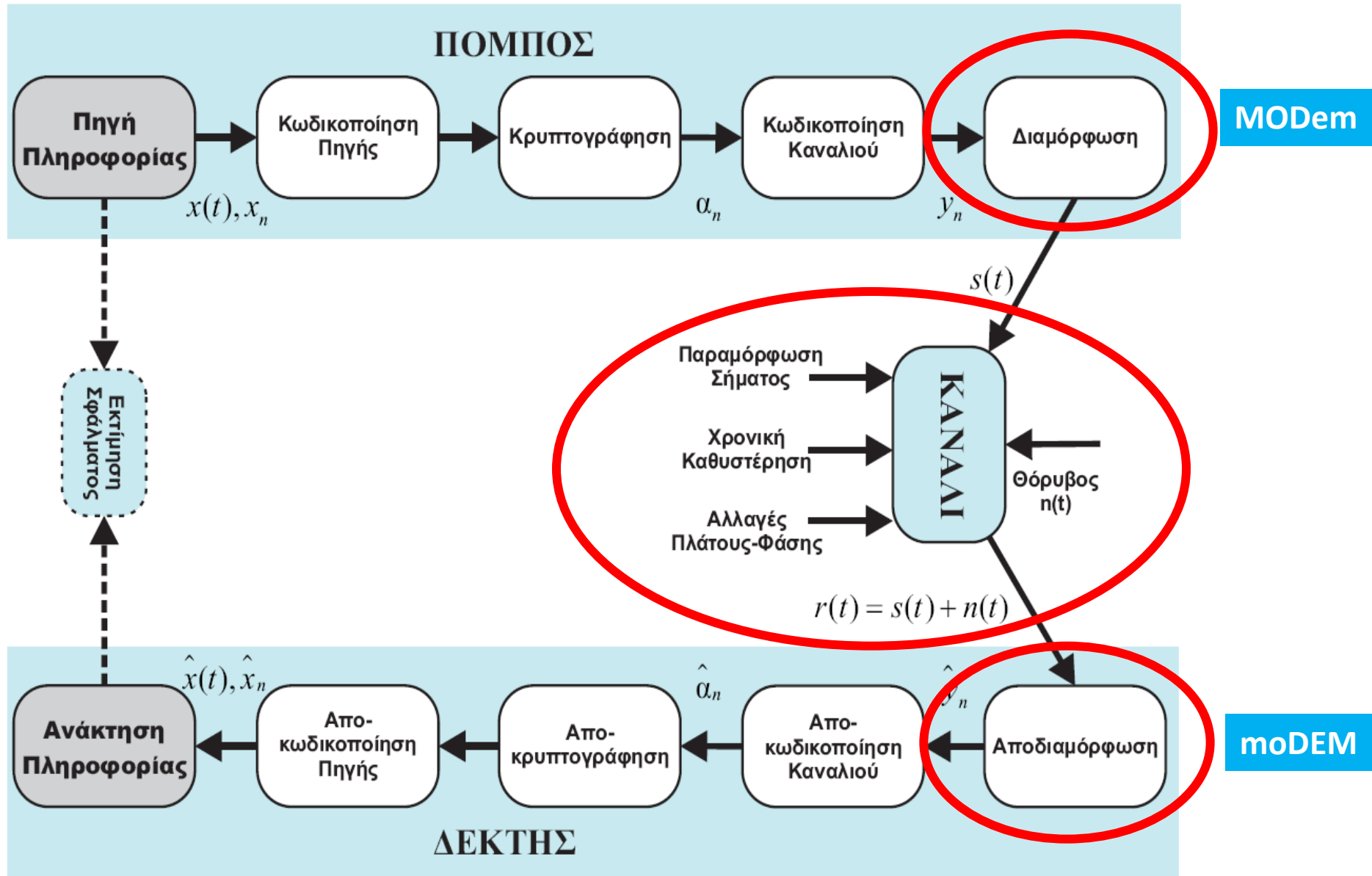




Εισαγωγή στα ψηφιακά συστήματα μετάδοσης

Ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας

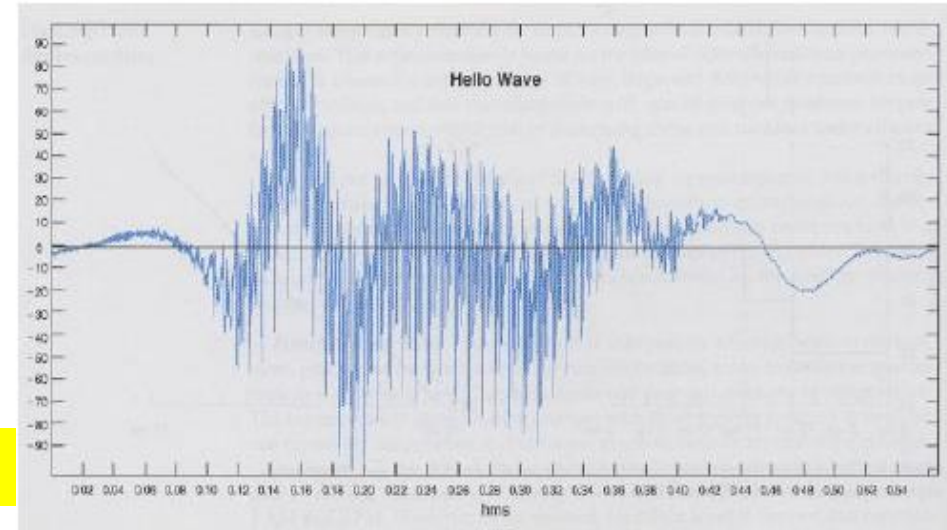


Πηγές πληροφορίας

● Αναλογικές πηγές πληροφορίας:

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

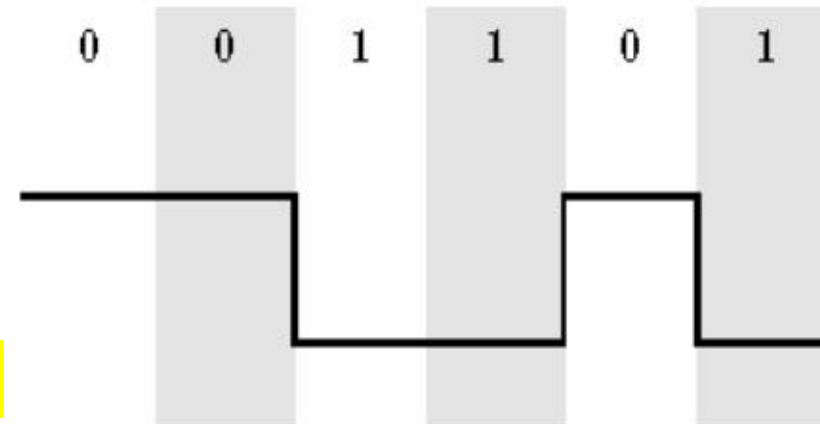
Αναλογικό σήμα



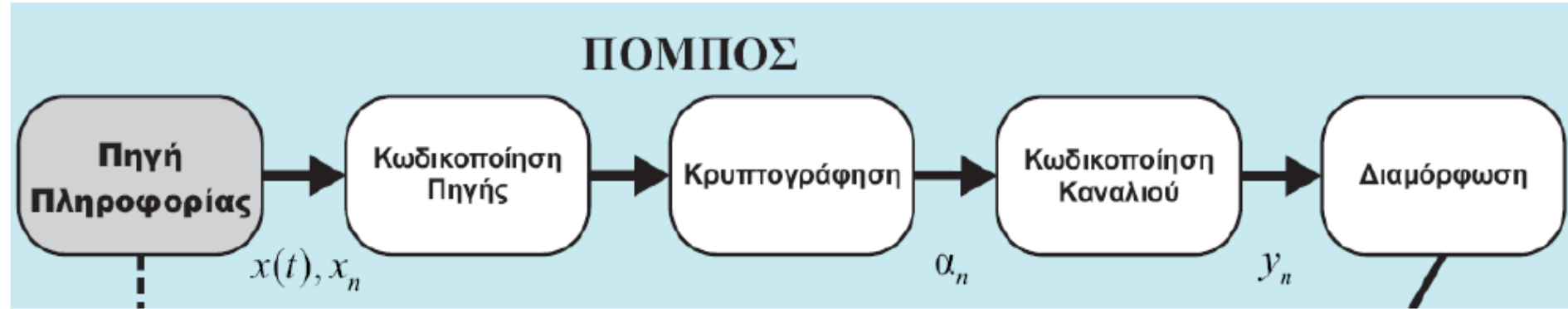
● Ψηφιακές πηγές πληροφορίας:

- ✓ Υπολογιστές
- ✓ Ψηφιακή λήψη

Ψηφιακό σήμα



Ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας-Πομπός



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

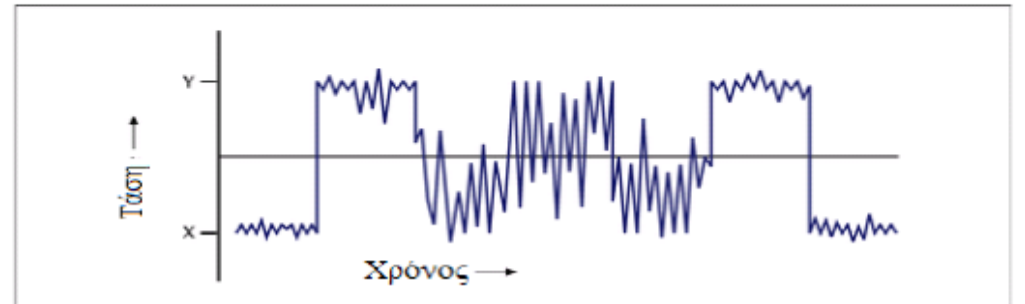
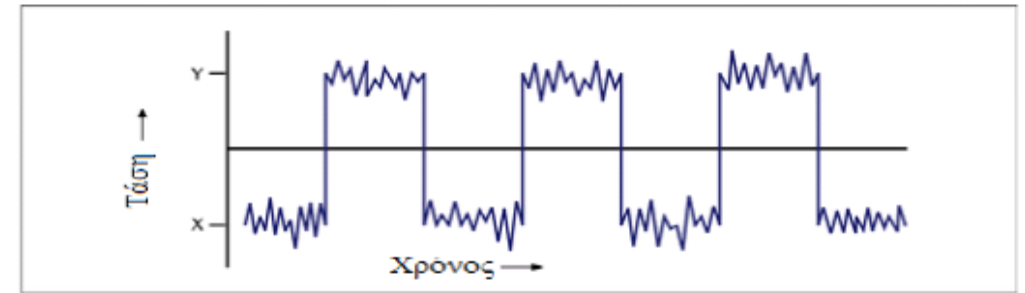
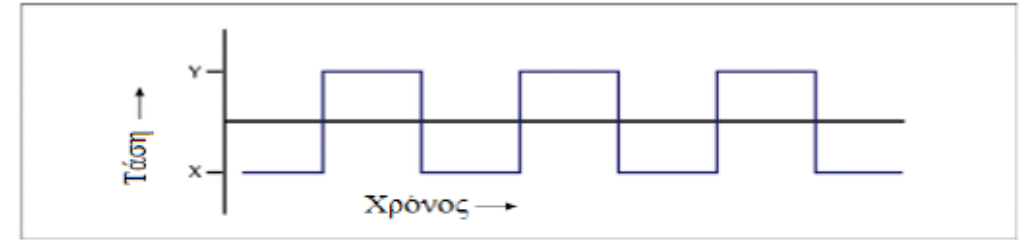
Ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας-Δέκτης



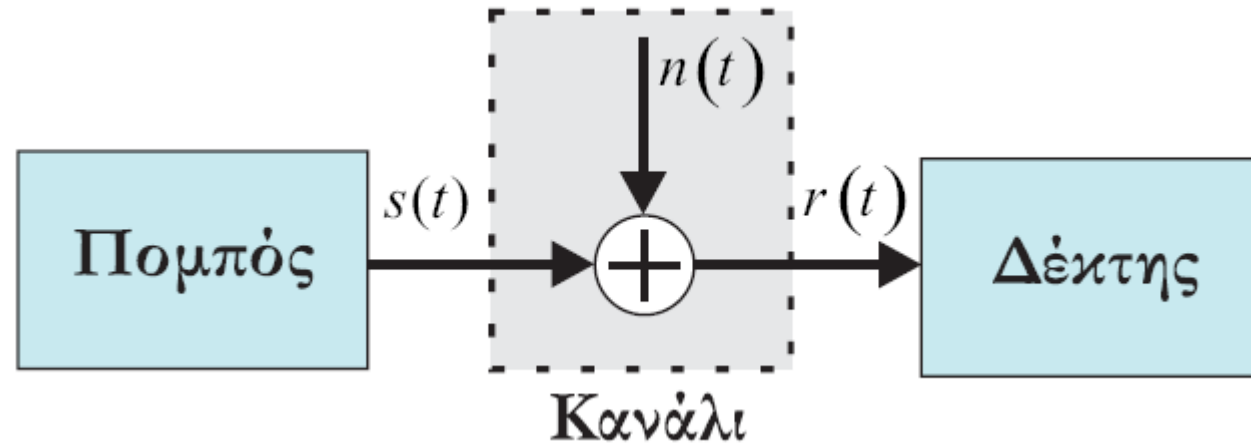
- Αποδιαμόρφωση
- Αποκωδικοποίηση καναλιού
- Αποκρυπτογράφηση
- Αποκωδικοποίηση πηγής

ΚΑΝΑΛΙ (channel)

- ✓ Πρόσθεση θορύβου
- ✓ Παραμόρφωση
- ✓ Χρονική καθυστέρηση



Κανάλι προσθετικού λευκού Γκαουσιανού θορύβου (Additive White Gaussian Noise - AWGN Channel)



Additive
Noise

$$r(t) = s(t) + n(t)$$

Σήμα εισόδου στο δέκτη



Λευκός – Γκαουσιανός Θόρυβος

White

Ονομασία που προέρχεται από το πεδίο της συχνότητας

- ✓ Λευκός Θόρυβος - Ορισμός $S_n(f) = \frac{N_0}{2}, f \in (-\infty, +\infty)$
- ✓ Άπειρη ισχύς
- ✓ Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $R_n(\tau) \triangleq \mathcal{F}^{-1}[S_n(f)] = \int_{-\infty}^{\infty} S_n(f) e^{j2\pi f\tau} df = \frac{N_0}{2} \delta(\tau)$
- ✓ Το πλάτος Gaussian

Gaussian

Ονομασία που προέρχεται από το πεδίο του χρόνου

Πυκνότητα πιθανότητας $f(x)$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

Μέση τιμή μηδέν

Συνάρτηση κατανομής $F(x)$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(y) dy = \int_{-\infty}^{\frac{x}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$



Σχόλιο για κανάλια AWGN

- Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, το κανάλι προσεγγίζεται πολύ καλά ως κανάλι AWGN. Επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις, δορυφορικές επικοινωνίες με καλές καιρικές συνθήκες, και οι επικοινωνίες ευρείας ζώνης σε ομοαξονικά καλώδια.
- Σε περιπτώσεις καναλιών με **διαλείψεις (fading)**, **πολλαπλές οδεύσεις (multipath)**, **περιορισμένο εύρος ζώνης** κ.α., τα κανάλια μοντελοποιούνται σαν AWGN, διότι η επίδοση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος σε κανάλι AWGN αποτελεί ένα **άνω όριο** της επίδοσης όταν υπάρχουν και άλλα φαινόμενα που την επηρεάζουν αρνητικά. Δηλαδή, δεν μπορεί να υπάρξει επίδοση καλύτερη από αυτή που υπολογίζεται για επικοινωνία με την παρουσία AWGN.
- Για σύγκριση και αξιολόγηση των επιδόσεων διαφόρων τεχνικών διαμόρφωσης ή/και κωδικοποίησης θεωρούμε κανάλι AWGN.



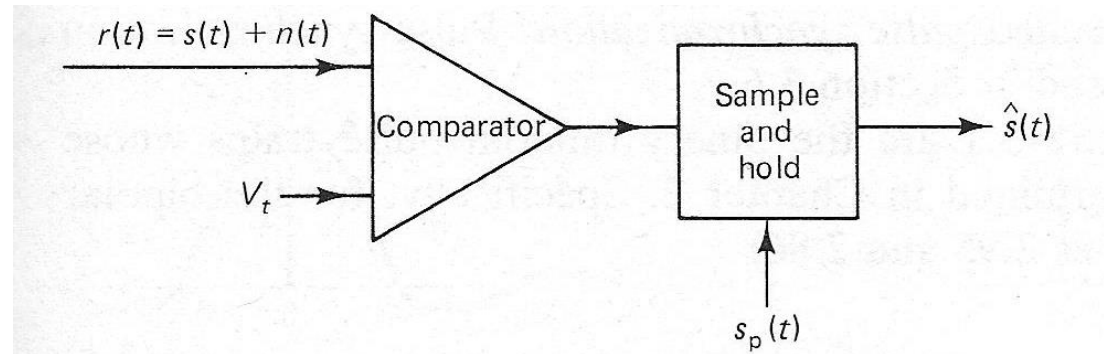
ΠΛΕΟΝΗΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

- ✓ 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

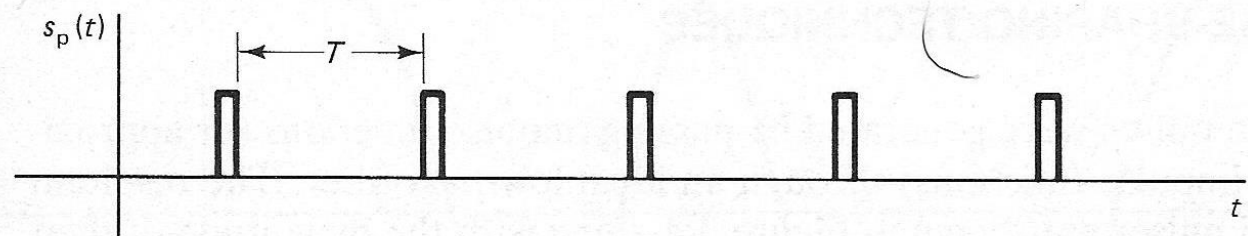
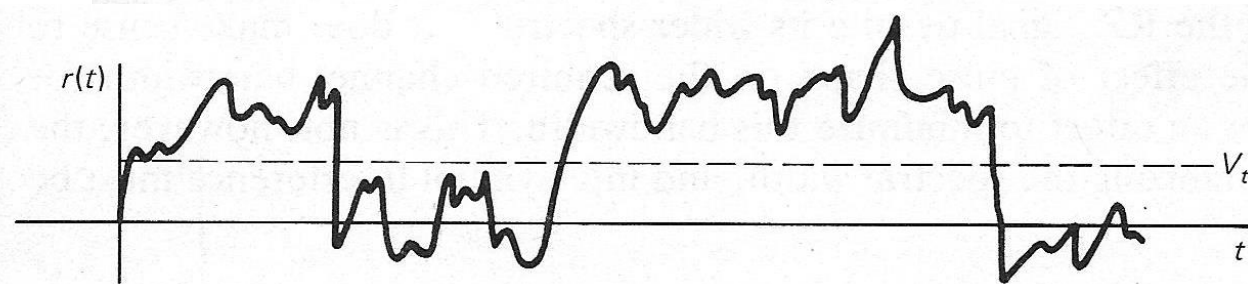
ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

✓ Συγχρονισμός

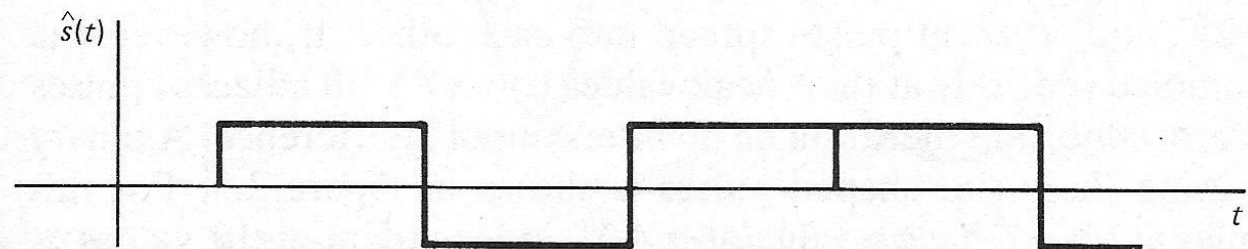
Ψηφιακός Δέκτης (binary)



Είσοδος
στον
Ψηφιακό
Δέκτη



Έξοδος
του
Ψηφιακού
Δέκτη



ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

✓ Λόγος σήματος προς θόρυβο $\text{SNR} = \frac{\mathcal{P}_r}{P_N}$.

■ Ασύρματες επικοινωνίες $\text{ASNR} = \mathbb{E}[\text{SNR}]$

✓ Λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο $\text{SINR} = \frac{\mathcal{P}_r}{P_N + \mathcal{P}_I}$ $\text{ASINR} = \mathbb{E}[\text{SINR}]$

✓ Ρυθμός σφάλματος bit ή συμβόλου (BER ή SER)

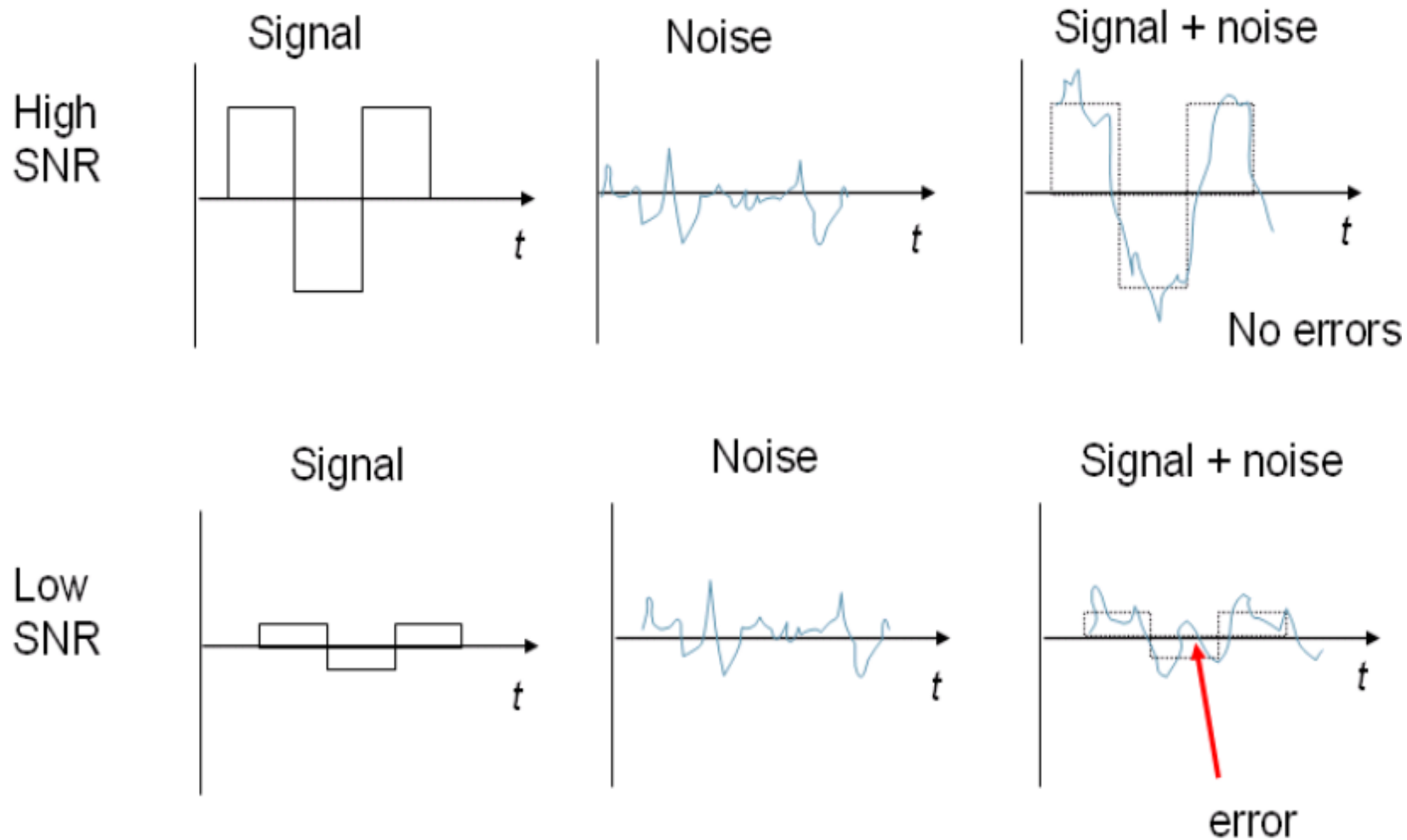
✓ Αποδοτικότητα ισχύος (Power efficiency) SNR για συγκεκριμένο BER

✓ 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

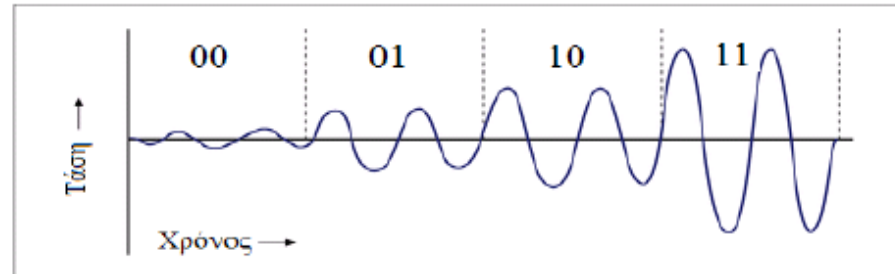
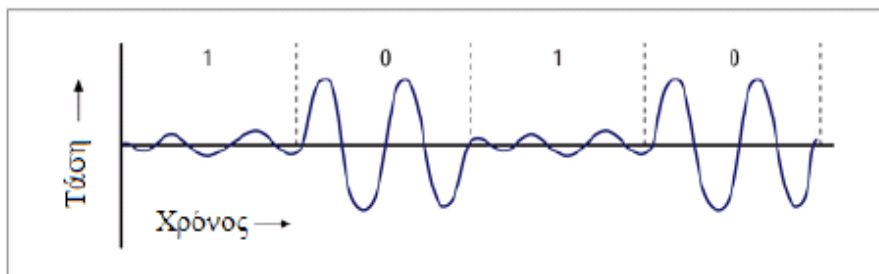
✓ Πιθανότητα διακοπής επικοινωνίας (outage probability) - Call Blocking Probability

Παράδειγμα SNR

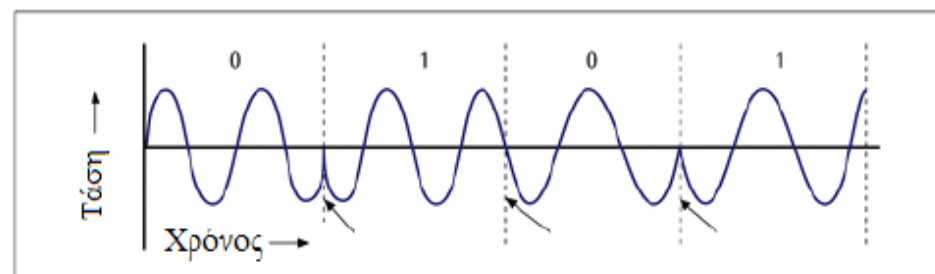
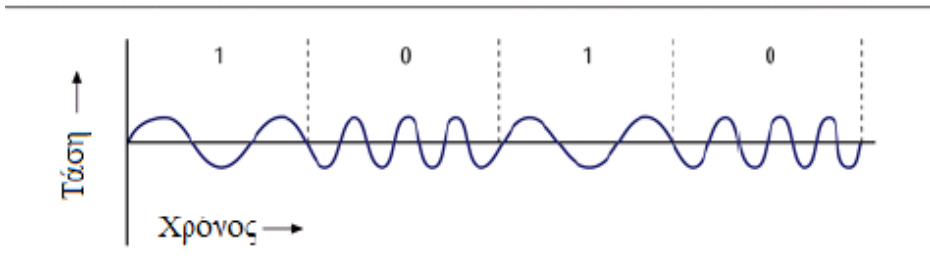


ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ – ΠΡΩΤΗ ΓΕΥΣΗ

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.



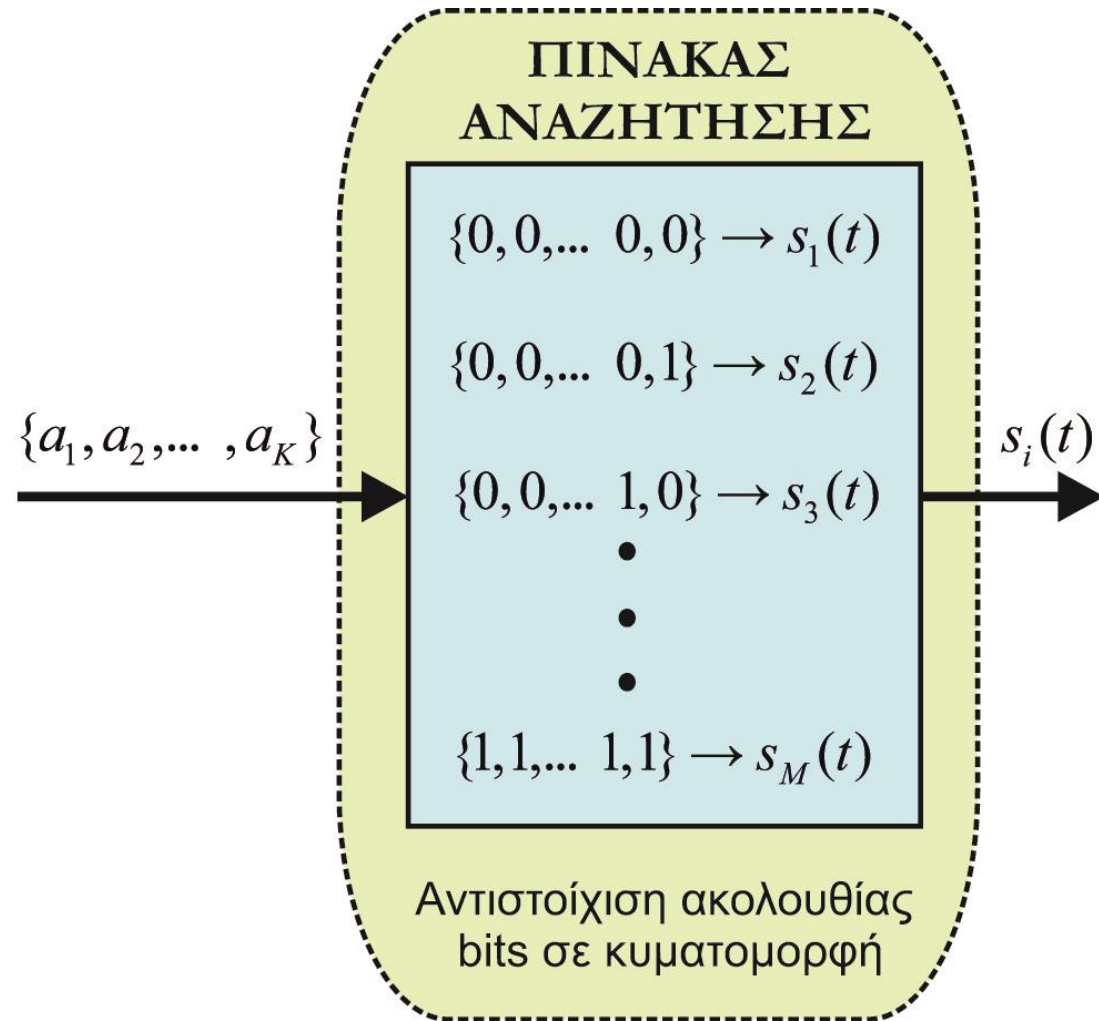
Κάθε bit αναπαρίσταται από έναν ημιτονοειδή παλμό διαφορετικού πλάτους και ίδιας συχνότητας.



Κάθε bit αναπαρίσταται από έναν παλμό διαφορετικής συχνότητας ή φάσης.

Αρχή Ψηφιακής Μετάδοσης Δεδομένων

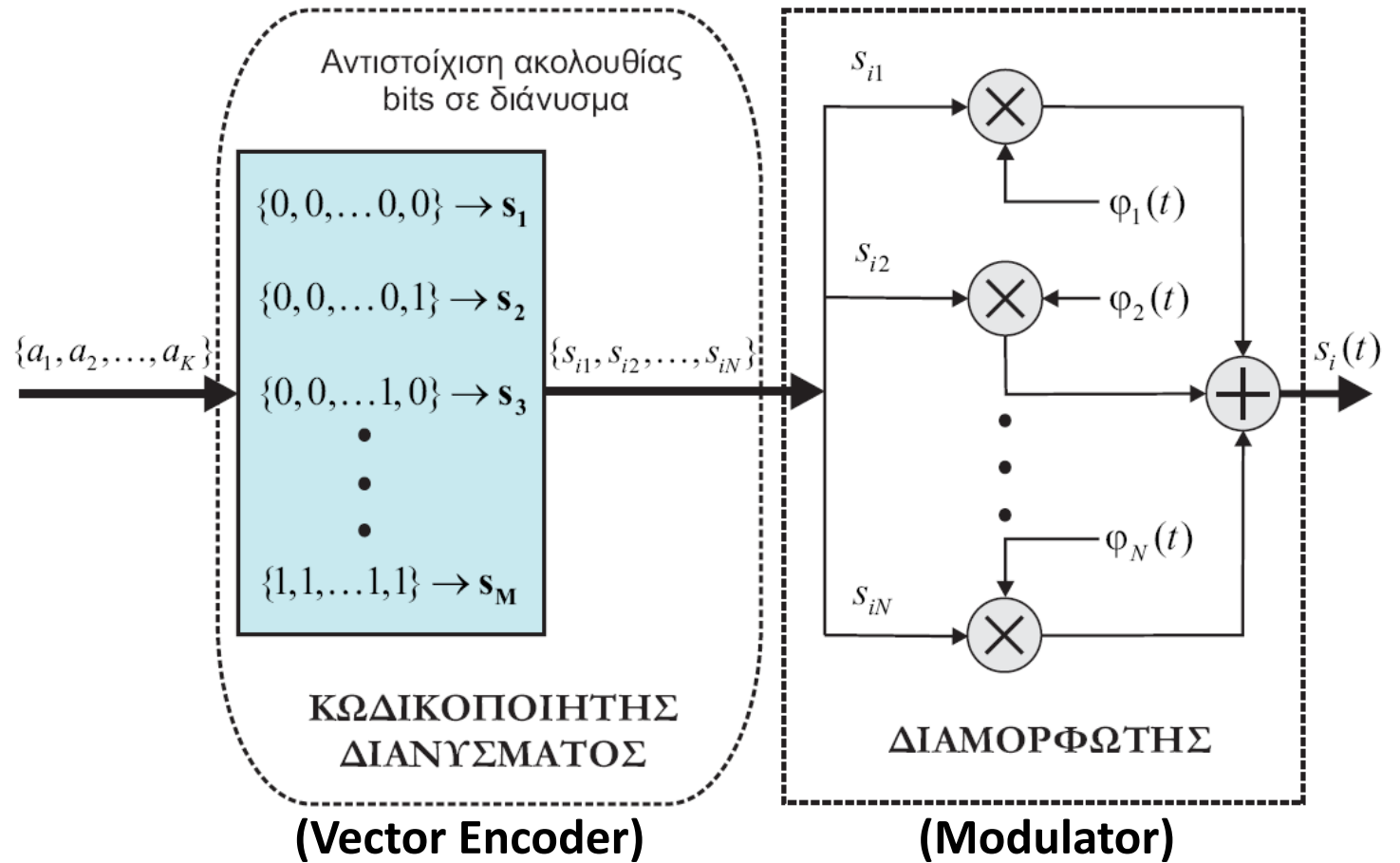
- Αντιστοίχιση (mapping) μίας ακολουθίας από K bits σε μία κυματομορφή $s_i(t)$ διάρκειας T sec, η οποία ανήκει σε ένα σύνολο $M = 2^K$ κυματομορφών $s_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, M$



Ψηφιακός Πομπός

- Στην είσοδο του πομπού έρχονται δυαδικά δεδομένα (0, 1), που παρίστανται με ένα διάνυσμα διαστάσεων K_b .
- Οι 2^{K_b} διαφορετικές λέξεις απαριθμούνται με έναν δείκτη i :

$$i = 0, 1, 2, \dots, M = 2^{K_b} - 1$$
- Γενικά, αυτές οι λέξεις των K_b bits δεν εμφανίζονται ισοπίθανα στην μετάδοση, αλλά σε κάθε μία, αντιστοιχεί διαφορετική πιθανότητα p_i .
- Στον διαμορφωτή το διάνυσμα των K_b bits αντιστοιχίζεται σε μία από 2^{K_b} αναλογικές κυματομορφές $s_i(t)$.
- Αν T είναι η (μέγιστη) διάρκεια των $s_i(t)$, τότε προκύπτει ότι ο ρυθμός (ταχύτητα) μετάδοσης των bits είναι $W_b = K_b / T$

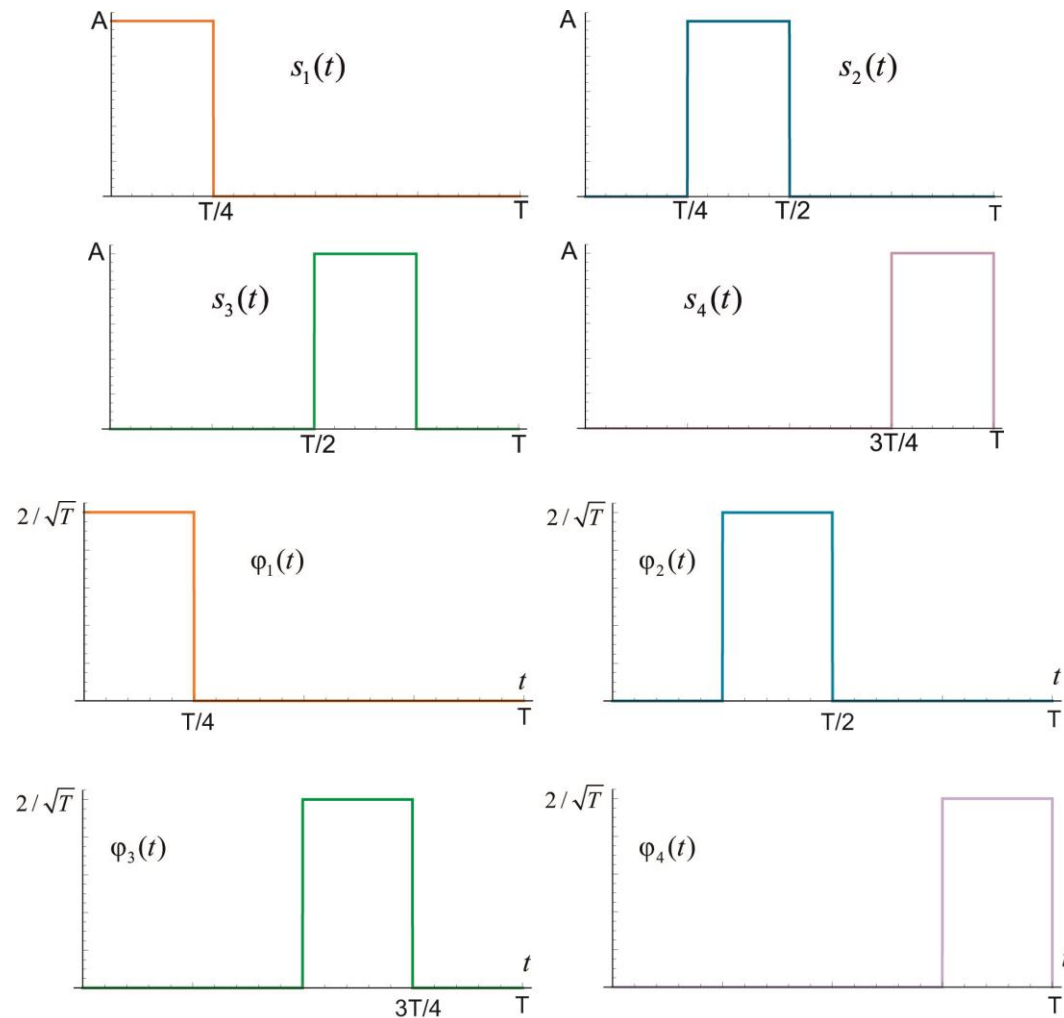


Τα $s_i(t)$ ανήκουν σε N -διάστατο χώρο σημάτων με ορθοκανονικές συναρτήσεις βάσης $\phi_1(t), \phi_2(t), \dots, \phi_N(t)$ και δημιουργούν έναν αστερισμό από διανύσματα $s_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iN}\}$.

$$s_i(t) = \sum_{j=1}^N s_{ij} \phi_j(t) \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, M \\ N \leq M \end{matrix}$$



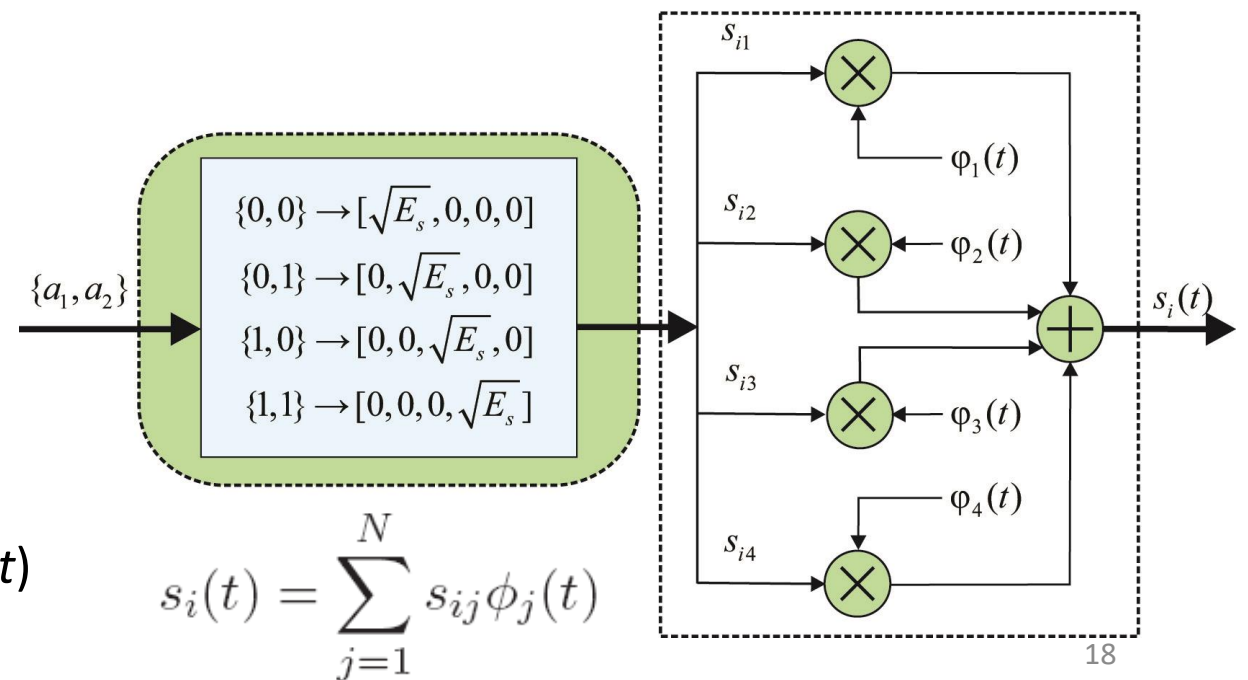
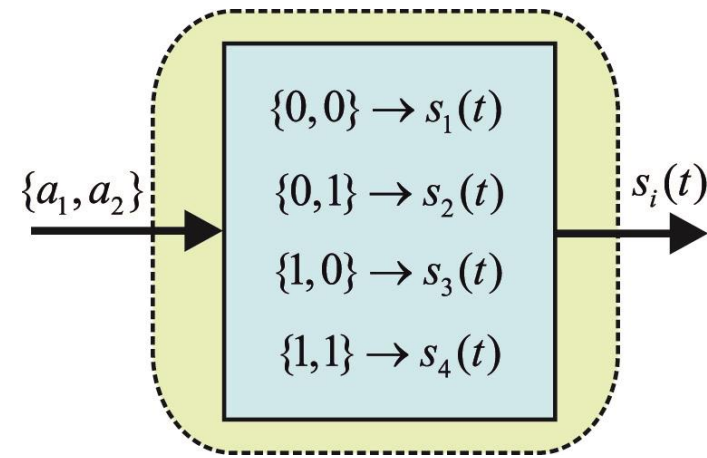
Παράδειγμα πίνακα αναζήτησης και κυματομορφών εκπομπής



Ορθοκανονικές συναρτήσεις βάσης για τα σήματα $s_i(t)$
(διαδικασία Gram-Schmidt)

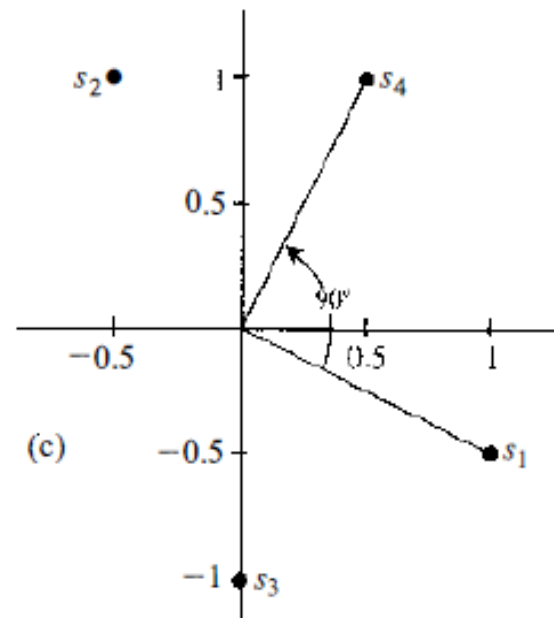
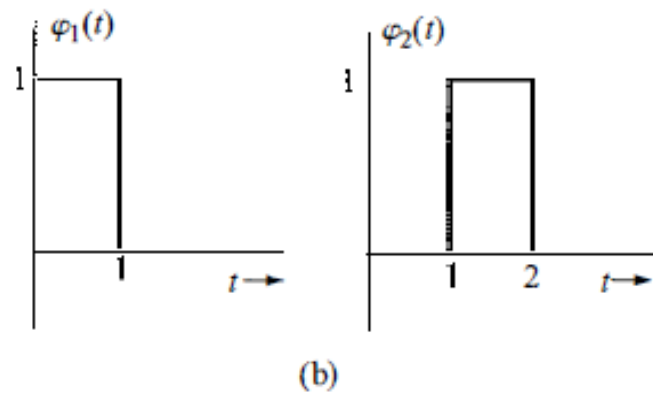
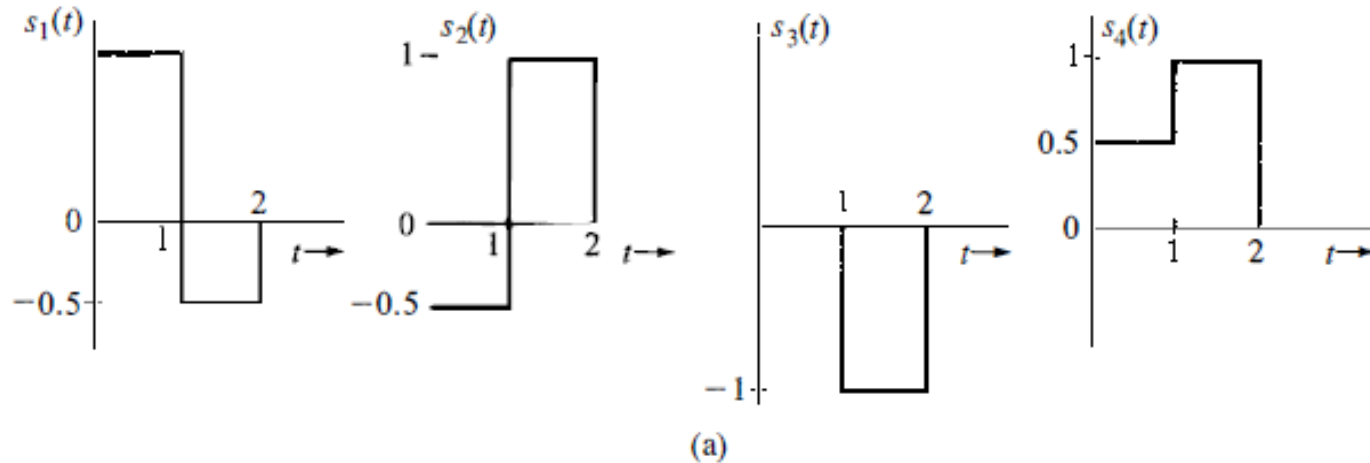
$$M = 4$$

$$K_b = \log_2 M = 2$$



$$s_i(t) = \sum_{j=1}^N s_{ij} \phi_j(t)$$

ΣΗΜΑΤΑ, ΟΡΘΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΒΑΣΗ ΚΑΙ ΑΣΤΕΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ



(a) ΣΗΜΑΤΑ
(b) ΟΡΘΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΒΑΣΗ
(c) ΑΣΤΕΡΙΣΜΟΣ

$$\begin{aligned}s_1 &= (1, -0.5) \\s_2 &= (-0.5, 1) \\s_3 &= (0, -1) \\s_4 &= (0.5, 1)\end{aligned}$$

Παράδειγμα Ψηφιακής Μετάδοσης

- Παράδειγμα ενός συνόλου $M = 4$ σημάτων ($x_i(t)$, $i = 1, 2, 3, 4$), που μπορεί να μεταδώσει $K = 2$ bits πληροφορίας, αφού $2^2 = 4$, δηλ. (00, 01, 10, 11):

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

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 τ_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:

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

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

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

Απόδοση Ψηφιακής Μετάδοσης (συνέχεια)

- **Πολυπλοκότητα (complexity)** – σχετίζεται με το κόστος των συστημάτων

ΘΕΩΡΗΜΑ SHANNON-HARTLEY: Η χωρητικότητα C του καναλιού μετάδοσης παρέχει τον θεωρητικά μέγιστο ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας (σε bps) που μπορεί να επιτευχθεί σε κανάλι AWGN συγκεκριμένου εύρους ζώνης, για αυθαίρετα μικρή πιθανότητα σφάλματος (BER) και συγκεκριμένο SNR. Αυθαίρετα μικρό BER σημαίνει ότι μπορεί να ευρεθεί τεχνική κωδικοποίησης καναλιού η οποία να δώσει το επιθυμητό BER. Αλλά όσο μικραίνει το BER αυξάνει η πολυπλοκότητα της κωδικοποίησης και του συστήματος.

- **Αποδοτικότητα εύρους ζώνης (bandwidth efficiency)**

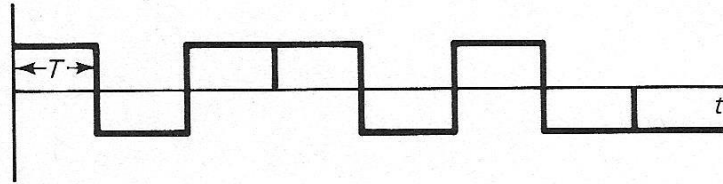
Αν η ταχύτητα μετάδοσης της πληροφορίας είναι W_b bits/sec (bps) και το εύρος ζώνης μετάδοσης B_T Hz, τότε το μέτρο της αποδοτικότητας εύρους ζώνης είναι η **φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency)**

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

- 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...

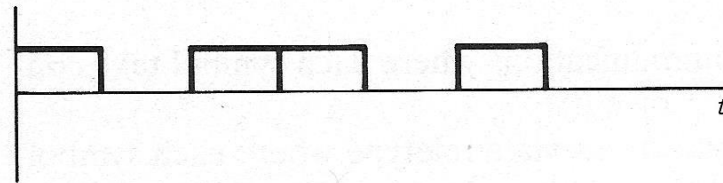
Διάφορα ψηφιακά σήματα (binary)

Τύποι παλμών
Διάρκειας T



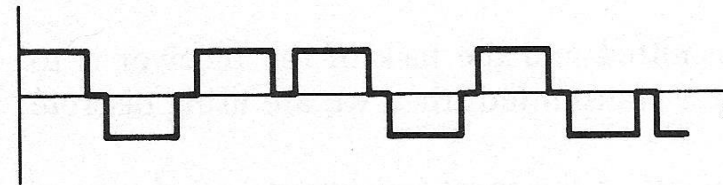
(a)

Bipolar - NRZ



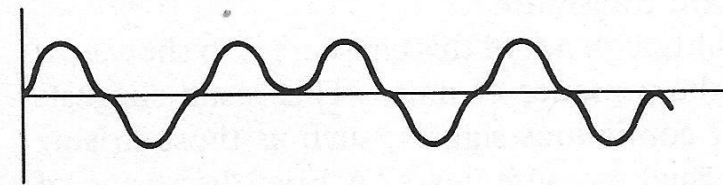
(b)

Monopolar



(c)

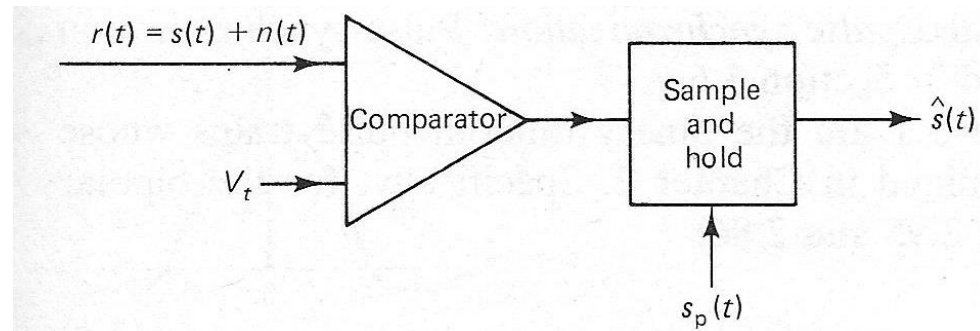
Bipolar - RZ



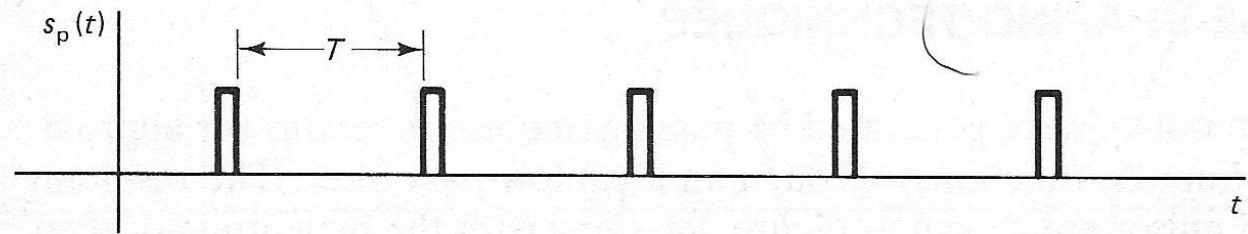
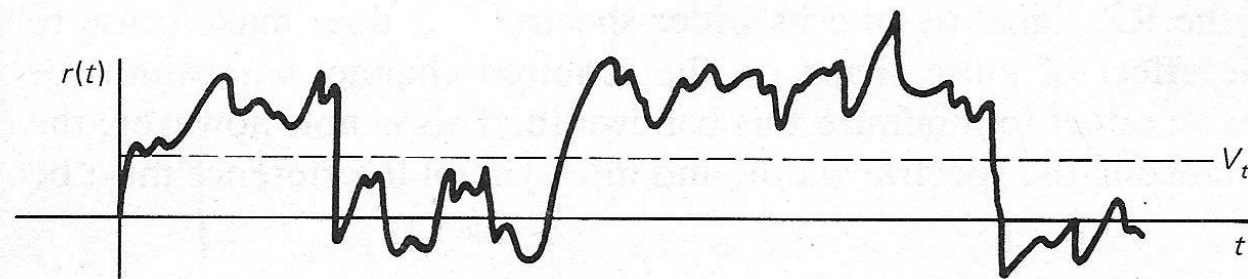
(d)

Raised-cosine-shaped

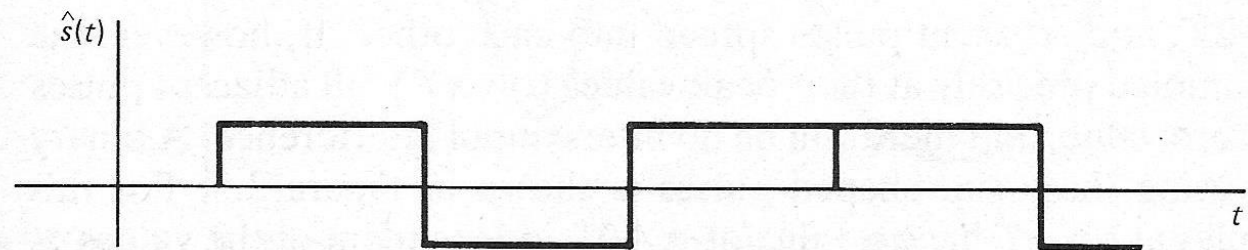
Ψηφιακός Δέκτης (binary)



Είσοδος
στον
Ψηφιακό
Δέκτη

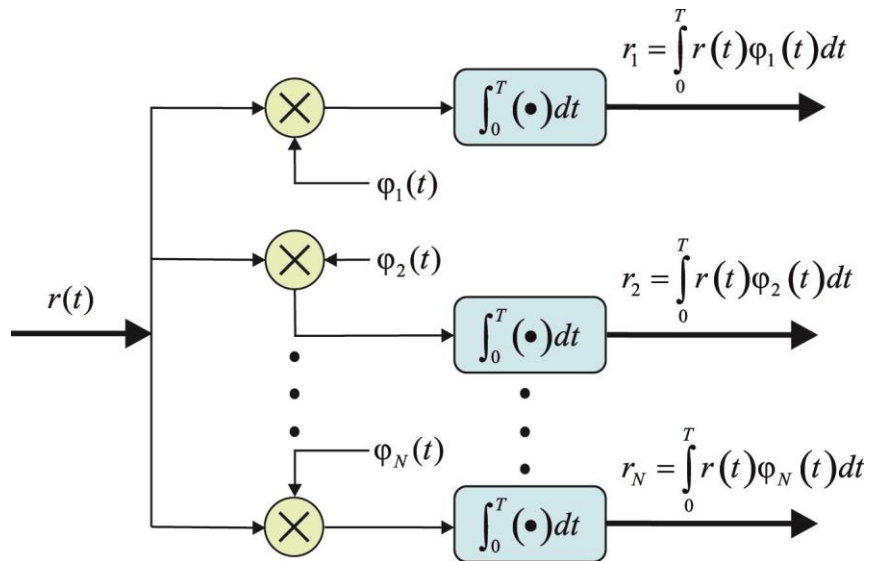


Έξοδος
του
Ψηφιακού
Δέκτη

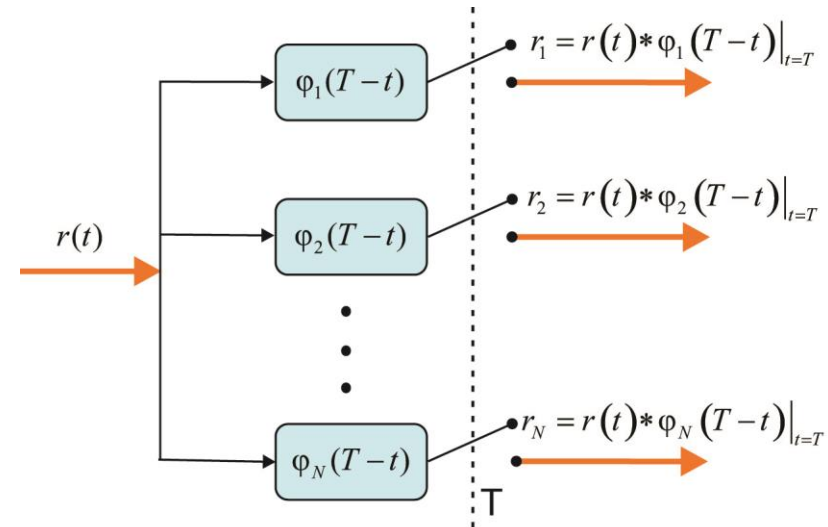


ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΔΕΚΤΗΣ (Αποδιαμορφωτής – ανιχνευτής)

Αποδιαμορφωτής συσχέτισης
(Correlative demodulator)



Αποδιαμορφωτής προσαρμοσμένων φίλτρων
(Matched-filter demodulator)

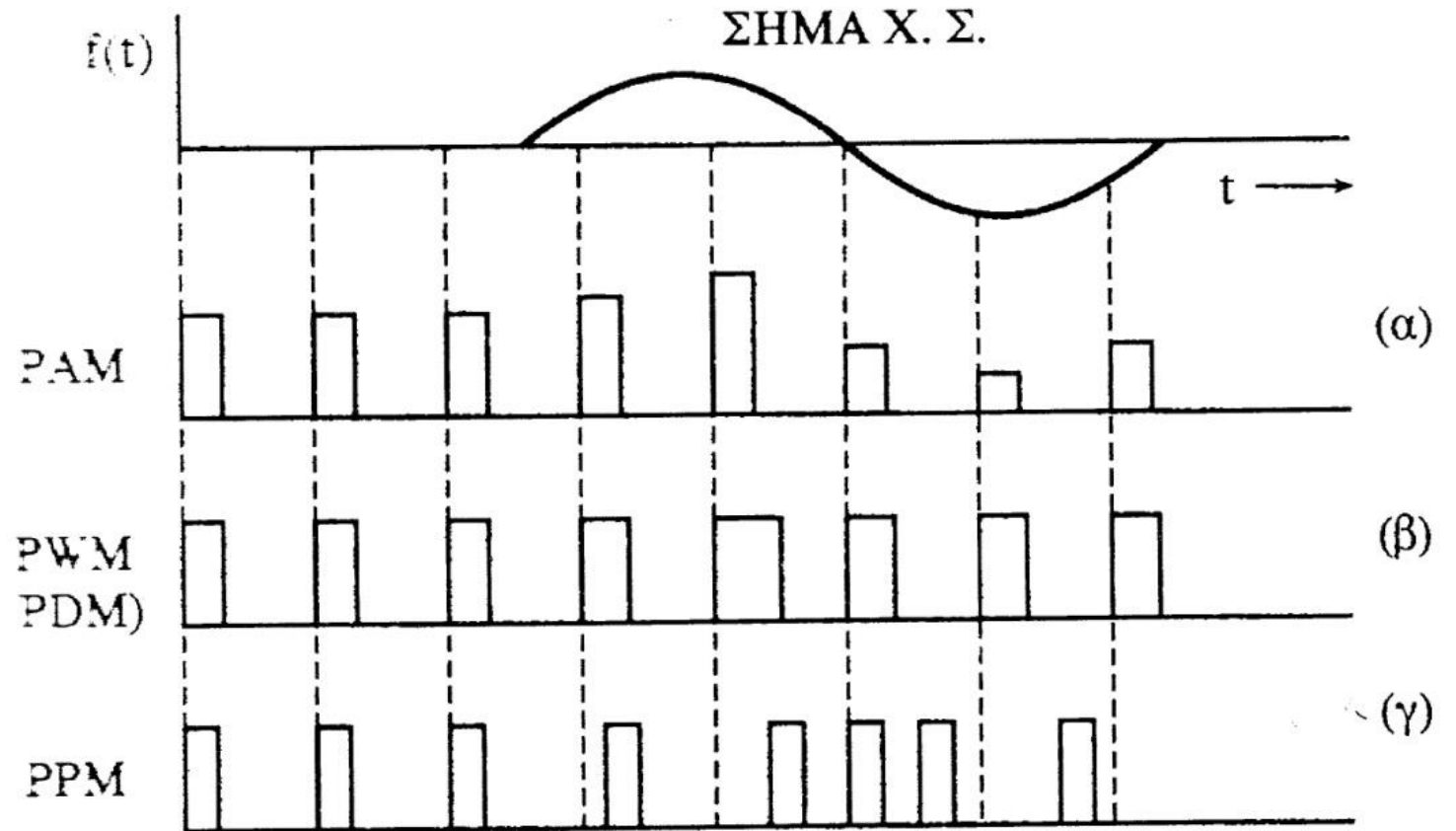


Ψηφιακές Μεταδόσεις

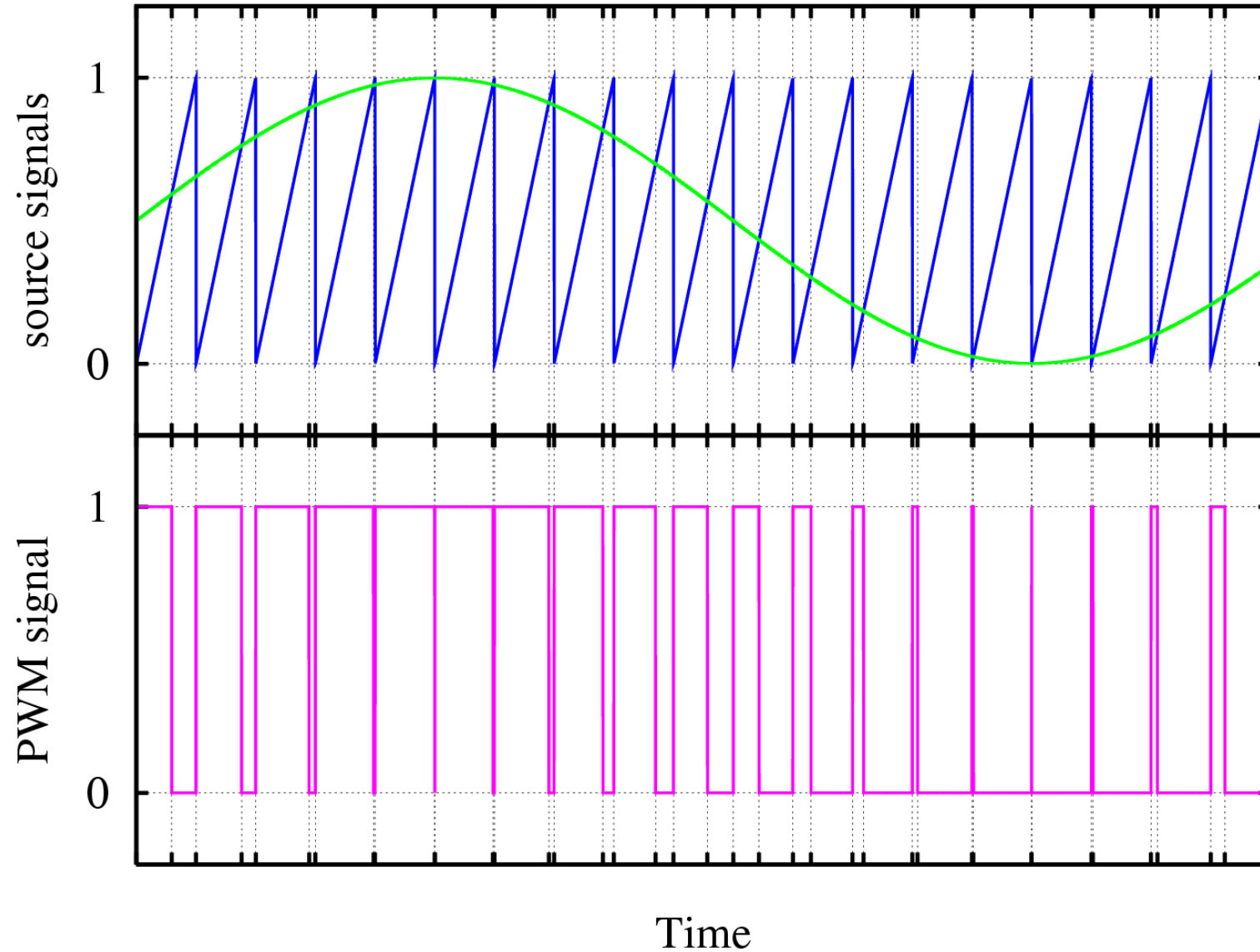
- *Μετάδοση δεδομένων (data - bits):*
 - *Βασικής ζώνης (π.χ. από CPU Η/Υ στον σκληρό δίσκο, ή σε CD).*
 - *Με Διαμόρφωση Φέροντος (π.χ. στα ασύρματα LAN, μέσω modem ραδιοκυμάτων).*

Διαμόρφωση παλμών

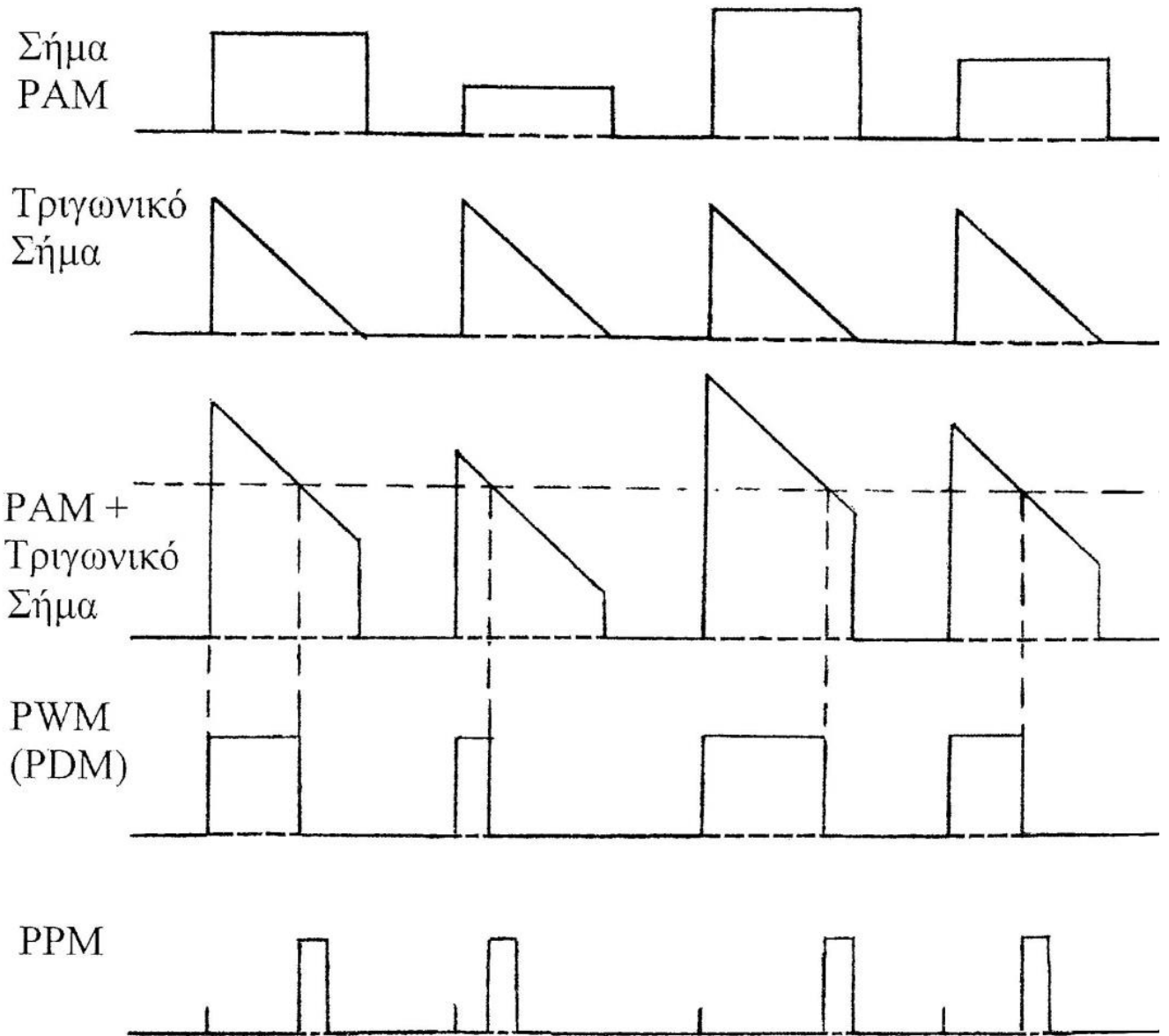
PAM
PWM(PDM)
PPM



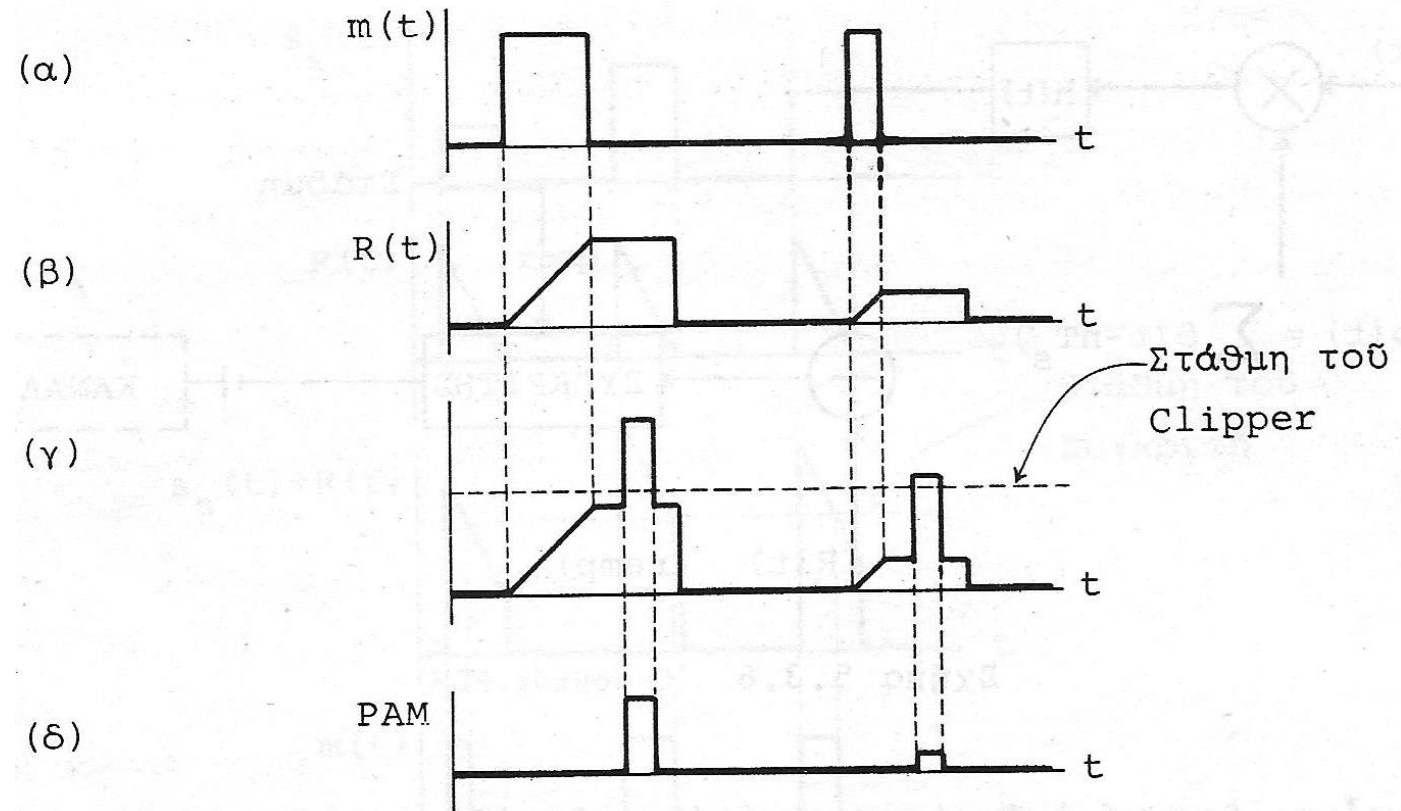
Διαδικασία Διαμόρφωσης παλμών κατά διάρκεια



Μετατροπή PAM σε PWM (PDM) και PPM



ΑΠΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ PDM (ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΕ PAM)



(α) Τό PDM $m(t)$

(β) Παραγωγή της ramp

(γ) "Αθροισμα του σήματος του (β)

μέ έναν περιοδικό παλμό

(δ) Τό σήμα PAM

Διαμόρφωση φορέα

$$\text{Φορέας} = A \cos(\omega_c t + \varphi)$$

- Πλάτος A
- (Κυκλική) Συχνότητα ω_c
- Φάση φ
- Γωνία $(\omega_c t + \varphi)$

Πληροφορία στο Πλάτος $\Rightarrow$ Διαμόρφωση Πλάτους, AM
(Amplitude Modulation)

Πληροφορία στη Συχνότητα $\Rightarrow$ Διαμόρφωση Συχνότητας,
FM (Frequency Modulation)

Πληροφορία στη Φάση $\Rightarrow$ Διαμόρφωση Φάσης, PM
(Phase Modulation)

Πληροφορία στη Γωνία του φορέα $\Rightarrow$ FM ή PM