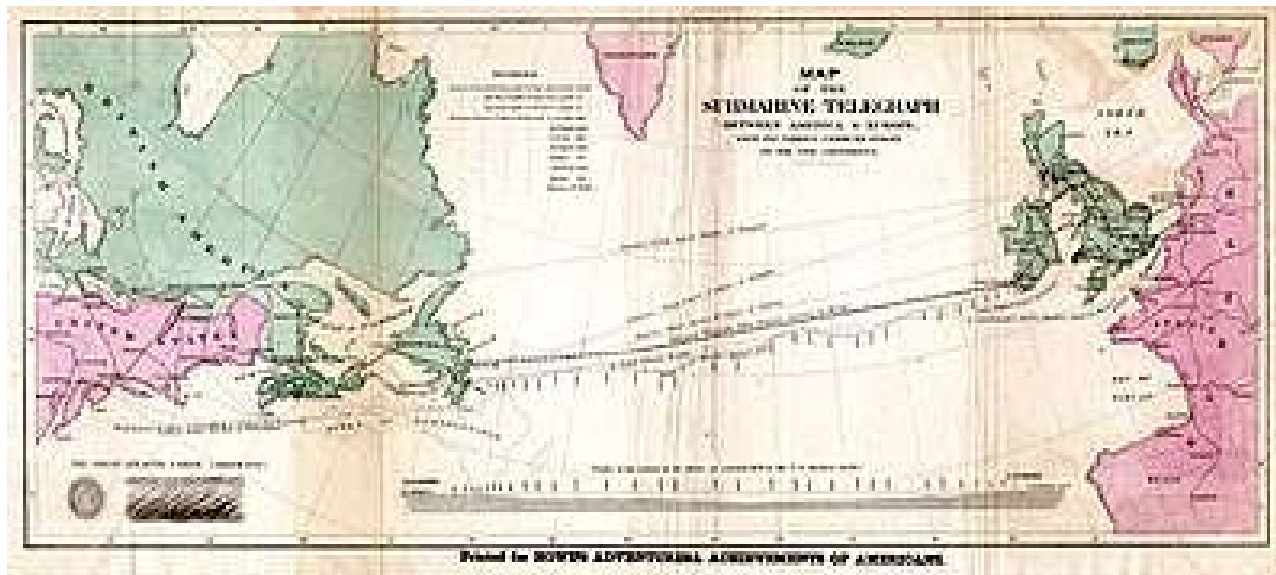


# Ψηφιακές Τηλεπικοινωνίες

*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/νίες

---

## 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	— — — ■ ■

# 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 τηλεγράφου 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 Πυρσειά (~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;

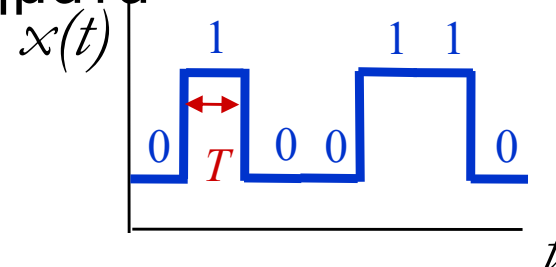
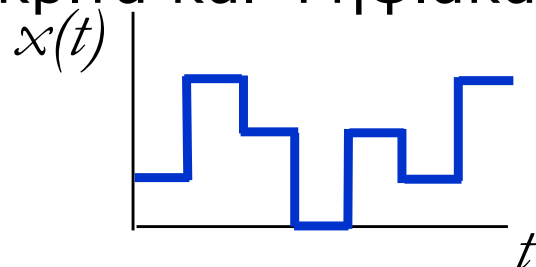
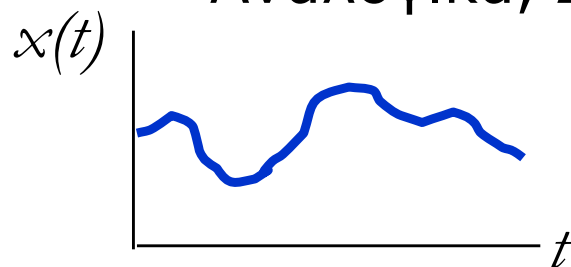
---

- 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).
- Διαπίστωση της ανάγκης για συνέργεια επιστημών και επιστημόνων.
- “Αφανείς ήρωες” με καθοριστική συμβολή.

# Είδη Τηλ/κων Συστημάτων

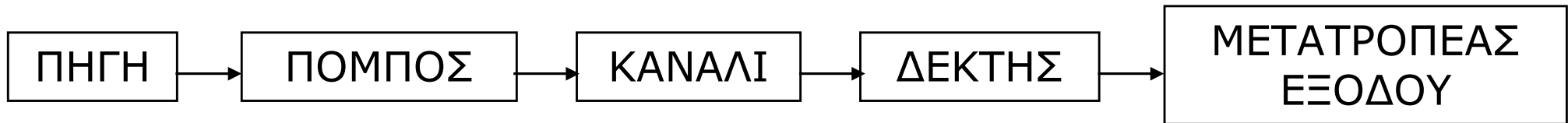
- Τηλεπικοινωνιακά συστήματα
  - » πολλά διαφορετικά συστήματα (from molecule to deep space)
  - » πολλοί διαφορετικοί τύποι πληροφορίας
- Σχεδιαστικές προκλήσεις σε θέματα
  - » υλικού
  - » επεξεργασίας
- Αναπαράσταση πληροφορίας
  - » αναλογικά σήματα
  - » σύμβολα

- 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!!!**

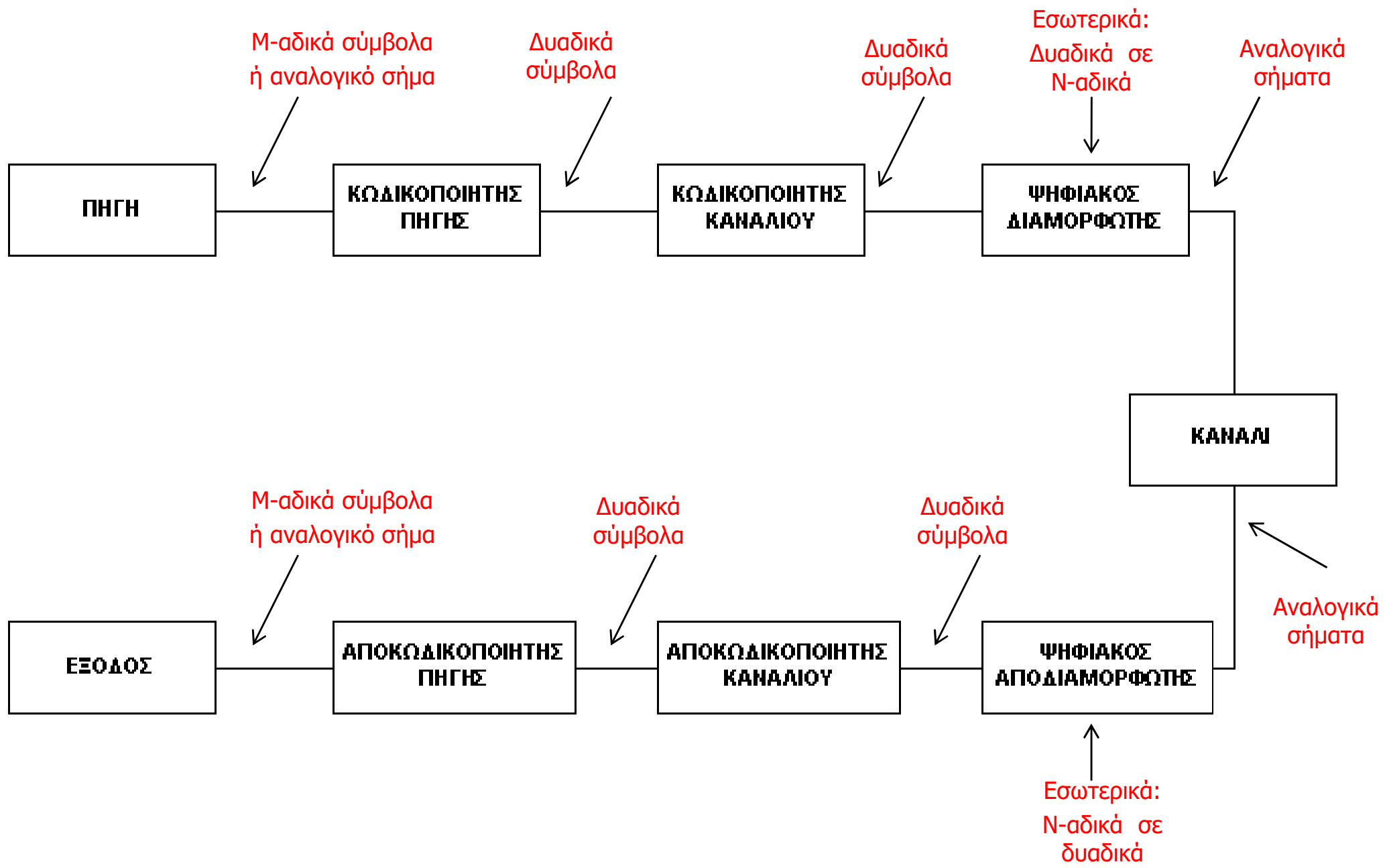
# Βασικά Σημεία για τα Τηλ/κα Συστ.

---

- 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.

# Φίλτρα Πομπού και Δέκτη

---

- Αναφερόμαστε στη μετάδοση βασικής ζώνης
- **Στόχος:** το μεταδιδόμενο σύμβολο μορφοποιείται κατάλληλα προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι ατέλειες του καναλιού βασικής ζώνης
- PAM: δυαδικά σύμβολα  $\rightarrow$  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

# Διαμόρφωση και Α/Δ

---

- Αναφερόμαστε στη ζωνοπερατή μετάδοση
- **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.

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

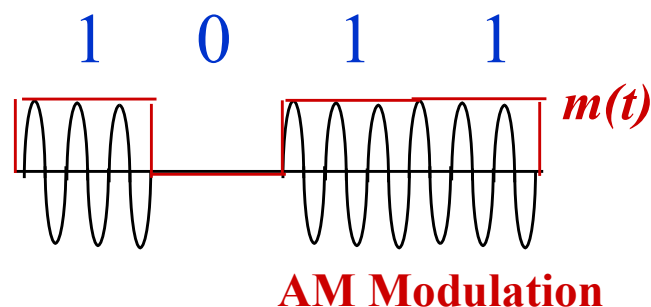
$$\cos(\omega_c t) x(t) \stackrel{FT}{\leftrightarrow} \frac{1}{2} [X(\omega - \omega_c) + X(\omega + \omega_c)]$$

- 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**

# Διαμόρφωση και Α/Δ (2)

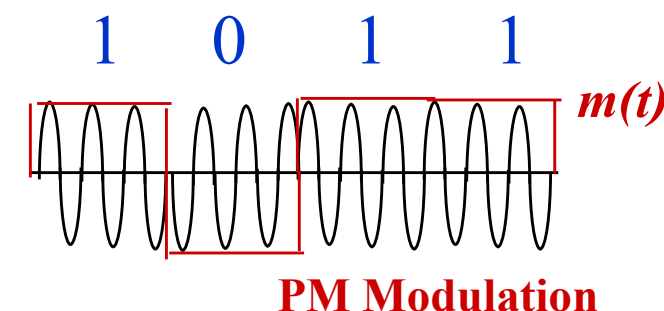
## ■ Amplitude Shift Keying (ASK)

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



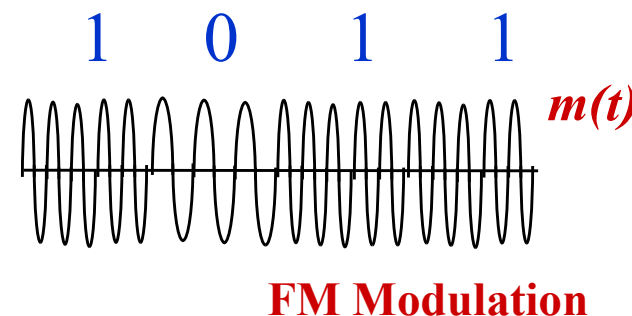
## ■ Phase Shift Keying (PSK)

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



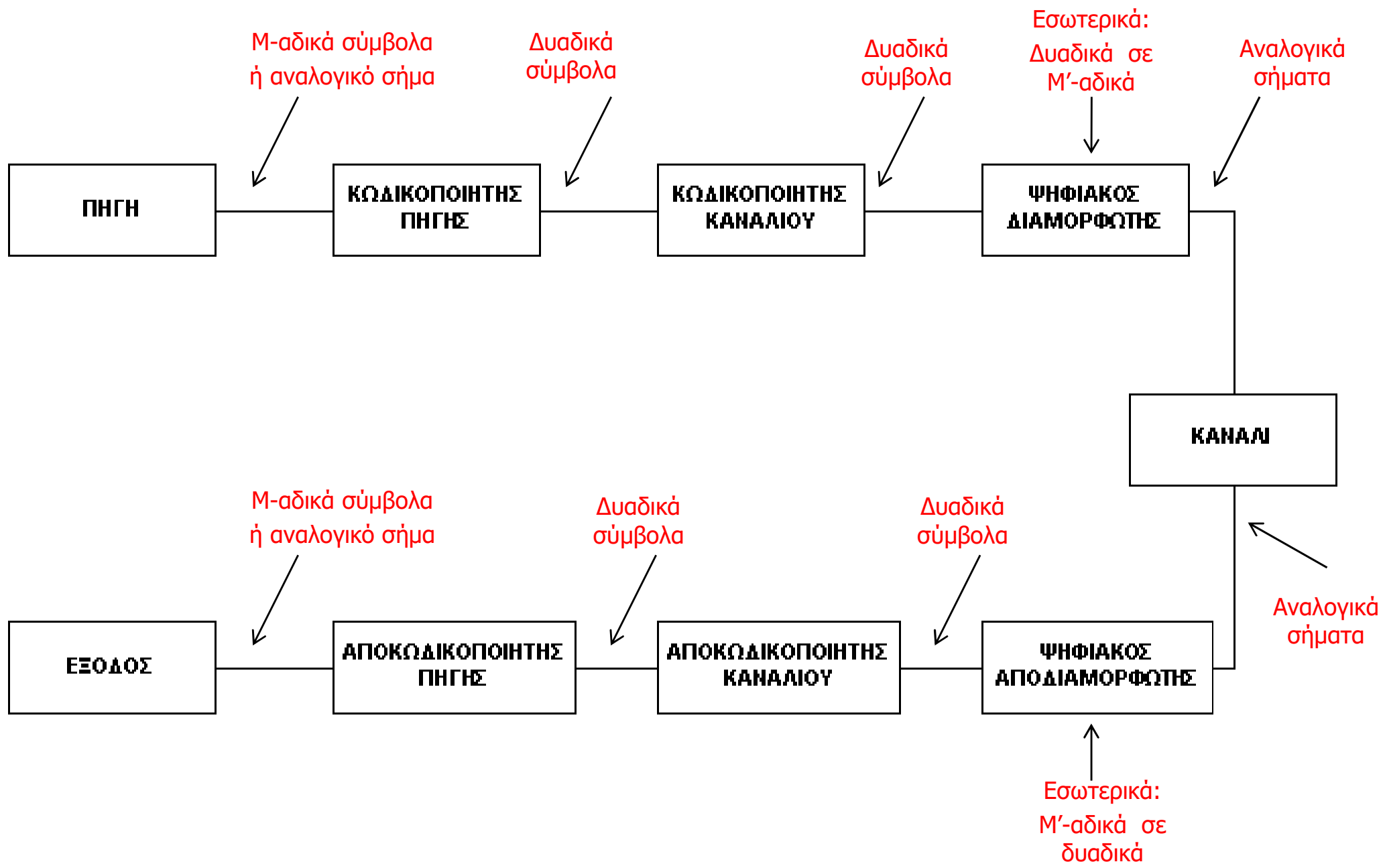
## ■ Frequency Shift Keying (FSK)

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

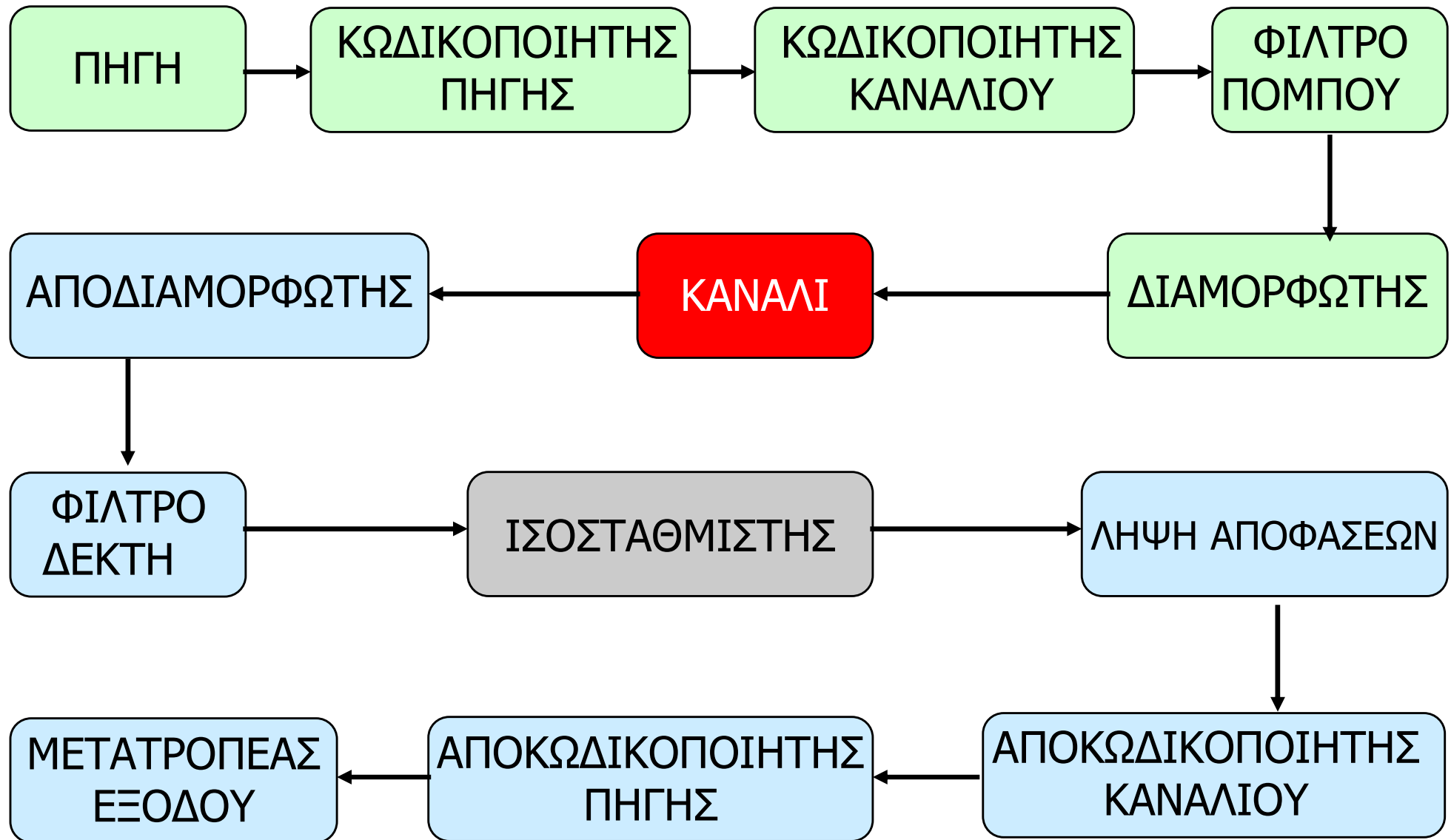




# Ψηφιακό Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα: Βασική Δομή



# 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

# Κανάλι

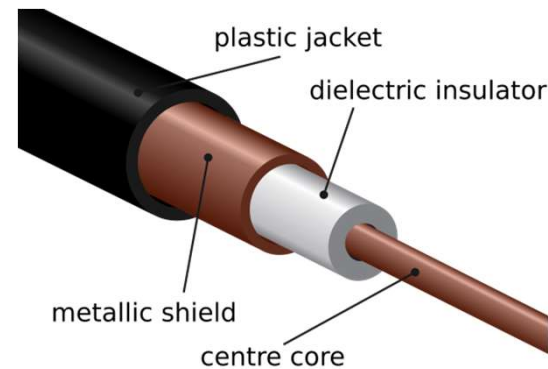
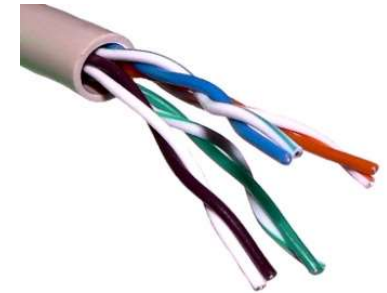
---

- Το κανάλι παρέχει τη σύνδεση μεταξύ πομπού και δέκτη
- Προβλήματα
  - Περιορισμένο εύρος ζώνης
  - Εξασθένηση και παραμόρφωση:
    - παραμόρφωση πλάτους
    - παραμόρφωση φάσης
  - Εισάγονται θόρυβοι, όπως:
    - θερμικός AWGN (Additive White Gaussian Noise)
    - κρουστικός θόρυβος
  - Παρεμβολές (από την ακύρωση ... στη διαχείριση)
  - Πολύδρομη μετάδοση – διαλείψεις (ασύρματο κανάλι)
  - Χρονική μεταβολή

# Βασικοί Τύποι Καναλιών (1/2)

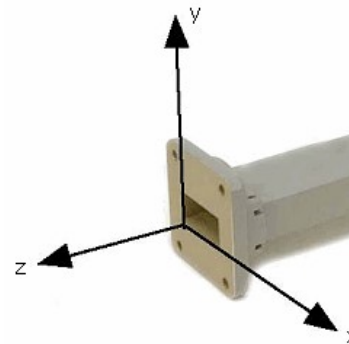
## ■ Ενσύρματα

- Συνεστραμμένο ζεύγος χαλκού (twisted-pair)
  - > εύρος ζώνης  $O(10^2)$  KHz
  - > «δια-φωνία» (crosstalk)
- Ομοαξονικό (coaxial cable)
  - > εύρος ζώνης  $O(10^2)$  MHz
  - > δεν έχει crosstalk
  - > ανάγκη για repeaters



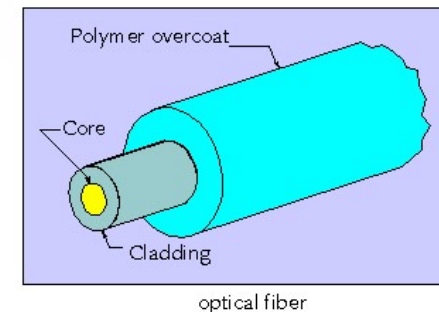
## ■ Κυματοδηγοί

- καθοδηγούμενη διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος

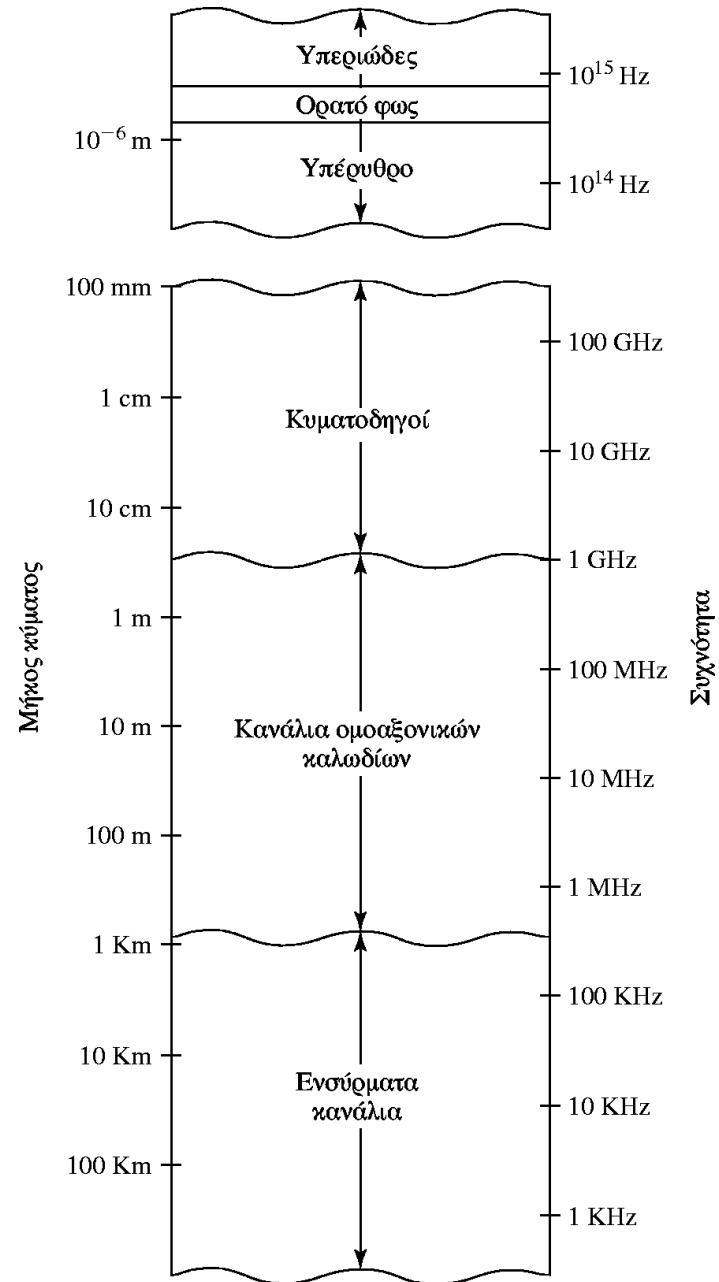


## ■ Οπτικές Ίνες

- οπτικός κυματοδηγός
- βελτίωση απόσβεσης από 1000 dB/Km σε  $O(0.1)$  dB/Km



# Ενσύρματα Κανάλια



# Βασικοί Τύποι Καναλιών (2/2)

---

## ■ Ασύρματα

- VLF [ $f=O(1\text{KHz})$ ]... VHF [ $f=O(100\text{MHz})$ ]
- Μικροκυματικά
  - » UHF (300MHz – 3GHz)
  - » SHF (3GHz – 30GHz)
- millimeter waves ή EHF (30GHz – 300GHz)
- IR, UV, ορατού φωτός [ $f=O(10^{15})\text{ Hz}$ ] ([Optical wireless com](#))

## ■ Υποβρύχια ακουστικά κανάλια

- skin depth  $\delta$  = απόσταση με απόσβεση ΗΜ κύματος κατά  $1/e$
- $\delta = 250/\text{sqrt}(f)$  (π.χ., για σήμα 1GHz  $\rightarrow \delta = \sim 8\text{mm}$ )

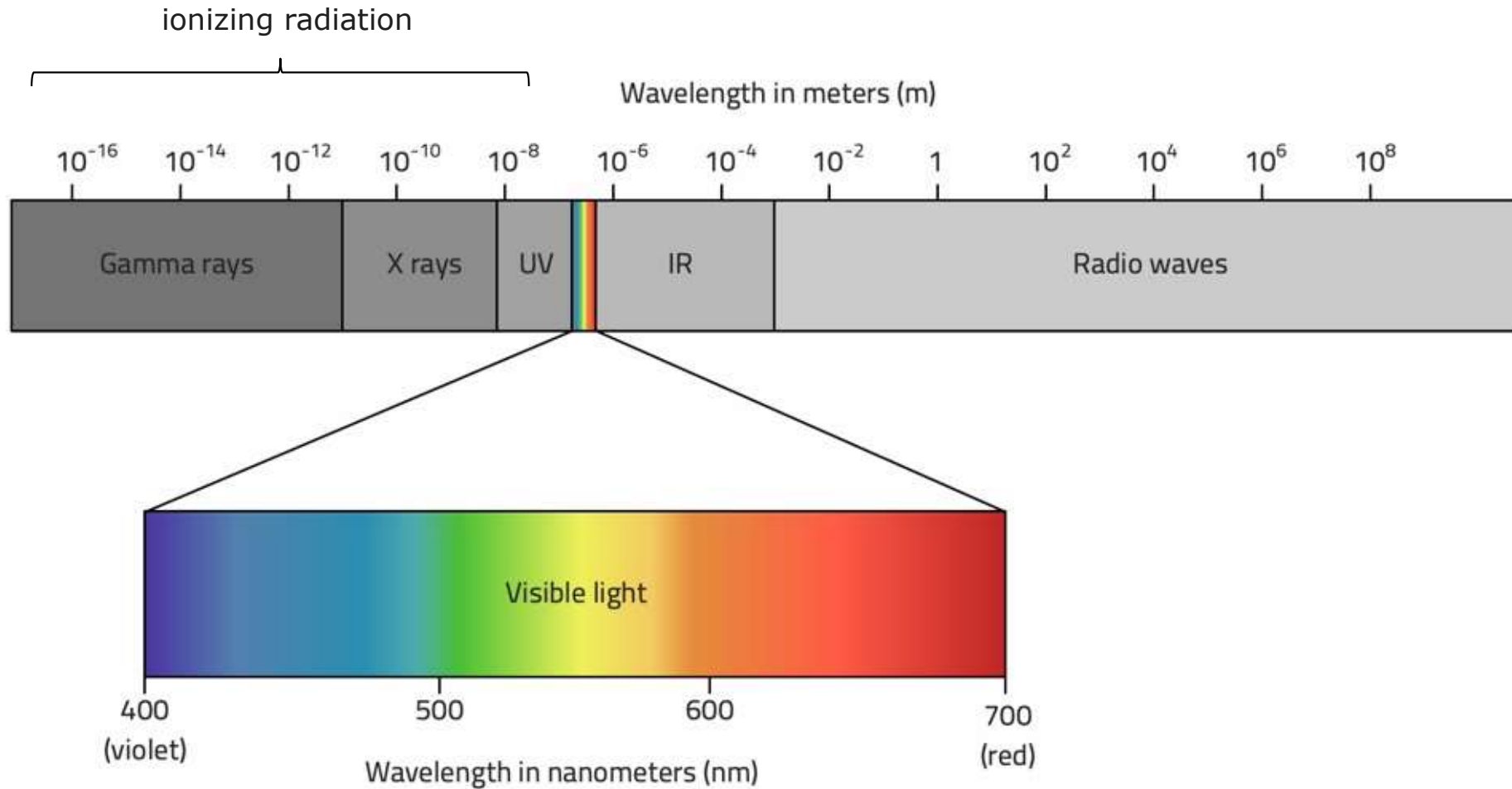
## ■ Κανάλια αποθήκευσης

- Μαγνητικά μέσα / Οπτικά μέσα / SSD
- Νέου τύπου μνήμες (π.χ. θερμικές)

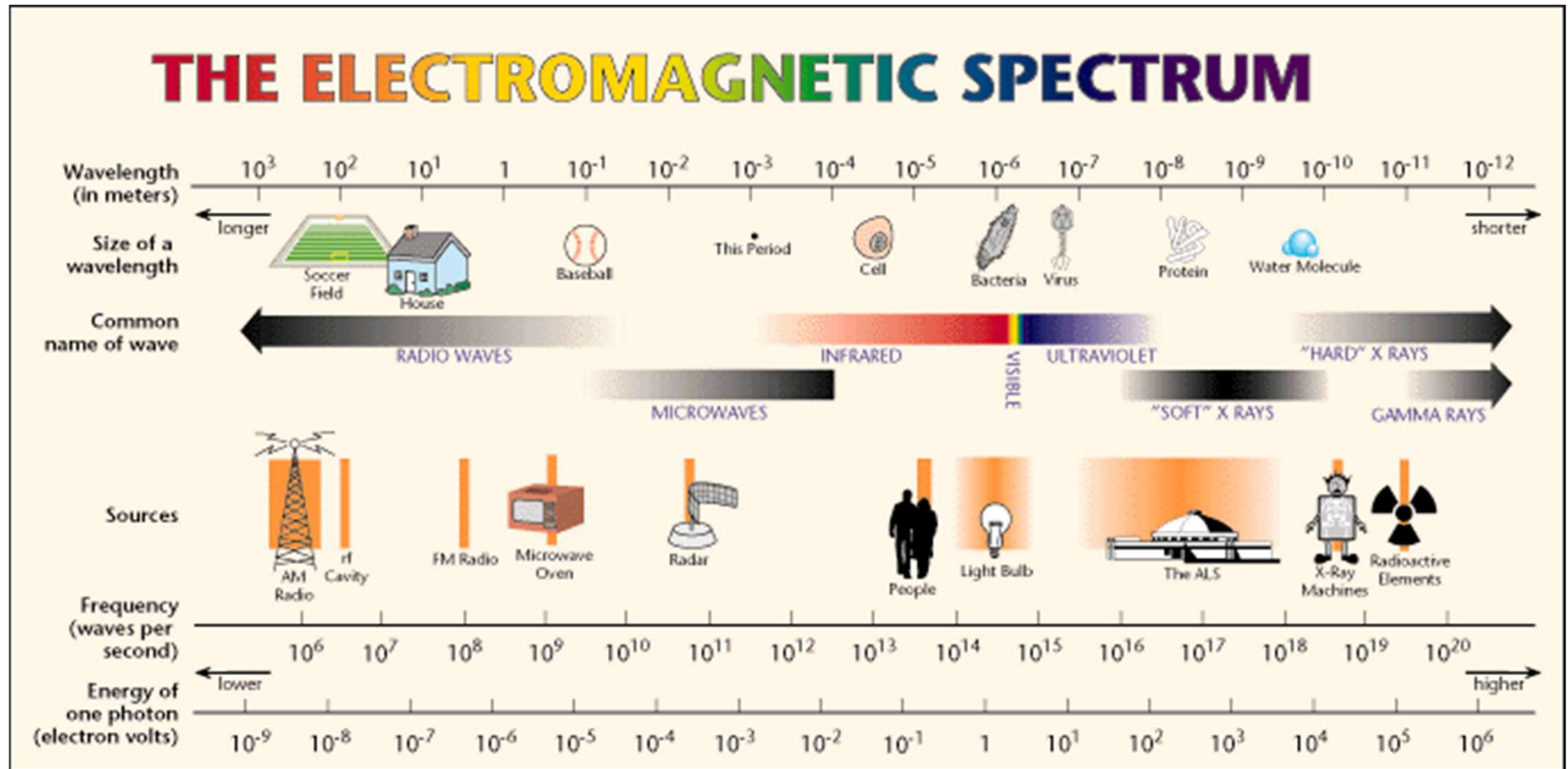
## ■ Άλλα κανάλια: power lines, deep space, κλπ.



# Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

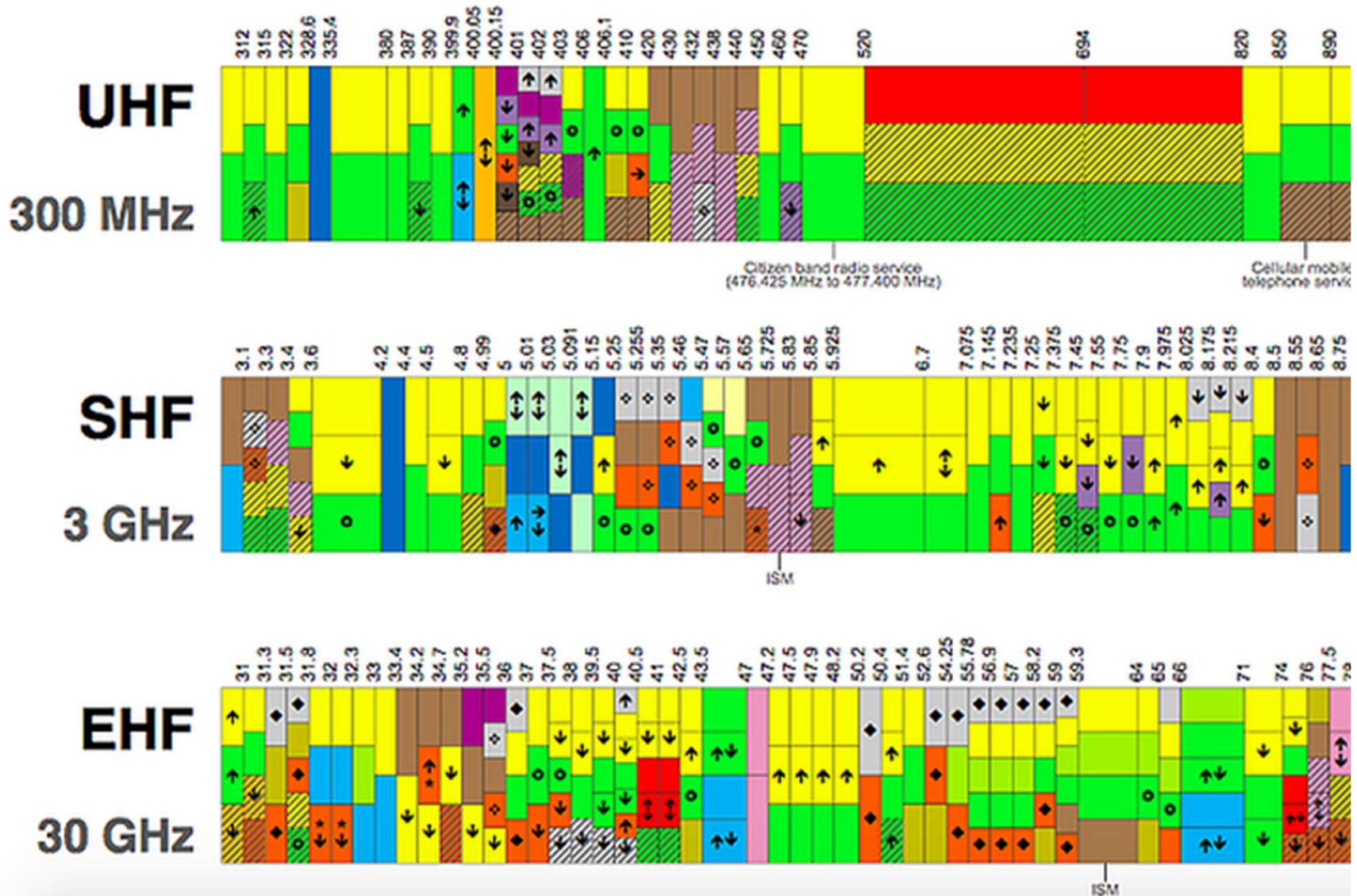


# Ραδιοφάσμα



ALS: Advanced Light Source

# Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα





# Ραδιοφάσμα

## UNITED STATES FREQUENCY ALLOCATIONS THE RADIO SPECTRUM

### RADIO SERVICES COLOR LEGEND



### ACTIVITY CODE



### ALLOCATION USAGE DESIGNATION

SERVICE	EXAMPLE	DESCRIPTION
Primary	FIXED	Capital Letters
Secondary	MOBILE	1st Capital with lower case letters

This chart is published on the authority of the Table of Frequency Allocations used by the ITC and ITC, which have no comparative effect of any kind, is intended to provide a general guide to the Table of Frequency Allocations. Therefore, for complete information, users should consult the Table of Frequency Allocations published by the International Telecommunication Union (ITU).

U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE  
National Telecommunications and Information Administration  
Office of Spectrum Management  
JANUARY 2016

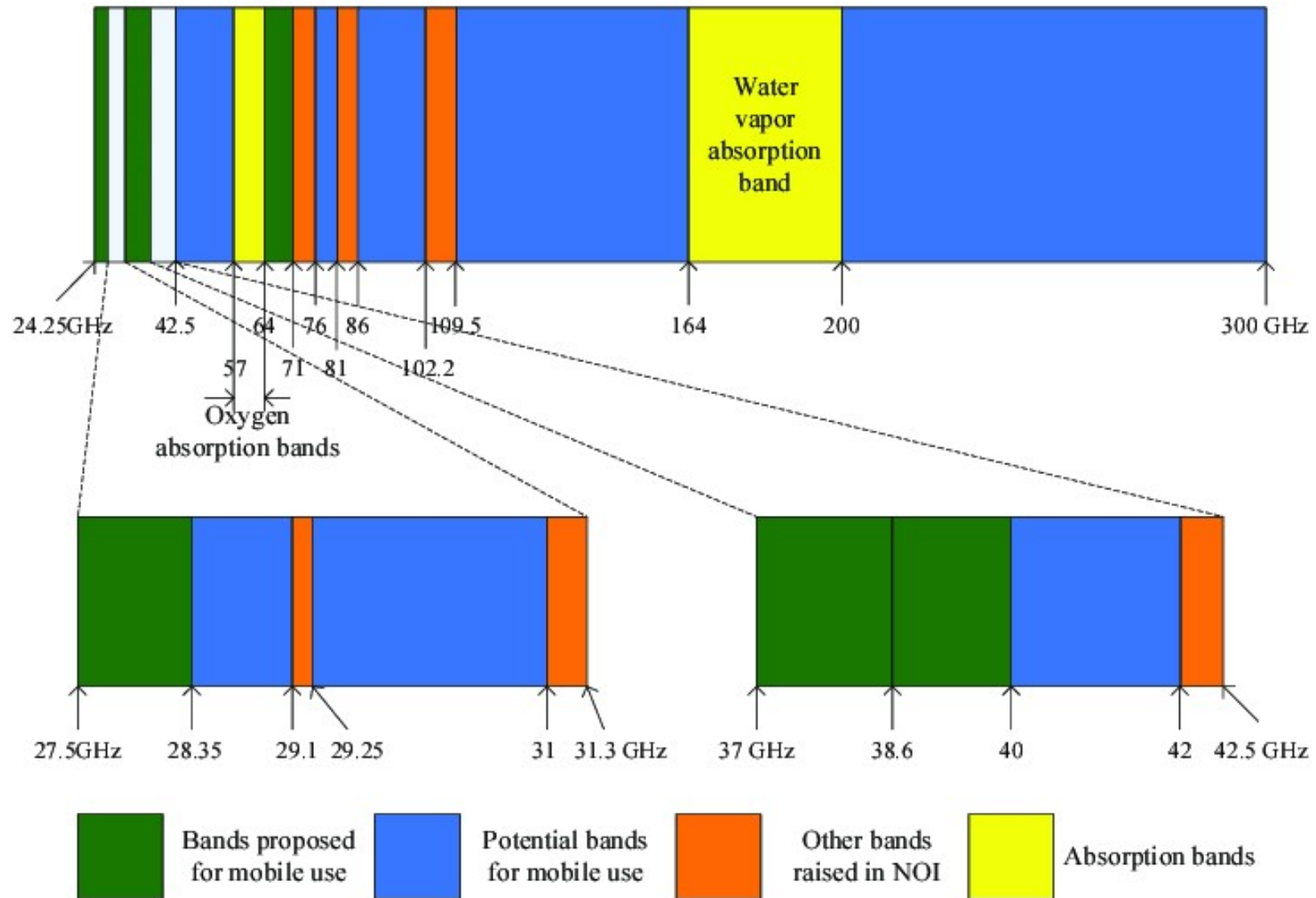
NTIA



0 kHz 300 kHz 3 MHz 30 MHz 300 MHz 3 GHz 30 GHz 300 GHz

PLAN VIEW OF THE RADIO SPECTRUM. THE SPECTRUM IS SHOWN IN THE ORDER OF FREQUENCY. THE BANDS ARE SHOWN IN THE ORDER OF FREQUENCY. THE BANDS ARE SHOWN IN THE ORDER OF FREQUENCY.

# Ραδιοφάσμα



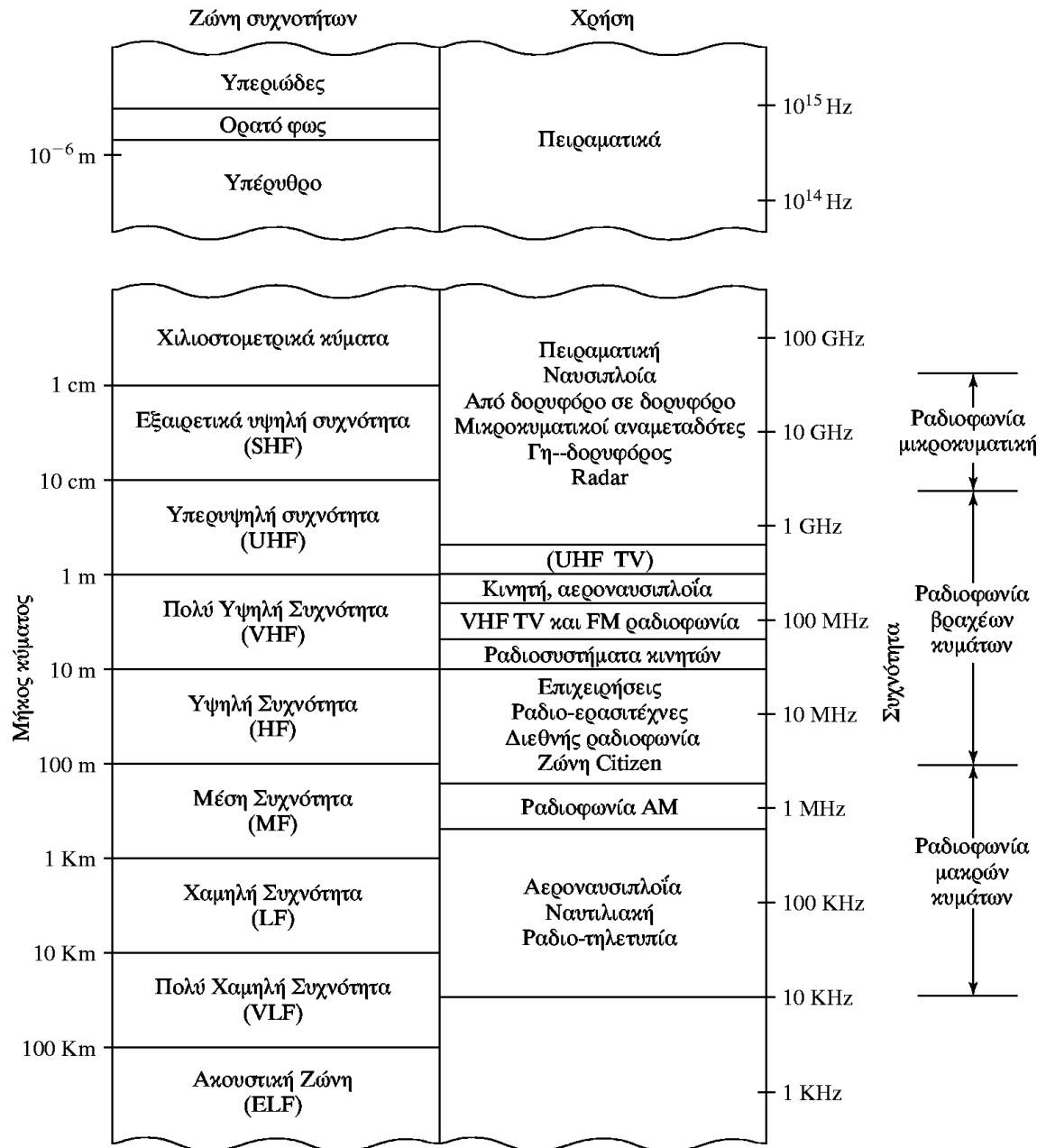
# Συχνότητες για Ασύρματα Κανάλια

Friis free space equation

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$$

Υποθέτουμε:

- $d \gg \lambda$  (far field)
- Free space
- Κεραίες TX και RX με ίδια πόλωση
- $G_t, G_r$  : Εξαρτώνται από  $\lambda$  και A (ενεργός επιφάνεια κεραίας)  $A = G \cdot (\lambda^2) / 4\pi$



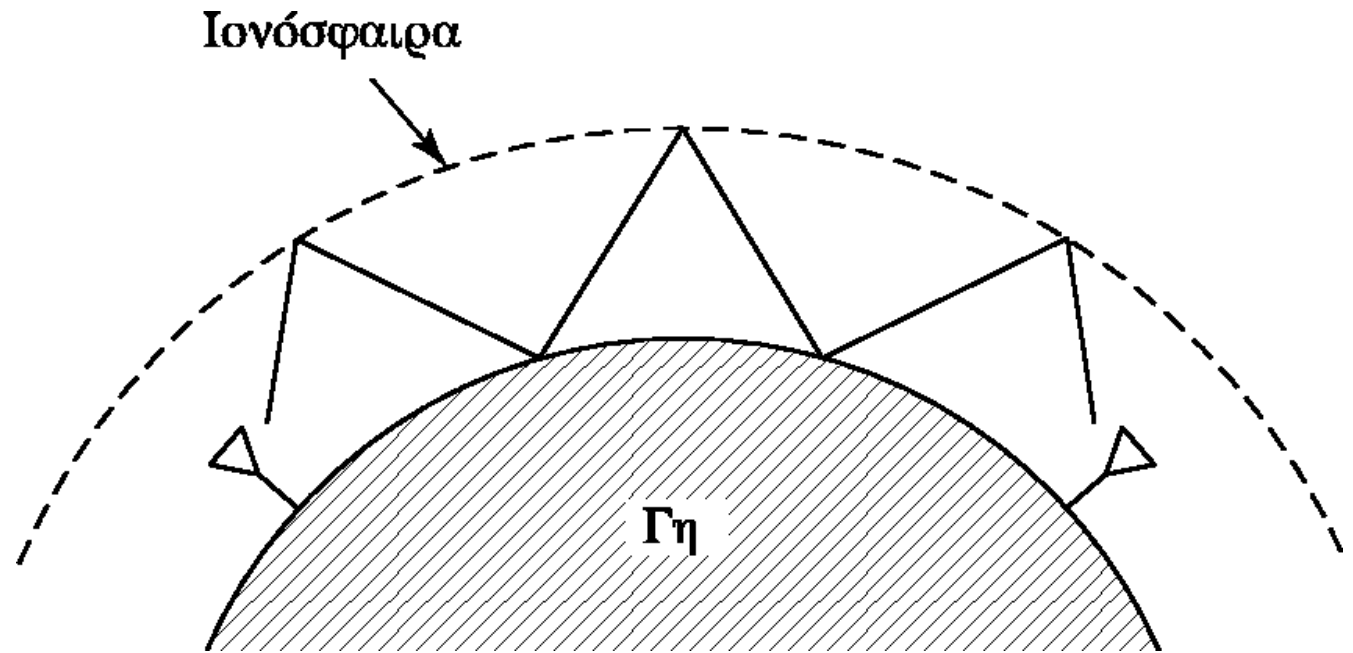
# Τρόποι Διάδοσης (1/4)

---

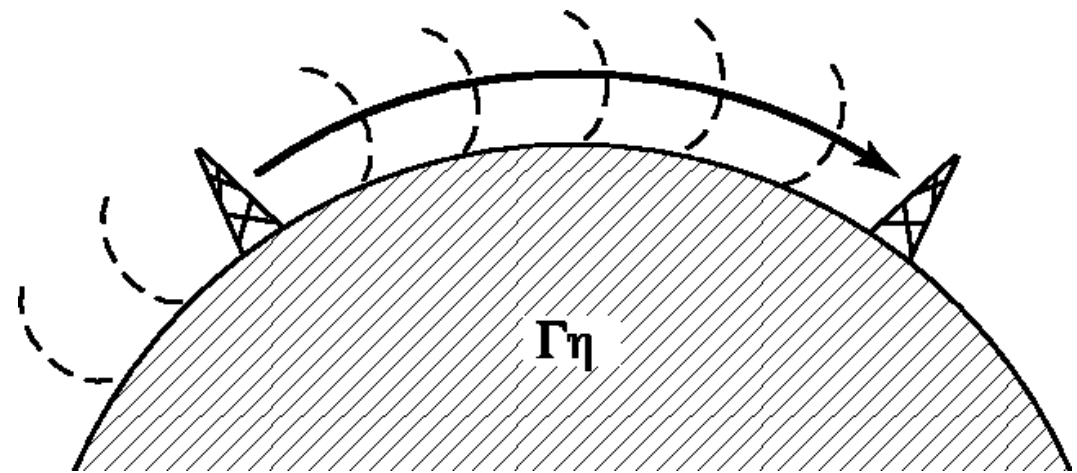
- Κυματοδήγηση μεταξύ εδάφους – ιονόσφαιρας
  - 3KHz – 30KHz (μήκος κύματος  $\sim O(10\text{Km})$  )
  - διάδοση σε πολύ μεγάλες αποστάσεις (γύρω από τη Γη!)
  - πολύ χαμηλές ταχύτητες μετάδοσης πληροφορίας
  - απαιτούνται τεράστιες κεραιές (γενικά, η κεραιά πρέπει να έχει διαστάσεις τουλάχιστον το 1/10 του  $\lambda$ )
- Εδαφικό κύμα (Ground wave, Surface wave)
  - Όσο μεγαλύτερη η αγωγιμότητα του εδάφους τόσο μεγαλύτερη απόσταση διανύει
  - 30KHz – 3MHz (μήκος κύματος  $\sim O(100\text{m})$  )
  - Απόσταση  $\sim 100\text{-}200\text{ Km}$
- Κύμα χώρου (Sky wave)
  - Διάδοση με ανάκλαση στην ιονόσφαιρα (σε ύψος 50-500Km)
  - 3MHz – 30MHz (μήκος κύματος  $\sim O(10\text{m})$  )
  - Απόσταση έως 500 Km (καλύτερες συνθήκες τη νύχτα)

# Τρόποι Διάδοσης (2/4)

- Κυματοδότηση



- Διάδοση εδαφικού κύματος





# Τρόποι Διάδοσης (3/4)

---

- Τροποσφαιρική διάδοση
  - σκέδαση (scattering) στις μεγάλες συγκεντρώσεις σωματιδίων της τροπόσφαιρας
  - 30MHz – 300MHz (μήκος κύματος  $\sim$  0(1m) )
- Διάδοση οπτικής επαφής (Line-of-Sight, LOS)
  - Ο κύριος τρόπος διάδοσης στη μικροκυματική περιοχή
  - Η κάλυψη περιορίζεται (πλην των εμποδίων) και από την καμπυλότητα της Γής.
  - Ακτίνα κάλυψης:  $d(\text{Km})=5 \sqrt{h(\text{m})}$ ,  $h(\text{m})$ : ύψος κεραίας σε μέτρα
  - «HM» ακτίνα Γής =  $(4/3)R$
- Διάδοση μέσω μετεωριτών (Meteor burst communications)
  - Η διάδοση επιτυγχάνεται με ανάκλαση σε περιοχές που ιονίζονται λόγω διέλευσης μετεωριτών (σε ύψος 80-120Km)
  - 20MHz – 500MHz (data sent in bursts)
  - τηλεμετρικές εφαρμογές

# Τρόποι Διάδοσης (4/4)

- Η ιδιαίτερη περίπτωση των κινητών επικοινωνιών

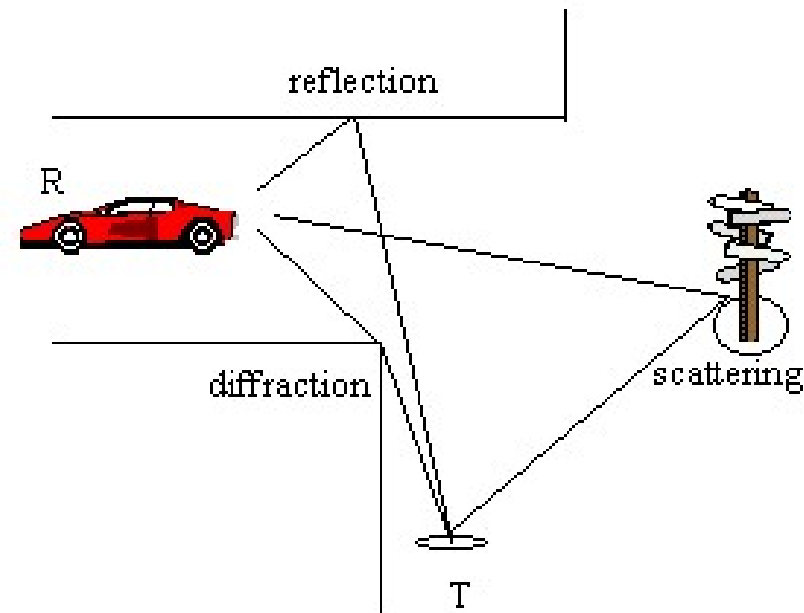
- Μηχανισμοί διάδοσης:

- > LOS (Line-of-Sight)

- > Ανάκλαση (reflection)

- > Περίθλαση (diffraction)

- > Σκέδαση (scattering)



- Φαινόμενα μεγάλης και μικρής κλίμακας

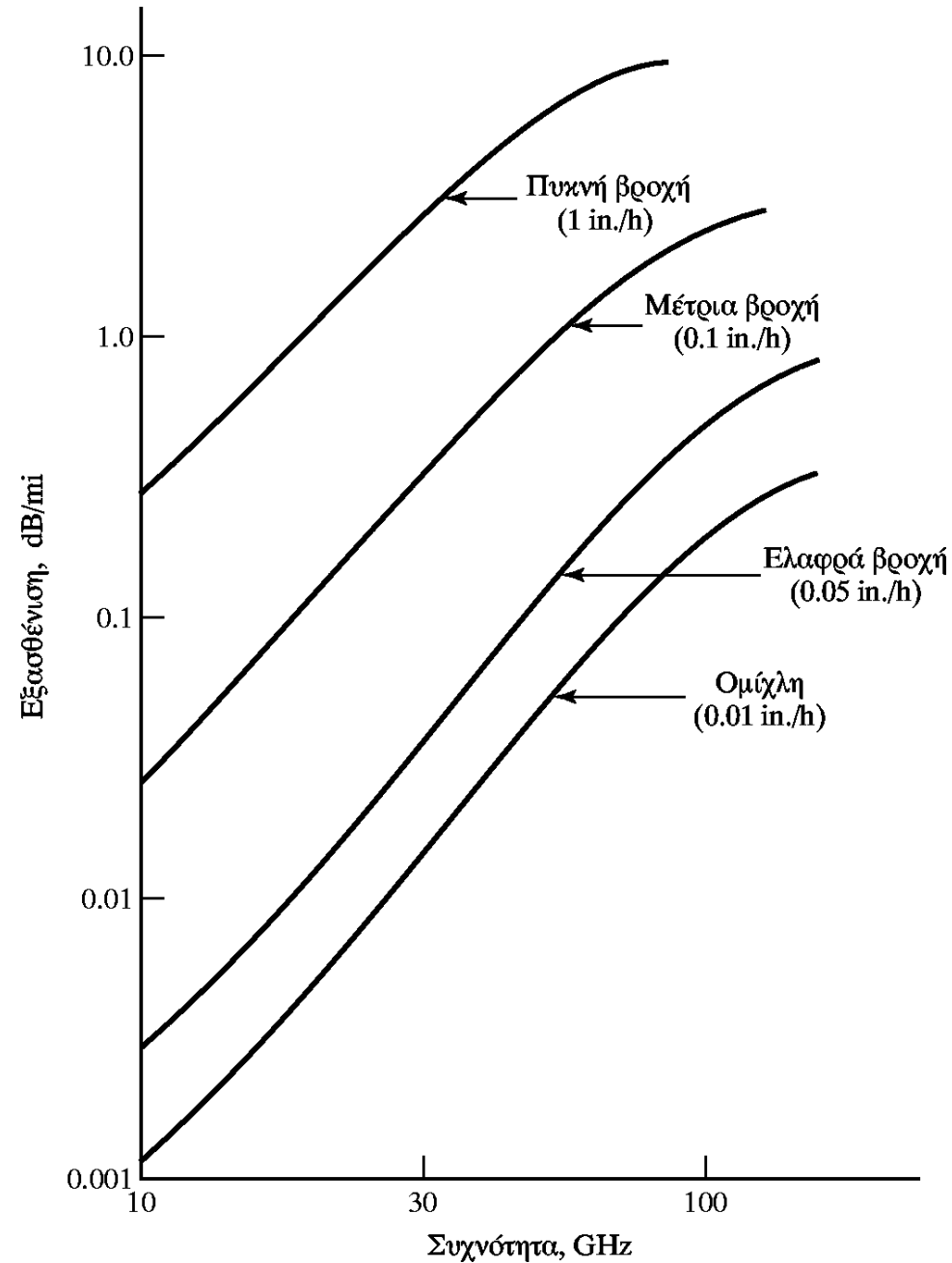
# Παράγοντες υποβάθμισης

---

Στην ασύρματη διάδοση:

- Θερμικός θόρυβος στα ηλεκτρονικά συστήματα του δέκτη
- Άλλα είδη θορύβων, π.χ. «κοσμικός θόρυβος» (ήλιος, quasars, pulsars, Big Bang noise, κλπ)
- Ατμοσφαιρικές συνθήκες
- Πολυδρομική διάδοση (τοπογραφία)
- Παρεμβολές από άλλες πηγές (χρήστες)

# Εξασθένηση λόγω Βροχόπτωσης



# Τρέχουσες και μελλοντικές εξελίξεις

---

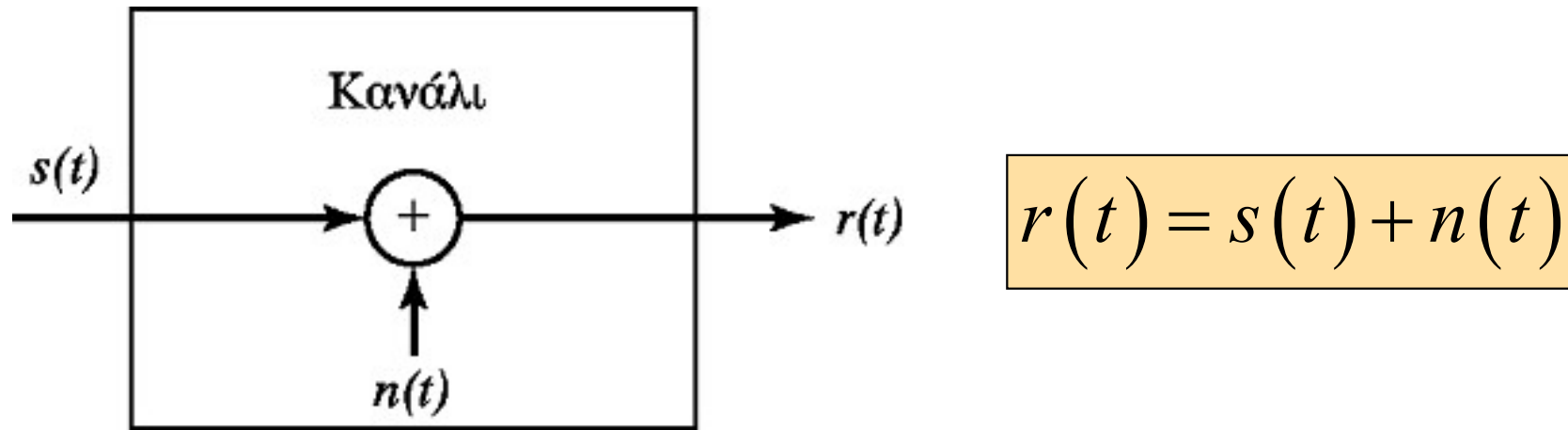
- Από τις Μικροκυματικές Επικοινωνίες ...
- ... στις επικοινωνίες mmWave (30GHz – 300GHz)
- αλλά και σε επικοινωνίες στο μικρόκοσμο (μοριακές επικοινωνίες)
- Ετερογενή ασύρματα γνωσιακά δίκτυα
- ML for COM & COM for ML

# Μαθηματικά Μοντέλα Καναλιών

---

- Όπως είδαμε οι τρόποι επικοινωνίας και τα μέσα μετάδοσης ποικίλουν
- Ανεξάρτητα από το μέσο μετάδοσης, τα περισσότερα κανάλια εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά
- Περιγράφονται από κάποια **βασικά μαθηματικά μοντέλα**
- **Πώς προέκυψαν** τα μαθηματικά μοντέλα;
  - παρατηρώντας το φυσικό μέσο διάδοσης (**model based**)
  - κάνοντας συστηματικές μετρήσεις σε αυτό (**data driven**)
- Με βάση το μαθηματικό μοντέλο του καναλιού, σχεδιάζονται και τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος
- Βασικά Μαθηματικά Μοντέλα:
  - κανάλι προσθετικού θορύβου
  - κανάλι γραμμικού φίλτρου
  - κανάλι χρονικά μεταβαλλόμενου γραμμικού φίλτρου
  - παραμετρικό μοντέλο
- Ιδιαίτερα δύσκολα είναι τα μη γραμμικά κανάλια

# Κανάλι Προσθετικού Θορύβου



- Το απλούστερο και πιο γενικό μοντέλο καναλιού
- Το εκπεμπόμενο σήμα υποβαθμίζεται μόνο από :  
προσθετικό λευκό θόρυβο με κατανομή Gauss  
(Additive White Gaussian Noise, AWGN)

# Κανάλι Προσθετικού Θορύβου

---

## Λευκός Θόρυβος:

- Είναι μια θεμελιώδης τυχαία διαδικασία που εμφανίζεται σε πολλές περιπτώσεις.
- Μία τυχαία (και Ασθενώς Στάσιμη) διαδικασία καλείται λευκή αν η συνάρτηση αυτο-συνδιασποράς της είναι η  $\sigma^2\delta(t)$
- Ισοδύναμα αυτό σημαίνει ότι:
- **Η πυκνότητα φάσματος ισχύος είναι μία σταθερά.**
  
- Στο μοντέλο καναλιού AWGN ο θόρυβος είναι:
  - προσθετικός
  - λευκός
  - ανεξάρτητος του σήματος
  - μοντελοποιείται ως **Gaussian** μηδενικής μέσης τιμής (Κ.Ο.Θ.)
- **Φυσική Εξήγηση**
  - θερμικός θόρυβος από ηλεκτρονικά στοιχεία και ενισχυτές του δέκτη
  - διάφορες παρεμβολές (π.χ., από άλλους χρήστες)



# Κανάλι Προσθετικού Θορύβου (2)

---

- Όταν το κανάλι εισάγει εξασθένηση, το μοντέλο τροποποιείται ως

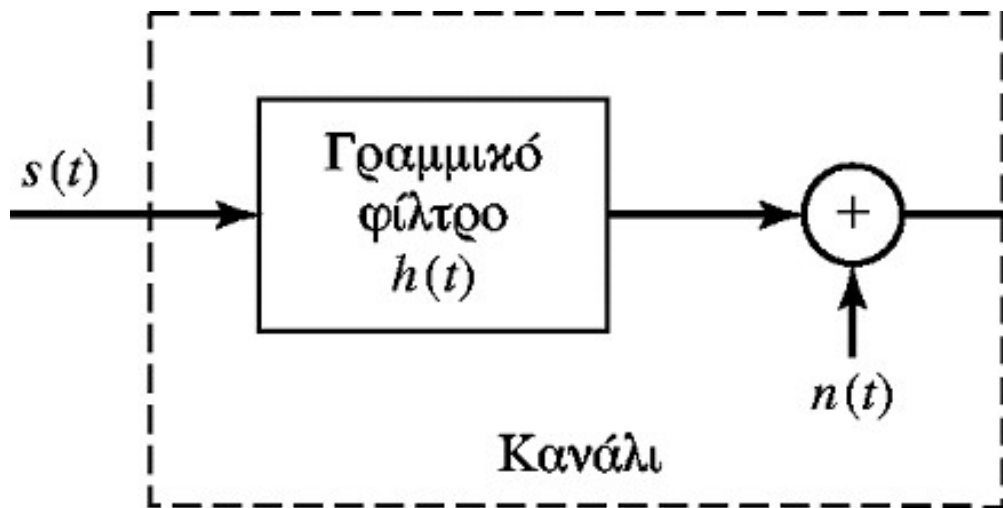
$$r(t) = as(t) + n(t)$$

- όπου  $a < 1$  είναι η εξασθένηση του καναλιού (είναι τ.μ.)
- η παράμετρος  $a$  είναι **τυχαία μεταβλητή** (στις περισσότερες περιπτώσεις)

- SNR in dB:  $10 \log_{10} \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}}$

- $P_{\text{signal}} = a^2 P_s$        $P_{\text{noise}} = \sigma^2$

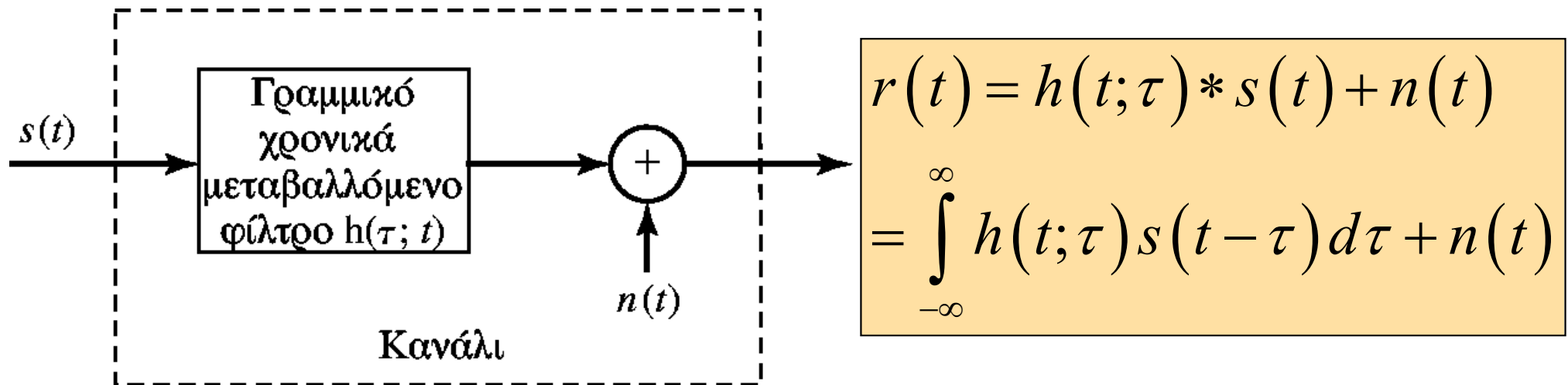
# Το Κανάλι ως Γραμμικό Σύστημα



$$r(t) = h(t) * s(t) + n(t)$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) s(t - \tau) d\tau + n(t)$$

- Λόγω των ιδιοτήτων του καναλιού, εισάγεται παραμόρφωση πλάτους και φάσης στα πλαίσια της ζώνης διέλευσης.
- Επίσης, χρησιμοποιούνται φίλτρα για να περιορίσουν το εύρος ζώνης του σήματος στο εύρος ζώνης του καναλιού και για να μορφοποιήσουν τον αποσπελλόμενο παλμό
- Έτσι, γενικά, αρκετά κανάλια μοντελοποιούνται ως γραμμικά συστήματα με απόκριση  $h(t)$ . Επιπλέον, στην έξοδο του συστήματος (δηλ. του καναλιού) εισάγεται και θόρυβος (AWGN)
- Πολυπλοκότερα μοντέλα: **Μη-Γραμμικά**

# Το Κανάλι ως Χρον. Μεταβ. Γραμ. Συστ.



- Πολλά φυσικά κανάλια μεταβάλλονται χρονικά λόγω:
  - πολύδρομης διάδοσης
  - σχετικής κίνησης πομπού-δέκτη
  - αλλαγών στο μέσο (ασύρματο ή ενσύρματο)
- Σε κάθε χρονική στιγμή  $t$  το κανάλι χαρακτηρίζεται από μια διαφορετική κρουστική απόκριση  $h(\tau)$
- Το κανάλι περιγράφεται πλήρως από την  $h(t; \tau)$

# Παραμετρικό Μοντέλο Καναλιού (1)

---

- Στο μοντέλο χρονικά μεταβαλλόμενου γραμμικού φίλτρου το κανάλι περιγράφεται από την κρουστική του απόκριση. Ακολουθεί ένας διαφορετικός τρόπος περιγραφής κατάλληλος για πολυδρομικά κανάλια (**multipath channels**)
- Εφαρμόζεται συχνά σε κανάλια πολύδρομης μετάδοσης, π.χ.
  - ιονοσφαιρικό ( $f > 30\text{MHz}$ ),
  - Μικροκυματικά ραδιοκανάλια στην κινητή κυψελωτή τηλεφωνία,
- θεωρούμε ότι το σήμα ακολουθεί  $L$  διαδρομές (μονοπάτια)
- Κάθε μονοπάτι
  - έχει διαφορετική εξασθένιση  $a_k(t)$ 
    - » χρονικά μεταβαλλόμενη
  - και χρονική καθυστέρηση  $\tau_k$ 
    - » συνήθως χρονικά σταθερή ή αργά μεταβαλλόμενη

# Παραμετρικό Μοντέλο Καναλιού (2)

---

- Κρουστική απόκριση καναλιού (παραμετρική έκφραση)

$$h(t; \tau) = \sum_{k=1}^L a_k(t) \delta(\tau - \tau_k)$$

- Λαμβανόμενο σήμα

$$r(t) = \sum_{k=1}^L a_k(t) s(t - \tau_k) + n(t)$$