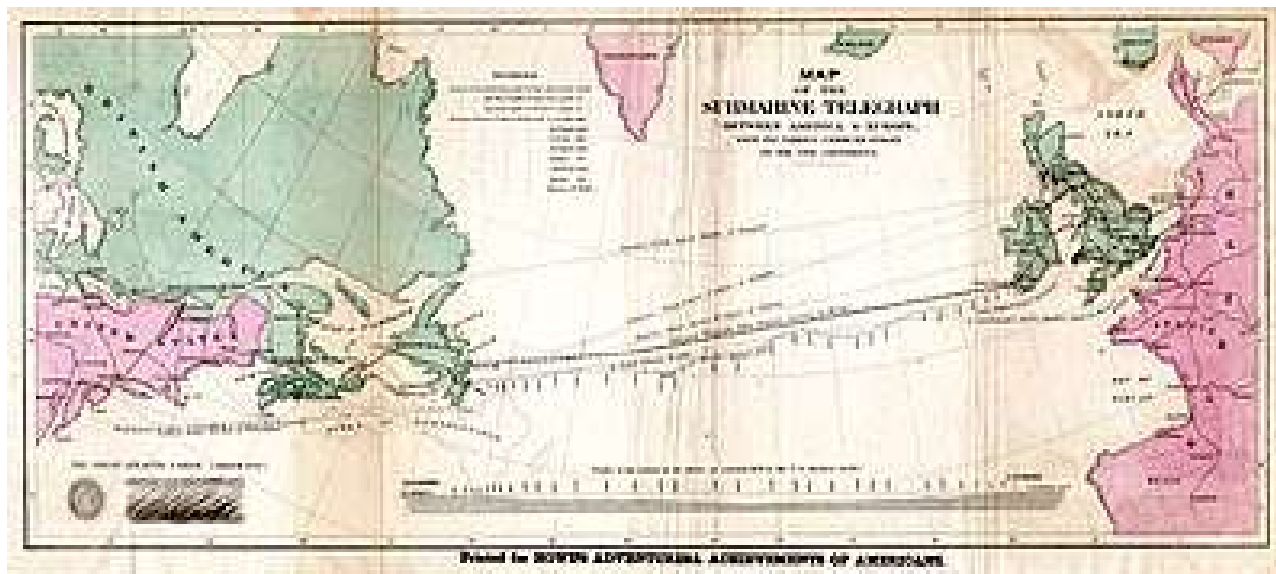


Βασικές Έννοιες Συστημάτων Επικοινωνίας

Εισαγωγή

Τηλεγραφία και Τηλεφωνία

- **1837:** Ο **Samuel Morse** εφευρίσκει τον ηλεκτρικό τηλέγραφο (με τη βοήθεια του **Alfred Vail**), παράλληλα με τους **Cooke** και **Wheatstone**, **Joseph Henry** και άλλους) και λίγα χρόνια αργότερα τον διάσημο δυαδικό κώδικα μεταβλητού μήκους
- **1858:** Υπερατλαντική καλωδιακή σύνδεση ΗΠΑ – Ευρώπης



Επισκόπηση Τεχνολογικών Εξελίξεων στις Τηλ/νιες

Standard letters

A	■ —	N	— ■
B	— ■ ■ ■	O	— — —
C	— ■ — ■	P	■ — — ■
D	— ■ ■	Q	— — ■ —
E	■	R	■ — ■
F	■ ■ — ■	S	■ ■ ■
G	— — ■ ■	T	—
H	■ ■ ■ ■	U	■ ■ —
I	■ ■	V	■ ■ ■ —
J	■ — — —	W	■ — —
K	— ■ —	X	— ■ ■ —
L	■ — ■ ■	Y	— ■ — —
M	— —	Z	— — ■ ■

Κώδικας Morse (μεταβλητού μήκους αλλά όχι προθεματικός)

Επισκόπηση Τεχνολογικών Εξελίξεων στις Τηλ/νίες

- **1875:** Ο **Emile Baudot** εφευρίσκει ένα «εκτυπωτικό» τηλέγραφο με βάση έναν δυαδικό κώδικα σταθερού μήκους όπου κάθε γράμμα κωδικοποιείται με 5 bits.
- **1876:** Ο **Alexander Graham Bell** εφευρίσκει το τηλέφωνο (αν και σήμερα έχει αναγνωριστεί επίσημα και η μεγάλη συμβολή του **Antonio Meucci**, που είχε προηγηθεί του A. Bell)
- **1915:** Πρώτη τηλεφωνική μετάδοση μεγάλων αποστάσεων
 - » χάρη στην εφεύρεση του τριοδικού ενισχυτή το 1906
 - * Το πρώτο υπερατλαντικό καλώδιο για τηλεφωνικές υπηρεσίες καθίσταται διαθέσιμο το 1953
- **1897:** Ο **Almon Brown Strowger** αναπτύσσει τον πρώτο ηλεκτρομηχανικό αυτόματο μεταγωγέα (για να μη χάνει πελάτες !!!)
 - » ο πρώτος ψηφιακός μεταγωγέας θα αναπτυχθεί το 1960

Ασύρματες Επικοινωνίες

- 1820: Ο **Oersted** δείχνει ότι ηλεκτρικό ρεύμα παράγει μαγνητικό πεδίο (και γενικά η μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου)
- 1821: Ο **Faraday** έδειξε ότι η μετακίνηση ενός μαγνήτη κοντά σε έναν αγωγό προκαλεί επαγωγικό ρεύμα (δηλαδή ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει ηλεκτρικό πεδίο)
- **1867**: Βασιζόμενος στα προηγούμενα, ο **James Maxwell** προέβλεψε την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών (ΗΜ) κυμάτων και διατύπωσε τη βασική θεωρία (ένα σύνολο από 4 “μερικές δ.ε.” , με διόρθωση στο Νόμο του Ampere)
- **1887**: Ο **Hertz** έδειξε πειραματικά την ύπαρξη των ΗΜ κυμάτων
 - » ασύρματη μετάδοση σήματος για μερικά μέτρα

Επισκόπηση Τεχνολογικών Εξελίξεων στις Τηλ/νιες

- **1896:** Ο **Guglielmo Marconi** κάνει επίδειξη του ασύρματου τηλέγραφου στη Βρετανική Υπηρεσία Τηλεγράφων
- **1901:** Ο **Marconi** μεταδίδει με επιτυχία ραδιοφωνικό σήμα κατά μήκος του Ατλαντικού (Cornwall → Newfoundland)
(η συμβολή των **Nicola Tesla** και **Alexander Stepanovich Popov**)
- **1914:** Πρώτη ραδιοεπικοινωνιακή μετάδοση φωνής
- **1920s:** Ασύρματοι **δέκτες** εγκαθίστανται σε αστυνομικά αυτοκίνητα του Detroit
- **1930s:** Αναπτύσσονται ασύρματοι **πομποί**
 - » Διαμόρφωση κατά πλάτος φέρουσας. Ο τηλ/κος εξοπλισμός καταλαμβάνει το μισό αυτοκίνητο!
- **1935:** Ο **Edwin Armstrong** επιδεικνύει τη διαμόρφωση κατά συχνότητα (Frequency Modulation, FM)

Επισκόπηση Τεχνολογικών Εξελίξεων στις Τηλ/νίες

- **1946:** Πρώτη διασύνδεση κινητών χρηστών με το δημόσιο δίκτυο PSTN
- **1949:** Η FCC αναγνωρίζει την ασύρματη ραδιοεπικοινωνία ως μια νέα κατηγορία υπηρεσιών

Ασύρματες κινητές επικοινωνίες

- 1979: Η **NTT/Japan** αναπτύσσει το πρώτο κυψελωτό σύστημα κινητής τηλεφωνίας
- 1983: Στις ΗΠΑ αναπτύσσεται το Advanced Mobile Phone System (**AMPS**) (στην 900 MHz band, με 666 duplex channels)
- 1989: Ανακοινώνεται το πρώτο ψηφιακό πρότυπο κινητής τηλεφωνίας (από το ευρωπαϊκό Groupe Spécial Mobile – **GSM**)
- **2G → 3G → 4G → 5G → B5G → 6G** (αλλαγή γενιάς ανά ~8-10 χρόνια)
(1G: analog com.)

5G specs:

- Up to 10Gbps data rate - > 10 to 100x speed improvement over 4G and 4.5G networks
- 1-millisecond latency
- 1000x bandwidth per unit area
- Up to 100x number of connected devices per unit area (compared with 4G LTE)
- 99.999% availability
- 100% coverage
- 90% reduction in network energy usage
- Up to 10-year battery life for low power IoT device

Επισκόπηση Τεχνολογικών Εξελίξεων στις Τηλ/νίες

- Τα τελευταία 70+ χρόνια
 - Δορυφορικές Επικοινωνίες
 - Οπτικές Επικοινωνίες
 - Κινητές (Κυψελωτές) Ασύρματες Επικοινωνίες
 - Αναλογικά → Ψηφιακά Συστήματα
- Τεχνολογικές Εξελίξεις
 - transistor
 - ολοκληρωμένα κυκλώματα
 - οπτοηλεκτρονική
 - παραγωγή και ενίσχυση μικροκυμάτων
 - τεχνολογία κεραιών
- Θεωρητικές Εξελίξεις
 - Θεωρία Πληροφορίας
 - Τεχνικές διαμόρφωσης
 - Αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος
 - MIMO / Συνεργατικές επικοινωνίες / Γνωσιακές επικοινωνίες
 - Machine Learning for COM

«Φρυκτωρία»

- Το πρώτο σύστημα ασύρματης ψηφιακής επικοινωνίας
- Στην πρώτη μορφή του συναντάται ήδη πριν το 1100 π.Χ.
- Διαδοχικά βελτιώθηκε τεχνολογικά και επεκτάθηκε σε ολόκληρη την Ελληνική επικράτεια
- Μια ώριμη μορφή του, η Πυρσεία (~150πχ, περιγράφεται από τον αρχαίο ιστορικό Πολύβιο) φαίνεται στο σχήμα
- **Σύστημα Αναμετάδοσης:** το ελληνικό αλφάβητο διαιρείται σε **5 τμήματα διαδοχικών γραμμάτων**. Υπάρχουν δύο ομάδες από 5 πυρσούς η κάθε μία.
 - **Πρώτη ομάδα:** ο αριθμός των αναμμένων πυρσών δείχνει σε πιο τμήμα γραμμάτων αναφερόμαστε
 - **Δεύτερη ομάδα:** ο αριθμός των αναμμένων πυρσών δείχνει το συγκεκριμένο γράμμα από το τμήμα αυτό



«Φρυκτωρία» (2)

- Οι πυρσοί ήταν πάντοτε αναμμένοι και καλύπτονταν ή απο-καλύπτονταν ανάλογα με τον προς μετάδοση χαρακτήρα
 - Ένα μήνυμα μπορούσε να μεταδοθεί σε αποστάσεις πάνω από 1000km σε λιγότερο από 1h
 - **Ενδιαφέρον:** οι θέσεις των «σταθμών αναμετάδοσης» ήταν περίπου οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται από τα σύγχρονα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα
- **Βυζάντιο:** Καμινοβίγλες και Ωρονόμιο



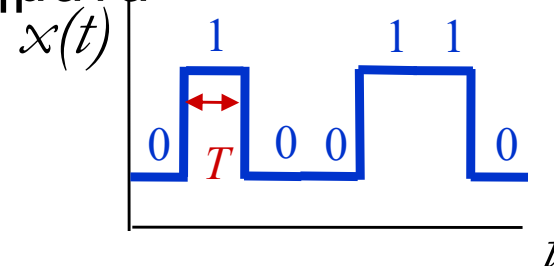
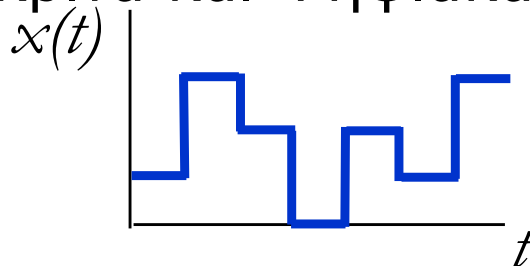
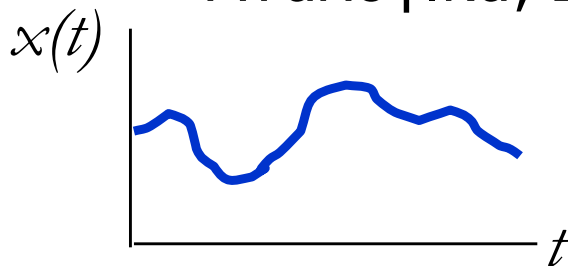
Τι μάθαμε από την ιστορική αναδρομή;

- Αναγνώριση των σημαντικών σταθμών και των πυλώνων της ανάπτυξης των Τηλεπικοινωνιών.
- Βασικές επινοήσεις (ανακαλύψεις, εφευρέσεις) συχνά με απρόβλεπτο χαρακτήρα.
- Κύρια βήματα της τεχνολογικής προόδου (κάπως λιγότερο απρόβλεπτα).
- Αναδραστικός κύκλος δυνατοτήτων και αναγκών
- Διαπίστωση της ανάγκης για συνέργεια επιστημών και επιστημόνων.
- “Αφανείς ήρωες” με καθοριστική συμβολή.

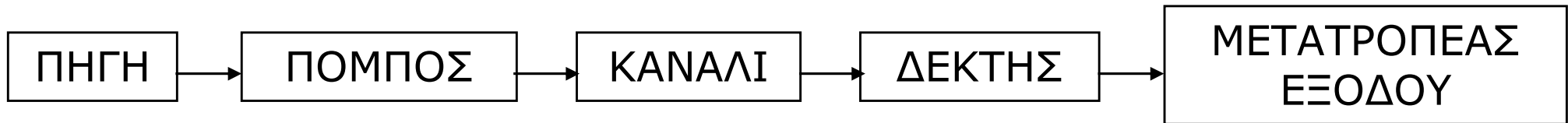
Είδη Τηλ/κων Συστημάτων

- Τηλεπικοινωνιακά συστήματα
 - » Πολλά διαφορετικά συστήματα (from molecule to deep space)
 - » Πολλοί διαφορετικοί τύποι πληροφορίας
- Σχεδιαστικές προκλήσεις σε θέματα
 - » Υλικού
 - » Επεξεργασίας της πληροφορίας
- Αναπαράσταση πληροφορίας
 - » Αναλογικά σήματα
 - » Σύμβολα

– Αναλογικά, Διακριτά και Ψηφιακά Σήματα



Γενικό Μοντέλο Τηλεπικοινωνιακού Συστήματος



- Η πηγή παράγει το προς μετάδοση σήμα
- Ο πομπός μετατρέπει το σήμα εισόδου σε μορφή κατάλληλη για τη μετάδοση από το κανάλι (αναλογικό σήμα)
- 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

Κριτήρια Απόδοσης

■ Αναλογικά Συστήματα Επικοινωνίας

- Το κριτήριο είναι η **πιστότητα**

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

■ Ψηφιακά Συστήματα Επικοινωνίας

- Το κριτήριο είναι η **πιθανότητα σφάλματος**

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

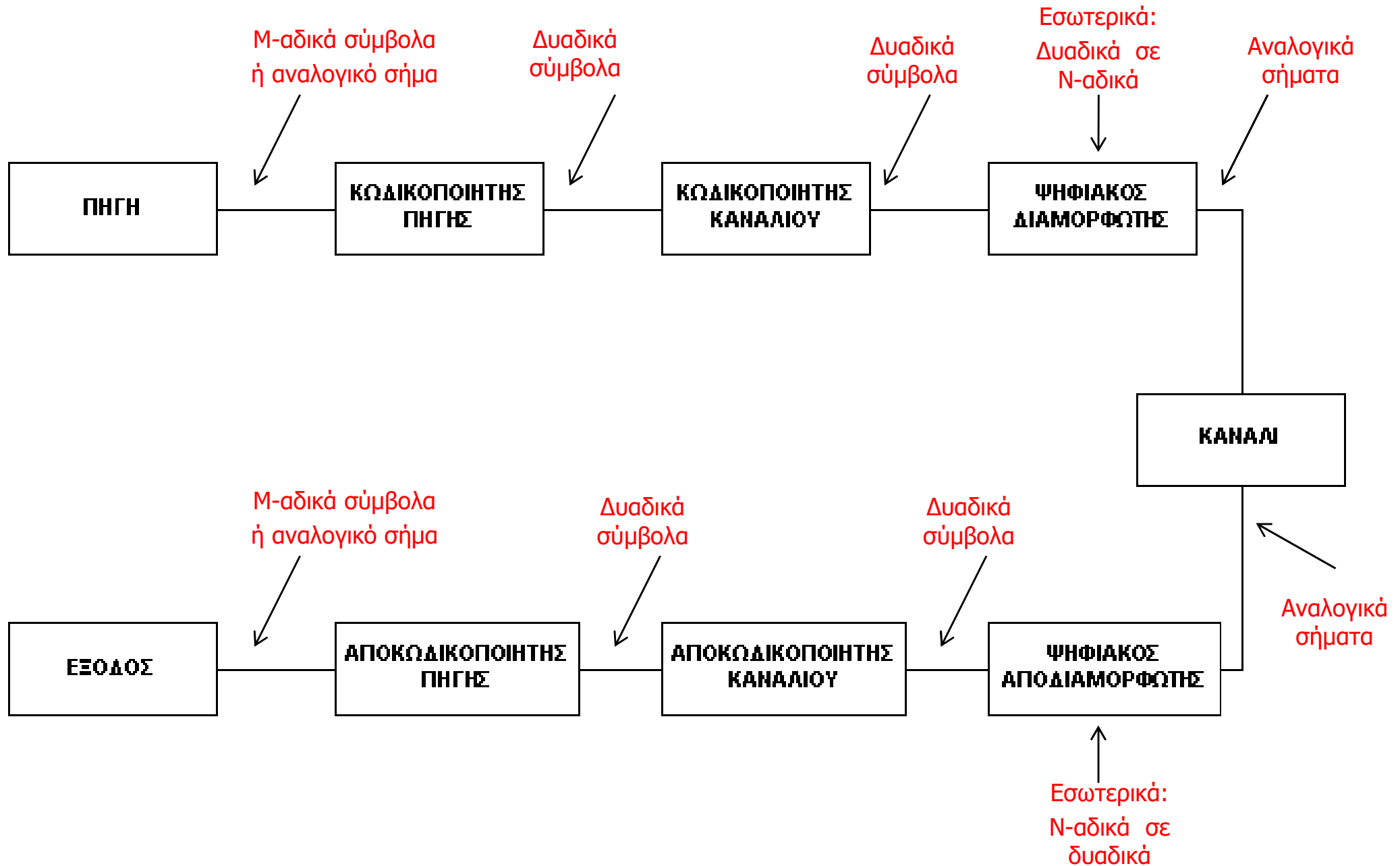
- Σε συνθήκες μη ιδανικού καναλιού, η P_b εξαρτάται
 - » από την ισχύ σήματος και την ισχύ του “θορύβου”
 - » το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων
 - » τα χαρακτηριστικά του καναλιού

- **Είναι δυνατόν να αποφευχθούν τα σφάλματα όταν υπάρχει θόρυβος;**
- **Αν μεταδίδουμε με ρυθμό $R < C$ τότε υπάρχει τρόπος ώστε να μεταδώσουμε χωρίς σφάλματα, παρά την ύπαρξη θορύβου!!!**

Βασικά Σημεία για τα Τηλ/κα Συστ.

- Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα (ΤΣ) διαμορφώνουν αναλογικά σήματα ή bits για μετάδοση πάνω σε ένα κανάλι
- Σχεδιαστικός στόχος σε ότι αφορά πομπό και δέκτη είναι η αντιμετώπιση της παραμόρφωσης και του θορύβου του καναλιού
- Μετρικές απόδοσης
 - αναλογικά συστήματα: πιστότητα
 - ψηφιακά συστήματα: πιθανότητα σφάλματος (σημαντικές επίσης ποσότητες είναι: εύρος ζώνης, ισχύς μετάδοσης, ρυθμός)
- Τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών συστημάτων οδήγησαν στη σταδιακή αντικατάσταση των αναλογικών ΤΣ από τα ψηφιακά ΤΣ
- *Πρακτικό παράδειγμα μετεξέλιξης από αναλογικό σε ψηφιακό:*
Το τηλεφωνικό δίκτυο βελτιστοποιήθηκε για φωνή και υστερούσε σε μετάδοση δεδομένων (~50Kbps). Σήμερα όμως μπορεί να υποστηρίξει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (>100Mbps)

Ψηφιακό Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα: Βασική Δομή



Ανάλυση της Δομής ενός Ψ.Τ.Σ.

Ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση των
βασικών επιμέρους υποσυστημάτων

Πηγή Πληροφορίας

- Αναλογική

- μπορεί/πρέπει να μετατραπεί σε ψηφιακή
 - » δειγματοληψία (Nyquist)
 - » κβαντισμός

- Ψηφιακή

- σύμβολα από πεπερασμένο αλφάβητο
- μετατροπή σε δυαδική ή Μιαδική μορφή
- πληροφορία συμβόλου
- εντροπία: η μέση πληροφορία των συμβόλων της πηγής

Κωδικοποιητής και Α/Κ Πηγής

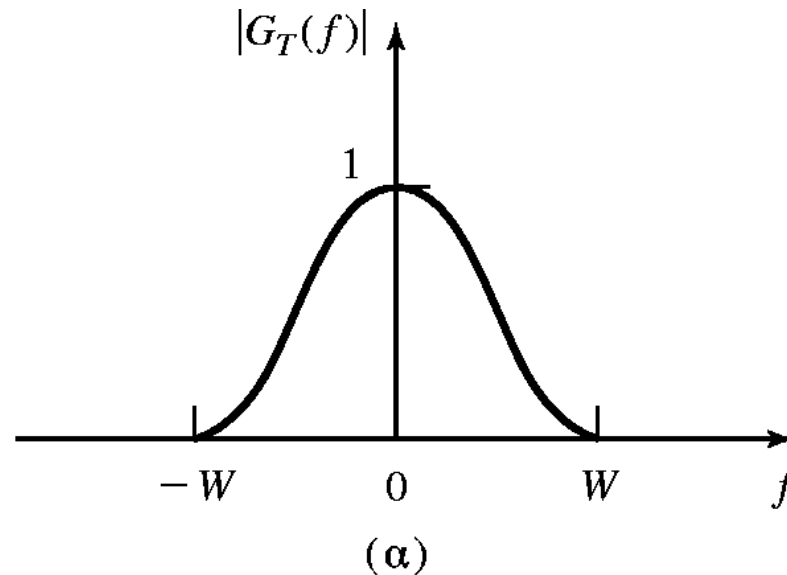
- **Στόχος:** η **οικονομική αναπαράσταση σε bits**
 - αποδοτικότερη αναπαράσταση της εξόδου μιας πηγής
- **Παραδείγματα:**
 - η κωδικοποίηση μεταβλητού μήκους (Morse, Huffman, LZW)
 - οι αλγόριθμοι συμπίεσης στα πρότυπα jpeg, mp3, mp4 ...
 - PCM, ADPCM, DM
- **Είσοδος:** ακολουθία συμβόλων ή αναλογικό σήμα
- **Έξοδος:** ακολουθία bits
- Η κωδικοποίηση μπορεί να είναι
 - με απώλειες (**lossy**)
 - και χωρίς απώλειες (**lossless**)
- Αν η πηγή είναι **αναλογική**, τότε η κωδικοποίηση είναι πάντοτε με **απώλειες** (γιατί ;)

Κωδικοποιητής και Α/Κ Καναλιού

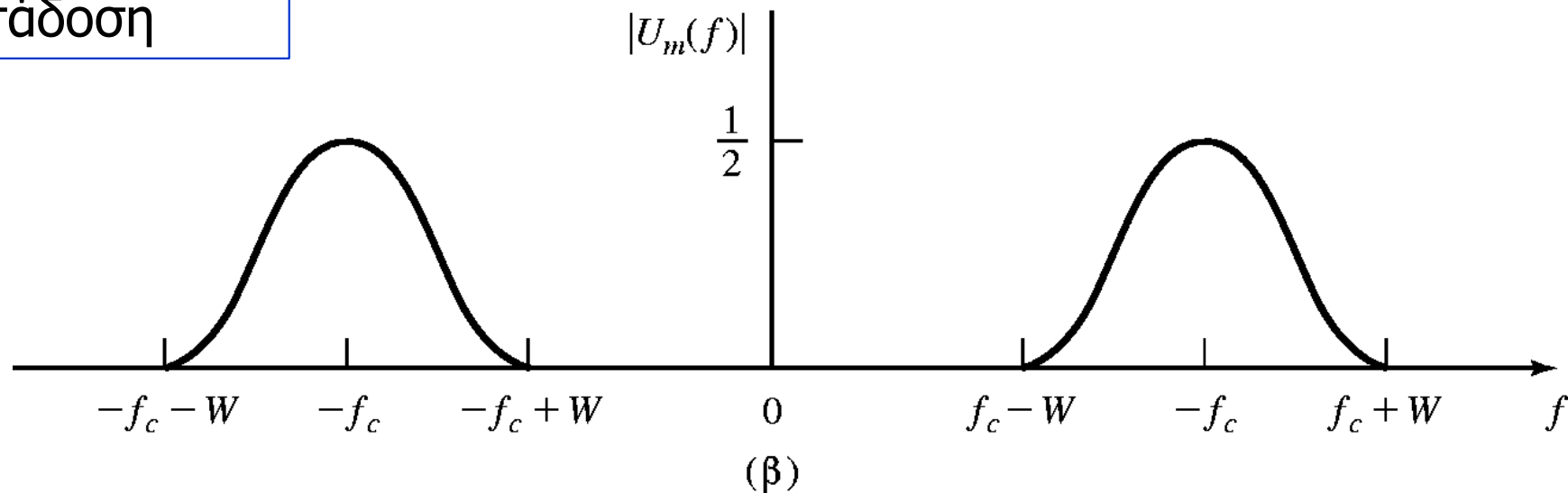
- **Στόχος:** ο έλεγχος σφαλμάτων
 - ανίχνευση (μόνο) ή
 - ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων
- **Είσοδος:** ακολουθία bits
- **Έξοδος:** ακολουθία bits
- Μπλοκ των k bits αντιστοιχίζονται σε μπλοκ των n bits
 - $n=k+r$
 - εισάγεται **πλεονασμός** με έναν ελεγχόμενο τρόπο
 - ρυθμός κωδικοποίησης k/n
- **Είδη:**
 - γραμμικοί μπλοκ κώδικες
 - κυκλικοί κώδικες
 - συνελικτικοί κώδικες
 - Κώδικες Turbo, Κώδικες LDPC, Polar codes κλπ.

Ψηφιακός Διαμορφωτής και Α/Δ: Μετάδοση πληροφορίας

Μετάδοση
βασικής ζώνης



Ζωνοπερατή
Μετάδοση



Ψηφιακός Διαμορφωτής και Α/Δ: Μετάδοση Βασικής Ζώνης

- **Στόχος:** το μεταδιδόμενο σύμβολο μορφοποιείται κατάλληλα προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι ατέλειες του καναλιού βασικής ζώνης
- PAM: δυαδικά σύμβολα → ορθογώνιοι παλμοί
 - ένας ορθογώνιος παλμός έχει **εύρος ζώνης ??**
 - **Ορθογώνιος παλμός σε bandlimited channel ??**
- Η μορφοποίηση παλμού (TX+RX) γίνεται έτσι ώστε να:
 - είναι υλοποιήσιμη
 - απαιτεί πεπερασμένο εύρος ζώνης
 - ικανοποιεί το κριτήριο του Nyquist για μηδενική διασυμβολική παρεμβολή

Ψηφιακός Διαμορφωτής και Α/Δ: Ζωνοπερατή Μετάδοση (1)

- **Στόχος:** τα μεταδιδόμενα σήματα (που αντιστοιχούν σε σύμβολα) αντιστοιχίζονται σε κυματομορφές σήματος (σήματα)
- Τα σήματα είναι τέτοια που να μπορούν να διέλθουν από ζωνοπερατό κανάλι
- Απευθείας εφαρμογή της **ιδιότητας διαμόρφωσης** του Μ.Φ.

$$e^{i\omega_c t} x(t) \overset{F}{\leftrightarrow} X(\omega - \omega_c) \quad \text{όπου } X(\omega) \text{ ο } F[x(t)]$$

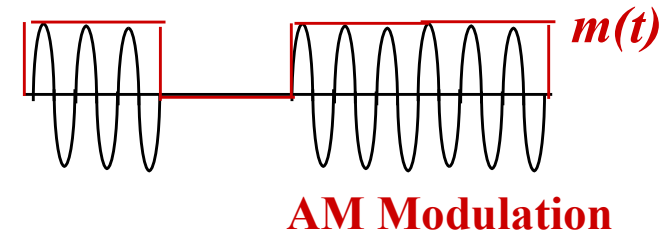
$$\cos(\omega_c t) x(t) \overset{FT}{\leftrightarrow} \frac{1}{2} [X(\omega - \omega_c) + X(\omega + \omega_c)]$$

- Το σήμα που «μετα-φέρει» την πληροφορία βασικής ζώνης λέγεται **φέρων (ή φέρουσα)** και έχει ημιτονοειδή μορφή
- Η πληροφορία αποτυπώνεται στις παραμέτρους του ημιτόνου
 - **Πλάτος, Συχνότητα, Φάση**

Ψηφιακός Διαμορφωτής και Α/Δ: Ζωνοπερατή Μετάδοση (2)

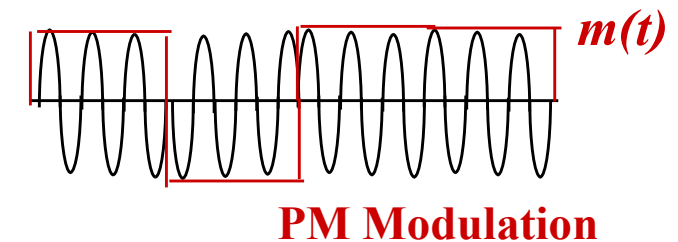
■ Amplitude Shift Keying (ASK)

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



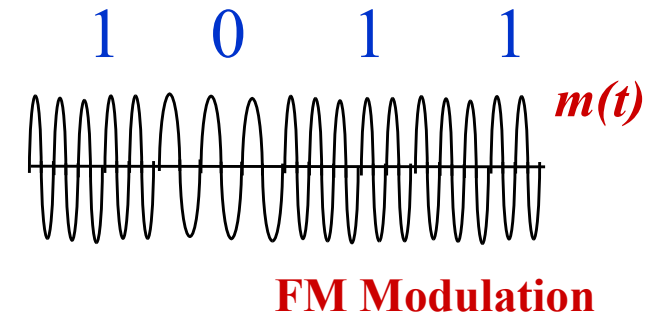
■ Phase Shift Keying (PSK)

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

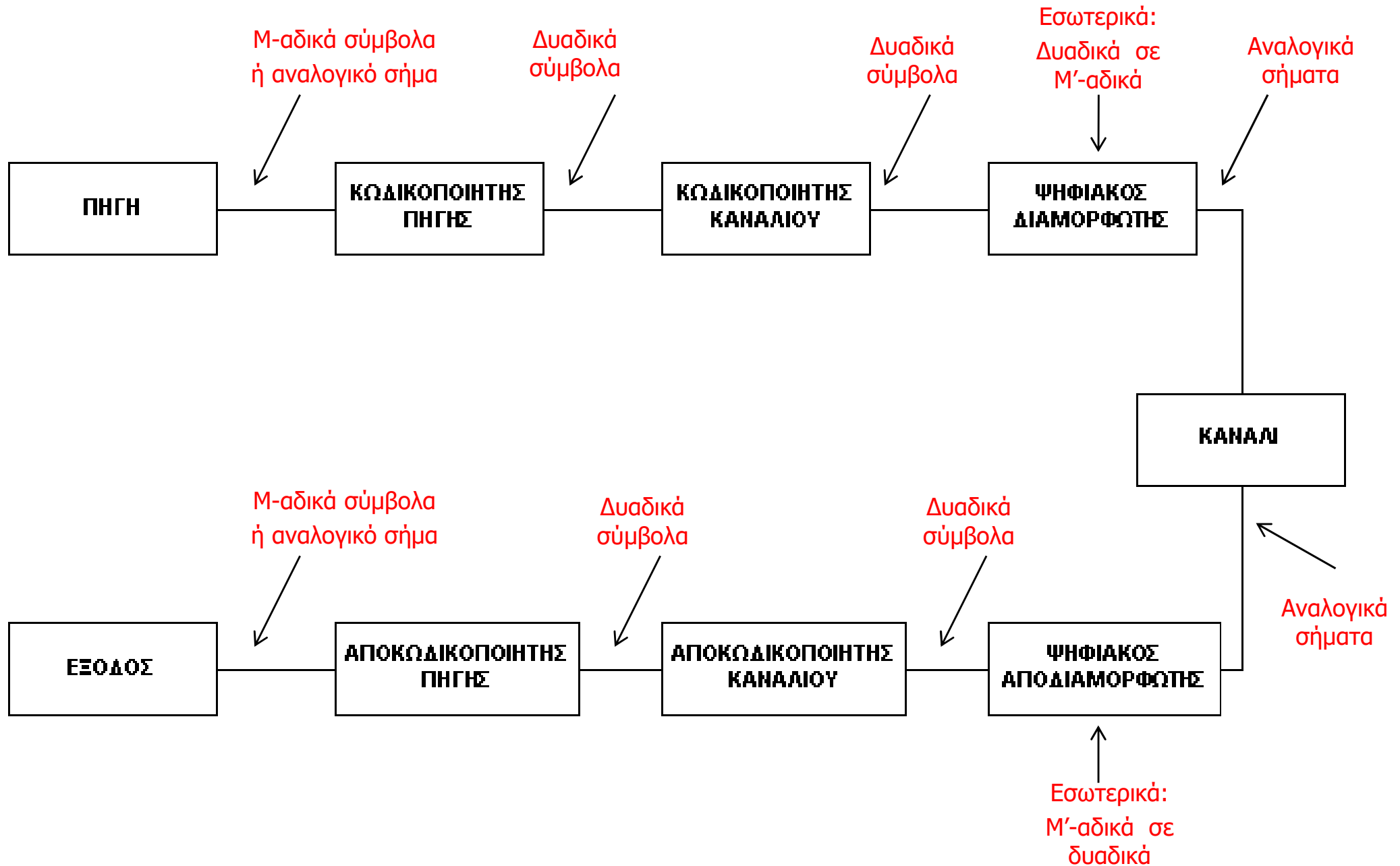


■ Frequency Shift Keying (FSK)

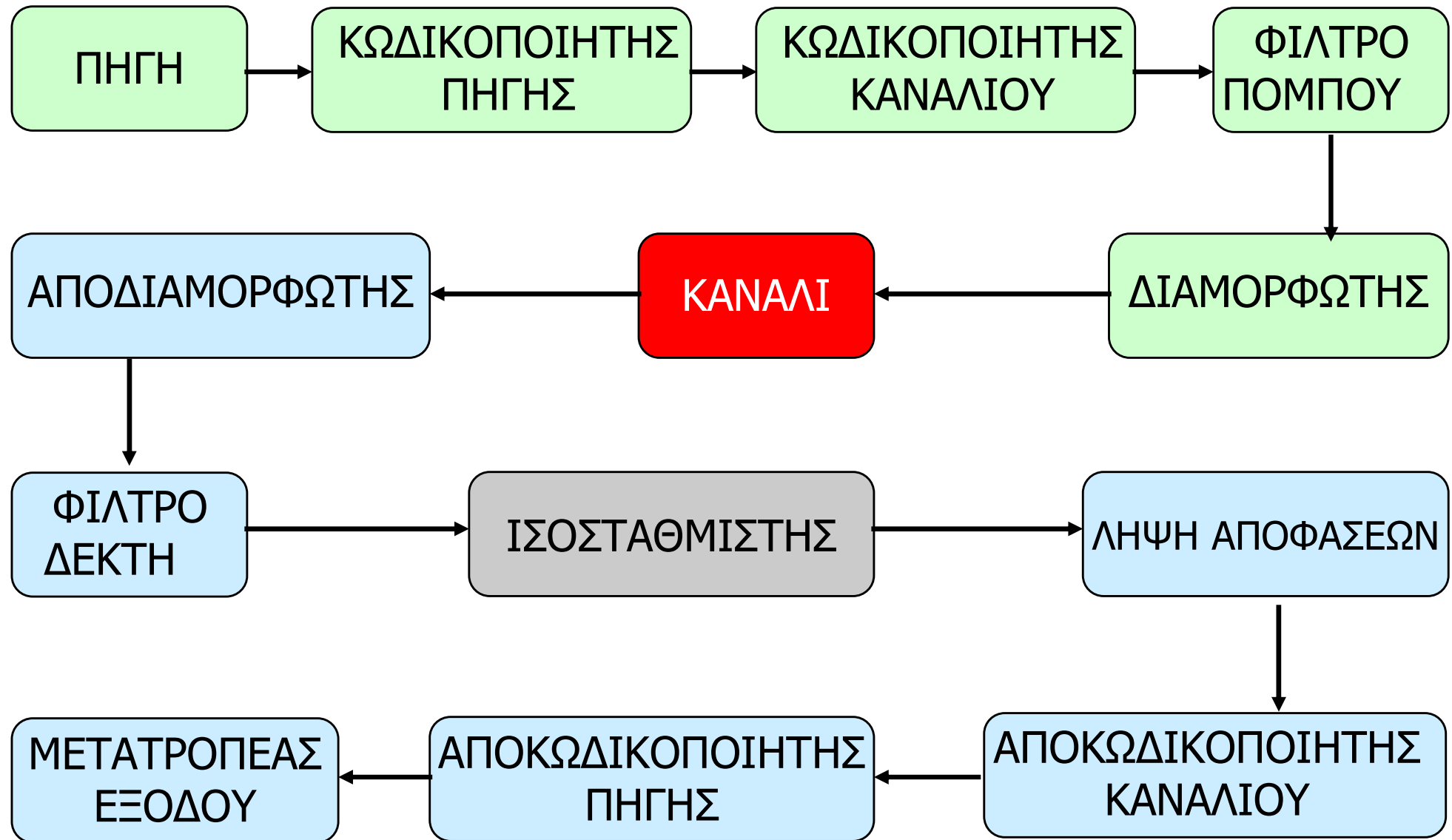
$$s(t) = \begin{cases} A_c \cos(2\pi f_1 t), & m(nT_b) = 1 \\ A_c \cos(2\pi f_2 t), & m(nT_b) = 0 \end{cases}$$



Ψηφιακό Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα: Βασική Δομή



Ψηφιακό Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα: Κάπως πιο πλήρες



Διαχείριση Παρεμβολών - Ισοσταθμιστής

- Είναι ένα (ψηφιακό) φίλτρο που έχει σκοπό να αναιρέσει τις δυσμενείς συνέπειες του μη ιδανικού καναλιού
- Μη ιδανικό κανάλι \Rightarrow Διασυμβολική παρεμβολή
συχνά το σημαντικότερο πρόβλημα κατά τη μετάδοση
- Εάν η αναίρεση επιτευχθεί τότε το όλο σύστημα ισοδυναμεί με μετάδοση μέσω ιδανικού καναλιού
- Οι συντελεστές του ψηφιακού φίλτρου υπολογίζονται με τη βοήθεια προχωρημένων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος και μάθησης
- Ορολογία: Ισοστάθμιση \equiv Εξίσωση \equiv Εξισορρόπηση
(equalization)

Άλλα υποσυστήματα ενός Ψ.Τ.Σ.

Σε μια πληρέστερη εκδοχή του ΨΤ συστήματος υπάρχουν κι άλλα υποσυστήματα όπως π.χ.

- κύκλωμα ανάκτησης συχνότητας και φάσης φέροντος
- υποσύστημα συγχρονισμού συμβόλων
- μετατροπή αστερισμού συμβόλων (δυναδική ακολουθία σε Μιαδική και αντίστροφα). Αυτό συνήθως είναι μέρος του ΨΔ και ΨΑ/Δ
- Precoder & Postcoder σε συστήματα MIMO

Περιεχόμενο μαθήματος

- ❑ Γενική περιγραφή ενός Τηλεπικοινωνιακού συστήματος
- ❑ Τηλεπικοινωνιακά κανάλια και κατηγοριοποιήσεις τους
 - Φυσικοί μηχανισμοί μετάδοσης πληροφορίας σε βασικές κατηγορίες καναλιών (οπτικά, ενσύρματα, ασύρματα) με έμφαση στα ασύρματα
 - Ασύρματη μετάδοση πληροφορίας. Στοιχεία ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης. Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα.
 - Μαθηματικά μοντέλα καναλιών
- ❑ Βασικά στοιχεία της Θεωρίας Πληροφορίας. Θεμελιώδεις περιορισμοί στις επικοινωνίες δεδομένων και σχετικά θεωρήματα.
- ❑ Κωδικοποίηση πηγής πληροφορίας: βασικές έννοιες και αλγόριθμοι
- ❑ Κωδικοποίηση Καναλιού: Αλγόριθμοι ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων
- ❑ Βασικές τεχνικές Ψηφιακή Διαμόρφωσης
- ❑ Ο Βέλτιστος Δέκτης σε ένα Ψηφιακό Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα
- ❑ Τεχνικές πολυπλεξίας στις ψηφιακές τηλεπικοινωνίες
- ❑ Συστήματα πολλαπλών κεραιών.