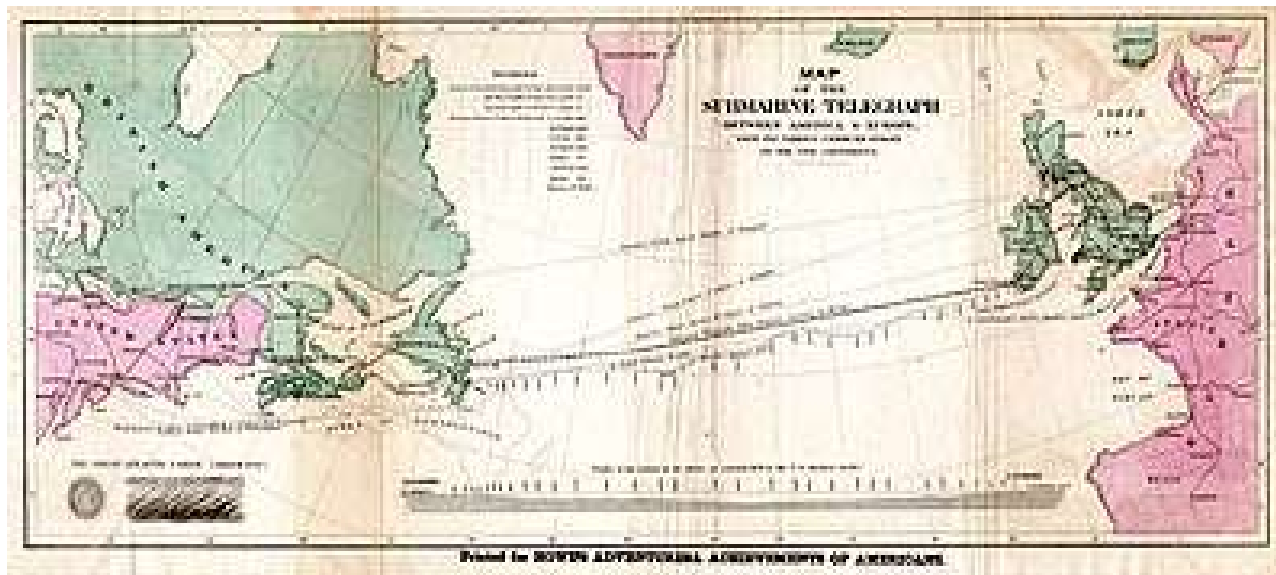


# Ψηφιακές Τηλεπικοινωνίες

*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

---

- 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)

## 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;

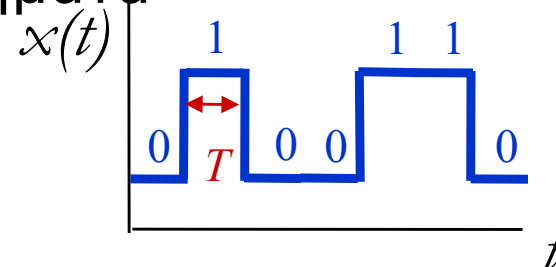
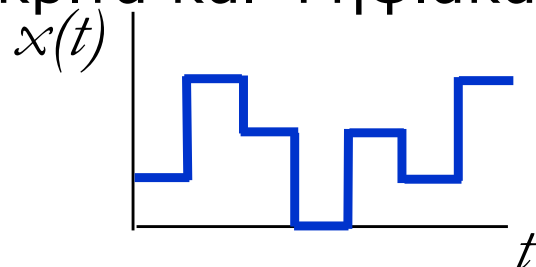
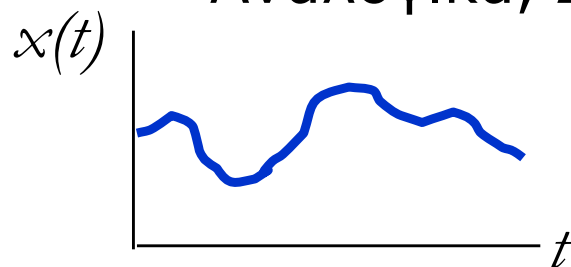
---

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

# Είδη Τηλ/κων Συστημάτων

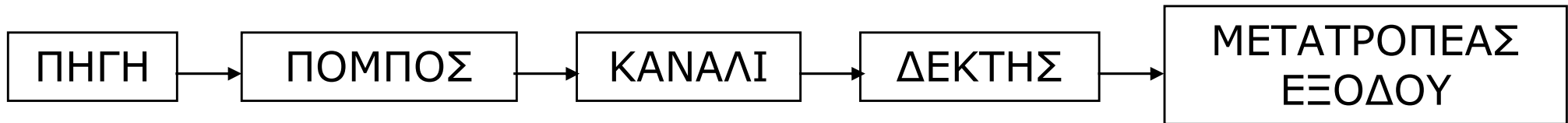
- Τηλεπικοινωνιακά συστήματα
  - » πολλά διαφορετικά συστήματα (from molecule to deep space)
  - » πολλοί διαφορετικοί τύποι πληροφορίας
- Σχεδιαστικές προκλήσεις σε θέματα
  - » υλικού
  - » επεξεργασίας
- Αναπαράσταση πληροφορίας
  - » αναλογικά σήματα
  - » σύμβολα

- 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;**

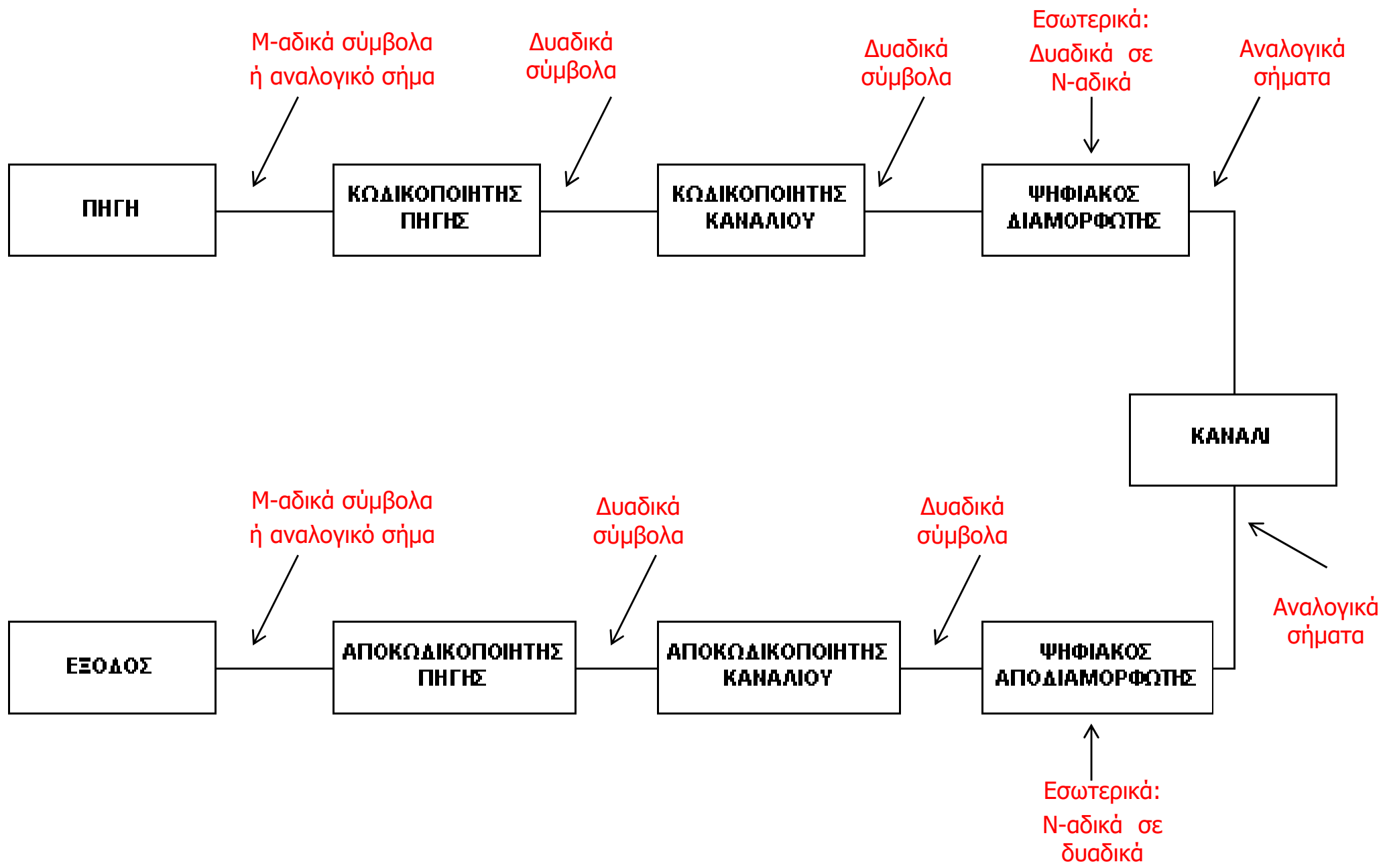
- **Αν μεταδίδουμε με ρυθμό  $R < C$  τότε υπάρχει τρόπος ώστε να μεταδώσουμε χωρίς σφάλματα, παρά την ύπαρξη θορύβου!!!**

# Βασικά Σημεία για τα Τηλ/κα Συστ.

---

- Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα 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 (για δεδομένα: εύρος ζώνης, ισχύ μετάδοσης, ρυθμό)
- Ο ρυθμός μετάδοσης πάνω από ενθόρυβα κανάλια έχει ένα θεμελιώδες όριο χωρητικότητας ακόμη κι αν διατεθεί άπειρο εύρος ζώνης
- *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.

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

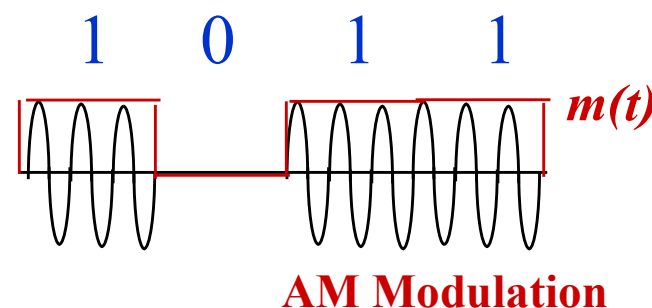
$$\cos(\omega_c t) x(t) \stackrel{FT}{\leftrightarrow} \frac{1}{2} [X(\omega - \omega_c) + X(\omega + \omega_c)]$$

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

# Διαμόρφωση και Α/Δ (2)

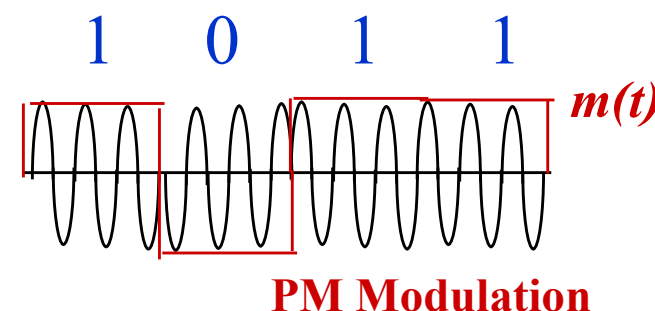
## ■ Amplitude Shift Keying (ASK)

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



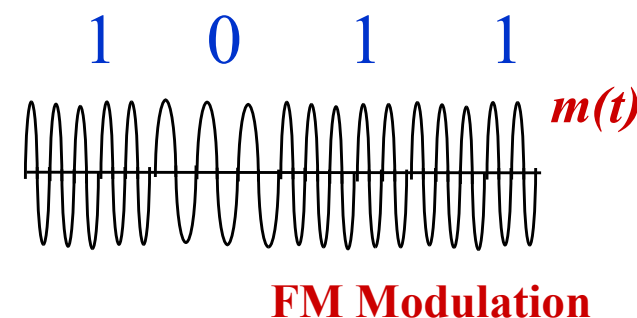
## ■ Phase Shift Keying (PSK)

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

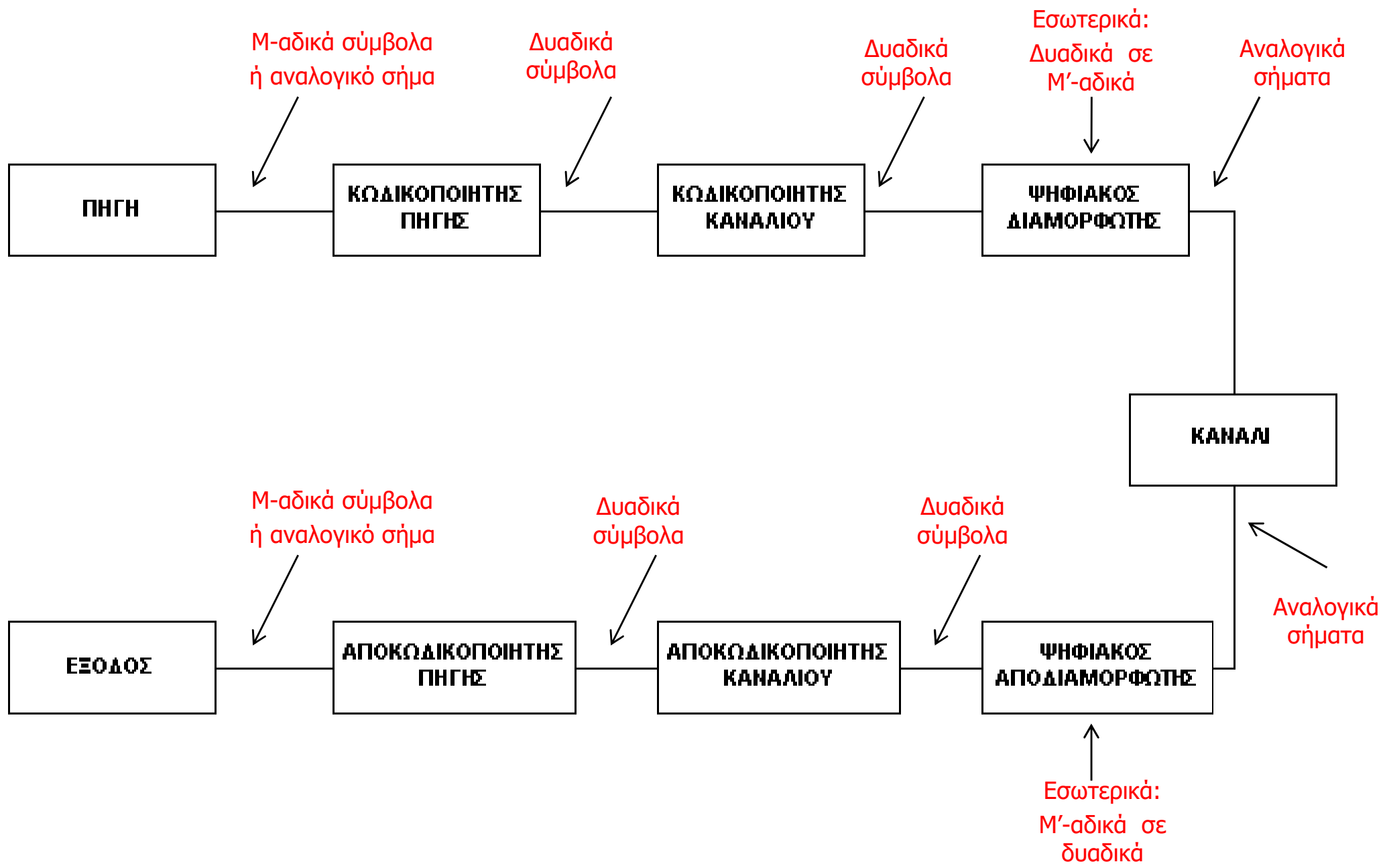


## ■ Frequency Shift Keying (FSK)

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

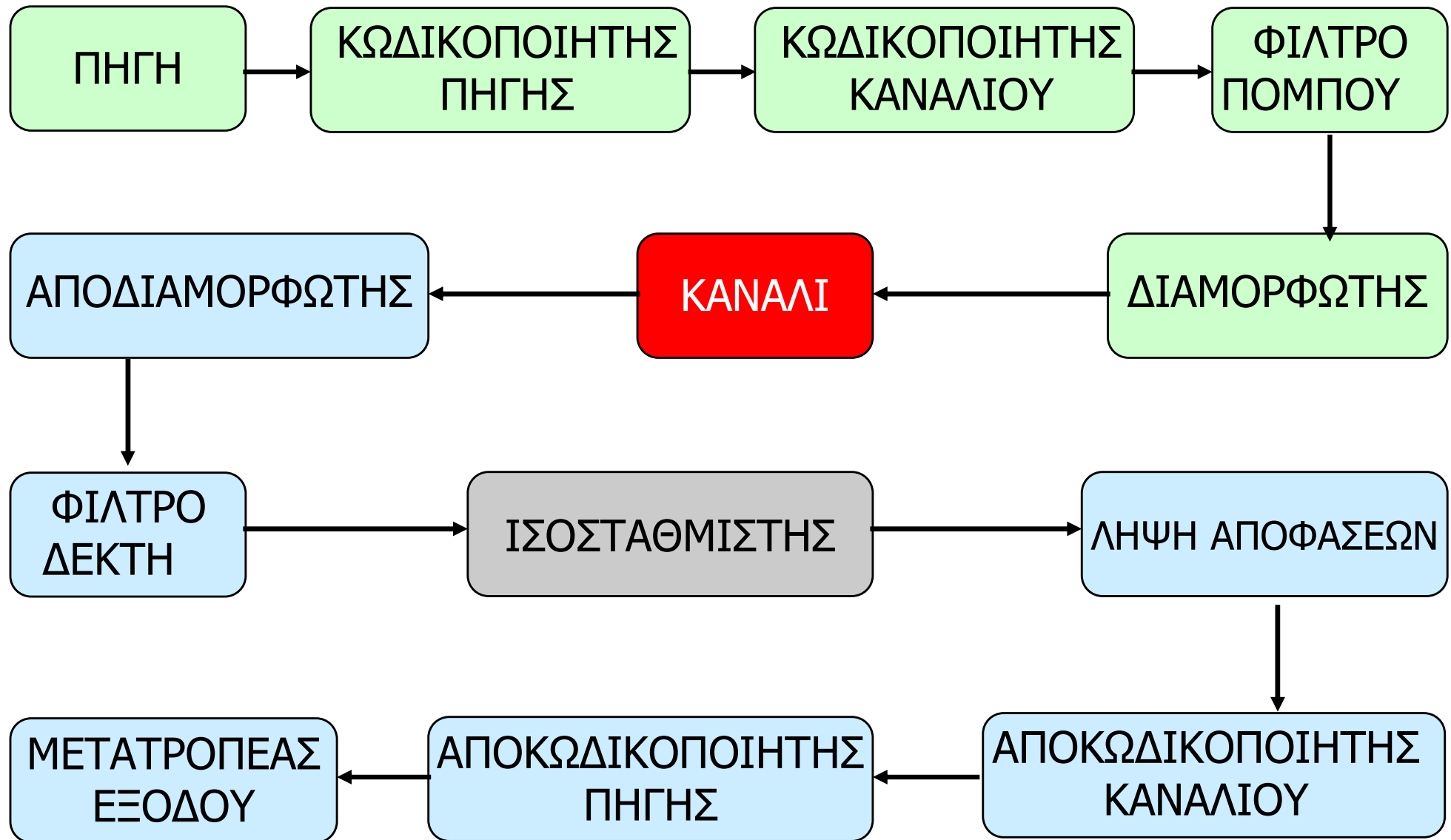


# Ψηφιακό Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα: Βασική Δομή





# 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)

# Κανάλι

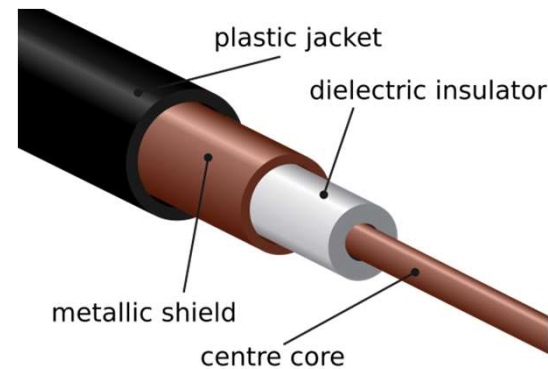
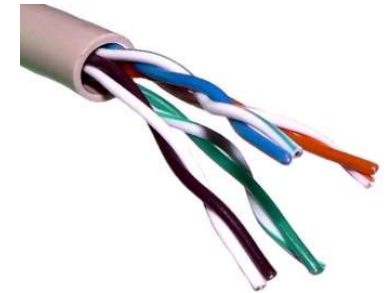
---

- 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)

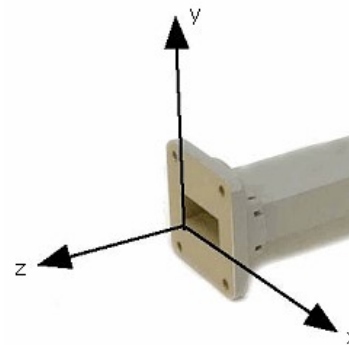
## ■ Ενσύρματα

- 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



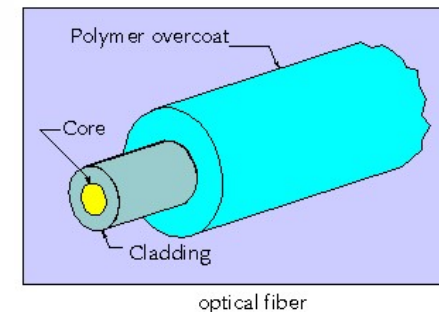
## ■ Κυματοδηγοί

- καθοδηγούμενη διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος

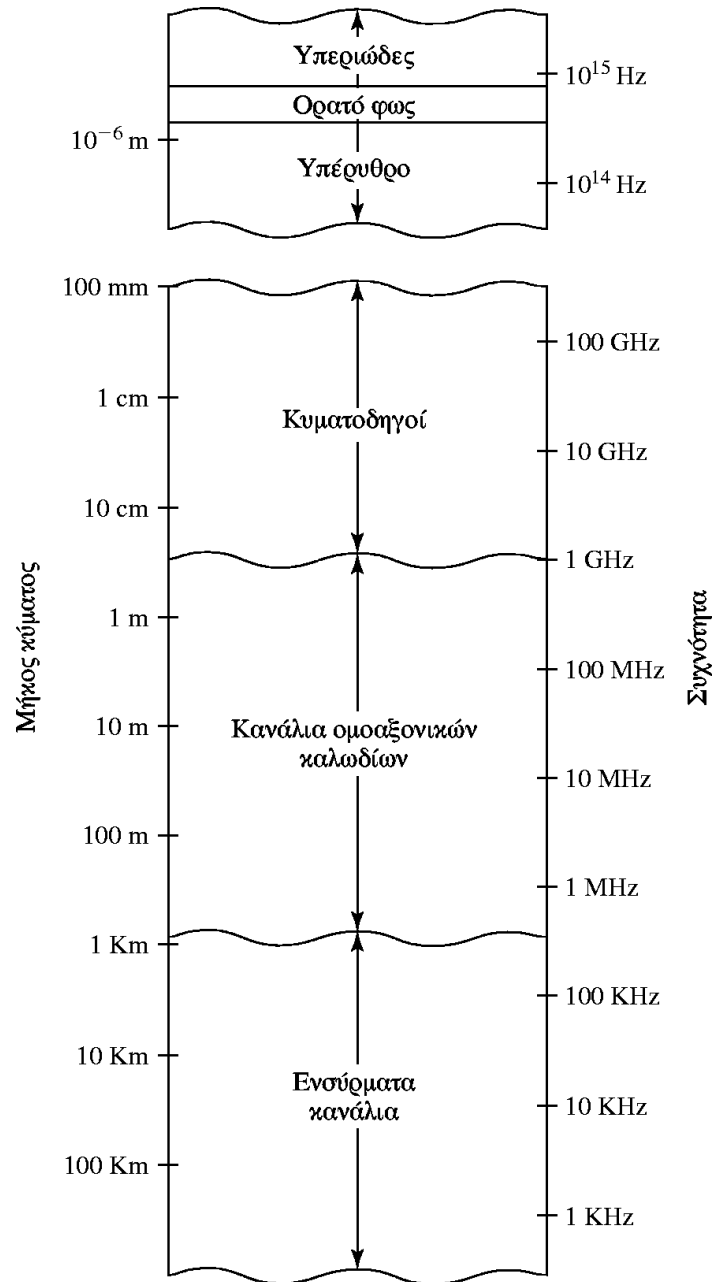


## ■ Οπτικές Ίνες

- 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)
- Υπέρυθρα, ορατού φωτός [ $f=O(10^{15})\text{ Hz}$ ] ([Optical wireless com](#))

## ■ Υποβρύχια ακουστικά κανάλια

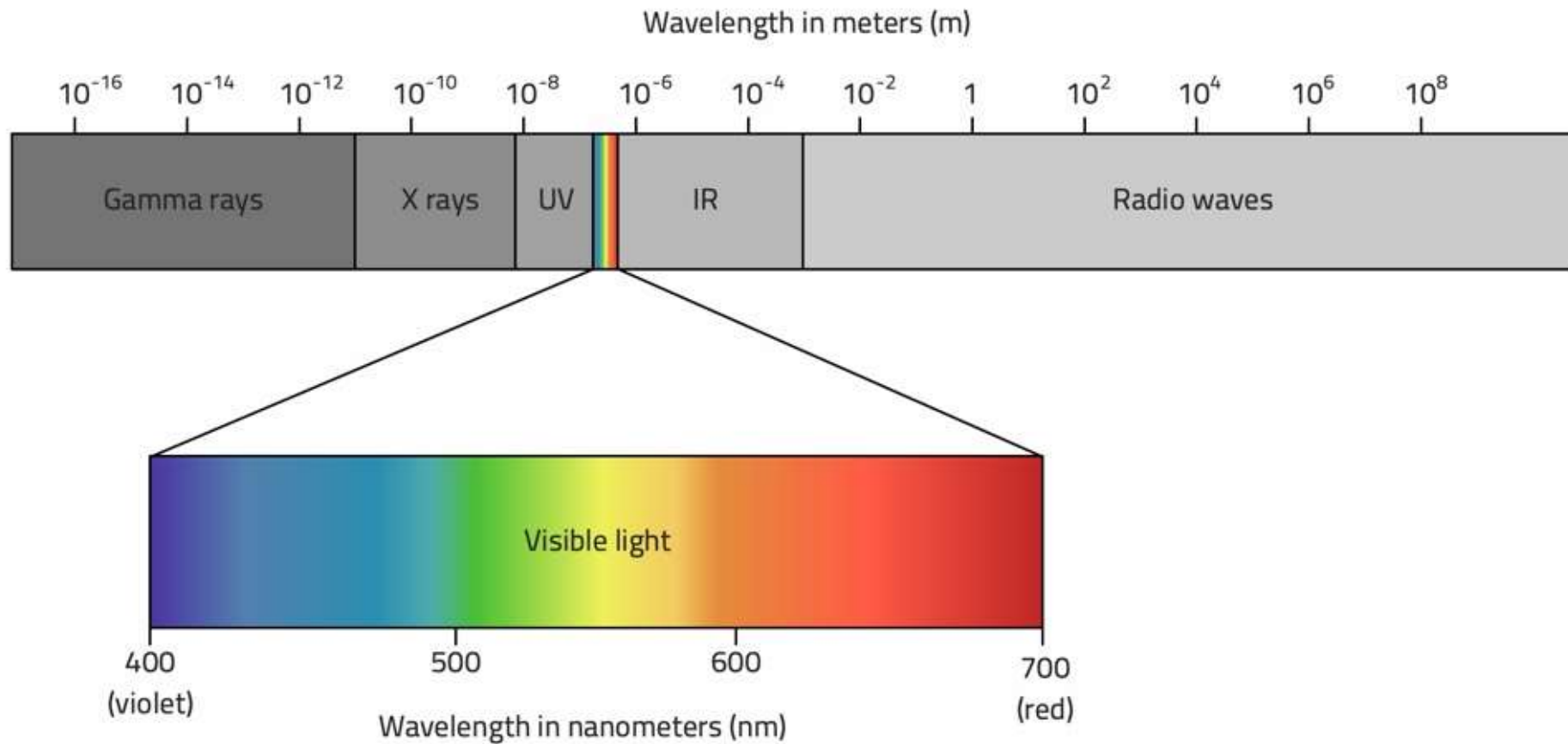
- skin depth  $\delta$  = απόσταση με απόσβεση ΗΜ κύματος κατά  $1/e$
- $\delta = 250/\text{sqrt}(f)$  (π.χ., για σήμα 1GHz  $\rightarrow \delta = \sim 8\text{mm}$ )

## ■ Κανάλια αποθήκευσης

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

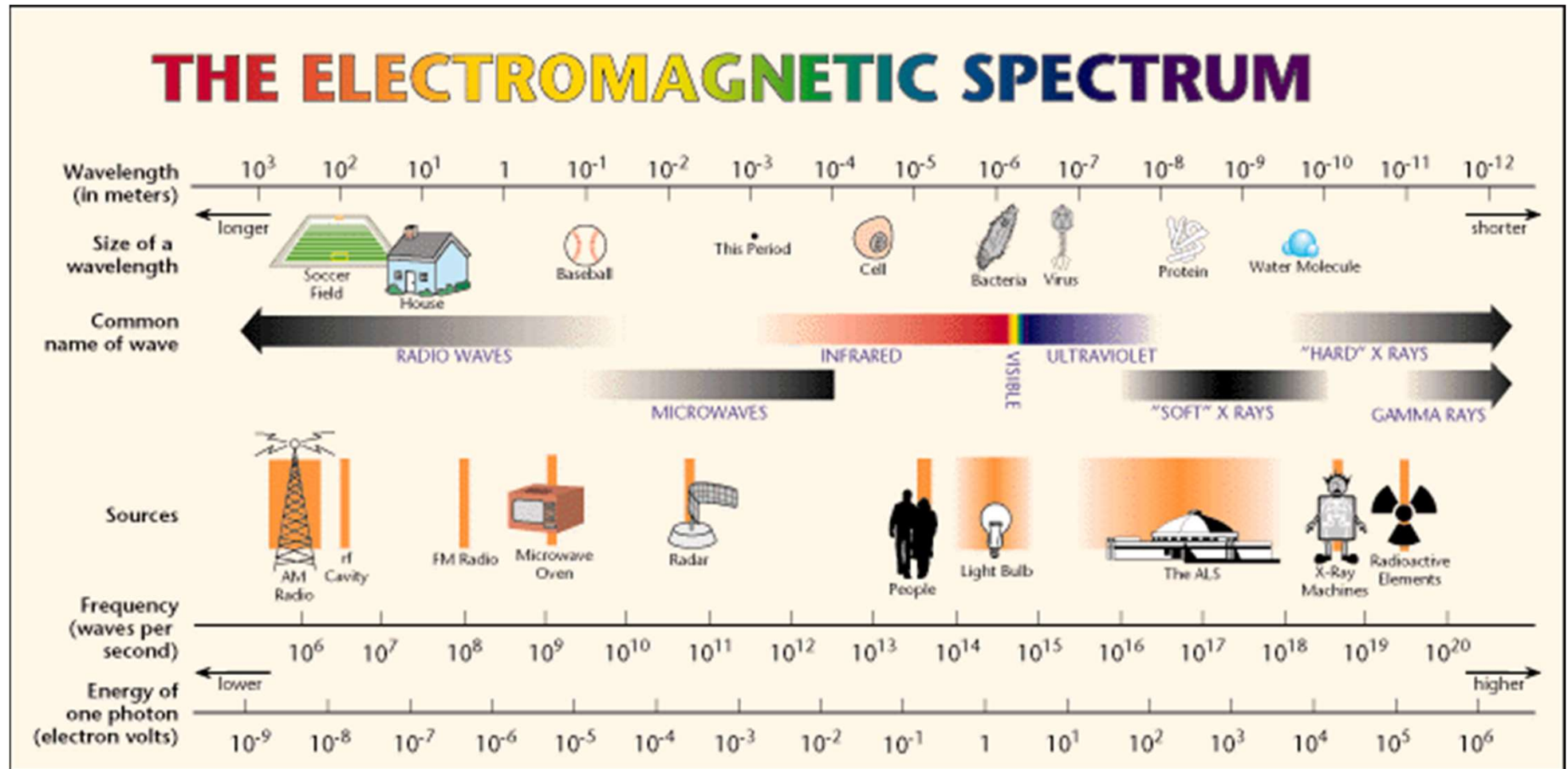
## ■ Άλλα κανάλια: power lines, deep space, κλπ.

# Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

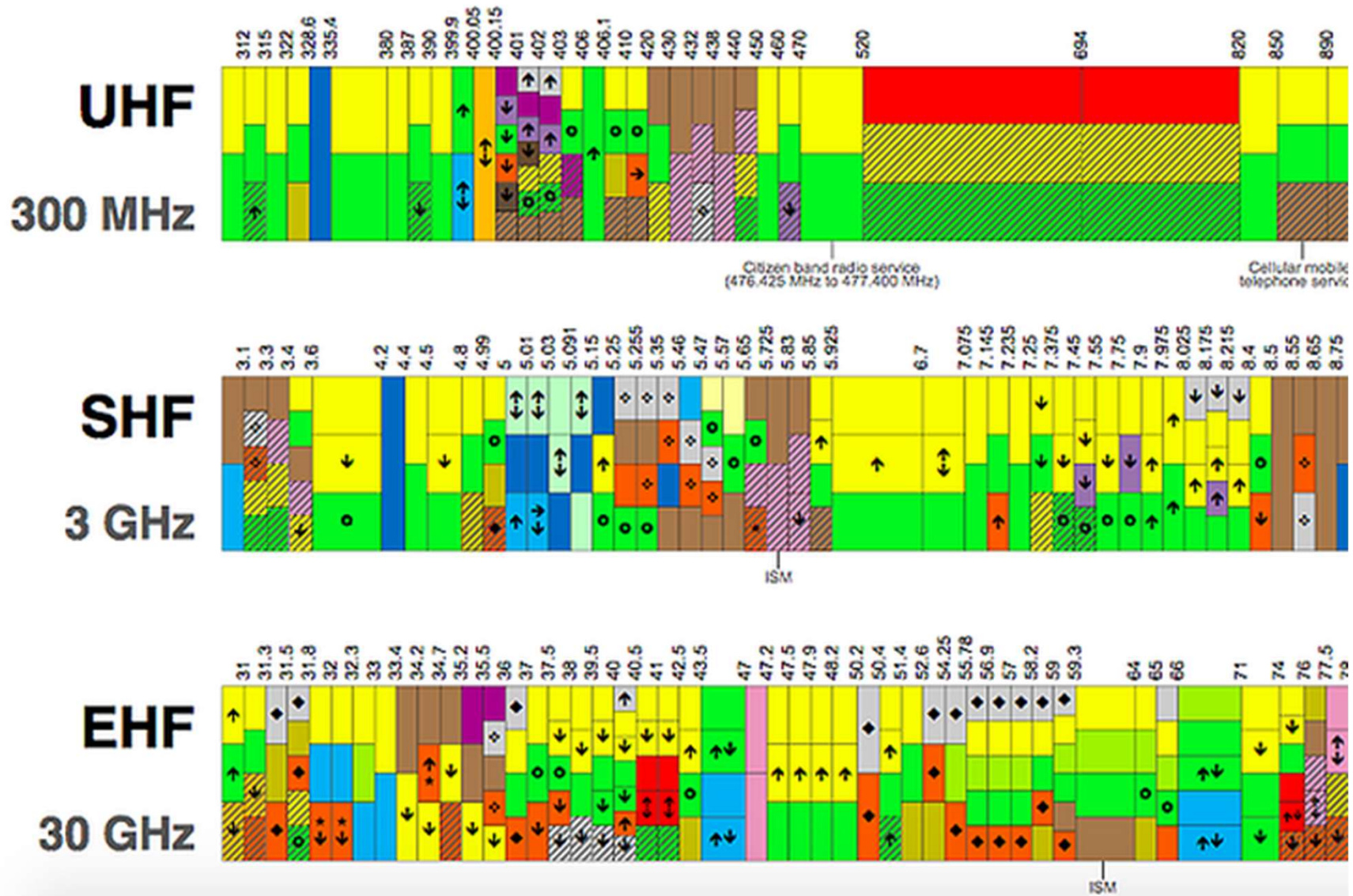




# Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα



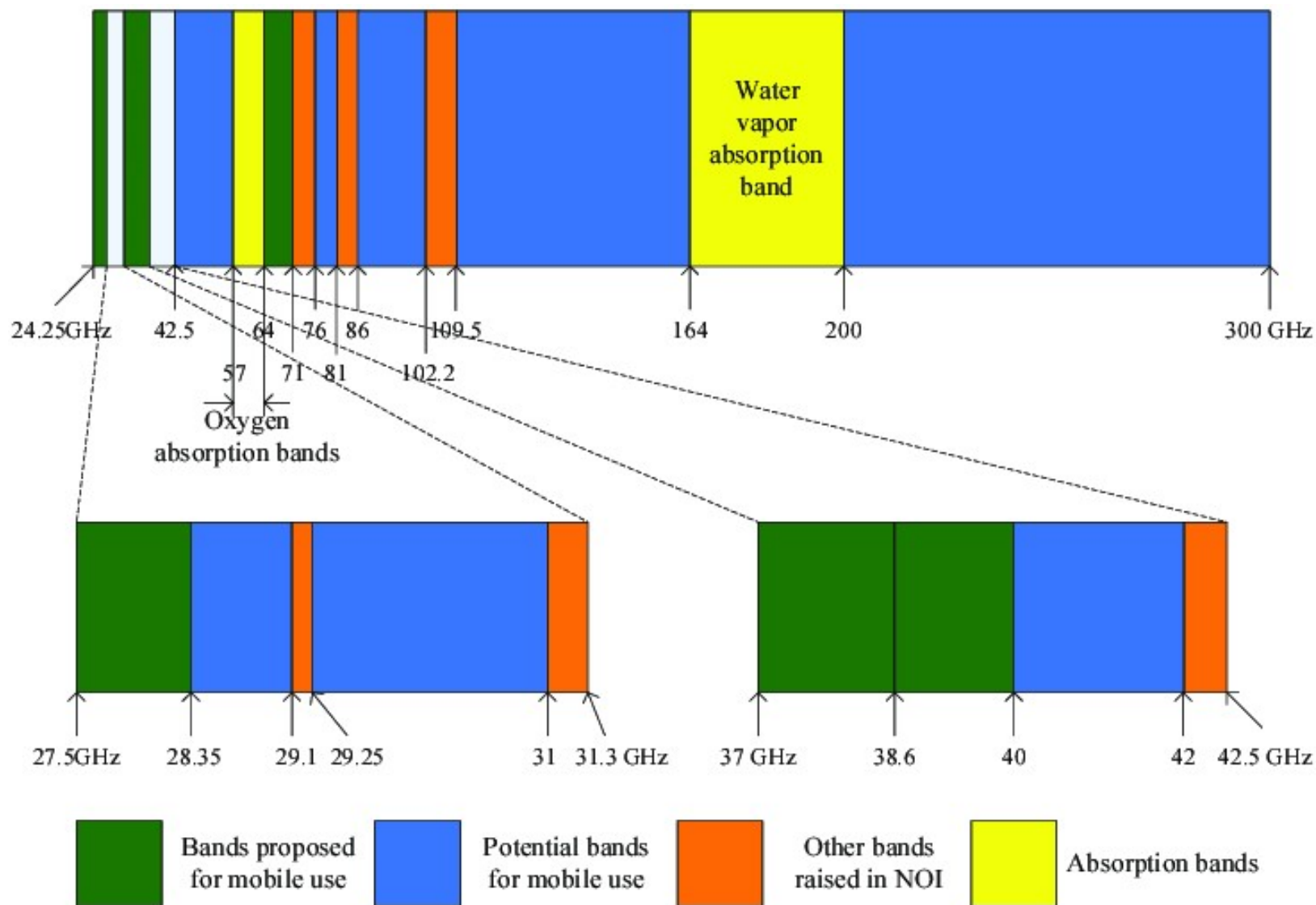
# Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα







# Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα



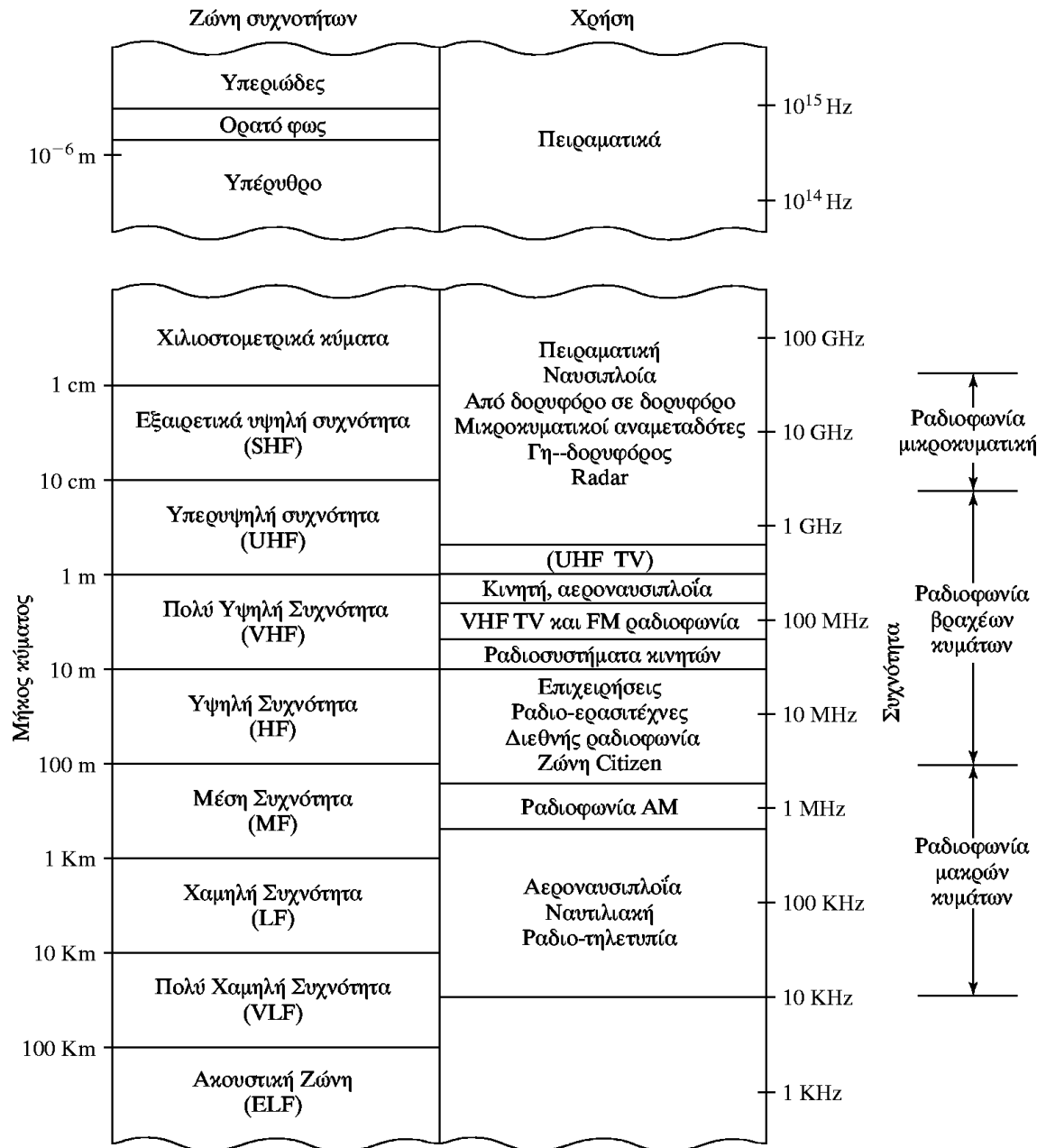
# Συχνότητες για Ασύρματα Κανάλια

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 (επιφάνεια κεραίας)



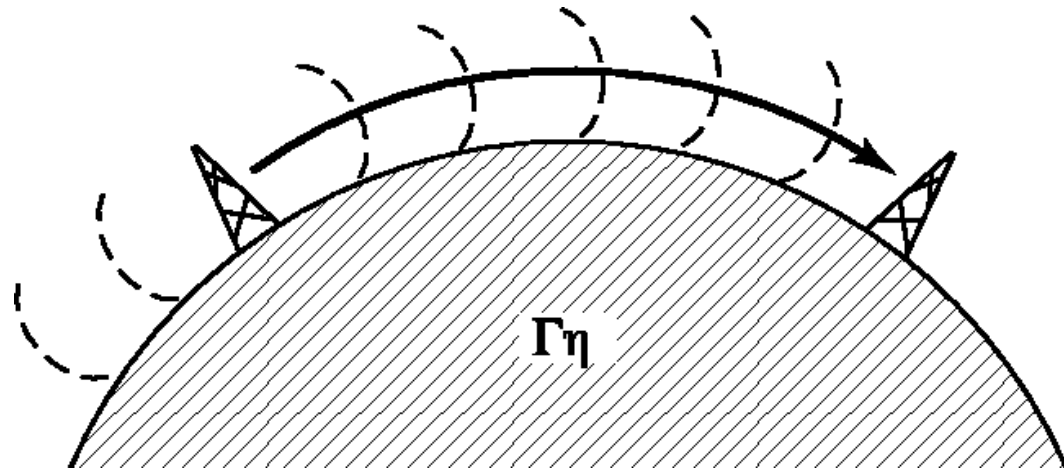
# Τρόποι Διάδοσης (1/4)

---

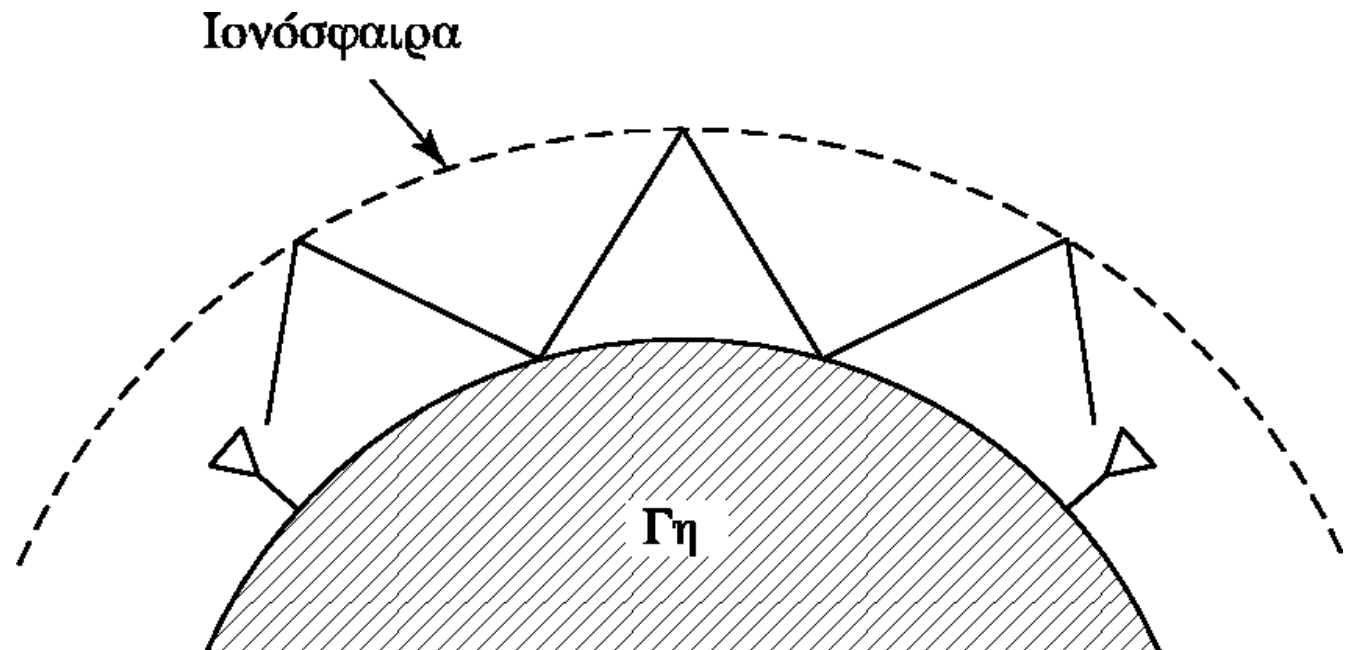
- Κυματοδήγηση μεταξύ εδάφους – ιονόσφαιρας
  - 3KHz – 30KHz (μήκος κύματος  $\sim O(10\text{Km})$  )
  - διάδοση σε πολύ μεγάλες αποστάσεις (γύρω από τη Γη!)
  - πολύ χαμηλές ταχύτητες μετάδοσης πληροφορίας
  - απαιτούνται τεράστιες κεραιές (γενικά, η κεραιά πρέπει να έχει διαστάσεις τουλάχιστον το 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)

- Διάδοση εδαφικού κύματος



- Κυματοδότηση





# 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

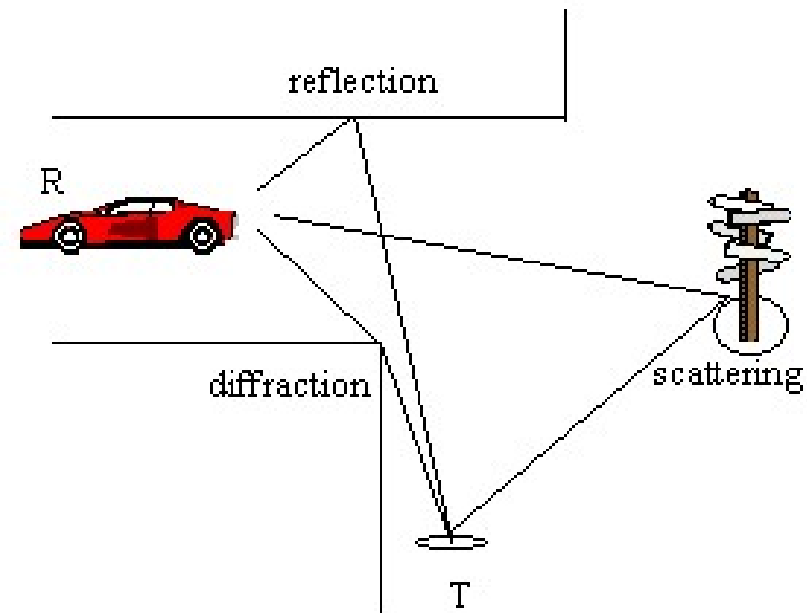
- Μηχανισμοί διάδοσης:

- > LOS (Line-of-Sight)

- > Ανάκλαση (reflection)

- > Περίθλαση (diffraction)

- > Σκέδαση (scattering)



- Φαινόμενα μεγάλης και μικρής κλίμακας

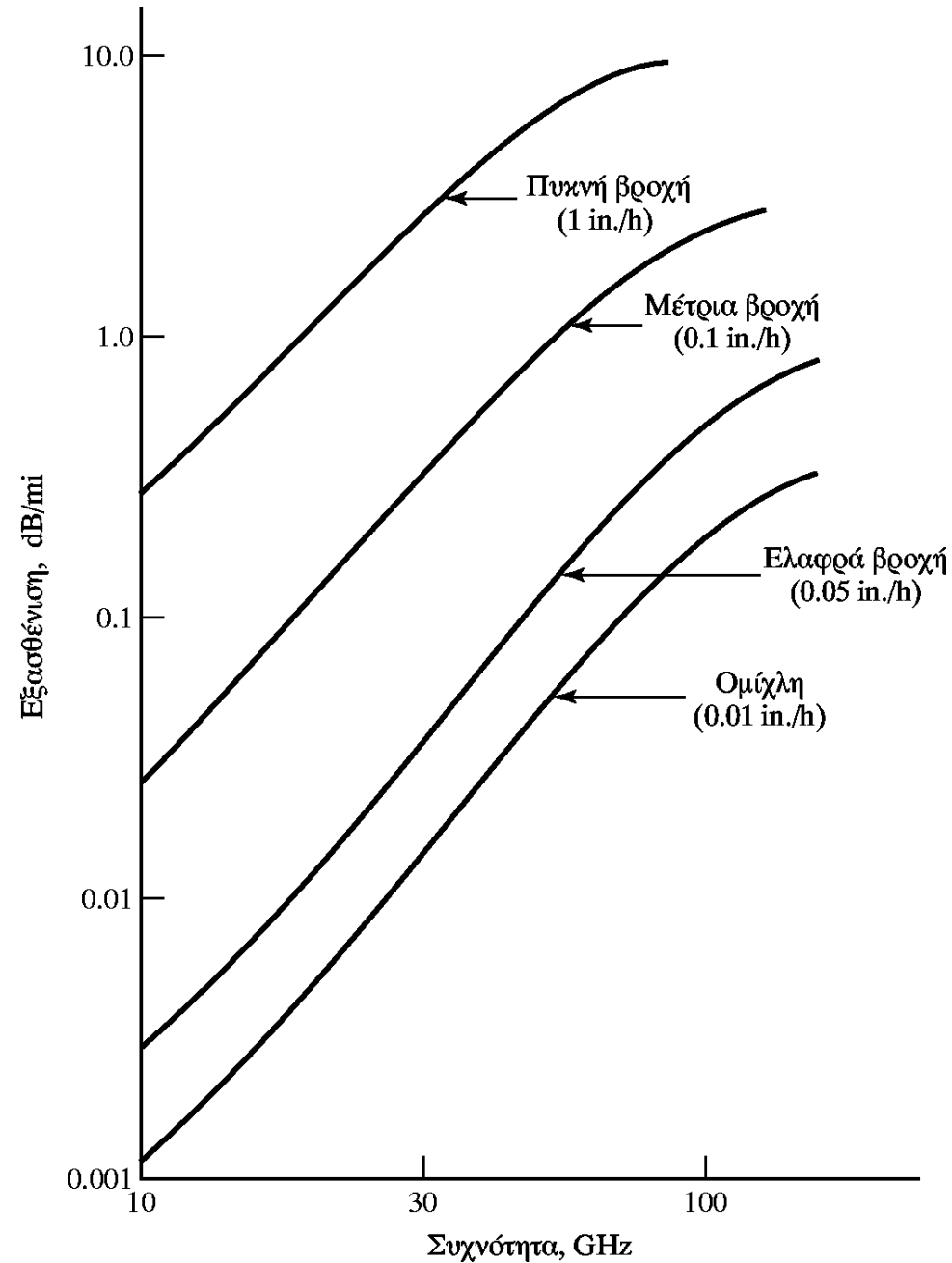
# Παράγοντες υποβάθμισης

---

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

---

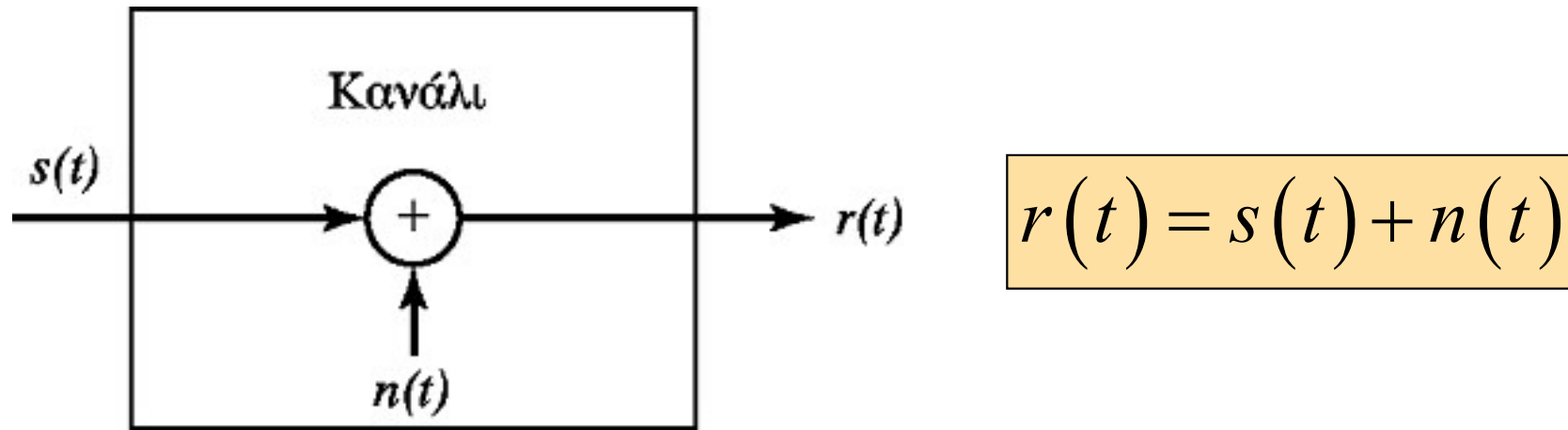
- Από τις Μικροκυματικές Επικοινωνίες ...
- ... στις επικοινωνίες mmWave (30GHz – 300GHz)
- αλλά και σε επικοινωνίες στο μικρόκοσμο (μοριακές επικοινωνίες)
- Ετερογενή ασύρματα γνωσιακά δίκτυα
- ML for COM & COM for ML

# 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
  - 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

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

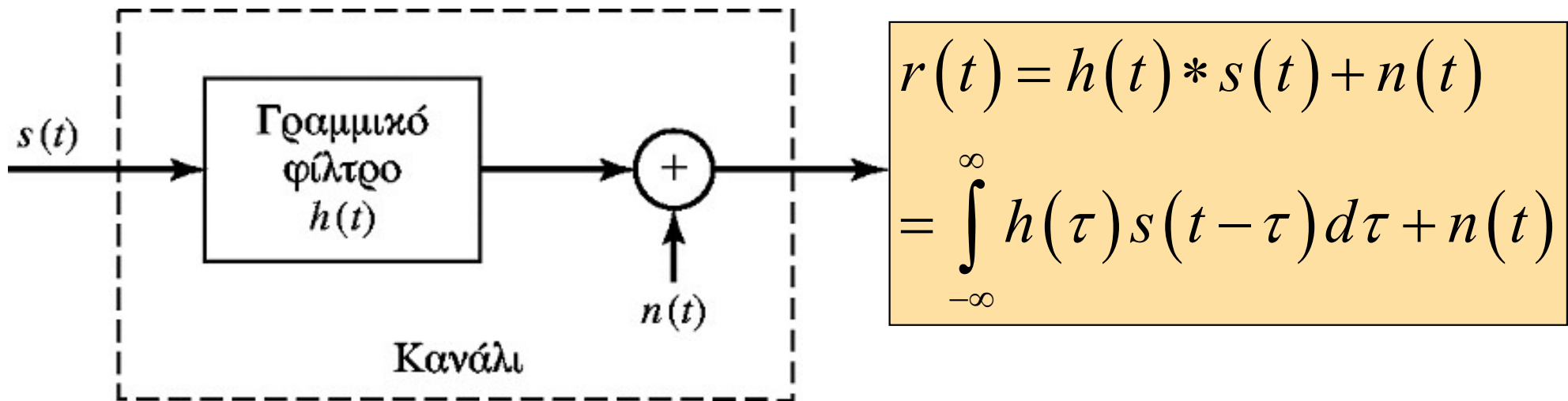
- όπου  $a < 1$  είναι η εξασθένηση του καναλιού (είναι τ.μ.)
- η παράμετρος  $a$  είναι **τυχαία μεταβλητή** (στις περισσότερες περιπτώσεις)

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

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

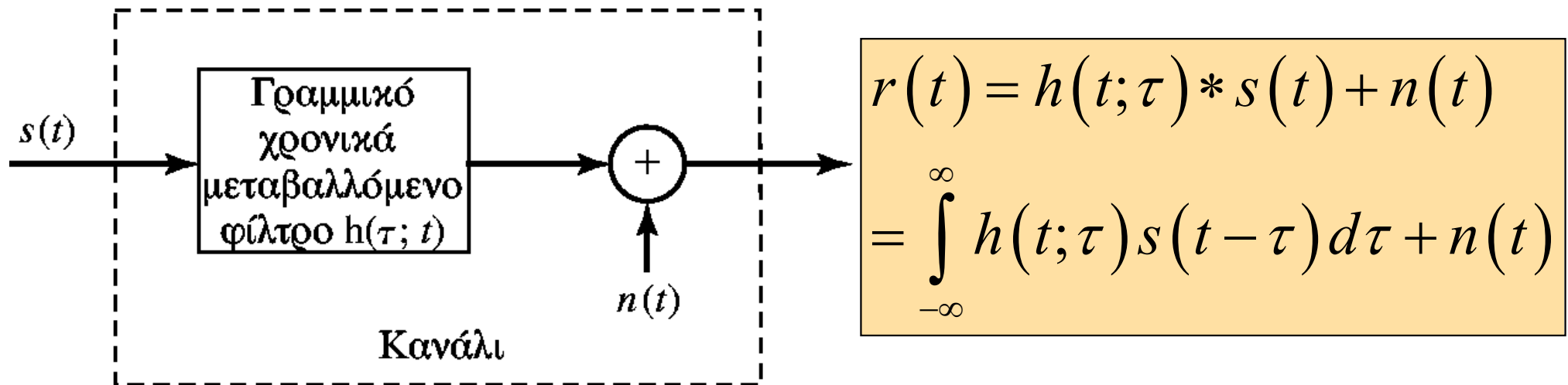


# Το Κανάλι ως Γραμμικό Σύστημα



- 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 φίλτρα με απόκριση  $h(t)$ . Επιπλέον, στην έξοδο του φίλτρου (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

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

- **Ερώτηση:** Γιατί σύμφωνα με όλα τα μοντέλα ο θόρυβος εισάγεται στο δέκτη και όχι πριν το κανάλι;