



# Μάθημα Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες

Τεχνικές Μετάδοσης : Διαμόρφωση  
και πολυπλεξία

Μάθημα 11<sup>ο</sup> – 12<sup>ο</sup>

---

ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Τομέας Επικοινωνιών και Επεξεργασίας Σήματος

Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών



# Περιεχόμενα Ενότητας

- Αναλογική - ψηφιακή μετάδοση
- Σήματα βασικής ζώνης - ζωνοπερατά
- Διαμόρφωση σήματος:
  - Αναλογική -ψηφιακή
  - Ημιτόνου -παλμών
- Αποδιαμόρφωση
- Πιθανότητα & ρυθμός σφαλμάτων
- Επιδόσεις & σχεδίαση τηλ/κών συστημάτων
- Τύποι Πολυπλεξιας
- Διασπορά – διεύρυνση φάσματος



# Αναλογική -Ψηφιακή Μετάδοση

- Δεδομένα: αναλογικά ή ψηφιακά
- Σήματα: αναλογικά ή ψηφιακά
- Μετάδοση: αναλογική ή ψηφιακή
  - Αναλογική Μετάδοση: μετάδοση αναλογικού σήματος (π.χ. ραδιοφωνία, τηλεόραση)
  - Ψηφιακή Μετάδοση: μετάδοση ψηφιακού σήματος (π.χ. LAN, οπτικές επικοινωνίες, ψηφιακή τηλεφωνία )
    - Στην αναλογική μετάδοση τα δεδομένα είναι αναλογικά η ψηφιακά
    - Στην Ψηφιακή μετάδοση τα δεδομένα είναι Ψηφιακά
    - Αν τα δεδομένα είναι Αναλογικά, θα πρέπει να μετατραπούν σε Ψηφιακά (A/D conversion)



# Ψηφιακή Μετάδοση Πλεονεκτήματα μειονεκτήματα

+

- Μεγαλύτερη ανοσία στο θόρυβο (μπορεί να αφαιρεθεί πιο εύκολα)
  - Τα λάθη ανιχνεύονται ακόμη και εάν ο θόρυβος είναι μεγάλος
  - Τα λάθη μπορούν να διορθωθούν (με χρήση κωδίκων διόρθωσης λαθών)
- Εύκολος έλεγχος πιστότητας σήματος
  - Το ψηφιακό σήμα μπορεί να αναγεννηθεί εξαλείφοντας έτσι την επίδραση θορύβου (ο θόρυβος δεν συσσωρεύεται)
- Δυνατότητα εξάλειψης πλεονάζουσας πληροφορία αναλογικού σήματος
  - Μικρότερες απαιτήσεις εύρους ζώνης
- Δεδομένα από διαφορετικές πηγές (φωνή, βίντεο, κλπ.) μπορούν να μεταδοθούν πάνω από το ίδιο τηλεπικοινωνιακό σύστημα
- Διασφάλιση απόρρητου με κρυπτογράφηση και προστασίας από παρεμβολές
- Συνήθως οικονομικότερα συστήματα με ευκολία υλοποίησης σε VLSI
- Ευελιξία στην ανταλλαγή εύρους ζώνης και ισχύος

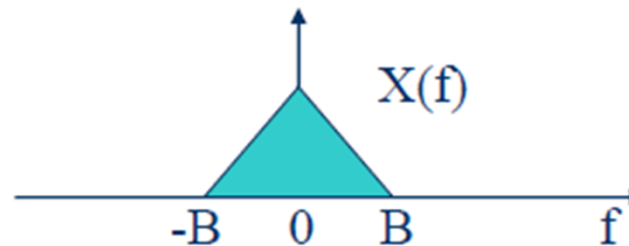
-

- Εν γένει, το απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερο από ότι στα αναλογικά συστήματα
- Απαιτείται συγχρονισμός



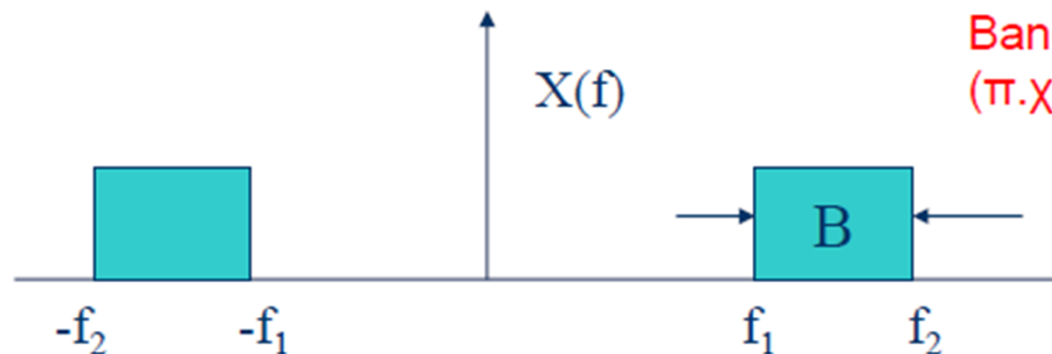
# Σήματα βασικής ζώνης και ζωνοπερατά

- Σήμα **βασικής ζώνης (baseband)** ή **χαμηλοπερατό (lowpass)**  $x(t)$  εύρους φάσματος  $B$  είναι ένα σήμα με Μ/Σ Fourier  $X(f)$  μη μηδενικό για  $|f| \leq B$  και μηδενικό για  $|f| > B$ .



Baseband κανάλια  
(π.χ. καλώδια Ethernet)

- **Ζωνοπερατό (bandpass)** σήμα  $x(t)$  εύρους φάσματος  $B = f_2 - f_1$  είναι ένα σήμα με Μ/Σ Fourier  $X(f)$  μη μηδενικό για  $0 \leq f_1 \leq |f| \leq f_2$ , και μηδενικό αλλού.



Bandpass κανάλια  
(π.χ. RF)



# Διαμόρφωση Σήματος (Modulation) I

- **Διαμόρφωση:** διαδικασία με την οποία η πληροφορία «τοποθετείται» σε ένα φυσικό «φορέα» ώστε να είναι κατάλληλη για μετάδοση μέσω ενός φυσικού καναλιού.
- Ένα σήμα πληροφορίας χαμηλών συχνοτήτων (baseband) μεταφέρεται από ένα φέρον σήμα (carrier signal) συνήθως υψηλότερης συχνότητας [φέρουσα συχνότητα (carrier frequency) ή συχνότητα φέροντος].
- **Φέρον σήμα:** αναλογικό σήμα ή σειρά παλμών
- Διαμόρφωση χαρακτηριστικών φέροντος σήματος (μεταβολή π.χ. πλάτους, συχνότητας ή φάσης) με βάση τα χαρακτηριστικά του σήματος πληροφορίας, ώστε το σήμα να περάσει μέσα από το μέσο μετάδοσης.
- Ο διαμορφωτής πρέπει να εκμεταλλεύεται πλήρως το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού.



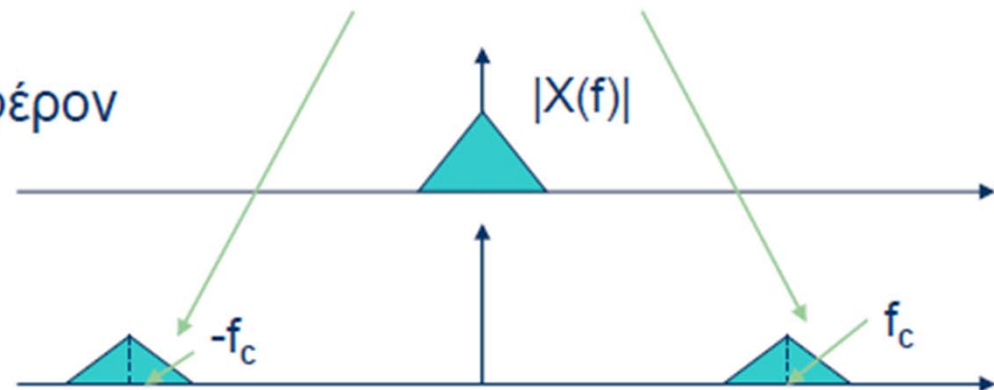
# Διαμόρφωση Σήματος (Modulation) II

- Δηλαδή, τα σήματα βασικής ζώνης  $x(t)$  μετασχηματίζονται σε ζωνοπερατά σήματα αν πολλαπλασιαστούν με ένα ημιτονοειδές σήμα:

$$s(t) = x(t) \cos(2\pi f_c t + \theta) \rightarrow S(f) = (1/2)[e^{-j\theta}X(f+f_c) + e^{j\theta}X(f-f_c)]$$

↑  
σήμα πληροφορίας

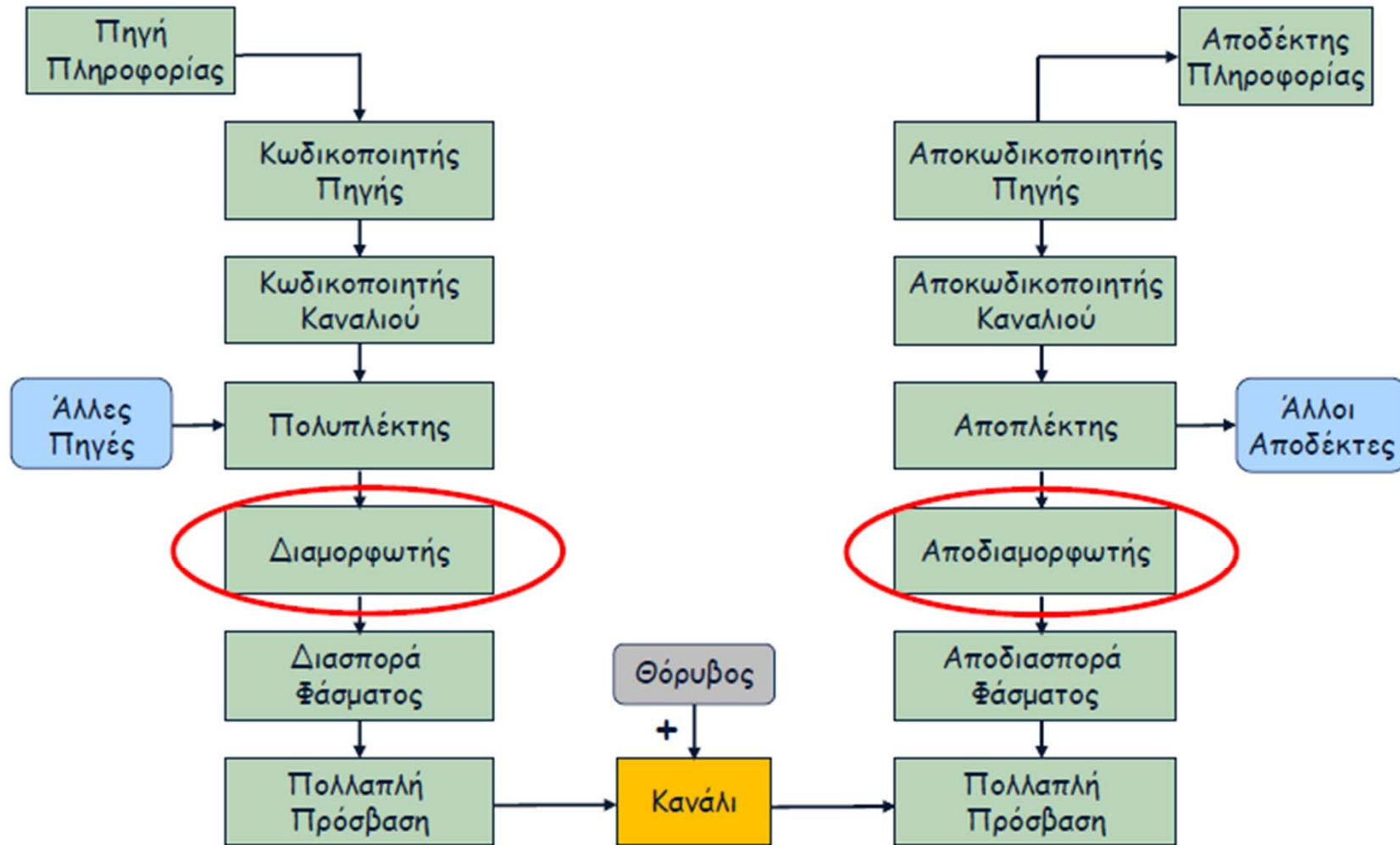
↑  
φέρον



- Τα περισσότερα σήματα μεταδίδονται διαμορφώνοντας ένα κατάλληλο φέρον διότι:
  - Τα διαμορφωμένα σήματα εκπέμπονται ευκολότερα
  - Επιτρέπεται η συνύπαρξη πολλών σημάτων με διαφορετικές συχνότητες φερόντων που μοιράζονται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα στον ίδιο γεωγραφικό χώρο.



# Μοντέλο Ψηφιακών Επικοινωνιών







# Πλεονεκτήματα Διαμόρφωσης Σήματος

- Δυνατότητα εύκολης μετάδοσης του σήματος
  - π.χ. στην ασύρματη μετάδοση με μέσο μετάδοσης τον αέρα (μικρό μέγεθος κεραίας)
- Δυνατότητα χρήσης πολυπλεξίας
  - Ταυτόχρονη μετάδοση πολλών σημάτων μέσα από το ίδιο μέσο μετάδοσης (**F**requency **D**ivision **M**ultiplexing-FDM)
- Δυνατότητα υπέρβασης των περιορισμών των μέσων μετάδοσης, δηλαδή εκμετάλλευση περιοχών του φάσματος με καλύτερες συνθήκες μετάδοσης
- Δυνατότητα περιορισμού θορύβου και παρεμβολών
- **Εκχώρηση συχνότητας**



# Αποδιαμόρφωση(demodulation)

- **Αποδιαμόρφωση(demodulation)** είναι η αντίστροφη διαδικασία της διαμόρφωσης
  - Ανάκτηση-εξαγωγή αρχικού σήματος πληροφορίας από το λαμβανόμενο διαμορφωμένο σήμα στον δέκτη.
- Αποδιαμόρφωση - Φώραση: σύμφωνη – ασύμφωνη

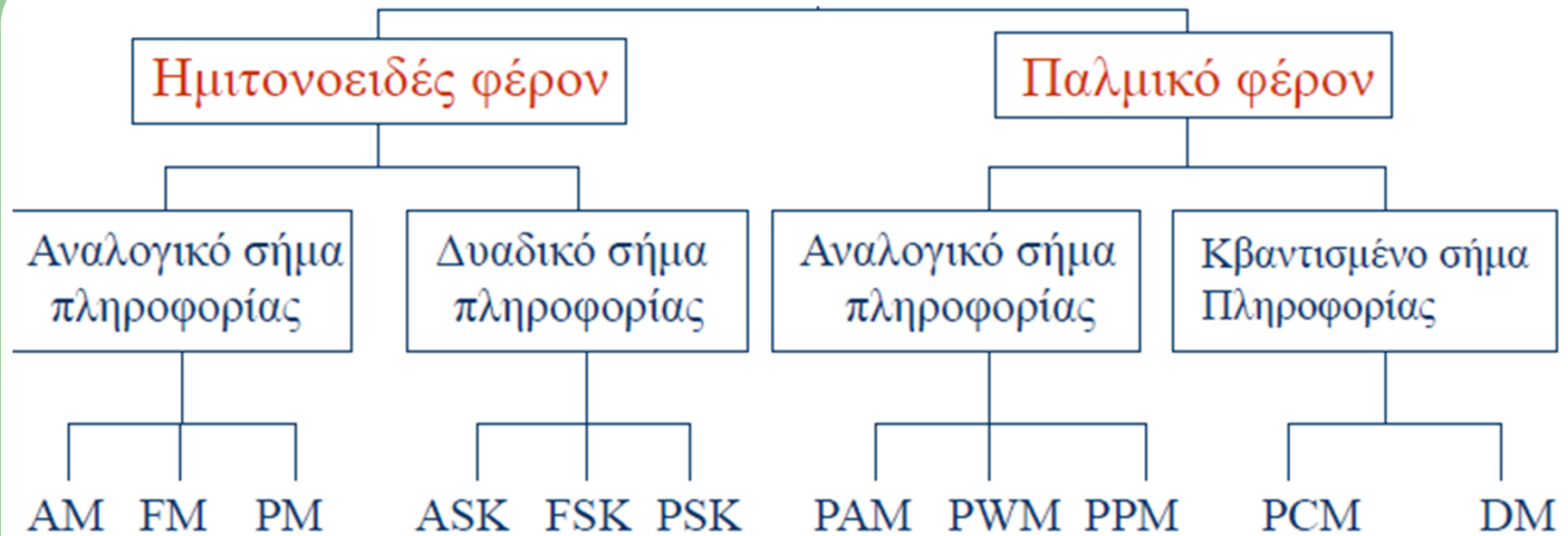


# Δεδομένα και Σήματα Μετάδοσης

- **Αναλογικά δεδομένα και μετάδοση αναλογικού σήματος**
  - Τα αναλογικά δεδομένα εύκολα μετατρέπονται σε αναλογικό σήμα (π.χ. Αναλογική TV, ραδιοφωνία)
- **Αναλογικά δεδομένα και μετάδοση ψηφιακού σήματος**
  - Μετατροπή σε ψηφιακά δεδομένα που επιτρέπει τη χρήση της σύγχρονης ψηφιακής μετάδοσης και τη χρήση του εξοπλισμού μεταγωγής A/D (π.χ. κωδικοποιητές, PCM)
- **Ψηφιακά δεδομένα και μετάδοση αναλογικού σήματος**
  - Ορισμένα μέσα μετάδοσης μεταδίδουν μόνο αναλογικά σήματα (π.χ. ασύρματα συστήματα), modems
- **Ψηφιακά δεδομένα και μετάδοση ψηφιακού σήματος**
  - Ο εξοπλισμός για την κωδικοποίηση είναι φθηνότερος από τον εξοπλισμό μετατροπής του ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (π.χ. σειριακή θύρα, PCs)



# Είδη Διαμόρφωσης



**passBand**

**baseBand**

A=Amplitude, F=Frequency, P=Phase, M= Modulation

K=Keying

W=Width, P=Pulse, Position

D=Delta

$$x(t)=A\cos(2\pi ft+\varphi)$$

$$x(t)=\sum A_k p(t-t_k)$$



- Το είδος της διαμόρφωσης καθορίζει:
  - Την αντοχή στον θόρυβο και την παραμόρφωση του καναλιού
  - Την πιστότητα αναπαραγωγής του αρχικού σήματος πληροφορίας
  - Το εύρος του απαιτούμενου για την μετάδοση φάσματος
  - Την πολυπλοκότητα των συστημάτων εκπομπής



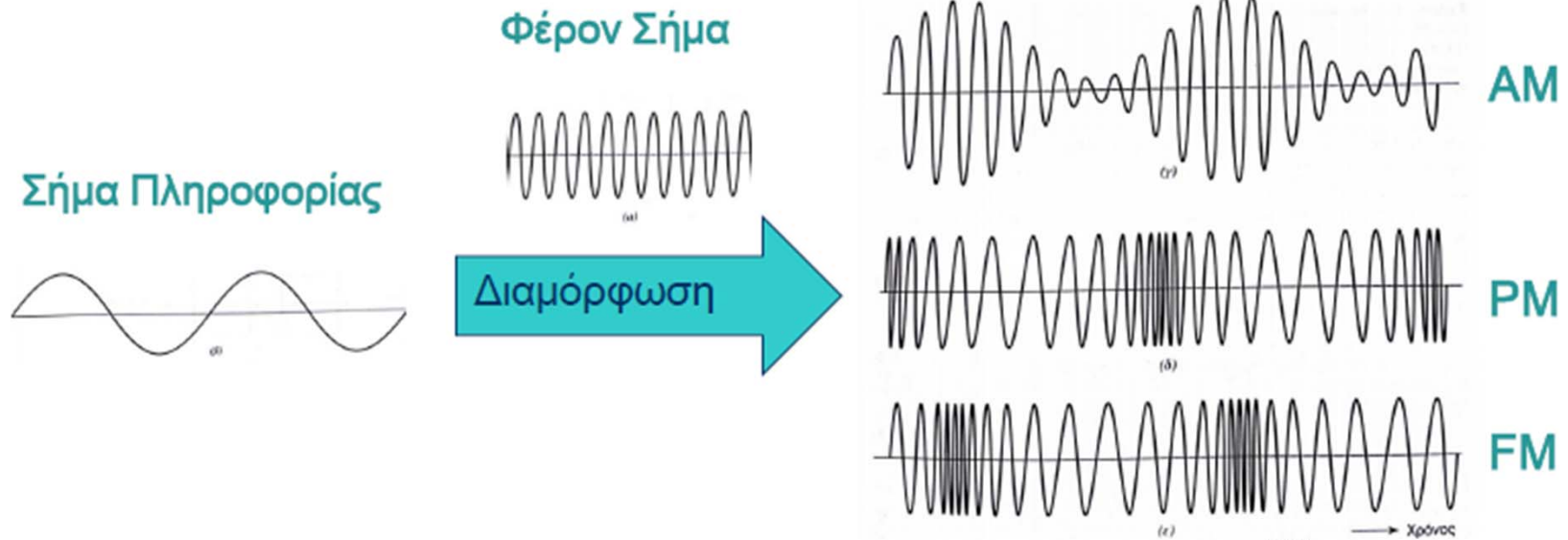
# Αναλογική Διαμόρφωση I

- Αναλογικό σήμα πληροφορίας  $m(t)$
- Αποτύπωση σήματος  $m(t)$  σε ένα άλλο σήμα  $u(t)$
- Τρία βασικά είδη διαμόρφωσης:
  - Διαμόρφωση Πλάτους  
(Amplitude Modulation - AM)  $u(t) = m(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_c)$
  - Διαμόρφωση Φάσης  
(Phase Modulation - PM)  $u(t) = \cos(2\pi f_c t + k_p m(t))$
  - Διαμόρφωση Συχνότητας  
(Frequency Modulation - FM)  $u(t) = \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau\right)$
- Στη διαμόρφωση FM, η στιγμιαία συχνότητα  $f_i(t)$  ακολουθεί το σήμα  $m(t)$

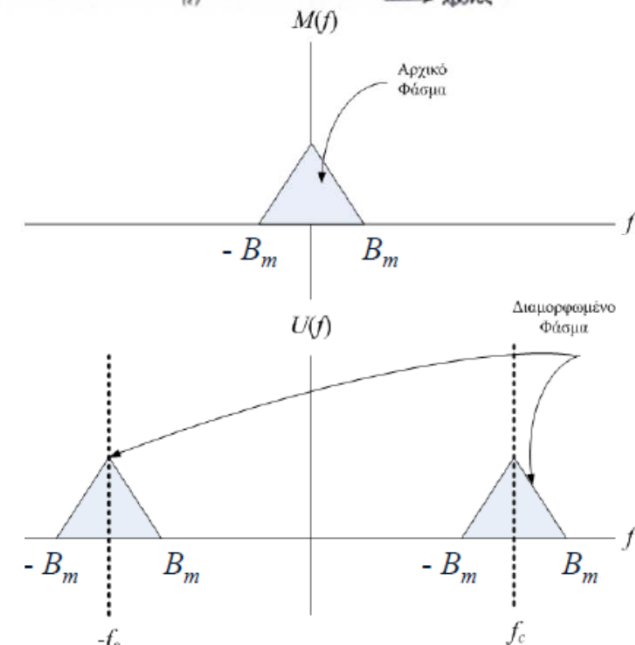
$$\theta(t) = 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau \Rightarrow f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} = f_c + k_f m(t)$$



# Φασματικό περιεχόμενο



- $B_m$ : εύρος ζώνης σήματος πληροφορίας
- $B_{RF}$ : εύρος ζώνης μετάδοσης
- AM:  $B_{RF} = 2B_m$
- FM:  $B_{RF} = 2 \cdot (\Delta + 1) \cdot B_m$ 
  - $\Delta = f_{\Delta} / B_m$ : δείκτης διαμόρφωσης
  - $f_{\Delta}$  = η μέγιστη απόκλιση συχνότητας από κεντρική συχνότητα φέροντος





# Παράδειγμα

- Ένας FM ραδιοφωνικός σταθμός εκπέμπει σήμα εύρους ζώνης 15KHz που έχει δείκτη διαμόρφωσης 5. Να υπολογιστεί το εύρος ζώνης μετάδοσης του διαμορφωμένου σήματος. Αν ο ίδιος ραδιοφωνικός σταθμός εξέπεμπε δυο προγράμματα ίδιου εύρους ζώνης σε διαδοχικές συχνότητες χρησιμοποιώντας πολυπλεξία FDM, πόσο θα είναι το εύρος ζώνης μετάδοσης του συνολικού FM διαμορφωμένου σήματος.
- $B_m = 15\text{KHz}$ ,  $B_{RF} = 2(\Delta + 1)B_m = 180\text{KHz}$ ,
- $B_{RF, FDM} = 360\text{KHz}$







## Αναλογική διαμόρφωση... Χρειάζεται;

- Σήμερα χρησιμοποιείται AM και FM (PM) για τη μεταφορά ψηφιακών σημάτων
- Η AM είναι η βάση για όλες τις ψηφιακές οπτικές μεταδόσεις
- Η FM (PM) είναι η βάση για πολλά άλλα τηλεπικοινωνιακά συστήματα
- Και θυμηθείτε .....Όλα στην πραγματικότητα είναι ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ



# Ψηφιακή διαμόρφωση

- Ψηφιακό σήμα πληροφορίας.
- Αναπαράσταση των bits με χρήση συνεχών σημάτων κατάλληλων για μετάδοση.
- Μετατροπή διακριτών τιμών σε αναλογικές κυματομορφές (συνήθως ημιτονικές).
- Δυαδική διαμόρφωση:
  - Δύο κυματομορφές
    - Bit 0 κυματομορφή  $s_0(t)$
    - Bit 1 κυματομορφή  $s_1(t)$
- M-αδική διαμόρφωση:
  - $M = 2^b$  διακριτές κυματομορφές  $s_i(i)$ ,  $i=0,1,2,\dots,M-1$  για την αναπαράσταση  $b$  bit.



# Είδη ψηφιακής διαμόρφωσης I

- Διαμόρφωση μεταλλαγής μετατόπισης πλάτους (Amplitude Shift Keying - ASK)

$$u(t) = m(t)A_c \cos(2\pi f_c t) = \begin{cases} A_c \cos(2\pi f_c t) & m(nT_b) = 1 \\ 0 & m(nT_b) = 0 \end{cases}$$

- Διαμόρφωση μεταλλαγής μετατόπισης φάσης (Phase Shift Keying - PSK)

$$u(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) = \begin{cases} A_c \cos(2\pi f_c t) & m(nT_b) = 1 \\ A_c \cos(2\pi f_c t + \pi) & m(nT_b) = 0 \end{cases}$$

- Διαμόρφωση μεταλλαγής μετατόπισης συχνότητας (Frequency Shift Keying - FSK)

$$u(t) = \begin{cases} A_c \cos(2\pi f_{c,1} t) & m(nT_b) = 1 \\ A_c \cos(2\pi f_{c,2} t) & m(nT_b) = 0 \end{cases}$$



# Είδη ψηφιακής διαμόρφωσης II

- ASK:  $B_{RF} = R_b$
- OOK = ASK δυο σταθμών on/off

- μετάδοση δεδομένων με οπτικές ίνες (οπτικές επικοινωνίες)

- FSK:  $B_{RF} = f_{c0} - f_{c1} + R_b$

- πρώτα modem για μετάδοση δεδομένων με ρυθμούς 300bit/s

- αποθήκευση δεδομένων σε αναλογικές κασέτες

- συστήματα αναγνώρισης κλήσης

- συστήματα ειδοποίησης

- μετάδοση πληροφορίας σχετική με τον καιρό

- εφαρμογές remote sensing

- συσκευές GSM

- PSK:  $B_{RF} = R_b$

- ασύρματα δίκτυα WiFi (IEEE 802.11)

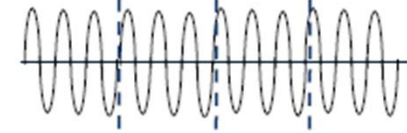
- πολλά standards RFID (Radio-Frequency Identification) για βιομετρικά διαβατήρια

- σύστημα Bluetooth

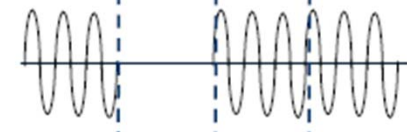
Σήμα πληροφορίας  $m(t)$



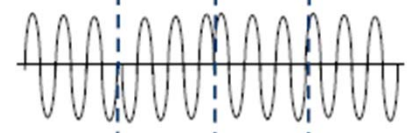
Φέρων σήμα



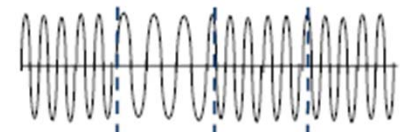
ASK



PSK



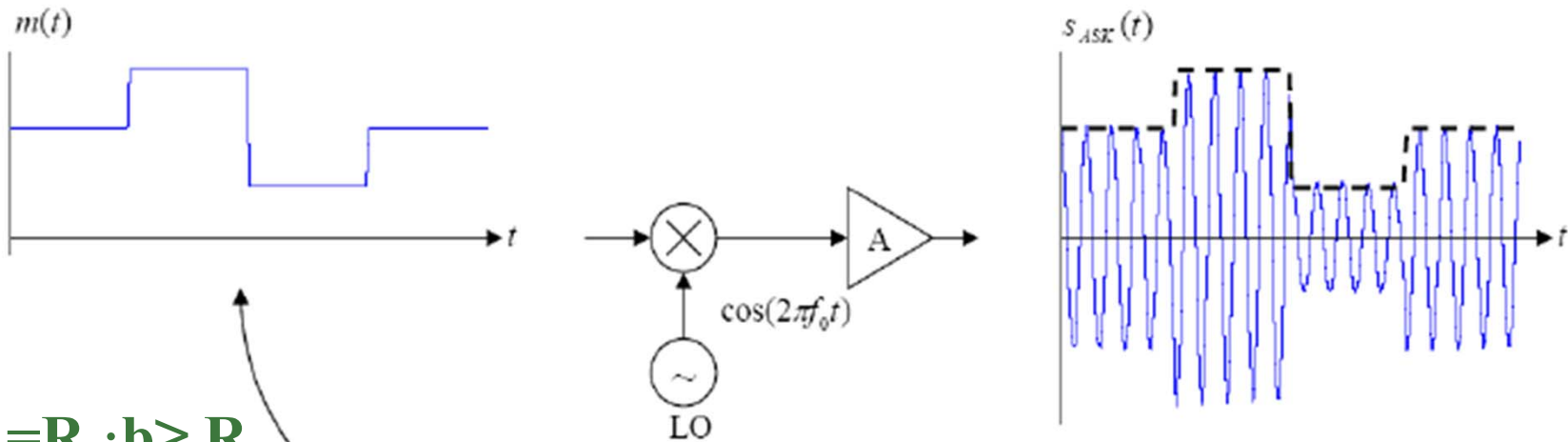
FSK





# Πολυσταθμική διαμόρφωση ASK(M-ASK)

Mathematical Representation:  $s_{ASK}(t) = Am(t)\cos(2\pi f_c t)$



$$R_b = R_s \cdot b \geq R_s$$

εύρος ζώνης μετάδοσης

$m(t)$  can assume one of 4 possible waveforms

⇒ 4-ary Amplitude Shift Keying

two bits are required to select one of the four possible amplitudes

$$B_{RF} = R_s \cdot (a+1)$$

$$0 \leq a \leq 1$$

(ιδανικά  $a=0$ )

When  $m(t)$  can assume only of of  $M$  possible waveforms, we have

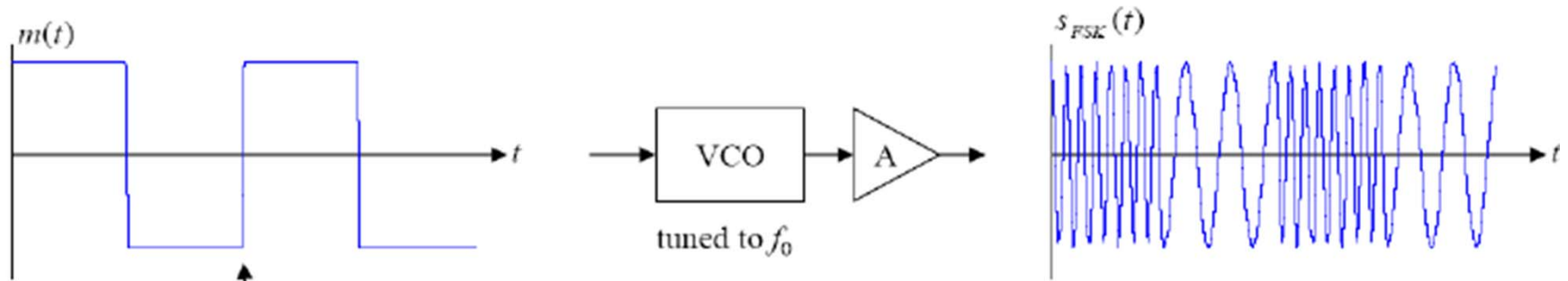
**M-ary Amplitude Shift Keying (MASK)**

$\log_2(M)$  bits are required to select one of the  $M$  possible waveforms



# Πολυσταθμική διαμόρφωση FSK(M-FSK)

$$\text{Mathematical Representation : } s_{FSK}(t) = A \cos \left( 2\pi f_0 t + 2\pi f_d \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau \right)$$



$$R_b = R_s \cdot b \geq R_s$$

εύρος ζώνης μετάδοσης

$$B_{RF} = M \cdot R_s \cdot (a+1)$$

$m(t)$  can assume one of two possible waveforms

⇒ Binary (2-ary) Frequency Shift Keying

one bit is required to select one of the two possible amplitudes

$$0 \leq a \leq 1$$

(ιδανικά  $a=0$ )

When  $m(t)$  can assume only of of  $M$  possible waveforms, we have

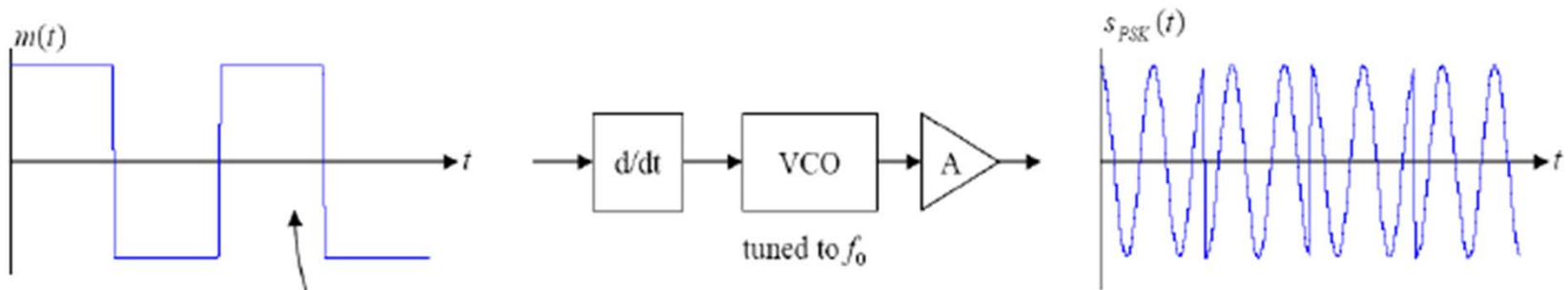
**$M$ -ary Frequency Shift Keying (MFSK)**

$\log_2(M)$  bits are required to select one of the  $M$  possible waveforms



# Πολυσταθμική διαμόρφωση PSK(M-PSK)

Mathematical Representation :  $s_{PSK}(t) = A \cos(2\pi f_0 t + k_p m(t))$



$R_b = R_s \cdot b \geq R_s$

εύρος ζώνης μετάδοσης

$B_{RF} = R_s \cdot (a+1)$

$0 \leq a \leq 1$

(ιδανικά  $a=0$ )

$m(t)$  can assume one of two possible waveforms  $\Rightarrow$  Binary (2-ary) Phase Shift Keying

one bit is required to select one of the two possible amplitudes

When  $m(t)$  can assume only of of  $M$  possible waveforms, we have

**$M$ -ary Phase Shift Keying (MPSK)**

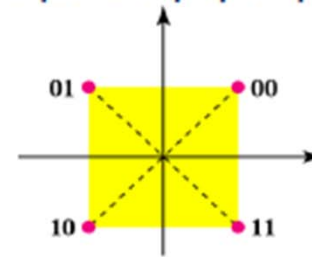
$\log_2(M)$  bits are required to select one of the  $M$  possible waveforms



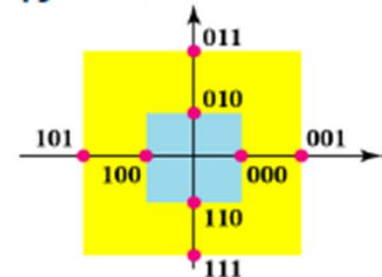
# Διαμόρφωση QAM I

- QAM (Quadrature Amplitude Modulation) → συνδυασμός διαμόρφωσης φάσης (PM/PSK) και διαμόρφωσης πλάτους (AM/ASK).
- Μετάδοση δύο σημάτων στην ίδια συχνότητα με διαφορά φάσης  $\pi/2$ .

$$u(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$



4-QAM  
1 amplitude, 4 phases



8-QAM  
2 amplitudes, 4 phases

- Μεταβολές στη φάση και στο πλάτος.
- Αναλογική QAM:
  - μετάδοση δύο αναλογικών σημάτων πληροφορίας (PM+AM).
  - χρησιμοποιείται στην αναλογική τηλεόραση (NTSC και PAL) για αποτύπωση πληροφορίας σχετικά με το χρώμα.
  - χρησιμοποιείται στη ραδιοφωνία AM για μετάδοση στέρεο ήχου.
- Ψηφιακή QAM:
  - μετάδοση δύο ψηφιακών σημάτων πληροφορίας (PSK+ASK).
  - x μεταβολές στη φάση, y μεταβολές στο πλάτος με  $x > y \rightarrow M = x \cdot y$  πιθανές μεταβολές (M-QAM).
  - χρησιμοποιείται στην καλωδιακή τηλεόραση και στα καλωδιακά modems, καθώς και στις τεχνολογίες ADSL και VDSL.

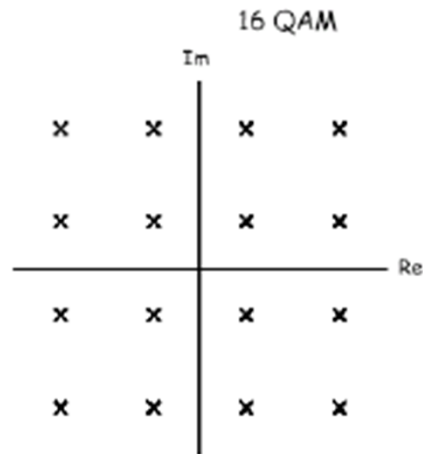




# Διαμόρφωση QAM II

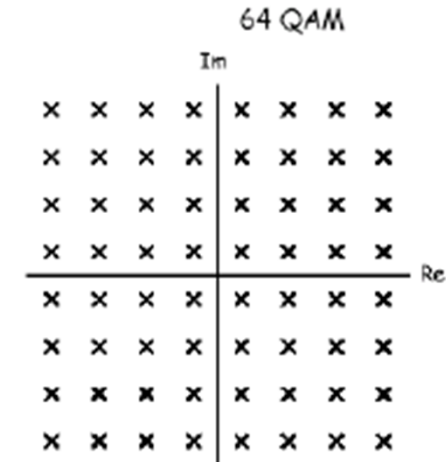
16-QAM ( $M=16$  σύμβολα)

$$R_b = 4 \cdot R_s$$



64-QAM ( $M=64$  σύμβολα)

$$R_b = 6 \cdot R_s$$



εύρος ζώνης μετάδοσης

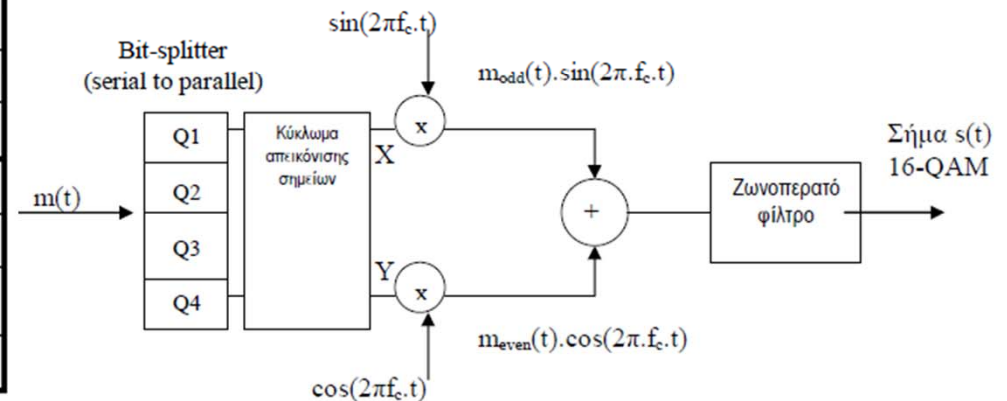
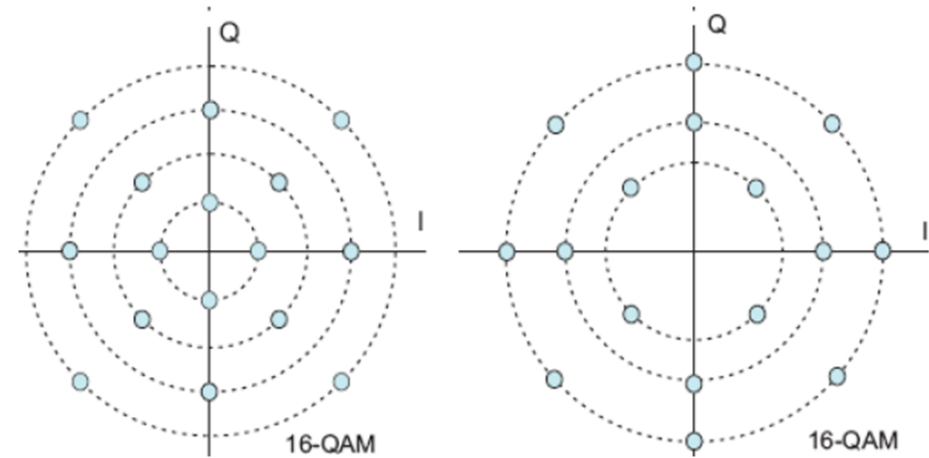
$$B_{RF} = R_s \cdot (a+1)$$

- Αποδοτικότερη χρήση εύρους ζώνης  $R_b = R_s \log_2 M = B_{RF} \log_2 M$
- ΑΛΛΑ απαίτηση για υψηλότερη τιμή SNR  $R_b = B_{RF} \log_2 (1 + S/N)$



# 16 QAM

Σύμβολο (baud)	Πλάτος	Φάση	Μεταδιδόμενο σήμα $s(t)$
1 0 0 1	5	$0^\circ$	$s(t) = 5A_c \cos(2\pi f_c t + 0^\circ)$
0 0 0 1	3	$0^\circ$	$s(t) = 3A_c \cos(2\pi f_c t + 0^\circ)$
0 0 0 0	1,41	$45^\circ$	$s(t) = 1,41A_c \cos(2\pi f_c t + 45^\circ)$
1 0 0 0	4,23	$45^\circ$	$s(t) = 4,23A_c \cos(2\pi f_c t + 45^\circ)$
1 0 1 0	5	$90^\circ$	$s(t) = 5A_c \cos(2\pi f_c t + 90^\circ)$
0 0 1 0	3	$90^\circ$	$s(t) = 3A_c \cos(2\pi f_c t + 90^\circ)$
0 0 1 1	1,41	$135^\circ$	$s(t) = 1,41A_c \cos(2\pi f_c t + 135^\circ)$
1 0 1 1	4,23	$135^\circ$	$s(t) = 4,23A_c \cos(2\pi f_c t + 135^\circ)$
1 1 1 1	5	$180^\circ$	$s(t) = 5A_c \cos(2\pi f_c t + 180^\circ)$
0 1 1 1	3	$180^\circ$	$s(t) = 3A_c \cos(2\pi f_c t + 180^\circ)$
0 1 1 0	1,41	$225^\circ$	$s(t) = 1,41A_c \cos(2\pi f_c t + 225^\circ)$
1 1 1 0	4,23	$225^\circ$	$s(t) = 4,23A_c \cos(2\pi f_c t + 225^\circ)$
1 1 0 0	5	$270^\circ$	$s(t) = 5A_c \cos(2\pi f_c t + 270^\circ)$
0 1 0 0	3	$270^\circ$	$s(t) = 3A_c \cos(2\pi f_c t + 270^\circ)$
0 1 0 1	1,41	$315^\circ$	$s(t) = 1,41A_c \cos(2\pi f_c t + 315^\circ)$
1 1 0 1	4,23	$315^\circ$	$s(t) = 4,23A_c \cos(2\pi f_c t + 315^\circ)$





# Διαμόρφωση QPSK

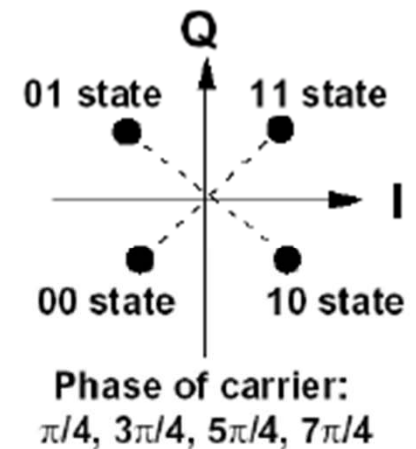
- QPSK
  - Διπλό BPSK
  - Για δεδομένο  $R_b$  χρησιμοποιεί το μισό  $B_{RF}$  από το BPSK

$$u(t) = \begin{cases} A_c \cos(2\pi f_c t + 5\pi/4) & m(nT_b) = 00 \\ A_c \cos(2\pi f_c t + 3\pi/4) & m(nT_b) = 01 \\ A_c \cos(2\pi f_c t + 7\pi/4) & m(nT_b) = 10 \\ A_c \cos(2\pi f_c t + \pi/4) & m(nT_b) = 11 \end{cases}$$

εύρος ζώνης μετάδοσης

$$B_{RF} = R_b / 2$$

Διάγραμμα αστερισμού  
(constellation diagram)





# Φασματική Απόδοση Διαμόρφωσης

- Φασματική απόδοση:

$$\eta_B = \frac{R_b}{B_{RF}} \quad (\text{bits / sec / Hz})$$

- Μέτρο αποτελεσματικότητας χρήσης φάσματος

$$\eta_B \leq \log_2(1 + S / N)$$

- Τυπικές τιμές (για βέλτιστη μορφή παλμού):

- ASK	1 bits/sec/Hz
- BPSK	1 bits/sec/Hz
- QPSK	2 bits/sec/Hz
- 8-PSK	3 bits/sec/Hz
- 16-QAM	4 bits/sec/Hz
- FSK	0.5 bits/sec/Hz
- 8-FSK	3/8 bits/sec/Hz



# Αποδιαμόρφωση - Φώραση

- **Σύμφωνη ή σύγχρονη φώραση (coherent detection):**  
Αποδιαμόρφωση με χρήση τοπικού σήματος στον δέκτη ίδιας συχνότητας και φάσης.
- **Ασύμφωνη ή ασύγχρονη φώραση (noncoherent detection):**  
Αποδιαμόρφωση με χρήση φίλτρων, χωρίς τοπικό σήμα.
- Οι ασύμφωνοι δέκτες έχουν χειρότερες επιδόσεις (μεγαλύτερη πιθανότητα σφάλματος) από τους σύμφωνους αλλά απλούστερη υλοποίηση.

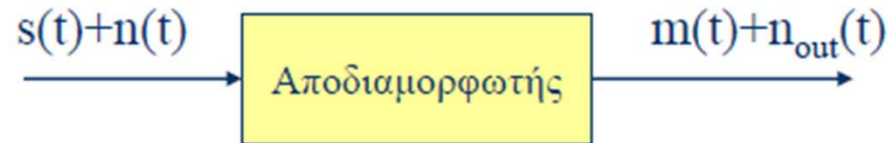
Coherent	Noncoherent
ASK	ASK
FSK	FSK
PSK	DPSK (Differential PSK)



# Σύγκριση αποδιαμορφωτών

- Αποδιαμορφωτές {AM, FM και PM}:

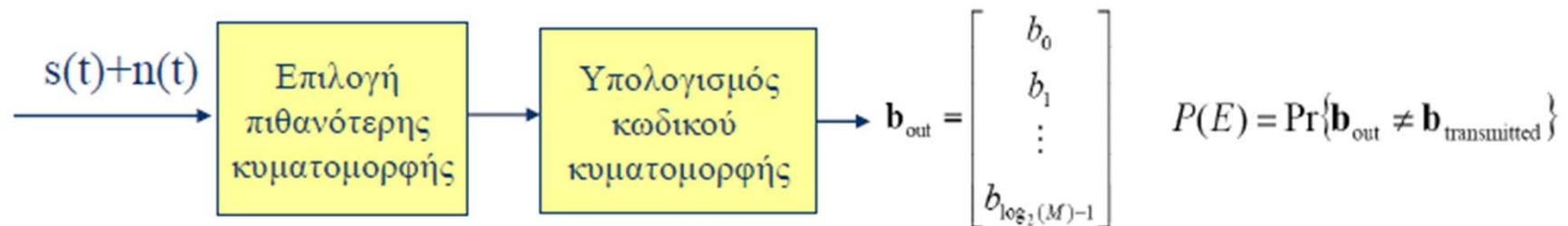
- Πιστή αναπαράσταση του  $m(t)$  από το διαμορφωμένο φέρον.
- Κριτήριο επιτυχίας = SNR = S/N



$$\frac{S}{N} = \frac{E\{|m(t)|^2\}}{E\{|n_{out}(t)|^2\}}$$

- Αποδιαμορφωτές {ASK, FSK και PSK}:

- Απόφαση για το ποια από τις  $M$  δυνατές κυματομορφές έχει μεταδοθεί.
- Έξοδος = κωδικός κυματομορφής
- Κριτήριο επιτυχίας = πιθανότητα σφάλματος





# Πιθανότητες σφάλματος σύμβολου και bit

symbol error probability    bit error probability

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

$$P_b \approx \frac{P(E)}{k}$$

$$E_b \approx \frac{E_{avg}}{k}$$

Συνάρτηση Q

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du.$$

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right).$$



# Η συνάρτηση $Q(x)$

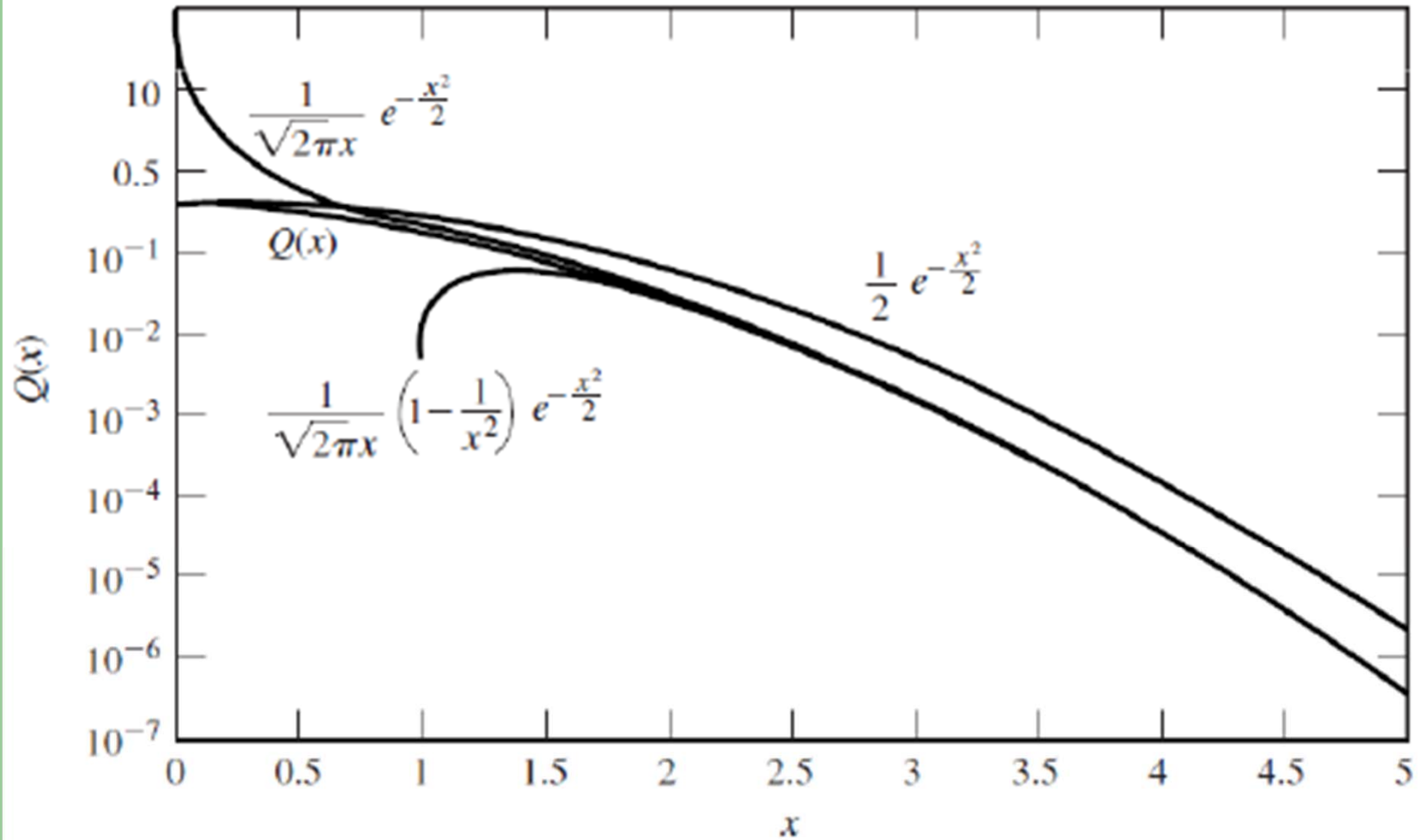
TABLE 4.1 TABLE OF  $Q(x)$  VALUES

$x$	$Q(x)$	$x$	$Q(x)$	$x$	$Q(x)$
0	5.000000e-01	2.4	8.197534e-03	4.8	7.933274e-07
0.1	4.601722e-01	2.5	6.209665e-03	4.9	4.791830e-07
0.2	4.207403e-01	2.6	4.661189e-03	5.0	2.866516e-07
0.3	3.820886e-01	2.7	3.466973e-03	5.1	1.698268e-07
0.4	3.445783e-01	2.8	2.555131e-03	5.2	9.964437e-06
0.5	3.085375e-01	2.9	1.865812e-03	5.3	5.790128e-08
0.6	2.742531e-01	3.0	1.349898e-03	5.4	3.332043e-08
0.7	2.419637e-01	3.1	9.676035e-04	5.5	1.898956e-08
0.8	2.118554e-01	3.2	6.871378e-04	5.6	1.071760e-08
0.9	1.840601e-01	3.3	4.834242e-04	5.7	5.990378e-09
1.0	1.586553e-01	3.4	3.369291e-04	5.8	3.315742e-09
1.1	1.356661e-01	3.5	2.326291e-04	5.9	1.817507e-09
1.2	1.150697e-01	3.6	1.591086e-04	6.0	9.865876e-10
1.3	9.680049e-02	3.7	1.077997e-04	6.1	5.303426e-10
1.4	8.075666e-02	3.8	7.234806e-05	6.2	2.823161e-10
1.5	6.680720e-02	3.9	4.809633e-05	6.3	1.488226e-10
1.6	5.479929e-02	4.0	3.167124e-05	6.4	7.768843e-11
1.7	4.456546e-02	4.1	2.065752e-05	6.5	4.016001e-11
1.8	3.593032e-02	4.2	1.334576e-05	6.6	2.055790e-11
1.9	2.871656e-02	4.3	8.539898e-06	6.7	1.042099e-11
2.0	2.275013e-02	4.4	5.412542e-06	6.8	5.230951e-12
2.1	1.786442e-02	4.5	3.397673e-06	6.9	2.600125e-12
2.2	1.390345e-02	4.6	2.112456e-06	7.0	1.279813e-12
2.3	1.072411e-02	4.7	1.300809e-06		



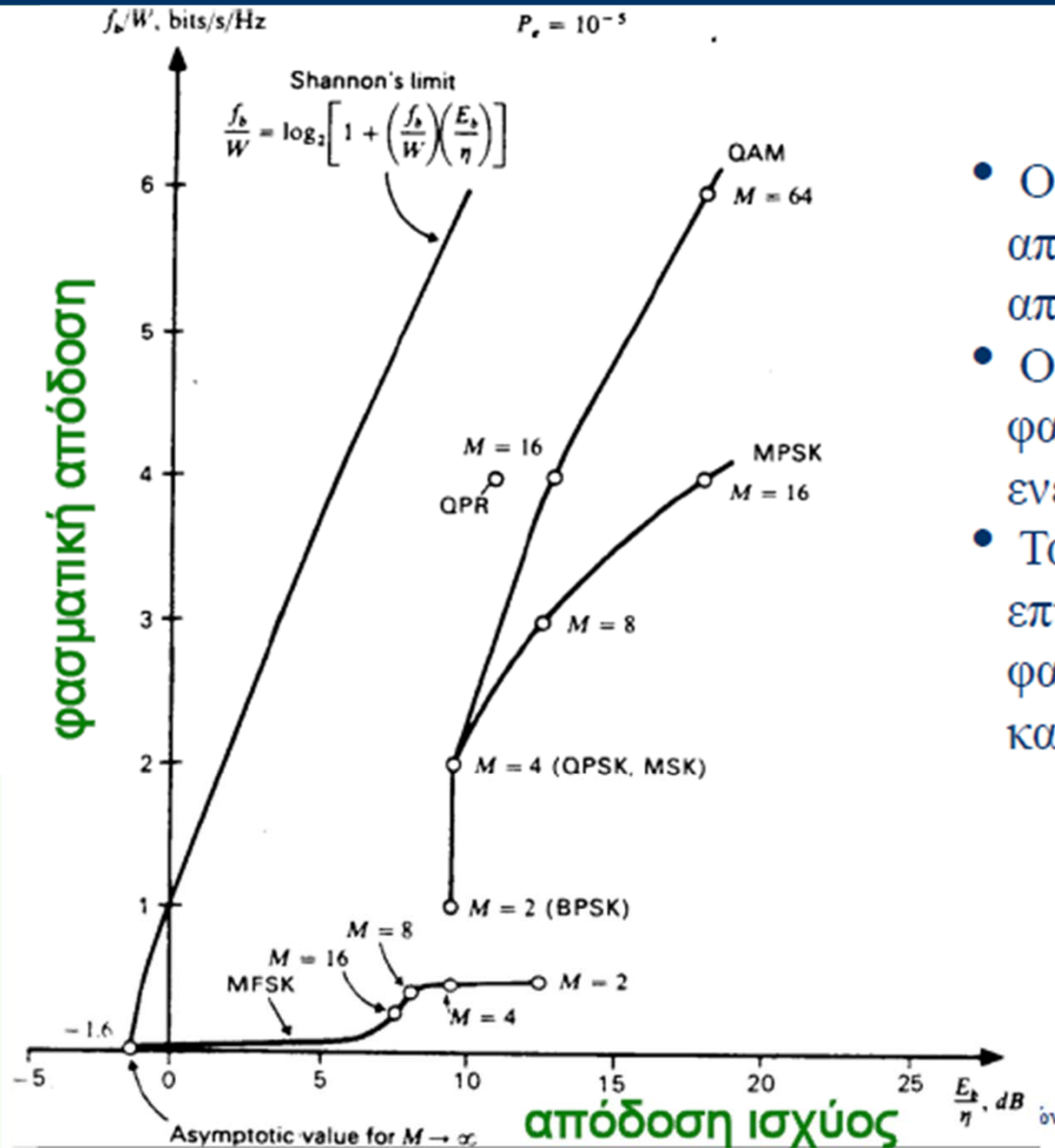


# Η συνάρτηση $Q(x)$





# Σύγκριση μεθόδων ψηφιακής διαμόρφωσης



- Οι MFSK είναι ενεργειακά αποδοτικές, αλλά όχι φασματικά αποδοτικές.
- Οι MPSK και MQAM είναι φασματικά αποδοτικές, αλλά όχι ενεργειακά αποδοτικές.
- Τα συστήματα κινητών επικοινωνιών είναι περιορισμένα φασματικά → κατάλληλες MPSK και MQAM.

$n$ : η φασματική πυκνότητα θορύβου



# Εφαρμογές ψηφιακών διαμορφώσεων

Modulation format	Application
MSK, GMSK	GSM, CDPD
BPSK	Deep space telemetry, cable modems
QPSK, $\pi/4$ DQPSK	Satellite, CDMA, NADC, TETRA, PHS, PDC, LMDS, DVB-S, cable (return path), cable modems, TFTS
OQPSK	CDMA, satellite
FSK, GFSK	DECT, paging, RAM mobile data, AMPS, CT2, ERMES, land mobile, public safety
8, 16 VSB	North American digital TV (ATV), broadcast, cable
8PSK	Satellite, aircraft, telemetry pilots for monitoring broadband video systems
16 QAM	Microwave digital radio, modems, DVB-C, DVB-T
32 QAM	Terrestrial microwave, DVB-T
64 QAM	DVB-C, modems, broadband set top boxes, MMDS
256 QAM	Modems, DVB-C (Europe), Digital Video (US)

- Υψηλή φασματική απόδοση( $\eta_B$ ) και Υψηλή απόδοση ισχύος( $E_b/N_0$ )
- Αντοχή στα φαινόμενα διαλείψεων(fading)
- Χαμηλό κόστος και ευκολία υλοποίησης
- Χαμηλές παρεμβολές σε γειτονικά κανάλια
- Σταθερή ή σχεδόν σταθερή περιβάλλουσα
  - Σταθερή: διαμόρφωση φάσης
  - Μη σταθερή: διαμόρφωση φάσης και πλάτους



**Κριτήρια επιλογής  
μεθόδου  
διαμόρφωσης**



# Παραδείγματα

Να υπολογιστεί ο μέγιστος ρυθμός που μπορεί να μεταδοθεί από ένα κανάλι εύρους ζώνης 4KHz δεδομένης διαμόρφωσης 8-FSK (για ιδανικούς παλμούς με  $a=0$ ).

(Απ:  $M=8$ ,  $\log_2(M)=3 \rightarrow B_{RF}=8 R_b/3 \rightarrow R_b=1.5\text{Kbps}$ )

Έστω σήμα 16-PSK μεταδίδεται με ρυθμό 12Mbps. Να υπολογιστεί ο ρυθμός baud και το εύρος ζώνης μετάδοσης του διαμορφωμένου σήματος (για ιδανικούς παλμούς με  $a=0$ ).

(Απ:  $M=16$ ,  $\log_2(M)=4 \rightarrow \text{baud rate}=R_s=R_b/4=3\text{Mbauds} \rightarrow B_{RF}=R_s=3\text{MHz}$ )

Να υπολογιστεί η φασματική απόδοση ενός 64-QAM συστήματος (για ιδανικούς παλμούς με  $a=0$ ) καθώς και η πιθανότητα σφάλματος bit για απόδοση ισχύος ( $E_b/N_0$ ) 18.8 dB. Για ένα ιδανικό σύστημα (χωρίς σφάλματα), πόσα dB σηματοθορυβικού λόγου (SNR) απαιτούνται θεωρητικά για να επιτευχθεί η συγκεκριμένη μέγιστη τιμή.

(Απ:  $M=64$ ,  $\log_2(M)=6 \rightarrow \eta=6 \text{ bits/sec/Hz}$ ,  $E_b/N_0=75.9 \rightarrow P_b \cong 10^{-6}$ ,  $\log_2(1+S/N)=6 \rightarrow S/N=63 \rightarrow \text{SNR} \cong 18\text{dB}$ )



# Μετάδοση σε Βασική Ζώνη

- Διαμόρφωση φέρουσας: αναλογική ή ψηφιακή

- παλμική φέρουσα

- ✓ Πλάτος παλμών
- ✓ Διάρκεια παλμών
- ✓ Θέση παλμών

- Αναλογική Διαμόρφωση Παλμών

- Pulse Amplitude Modulation (PAM)
- Pulse Width Modulation (PWM)
- Pulse Position Modulation (PPM)

- Ψηφιακή Διαμόρφωση Παλμών

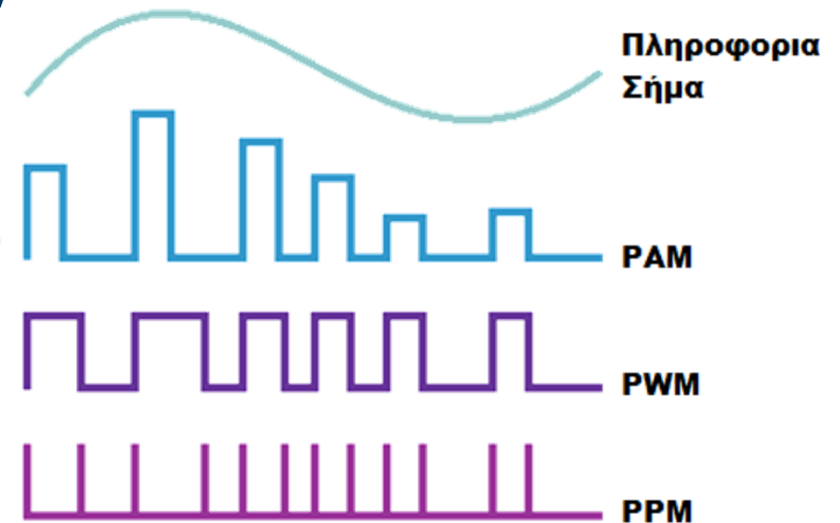
- Pulse Code Modulation (PCM)
- Delta Modulation (DM)



# Αναλογική Διαμόρφωση Παλμών

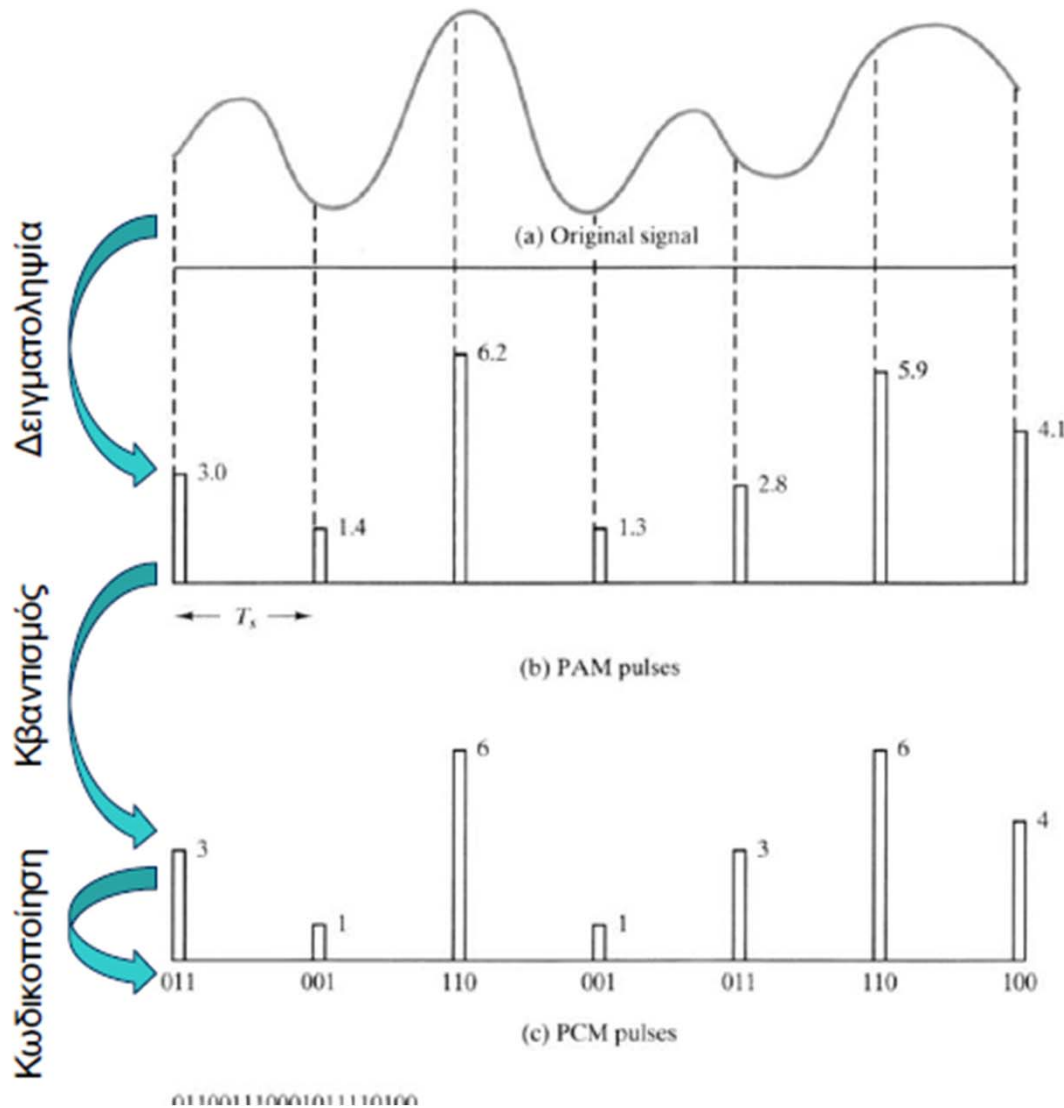
## Διαμόρφωση με Παλμικό Φέρον

- Το φέρον είναι μία ακολουθία παλμών
- **Διαμόρφωση ύψους παλμών**  
(PAM – Pulse Amplitude Modulation)
- **Διαμόρφωση διάρκειας παλμών**  
(PWM – Pulse Width Modulation)
- **Διαμόρφωση θέσης παλμών**  
(PPM – Pulse Position Modulation)





# Διαμόρφωση PCM



Εύρος ζώνης PCM

$$B_{PCM} \geq \frac{R_b}{2} = \frac{nf_s}{2}$$

$$n = \log_2 M$$

$M$ : οιστάθμες  
κβάντισης



# Κωδικοποίηση γραμμής (Line coding)

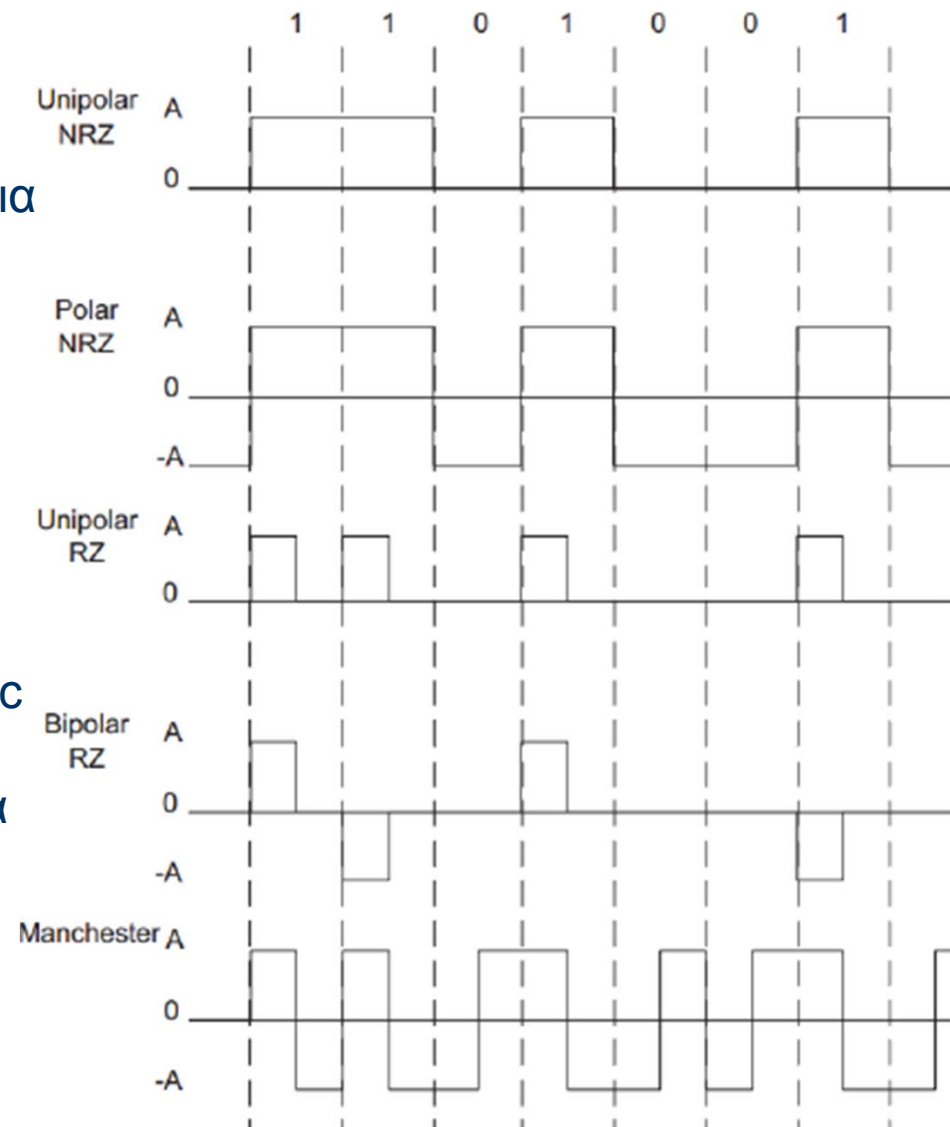
- Ψηφιακά δεδομένα & ψηφιακή μετάδοση (π.χ. ενσύρματη επικοινωνία μικρών αποστάσεων μεταξύ Η/Υ).
- Αναφέρεται και ως ψηφιακή διαμόρφωση (ή μετάδοση) βασικής ζώνης.
- Χρήση παλμών για μετάδοση ενός δυαδικού συμβόλου (bit).
- Είδη παλμών (pulse shapes):
  - Return-to-Zero (RZ): παλμός διάρκειας μισού bit που επιστρέφει στο 0 μεταξύ διαδοχικών bits (ευρύτερο φάσμα, καλύτερος συγχρονισμός).
  - Non-Return-to-Zero (NRZ): σταθερός παλμός σε όλη τη διάρκεια του bit (στενότερο φάσμα, μη δυνατός συγχρονισμός).
  - Biphasic (Manchester): παλμός δυο φάσεων για το "1" (+ -) και για το "0" (- +).





# Κωδικοποίηση γραμμής (Line coding)

- Κατηγορίες κωδικοποίησης(line codes):
- Πολική (Polar): παλμός θετικός για το "1" και αρνητικός για το "0".
- Μονοπολική (Unipolar): παλμός θετικός για το "1" και 0 για το "0".
- Διπολική (Bipolar): παλμός 0 για το "0" και θετικός ή αρνητικός για το "1" με διαδοχική εναλλαγή πολικότητας.
- Κάποιες κωδικοποιήσεις έχουν dc συνιστώσα -> δεν χρησιμοποιούνται για κυκλώματα που μπλοκάρουν το dc σήμα (π.χ PSTN).
- Η Manchester δεν έχει dc συνιστώσα. Χρησιμοποιείται στις ζεύξεις με καλώδια Ethernet





# Σύνοψη Αρχών Διαμόρφωσης

- Σχεδόν όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα μεταδίδουν ψηφιακά δεδομένα χρησιμοποιώντας ημιτονοειδές φέρον, διότι:
  - Τα σήματα υψηλής συχνότητας διαδίδονται ευκολότερα (σε μεγαλύτερη απόσταση).
  - Ανάλογα με τη συχνότητα φέροντος επιτρέπεται η τοποθέτηση του σήματος σε οποιοδήποτε μέρος του φάσματος.
- Στην πράξη η διαμόρφωση υλοποιείται ως εξής:
  1. Επεξεργασία ψηφιακών δεδομένων στη βασική ζώνη (κωδικοποίηση πηγής, κλπ).
  2. Μορφοποίηση παλμών και φιλτράρισμα της ψηφιακής κυματομορφής.
  3. Διαμόρφωση σήματος ταλαντωτή από το προκύπτον σήμα βασικής ζώνης.
  4. Φιλτράρισμα, ενίσχυση και εφαρμογή του προκύπτοντος σήματος ραδιοσυχνοτήτων στην κεραία ή στο μέσο μετάδοσης.



# Σχεδίαση τηλ/κού συστήματος

Κατά την σχεδίαση ενός τηλ/κού συστήματος δίνονται:

- Η πηγή πληροφορίας,
- Το κανάλι μετάδοσης,
- Ο προορισμός της πληροφορίας (τελικός χρήστης)

και απαιτείται η σχεδίαση του πομπού και του δεκτή, ώστε:

- Να γίνεται κωδικοποίηση/διαμόρφωση του σήματος πληροφορίας της πηγής,
- Να μεταδίδεται το διαμορφωμένο σήμα μέσα από το κανάλι,
- Να παράγεται εκτίμηση του σήματος πληροφορίας κατά ικανοποιητικό τρόπο για τον τελικό χρήστη,
- Να γίνονται όλα τα παραπάνω με τον οικονομικότερο τρόπο.



# παράδειγμα

Για ψηφιακό σήμα με ρυθμό μετάδοσης  $R = 34 \text{ Mbit/s}$  και για μετάδοση ελάχιστης παραμόρφωσης ( $\alpha = 1$ ), να υπολογιστούν:

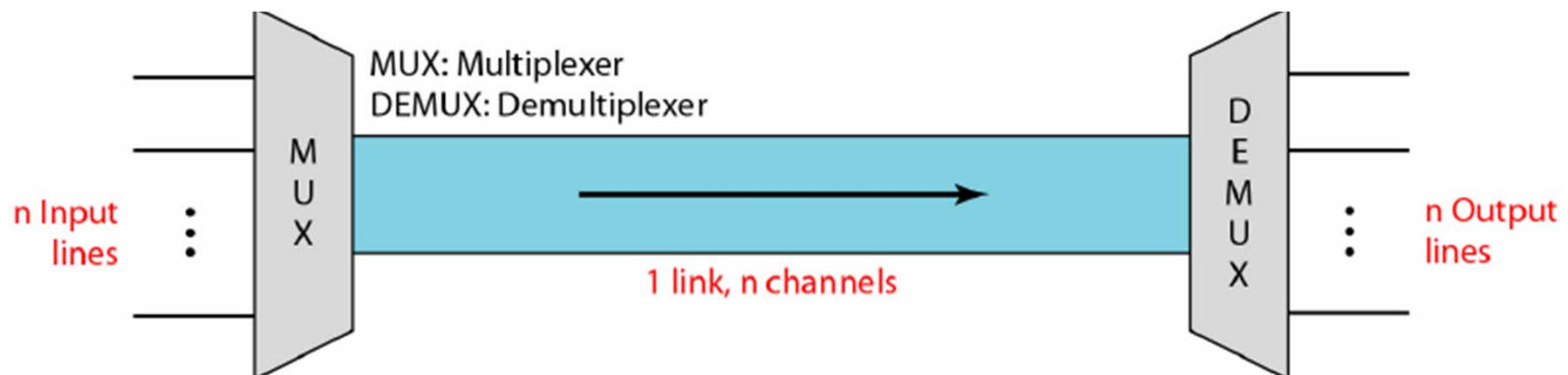
Το εύρος ζώνης για μετάδοση με διαμόρφωση BPSK, QPSK, 16-QAM

- $\alpha = 1, R_b = 34 \text{ MHz}, R_b = R_s \log_2 M, B_{RF} = (1 + \alpha) R_s$
- (α)  $B_{\text{BPSK}} = 2R_b = 68 \text{ MHz}$
- (β) Η QPSK προβλέπει  $M = 4$  καταστάσεις  
 $B_{\text{QPSK}} = 2R_b / 2 = 2R / 2 = 34 \text{ MHz}$
- (γ) Η 16-QAM προβλέπει  $M = 16$  καταστάσεις  
 $B_{\text{16-QAM}} = 2R_b / 4 = 2R / 4 = 17 \text{ MHz}$



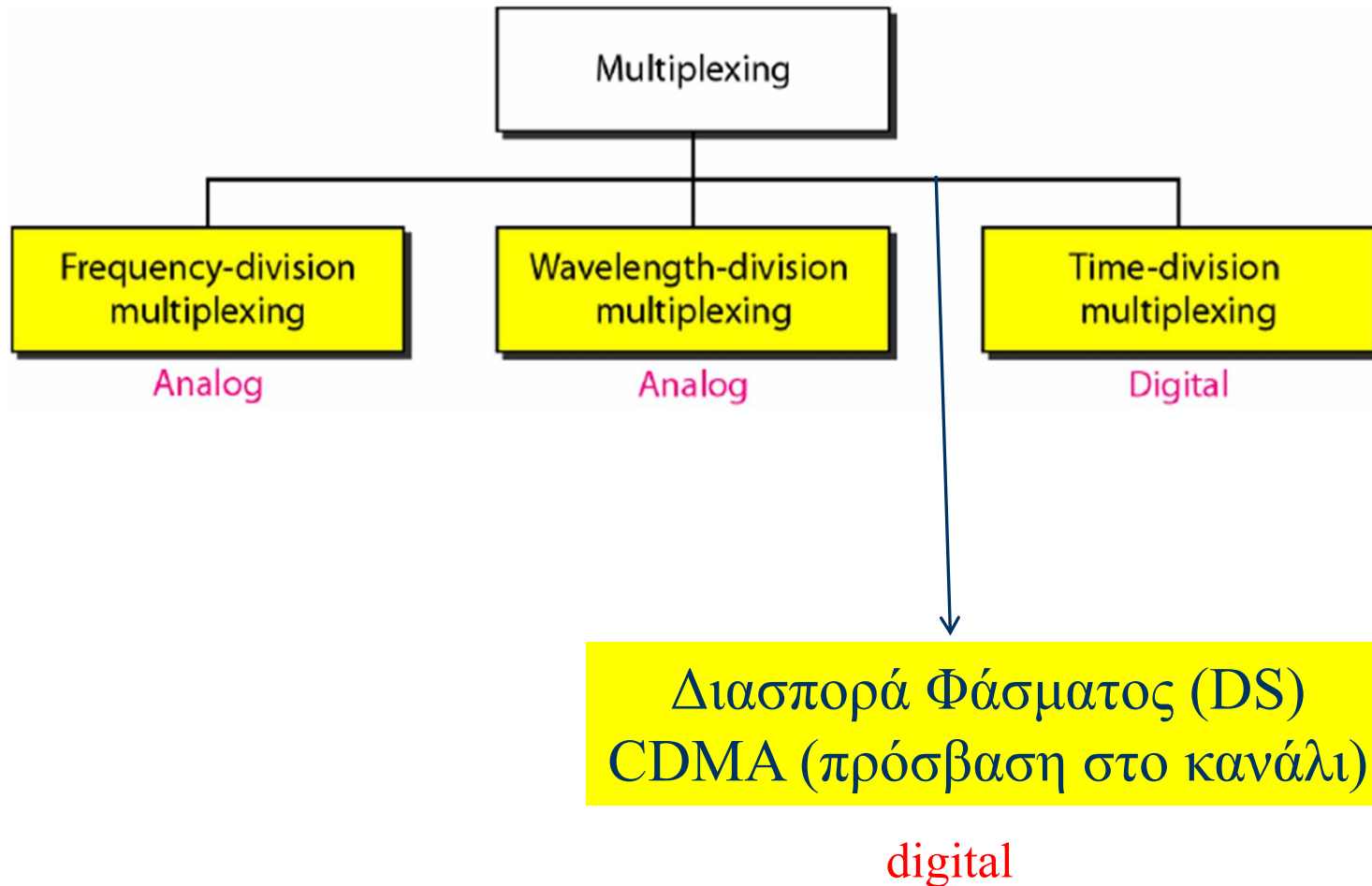
# Πολυπλεξία

- Όταν το εύρος ζώνης του μέσου που υλοποιεί μία σύνδεση είναι μεγαλύτερο από τις ανάγκες σε εύρος ζώνης των συσκευών που συνδέονται, τότε η σύνδεση μπορεί να 'μοιραστεί'.
- **Πολυπλεξία** είναι ένα σύνολο τεχνικών που επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων μέσα από την ίδια ζεύξη (Link –σύνδεση)
- **Multiplexer (MUX)** : many-to-one
- **Demultiplexer (DEMUX)** : one-to-many



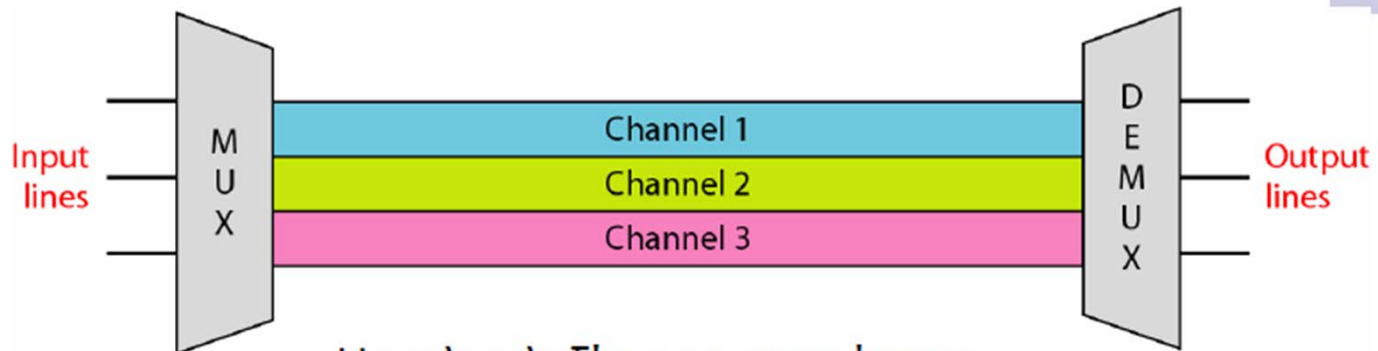


# Τύποι πολυπλεξίας



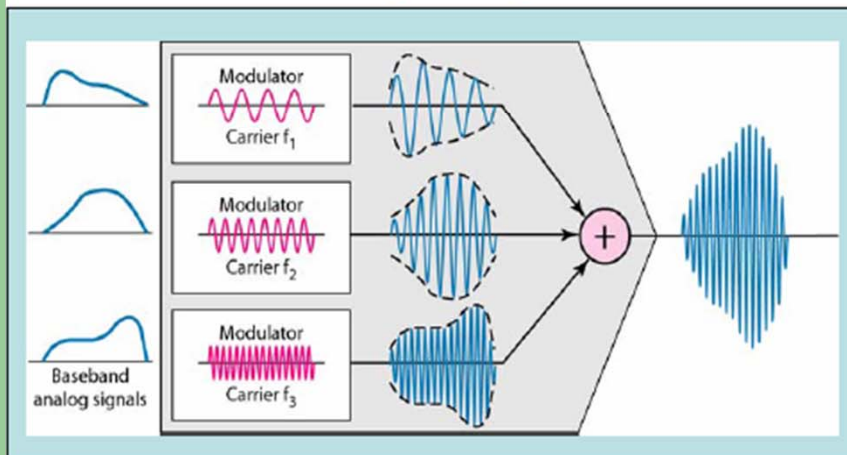


# Frequency Division Multiplexing (FDM)

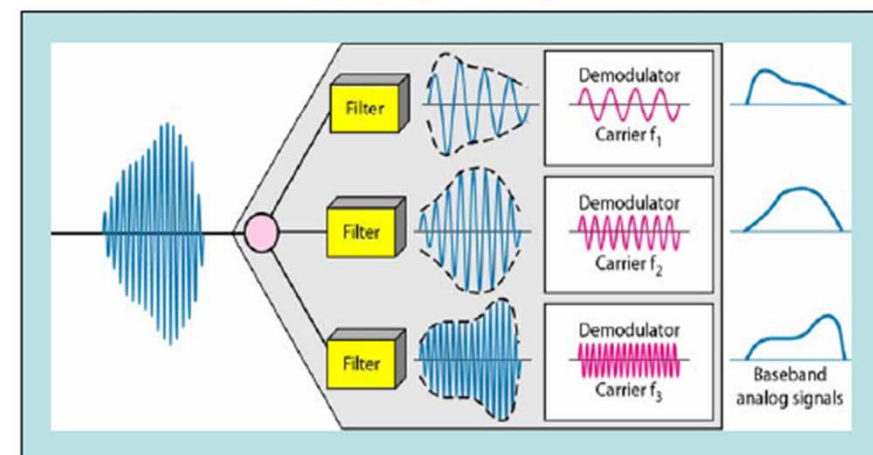


Η πολυπλεξία στη συχνότητα συνδυάζει αναλογικά σήματα

multiplexing



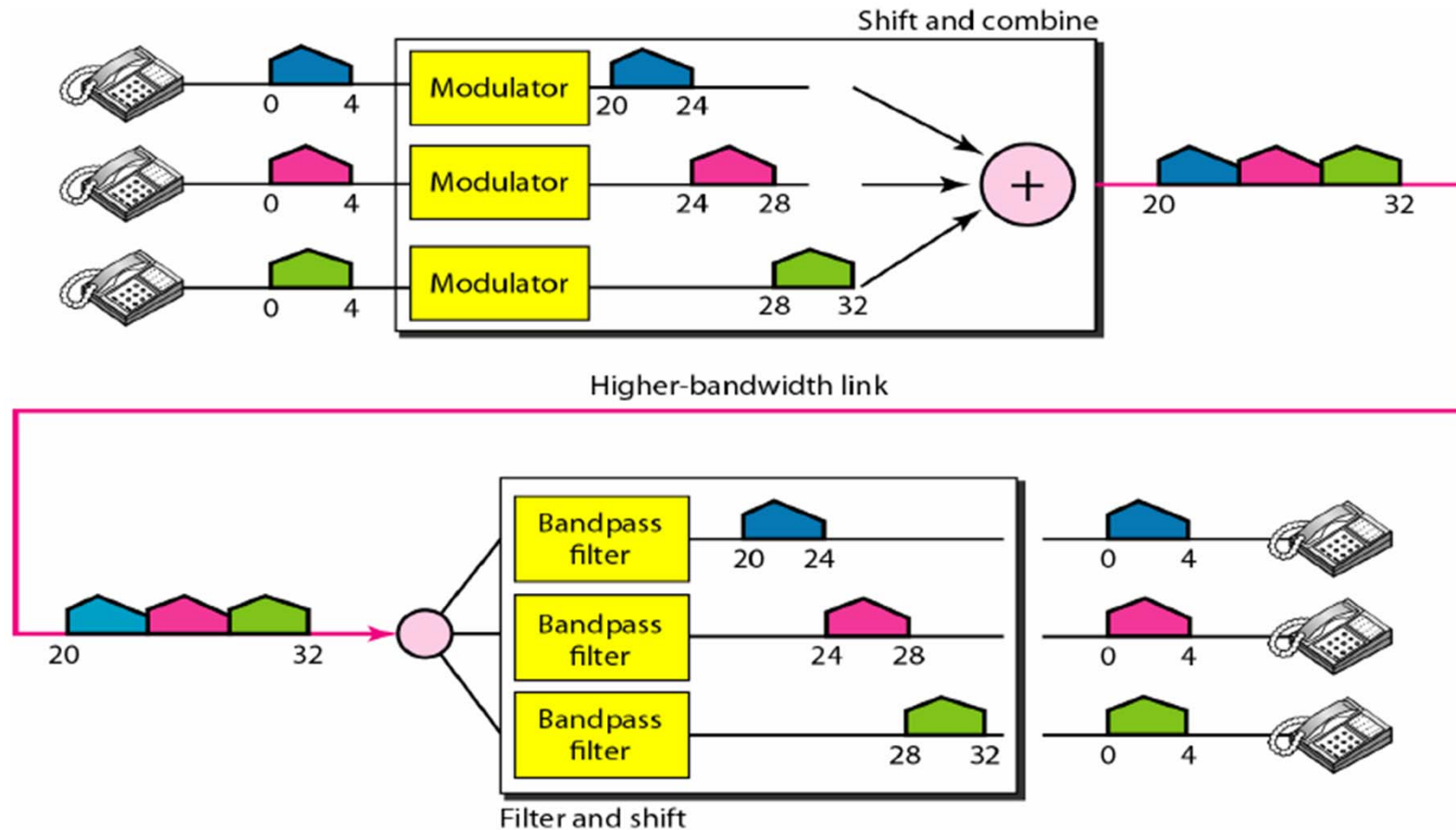
demultiplexing





# Παράδειγμα. Αναλογικό τηλ. δίκτυο

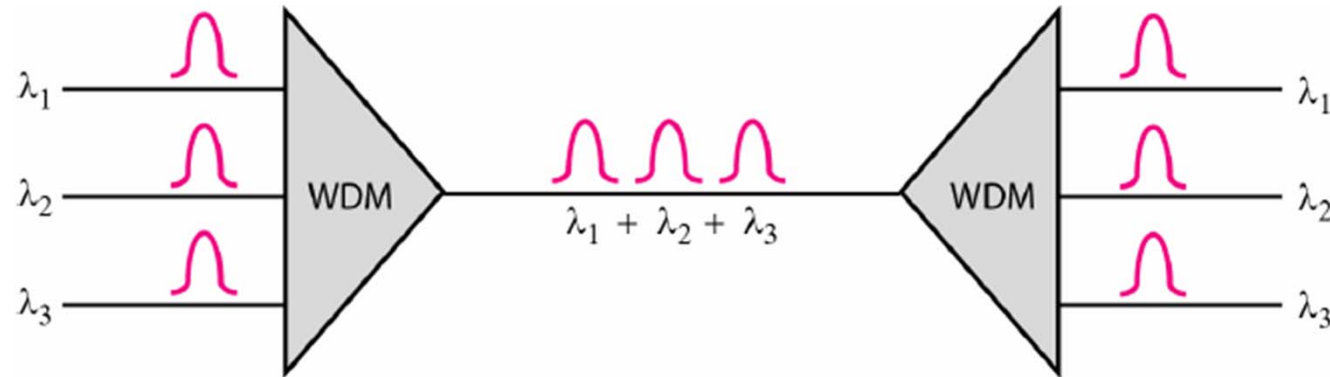
Το κανάλι φωνής καταλαμβάνει 4 kHz. Τρία κανάλια φωνής συνδυάζονται σε μία σύνδεση με εύρος ζώνης 12 kHz, από 20 στα 32 kHz. Υποτίθεται ότι δεν υπάρχουν guard bands.







# Wavelength Division Multiplexing (WDM)

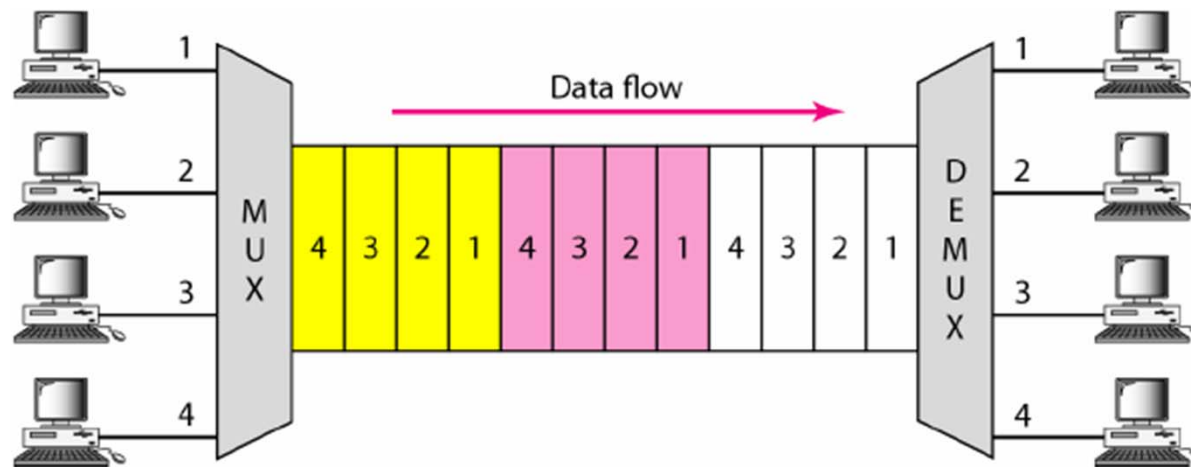


- ❖ Η πολυπλεξία μήκους κύματος είναι ουσιαστικά ίδια με την FDM με τη διαφορά ότι συνδυάζει οπτικά σήματα που μεταδίδονται μέσα από οπτικές ίνες.
- ❖ Όμοια με την περίπτωση του FDM, συνδυάζονται σήματα διαφορετικών συχνοτήτων, που όμως στην περίπτωση αυτή είναι πολύ υψηλές.



# Time Division Multiplexing (TDM)

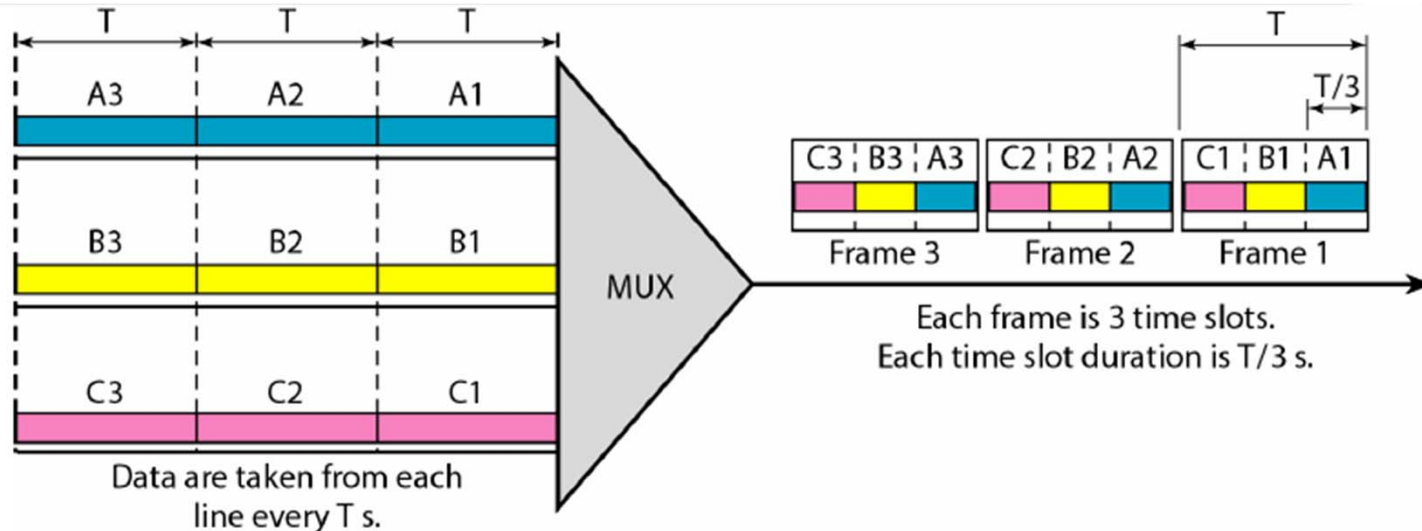
- Κατά την πολυπλεξία στο χρόνο τα σήματα (1, 2, 3, 4, ..) καταλαμβάνουν το κανάλι διαδοχικά σε καθορισμένα timeslots
- Η διαφορά από το TDMA είναι ότι η πληροφορία από την πηγή κατευθύνεται σε ένα συγκεκριμένο και σταθερό προορισμό



- Η πολυπλεξία στο χρόνο είναι ψηφιακή και συνδυάζει αριθμό καναλιών μικρότερου ρυθμού διάδοσης σε ένα κανάλι μεγαλύτερου (πολλαπλάσιου) ρυθμού διάδοσης.
- Η πολυπλεξία στο χρόνο μπορεί να είναι σύγχρονη ή στατιστική



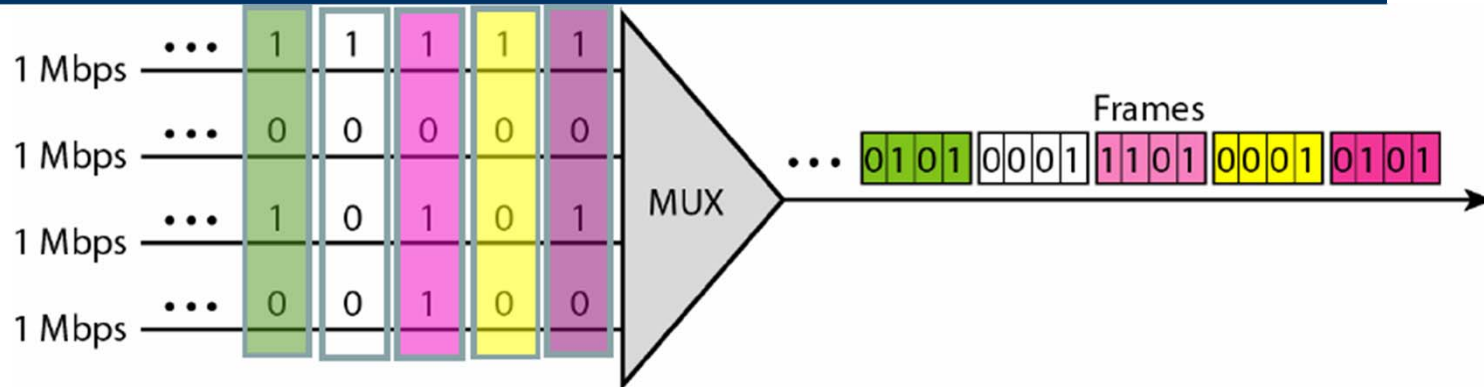
# Synchronous Time Division Multiplexing (TDM)



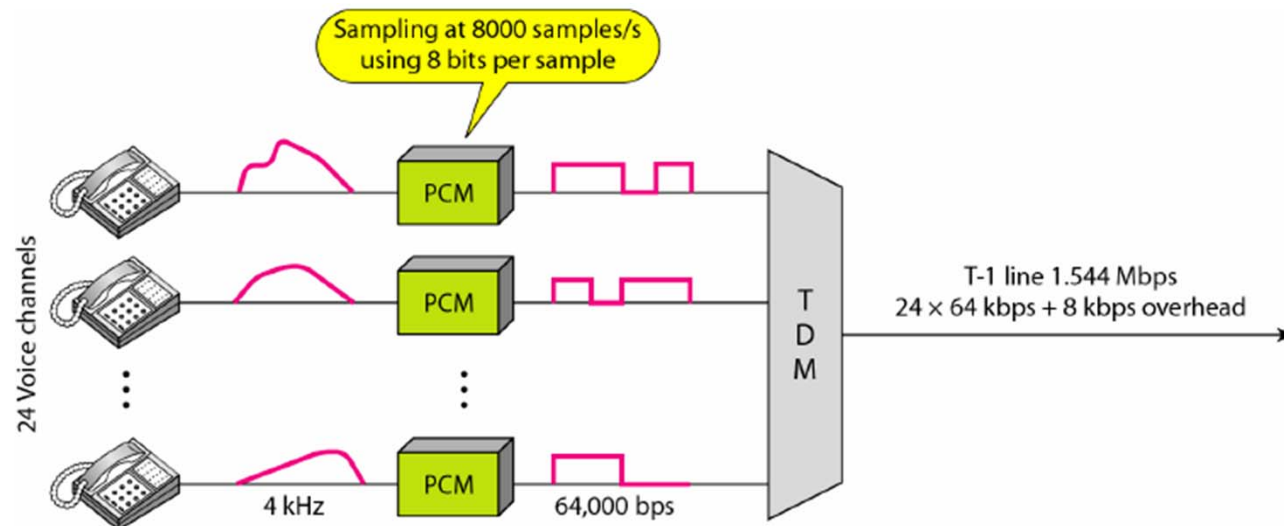
- ❖ Κατά τη σύγχρονη πολυπλεξία στο χρόνο, η πληροφορία στην είσοδο του MUX διαιρείται σε μονάδες, time slots, διάρκειας  $T$ .
- ❖ Στην έξοδο του MUX η πληροφορία διαιρείται σε μονάδες, time slots, διάρκειας  $T/n$ , όπου  $n$  ο αριθμός των σημάτων.
- ❖ Έτσι μετά την πολυπλεξία η μονάδα, time slot, έχει μικρότερη διάρκεια και συνεπώς μεταδίδεται γρηγορότερα.
- ❖ Για να υπάρχει σταθερή ροή πληροφορίας θα πρέπει ο ρυθμός κάθε σήματος στην έξοδο του MUX να είναι  $n$ -φορές μεγαλύτερος από το ρυθμό κάθε σήματος στην είσοδο.
- ❖ **Frame**: αποτελείται από  $n$  time slots, καθεμία για ένα από τα σήματα.



# Παράδειγμα

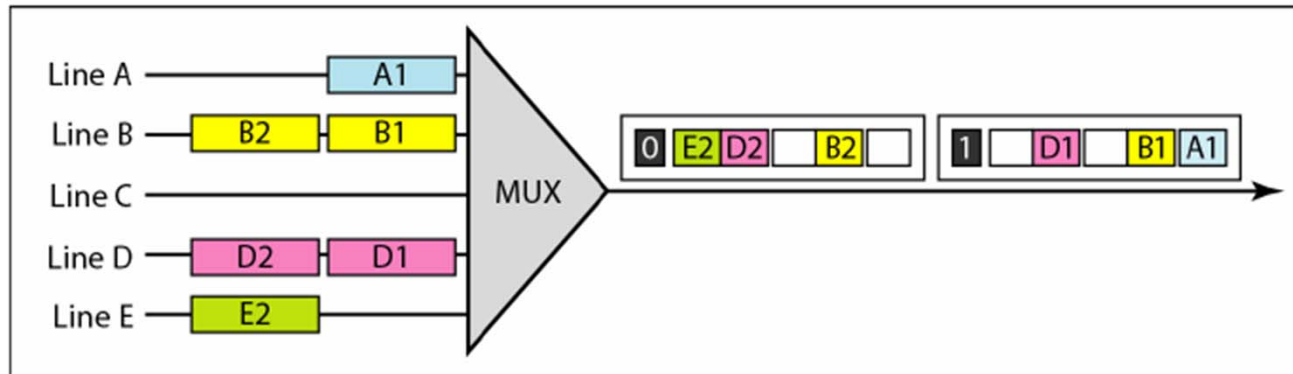


- ❖ Time slot εισόδου  $T=1/1\text{Mbps}=1\mu\text{s}$
- ❖ Time slot εξόδου =  $\frac{1}{4} \mu\text{s}$
- ❖ **Ρυθμός εξόδου 4 Mbps**

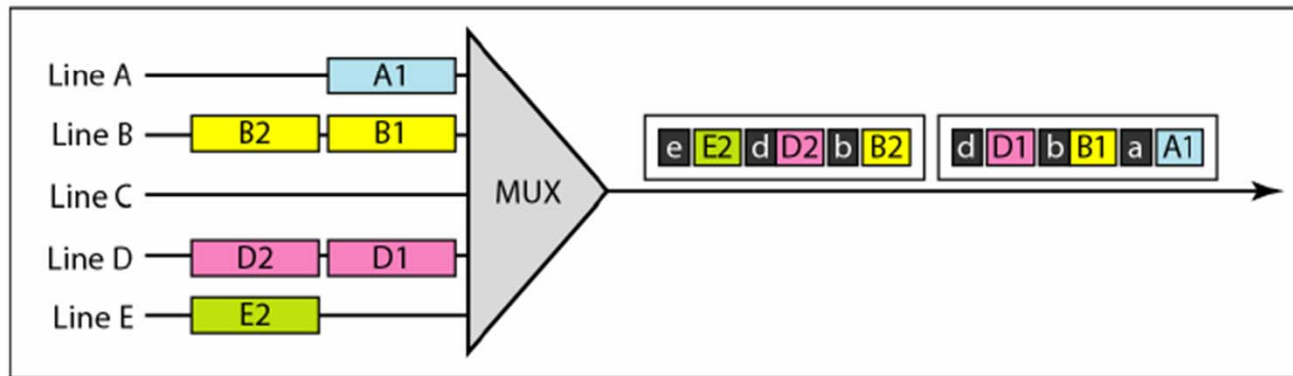




# Statistical Time Division Multiplexing



a. Synchronous TDM



b. Statistical TDM

✓ Μόνο όταν το σήμα εισόδου διαθέτει πληροφορία ίση με ένα time slot του ανατίθεται slot στην έξοδο του MUX

Ο αριθμός των time slots σε κάθε frame είναι γενικά μικρότερος από τον αριθμό των σημάτων στην είσοδο

**Δυναμικός τρόπος ανάθεσης χρόνου (time slots) για βέλτιστη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης**



# Ιεραρχίες TDM

- Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM) προβλέπει συγκεκριμένα ιεραρχικά επίπεδα που ονομάζονται **τάξεις πολυπλεξίας**

Τάξη	Ενεργά σήματα των 64 kbit/s	Συνολικός αριθμός σημάτων 64 kbit/s	Ρυθμός μετάδοσης (Mbit/s)	Κώδικας γραμμής
E1	30	32	2,048	HDB3
E2	120 (= 4 x 30)	132	8,448	HDB3
E3	480 (= 4 x 120)	537	34,448	HDB3
E4	1440 (= 4 x 480)	2176	139,264	CMI
E4	5760 (= 4 x 1440)	8828	564,992	Ατυποποίητο

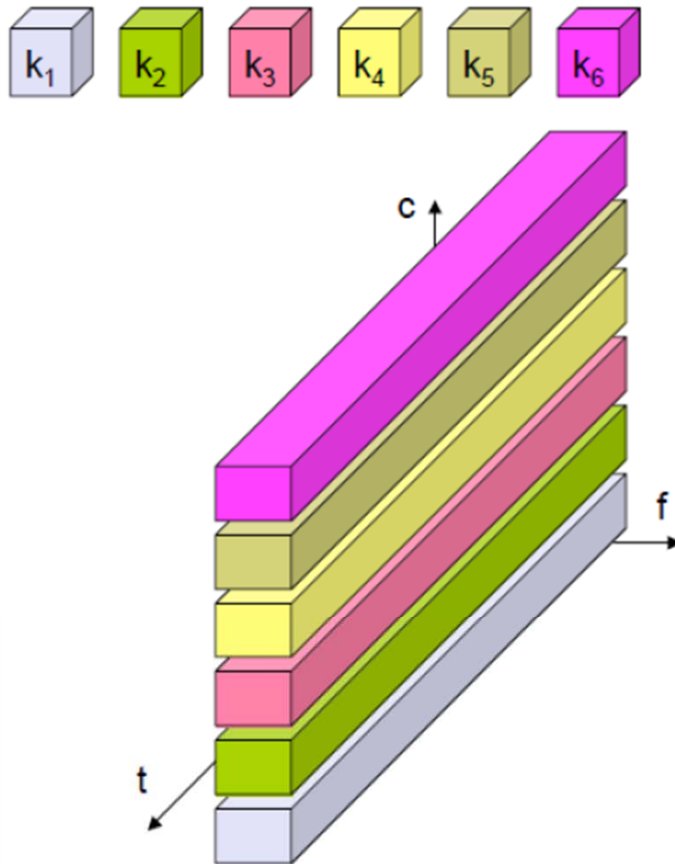
ιεραρχία  
PDH

Τάξη	Σχέση με προηγούμενη τάξη	Ρυθμός μετάδοσης (Mbit/s) <sup>4</sup>
STM-1	♦ Είτε 63 σήματα E1 ♦ Είτε 3 σήματα E3 ♦ Είτε 1 σήμα E4	155,520
STM-4	4 x STM-1	622,080
STM-16	4 x STM-4	2448,320
STM-64	4 x STM-16	9953,280
STM-256	4 x STM-64	39813,120

ιεραρχία  
SDH



# Πολυπλεξία Διαίρεσης Κώδικα (CDM)

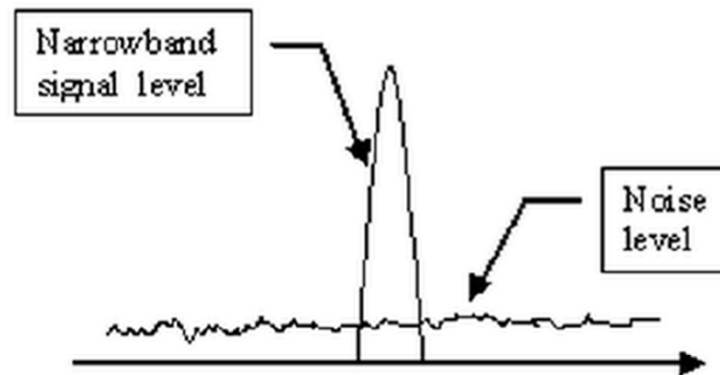


- Κάθε σήμα διακρίνεται από τα άλλα με ειδικό κώδικα.
- Τα δεδομένα μεταδίδονται με την χρήση ορθογώνιων κωδίκων.
- Διασπορά φάσματος (spread spectrum) του κάθε σήματος.
- Όλα τα σήματα καταλαμβάνουν το συνολικό διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων χωρίς χρονοθυρίδες.
- Εφαρμογές:
  - κυψελωτά συστήματα (3G)
  - δορυφορικές επικοινωνίες
  - στρατιωτικές επικοινωνίες



# Ασφάλεια Μετάδοσης Ασύρματων Συστημάτων

- Τα σήματα στενής ζώνης (narrowband) μπορούν εύκολα να δεχτούν παρεμβολές (jammed) από άλλα σήματα στην ίδια ζώνη συχνοτήτων.
- Επίσης μπορούν να υποκλαπούν, αφού η μπάντα συχνοτήτων είναι συγκεκριμένη και στενή (δηλ. είναι εύκολο να ανιχνευτούν).



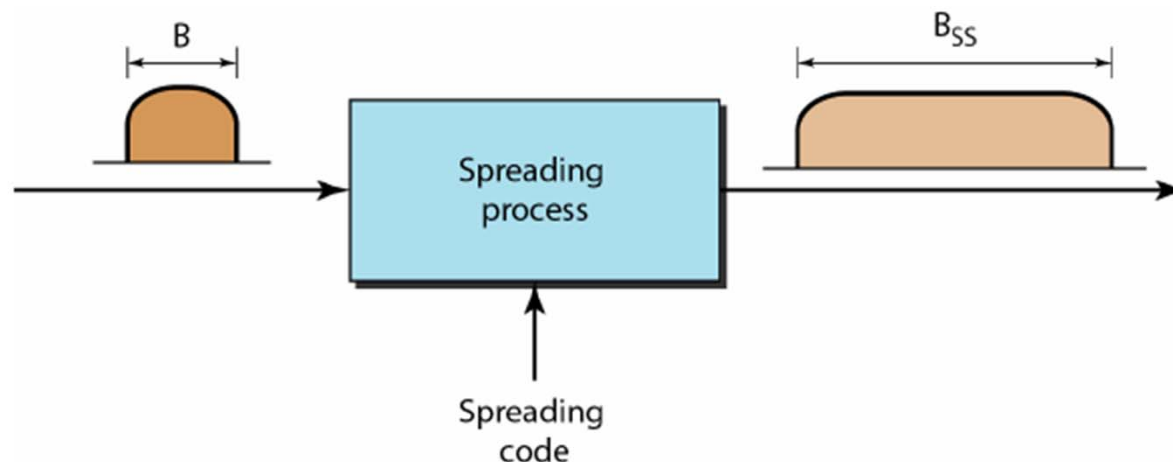
- Λόγω των παραπάνω προτάθηκαν (αρχικά για στρατιωτικές εφαρμογές) οι τεχνικές διασποράς φάσματος (Spread Spectrum) έτσι ώστε να παρέχουν ασφάλεια επικοινωνιών, απλώνοντας το σήμα σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων.





# Διασπορά Φάσματος – Spread Spectrum

- Το εύρος ζώνης που ανατίθεται σε κάθε πομπό είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από αυτό που χρειάζεται (redundancy)
- Η διασπορά του φάσματος από το αρχικό του σήματος στο τελικό μετά τη διασπορά, πρέπει να είναι μια διαδικασία ανεξάρτητη από το αρχικό σήμα



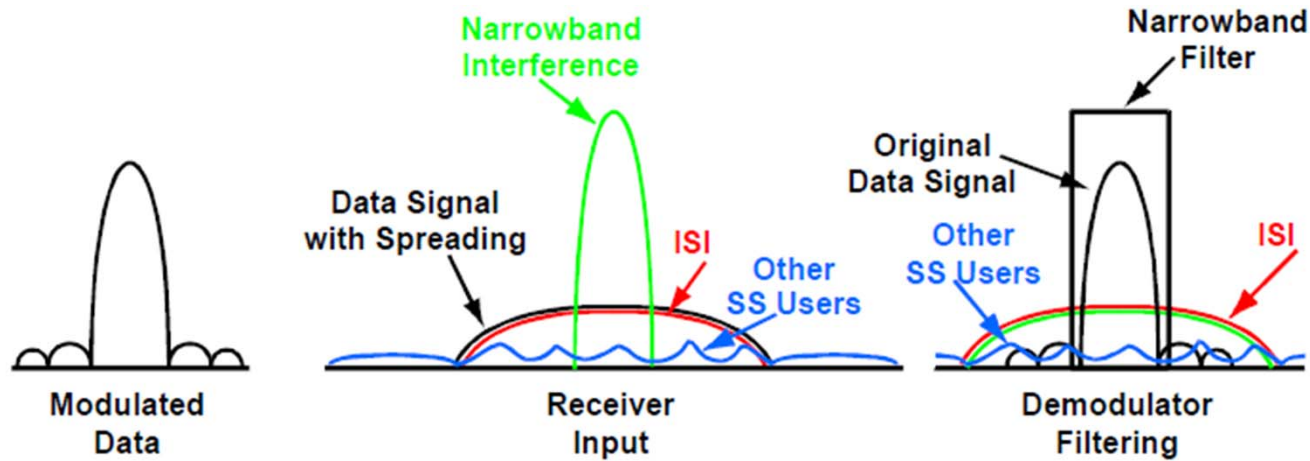


## Τεχνικές Διασποράς Φάσματος (Spread Spectrum)

- Το φάσμα του παραγόμενου σήματος μοιάζει με θόρυβο.
- Όποιος δεν γνωρίζει τον κώδικα δεν μπορεί να ανακτήσει το σήμα (το αντιλαμβάνεται σαν θόρυβο).
- Η διασπορά φάσματος αυξάνει την ασφάλεια παρέχοντας ανοχή σε θόρυβο, παρεμβολές, διαλείψεις και φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών.
- Η CDMA είναι μια μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης που βασίζεται στην τεχνολογία διασποράς φάσματος (συνύπαρξη πολλών χρηστών όπου ο καθένας χρησιμοποιεί έναν ξεχωριστό κώδικα καταλαμβάνοντας την ίδια μπάντα συχνοτήτων στην ίδια χρονική στιγμή).



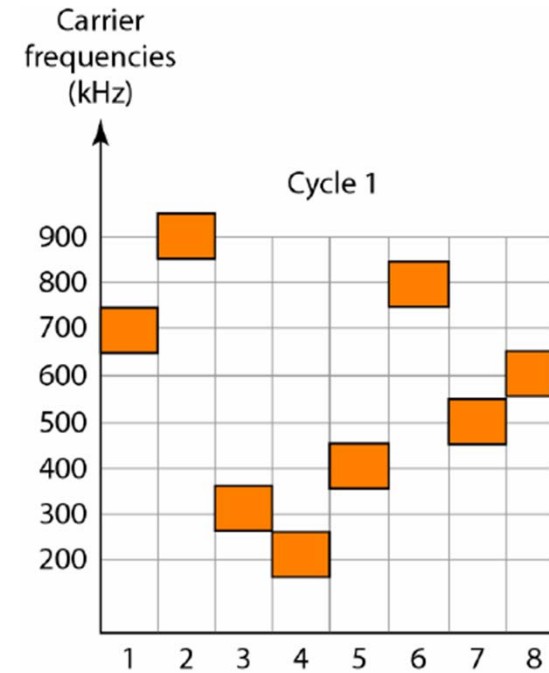
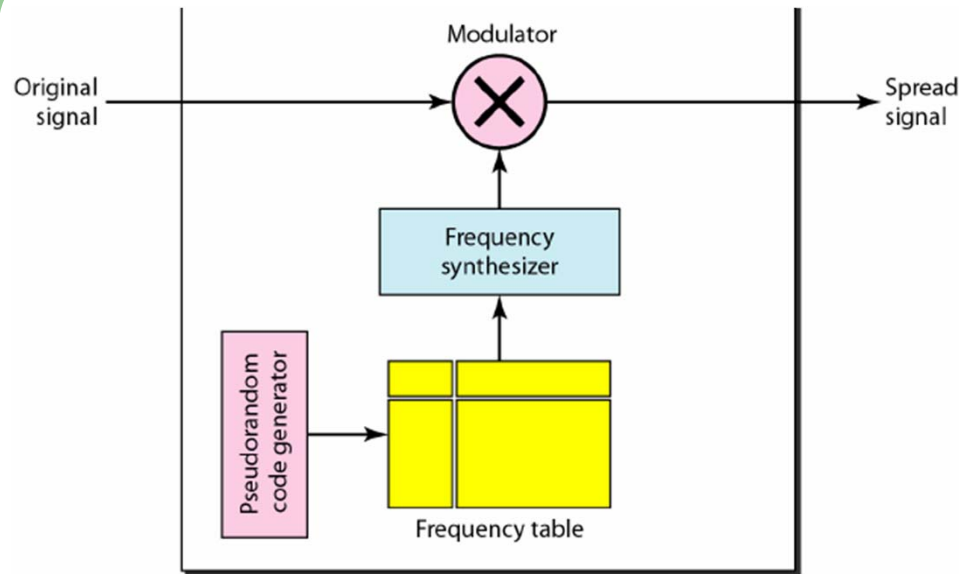
# Τεχνικές Διασποράς Φάσματος (Spread Spectrum)



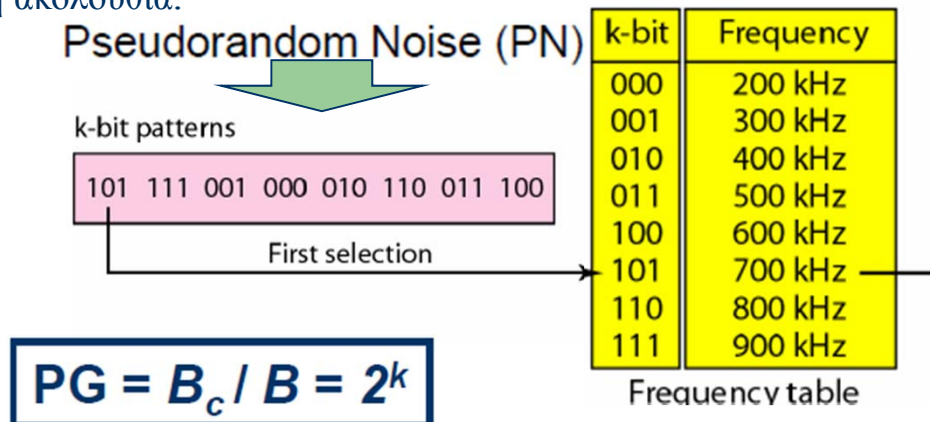
- ❖ FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)
  - «άλματα» από συχνότητα σε συχνότητα με ψευδοτυχαίο τρόπο. Ο δέκτης ακολουθεί τα ίδια άλματα συγχρονισμένα και με τον ίδιο ψευδοτυχαίο τρόπο
- ❖ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
  - Πολλαπλασιασμός ψευδοτυχαίων bits ('chips') με πληροφορία. Ο δέκτης πολλαπλασιάζει με την ίδια ακολουθία.



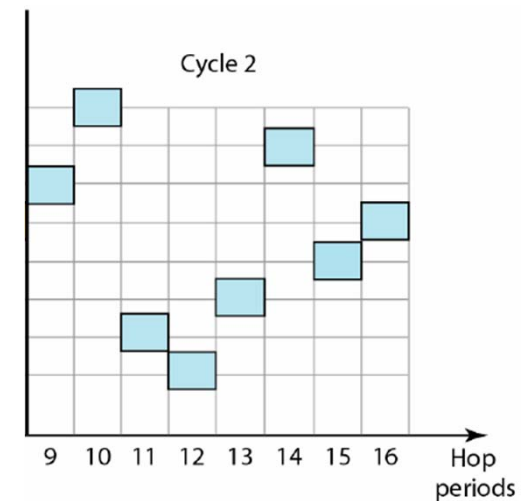
# Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)



Η συχνότητα του φέροντος μεταβάλλεται (hops) «τυχαία» παίρνοντας τιμές σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων σύμφωνα με γνωστή ακολουθία.

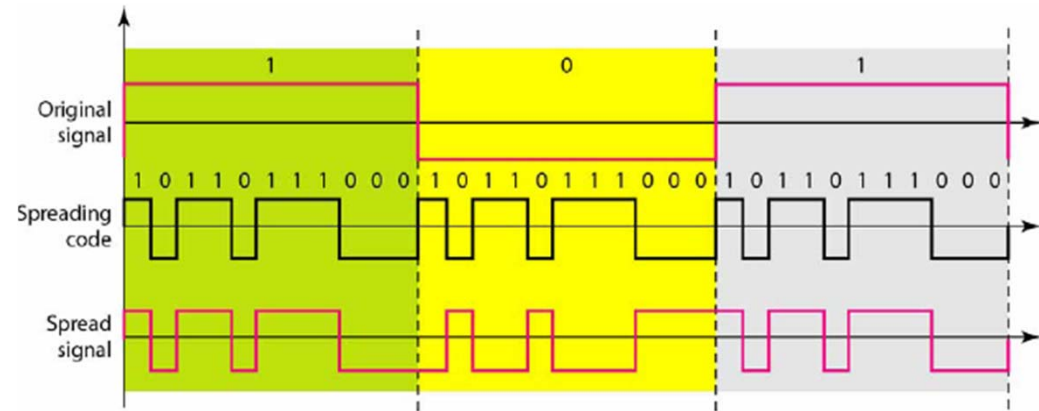
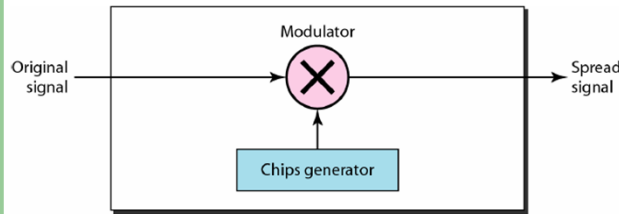


$$PG = B_c / B = 2^k$$

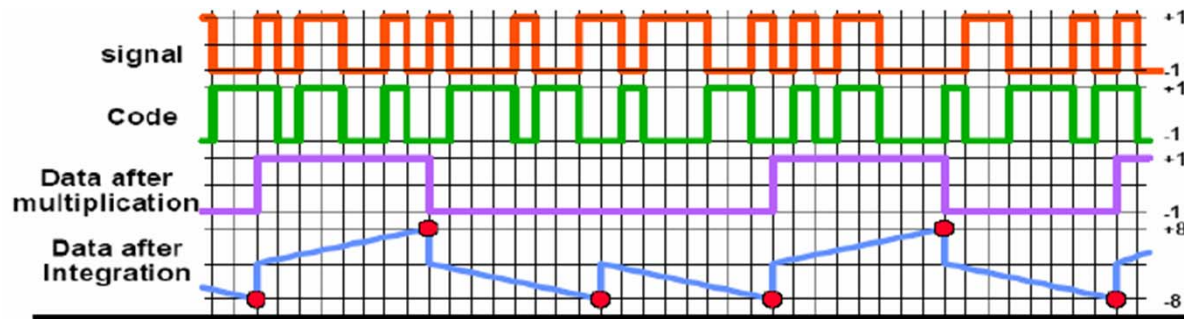




# Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)



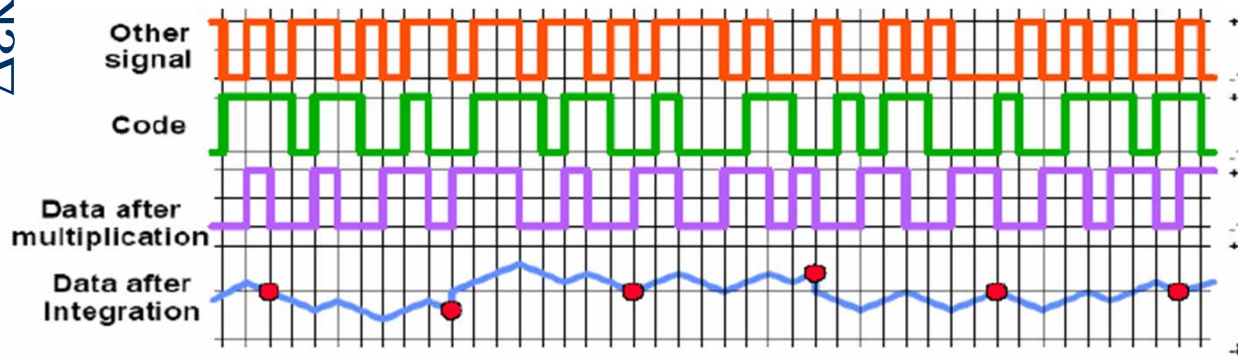
Spreading Factor  $S = \frac{T_S}{T_C}$



$T$  - bit period  
 $T_C$  - chip period

$PG = T / T_C = k$

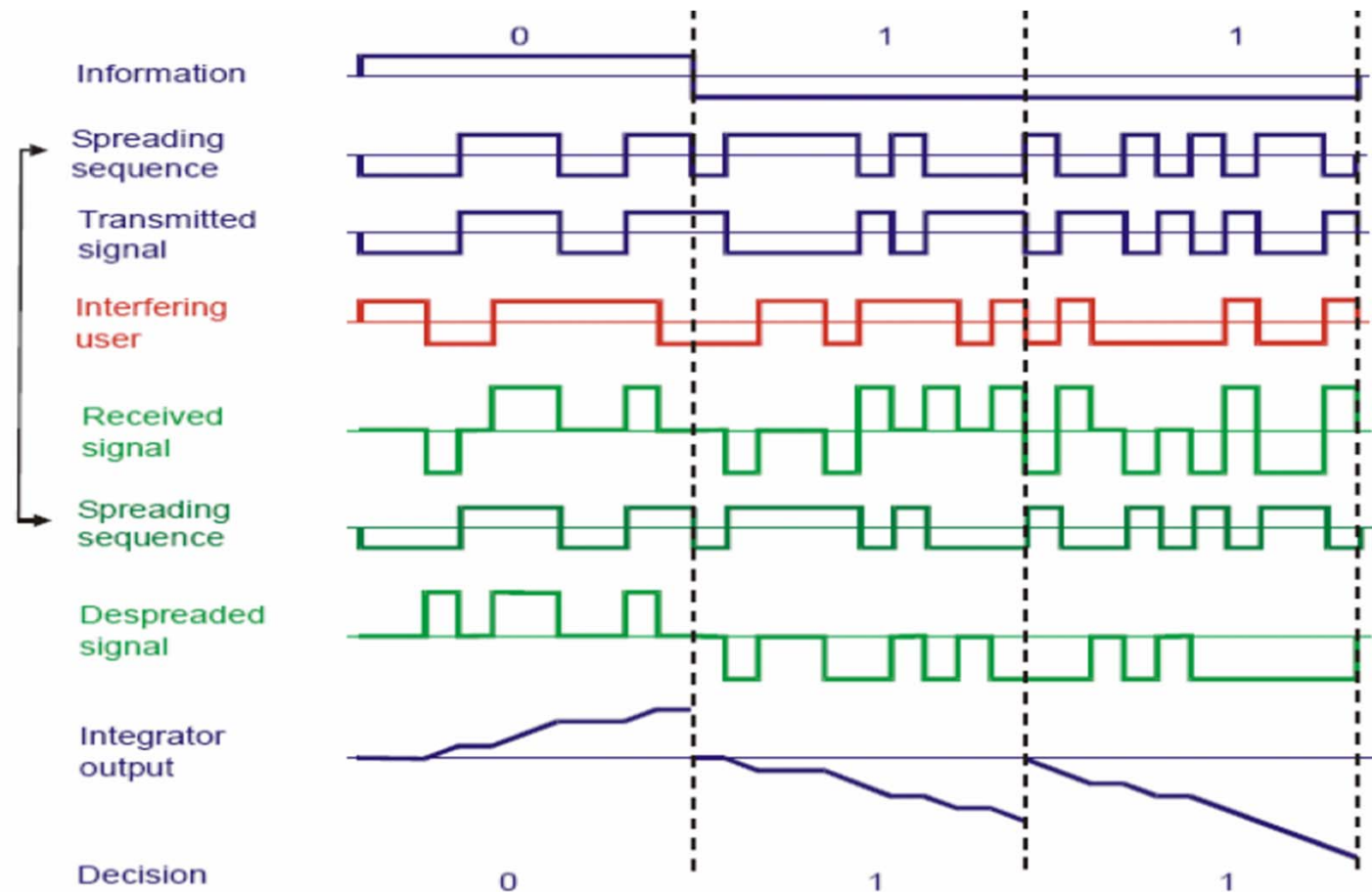
Δέκτης





# DS/CDMA – Πολλαπλή πρόσβαση

- Η CDMA είναι μια μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης που βασίζεται στην τεχνολογία διασποράς φάσματος (συνύπαρξη πολλών χρηστών όπου ο καθένας χρησιμοποιεί έναν ξεχωριστό κώδικα καταλαμβάνοντας την ίδια μπάντα συχνοτήτων στην ίδια χρονική στιγμή.





# Κώδικες Διασποράς CDMA

## Παράδειγμα

- Κώδικας χρήστη A = (1, -1, -1, 1, -1, 1) ή ισοδύναμα (1,0,0,1,0,1)
  - Για να στείλει το bit '1': (1, -1, -1, 1, -1, 1)
  - Για να στείλει το bit '0': (-1, 1, 1, -1, 1, -1) ← Οχι XOR ←
- Κώδικας χρήστη B = (1, 1, -1, -1, 1, 1)
- Έστω ο A στείλει το bit '1', δηλαδή στέλνει (1,-1,-1,1,-1,1)
- Ο παραλήπτης δεν ξέρει ποιος στέλνει και τι στέλνει, γι' αυτό πολλαπλασιάζει το λαμβανόμενο σήμα (received pattern – r.p.) με τους κώδικες κάθε χρήστη:
  - (Κώδικας A) x (r.p.) = 1 x 1 + (-1) x (-1) + (-1) x (-1) + 1 x 1 + (-1) x (-1) + 1 x 1 = 6
  - (Κώδικας B) x (r.p.) = 1 x 1 + (1) x (-1) + (-1) x (-1) + (-1) x 1 + 1 x (-1) + 1 x 1 = 0
- Άρα, ο παραλήπτης καταλαβαίνει ότι μετέδωσε ο A το bit '1' (αν το αποτέλεσμα ήταν -6, θα είχε μεταδώσει ο A το bit '0').

A	B	$\oplus$ XOR
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



# Διαμόρφωση με πολλαπλές φέρουσες- OFDM

- Αύξηση ψηφιακών multimedia εφαρμογών
- Αύξηση ζήτησης ευρυζωνικών συστημάτων
- Απαίτηση για φτηνές αξιόπιστες λύσεις
- ***Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*** is a method that allows to transmit high data rates over extremely hostile channels at a comparable low complexity.
  - OFDM has been chosen as the transmission method for the European radio (DAB) and TV (DVB-T) standard





# Το πρόβλημα: multipath channel

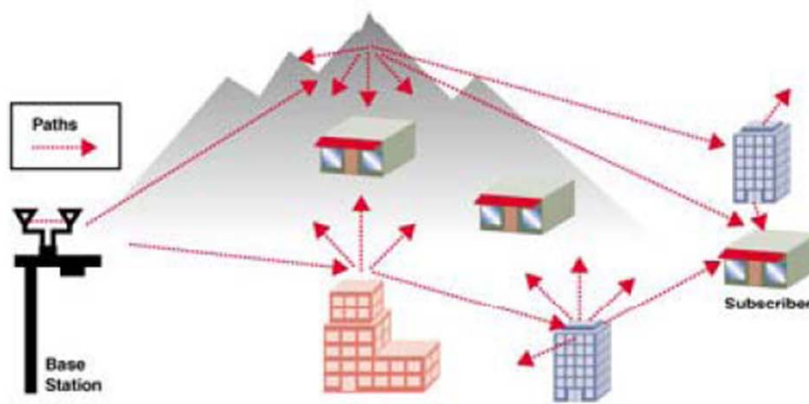
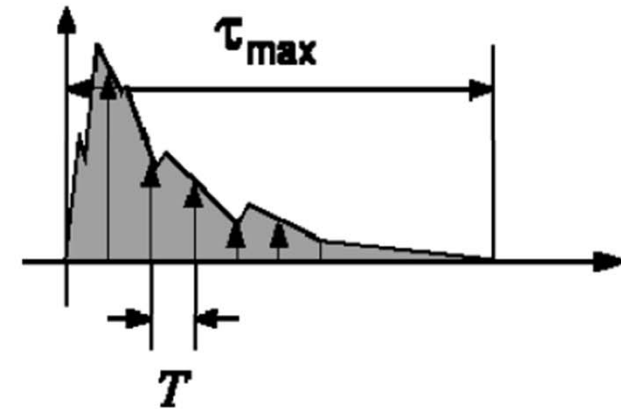


Fig. 1 Typical multipath.



- Channel Impulse Response
- $Cir \approx \tau_{max}$
- $ISI \approx \tau_{max}/T = \tau_{max} R_b$



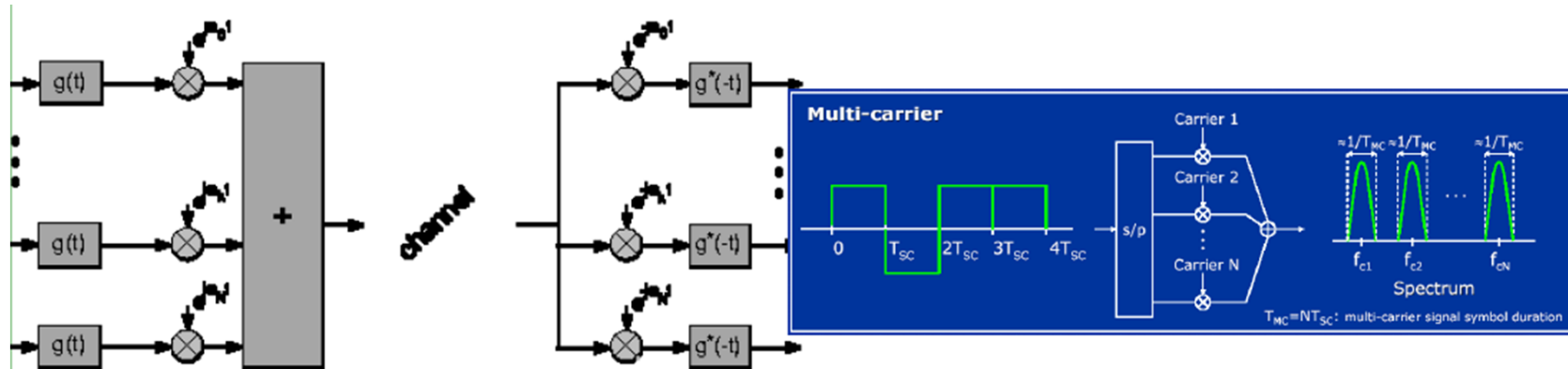
# Προσέγγιση με ένα φέρον



- The scenario we are dealing with in DVB-T is characterized by the following conditions:
- ⑩ Transmission Rate:  $R = \frac{1}{T} = 7.4 \frac{\text{M sym}}{\text{s}}$
- ⑩ Maximum channel delay:  $\tau_{\text{max}} = 224 \mu\text{s}$
- For the single carrier system this results in an ISI of:  $\frac{\tau_{\text{max}}}{T} \approx 1600$
- The complexity involved in removing this interference in the receiver is tremendous. In the scenario under consideration here, using such an approach will only lead to sub-optimal results
- ΕΞΙΣΩΤΕΣ



# Προσέγγιση με πολλαπλές φέρουσες

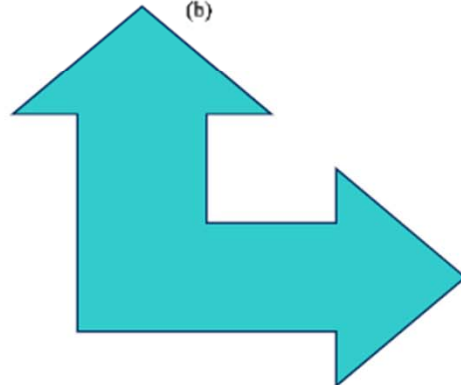
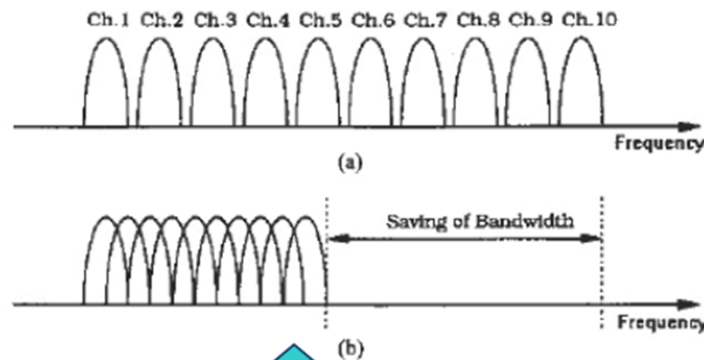


- The original data stream of rate  $R$  is multiplexed into  $N$  parallel data streams of rate:  $R_{TMC} = 1/T_{TMC} = R/N$
- the ISI for each sub system reduces to:  $\frac{T_{max}}{T_{TMC}} = \frac{T_{max}}{N \cdot T}$ 
  - ✓ DMT (xDSL systems 256 channel down – 32 channels up BWc=4kHz)
- **ΤΕΧΝΙΚΗ SPREAD SPECTRUM**
- a slight modification of the above approach leads us to the concept of OFDM



# OFDM - Orthogonal FDM I

- Στο σύστημα OFDM τα φάσματα των υπο-φερουσών επικαλύπτονται χωρίς όμως αυτό να προκαλεί το φαινόμενο inter-carrier interference.
- Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει οι υπο-φέρουσες να είναι μαθηματικά ορθογώνιες.



Δημιουργία  $k=BW/\Delta f$  υποκαναλιών



## Ορθογώνια FDM

- Σε κάθε υποκανάλι  $k$ , χρησιμοποιείται διαφορετική φέρουσα

$$y_k(t) = \cos 2\pi f_k t, \quad k = 0, 1, \dots, K-1$$

όπου  $f_k$  η κεντρική συχνότητα του υποκαναλιού

- Αν ο ρυθμός συμβόλων σε κάθε υποκανάλι είναι  $1/T = \Delta f$ ,  
- τότε οι υποφέρουσες είναι ορθογώνιες μεταξύ τους ανεξάρτητα από τις φάσεις τους

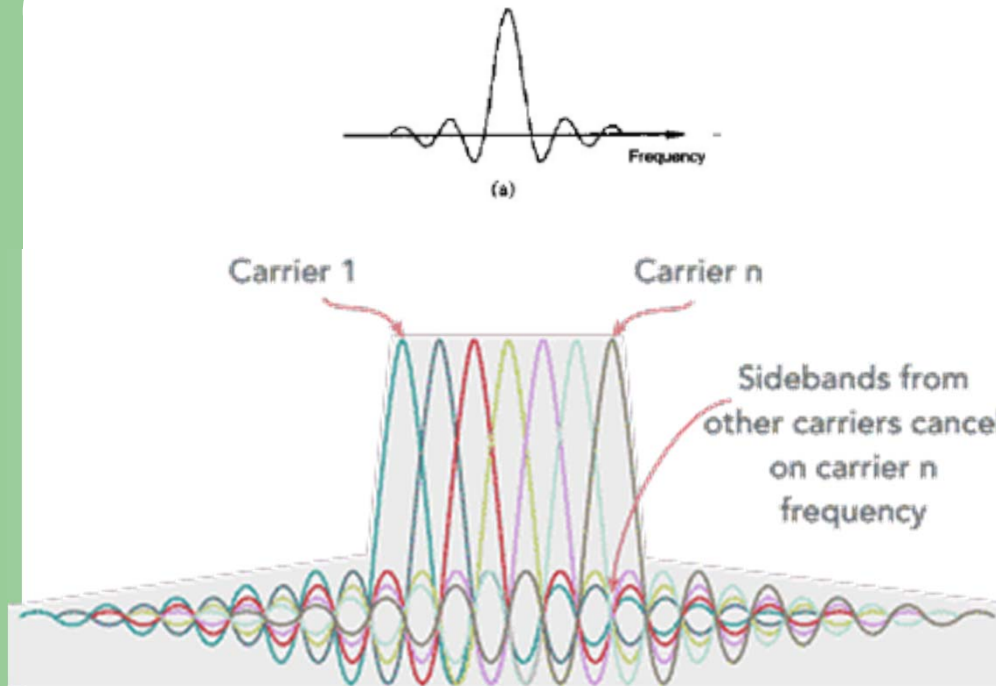
$$\int_0^T \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \cos(2\pi f_j t + \phi_j) dt = 0 \quad f_{i+1} = f_i + R_s$$

- Τότε, έχουμε ορθογώνια πολυπλεξία διαιρέσης συχνότητας  
- Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM

Σύμβολα των υποκαναλιών: xQAM



# OFDM - Orthogonal FDM II



## Χρήσεις

### ☐ OFDM + QAM

- ✓ xDSL – (DMT)
- ✓ DAB
- ✓ DVB
- ✓ Κινητή τηλεφωνία (3G - LTE )
- ✓ 5G

**The maximum of each sinc function corresponds to the zero-crossings of all the others**