

Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα Ι

Διάλεξη 4: Κανάλια Επικοινωνιών – Η έννοια της Διαμόρφωσης

Δρ. Μιχάλης Παρασκευάς
Επίκουρος Καθηγητής

Ατζέντα

1. Κανάλια Επικοινωνίας

- Είδη καναλιών επικοινωνίας
- Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα
- Επιπτώσεις στα σήματα από τα κανάλια επικοινωνίας

2. Η έννοια της Διαμόρφωσης

- Είδη διαμόρφωσης
- Διαμόρφωση με ημιτονοειδές φέρον
- Διαμόρφωση με παλμικό φέρον
- Σύγκριση αναλογικών – ψηφιακών διαμορφώσεων
- Σύγκριση αποδιαμορφωτών - Κριτήρια επιδόσεων

3. Εισαγωγή στις Αναλογικές Διαμορφώσεις

- Διαμόρφωση Πλάτους (AM)
- Διαμόρφωση Συχνότητας (FM)
- Διαμόρφωση Φάσης (PM)

Κανάλια Επικοινωνίας

- Είδη καναλιών επικοινωνίας
- Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα
- Επιπτώσεις στα σήματα από τα κανάλια επικοινωνίας

Κανάλια Επικοινωνίας

1. Είδη καναλιών επικοινωνίας
2. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα
3. Επιπτώσεις στα σήματα από τα κανάλια επικοινωνίας

Είδη Καναλιών Επικοινωνίας (1/4)

Κανάλια καθοδηγούμενης μετάδοσης

- Συνεστραμμένα ζεύγη συρμάτων (τηλεφωνία, xDSL)
- Ομοαξονικά καλώδια (CATV)
- Οπτικές ίνες (2×10^{13} Hz)

Κανάλια ελεύθερης μετάδοσης

- Κανάλια ραδιομετάδοσης (radio, TV, WLAN)
- Κανάλια κινητών επικοινωνιών (GSM, UMTS)
- Δορυφορικά κανάλια

Γραμμικά – μη γραμμικά

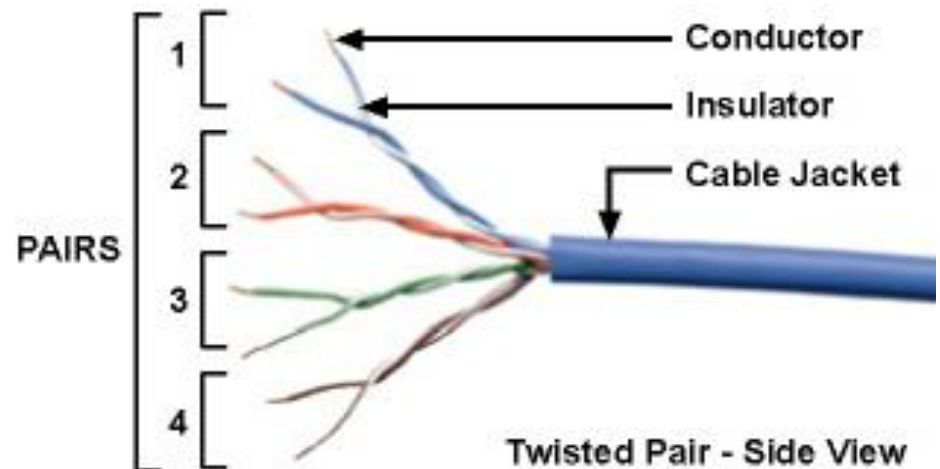
Χρονικά αμετάβλητα – χρονικά μεταβαλλόμενα

Με περιορισμό ισχύος – με περιορισμό φάσματος



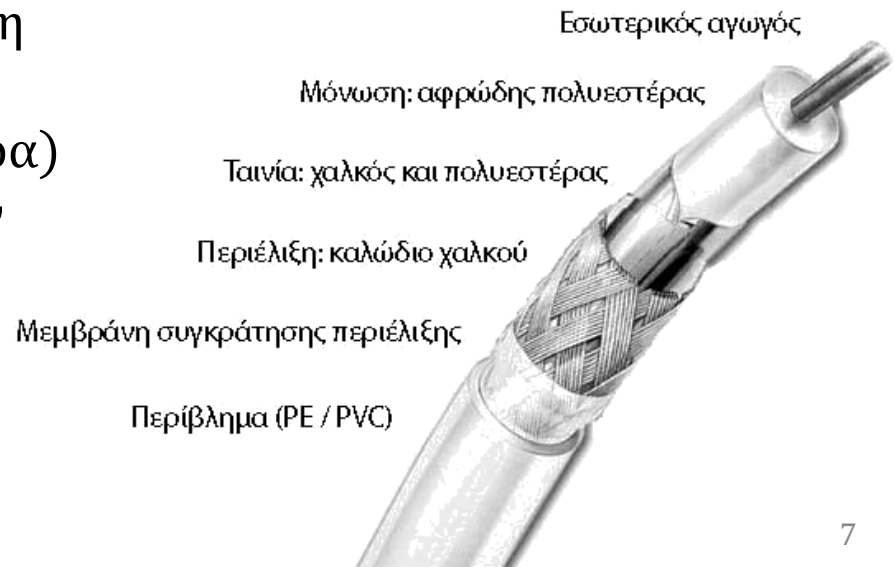
Τηλεφωνικό Κανάλι

- Ευρέως διαδεδομένο
- Κανάλι περιορισμένου εύρους ζώνης (300 Hz – 3100 Hz)
- Έχει μεγάλη απόσβεση στις υψηλότερες συχνότητες
- Ευάλωτο σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και συνακροάσεις
- Υλοποίηση με συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων ($Z_0 = 90 - 110 \text{ Ohms}$)
- Η τεχνολογία xDSL χρησιμοποιεί αυτά τα καλώδια
- Συνδέσεις point-to-point



Ομοαξονικό καλώδιο

- Έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων (μέχρι και 1 GHz).
- Αρκετά ανθεκτικό στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- Υλοποίηση με έναν εσωτερικό και έναν κυλινδρικό εξωτερικό αγωγό που χωρίζονται με διηλεκτρικό υλικό ($Z_0 = 50$ ή 75 Ohms).
- Υποστηρίζει συνδέσεις point-to-point άλλα και point-to-multipoint (MA).
- Χρησιμοποιείται στην καλωδιακή τηλεόραση (CATV) για τη μετάδοση τηλεοπτικών και ραδιοφωνικών προγραμμάτων, καθώς (παλαιότερα) και σε τοπικά δίκτυα υπολογιστών (LAN).



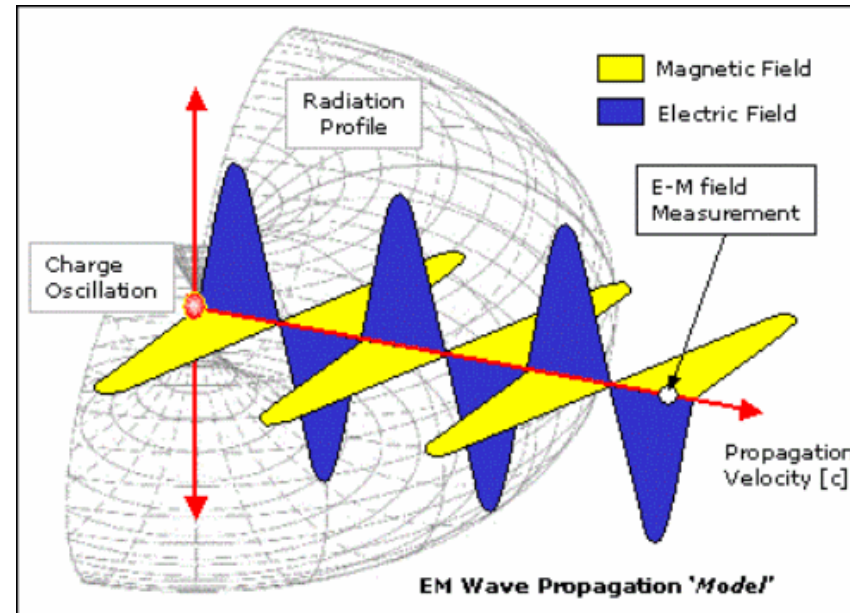
Οπτική ίνα

- Αποτελείται από ένα υάλινο κεντρικό πυρήνα περιβαλλόμενο από επένδυση με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά και ένα προστατευτικό εξωτερικό στρώμα.
- Τεράστιο εύρος ζώνης συχνοτήτων (μέχρι $2 \times 10^{13} \text{ Hz}$).
- Μικρή απόσβεση $\Rightarrow$ επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων.
- Αναισθησία στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- Μικρό μέγεθος και βάρος, ανθεκτικότητα, ευελιξία.
- Ανεξάντλητη πρώτη ύλη (άμμος).



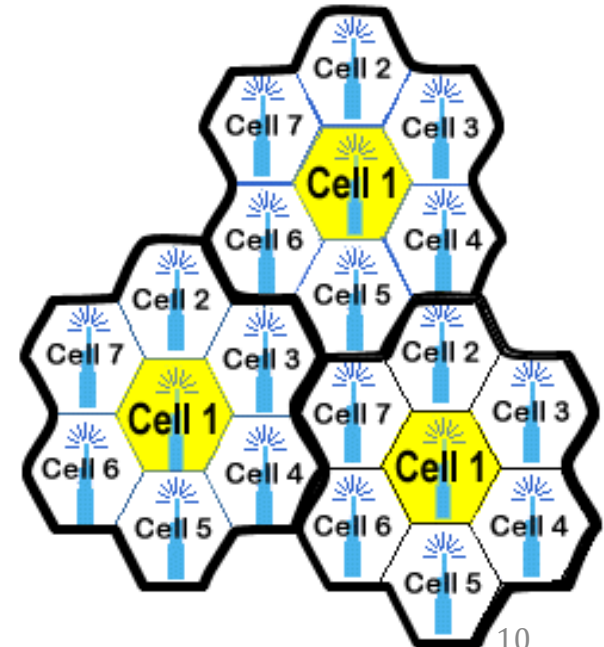
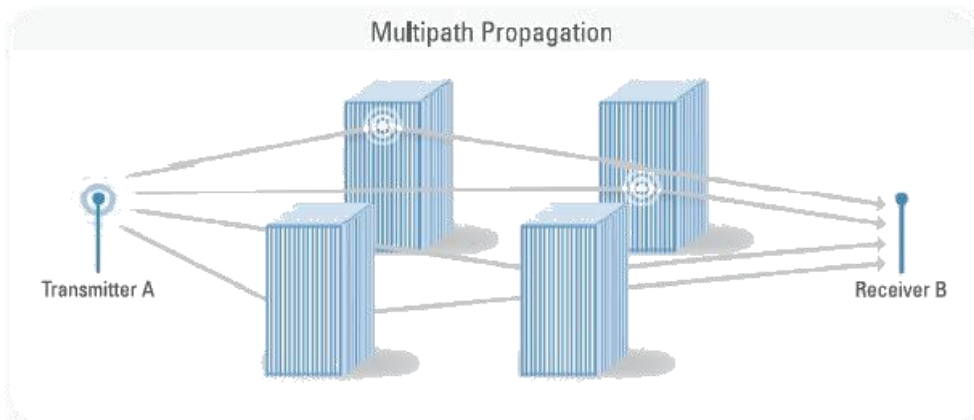
Ασύρματο κανάλι εκπομπής

- Εύρος ζώνης συχνοτήτων ανάλογο του σήματος και της διαμόρφωσης:
 - 20 KHz AM (Διαμόρφωση πλάτους)
 - 100 ή 200 KHz FM (Διαμόρφωση συχνότητας)
 - 4 – 6 MHz TV
- Υπερετερόδυνοι δέκτες για αποδιαμόρφωση.
- Κεραίες σε υψηλά σημεία, ισχυροί πομποί, φθηνοί και απλοί δέκτες.
- Επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων (ανάκλαση, περίθλαση).



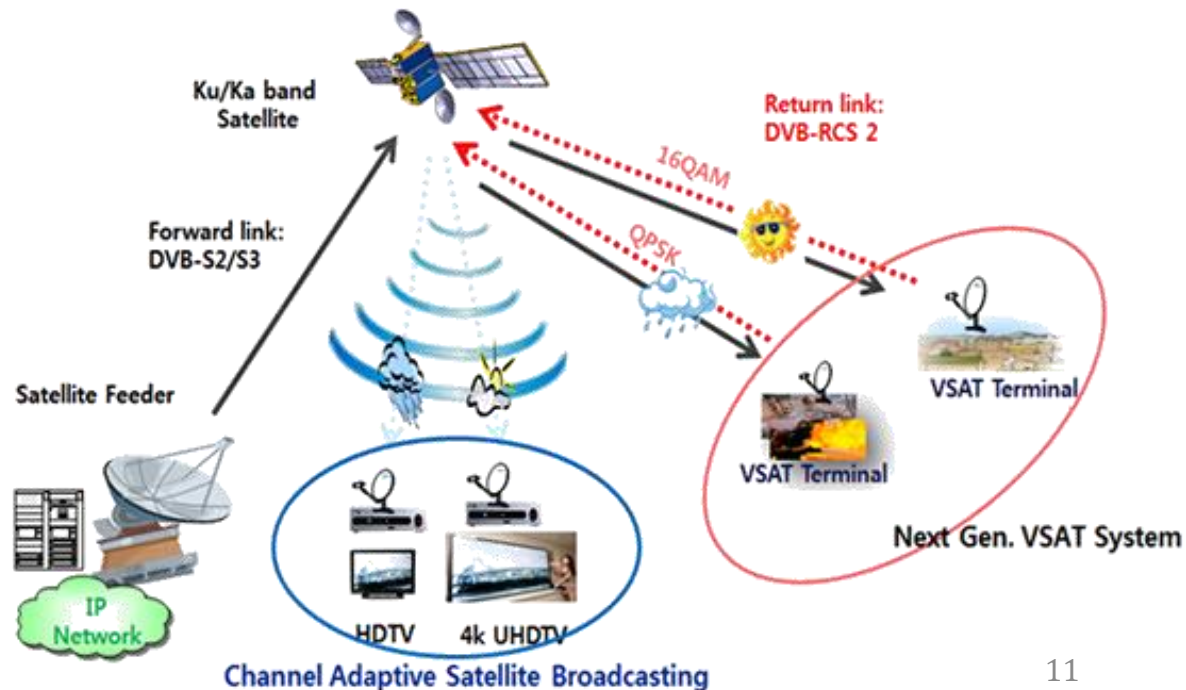
Κανάλια κινητών επικοινωνιών

- Κυψελωτές Επικοινωνίες – [Cellular Communications](#)
- Επίγεια κανάλια ασύρματης επικοινωνίας με κινητούς πομπούς και δέκτες.
- Δεν είναι πάντοτε δυνατή η οπτική επαφή πομπού και δέκτη.
- Η [σκέδαση](#) των Η/Μ κυμάτων προκαλεί [πολυδιάδρομη μετάδοση](#).
- Το κανάλι θεωρείται γραμμικό χρονικά μεταβαλλόμενο.



Δορυφορικά κανάλια

- Δορυφορικές Επικοινωνίες – [Satellite Communications](#)
- Κάλυψη πολύ μεγάλων περιοχών της Γης (σε [γεωστατική τροχιά](#) – 36.000 Km).
- Μεγάλο εύρος φάσματος και υψηλή αξιοπιστία.
- Συνδέσεις point-to-point, point-to-multipoint και broadcasting.
- Υλοποίηση δικτύων [VSAT](#) (very small aperture terminals).
- Κινούμενοι ή σταθεροί πομποί και δέκτες.
- Συνήθης συχνότητα λειτουργίας τα 4/6 GHz με τυπικό εύρος φάσματος 500MHz διαμοιρασμένο σε 12 [transponders](#) (36 MHz). Κάθε transponder μπορεί να υποστηρίξει 1200 κανάλια φωνής ή 50 Mbps data.



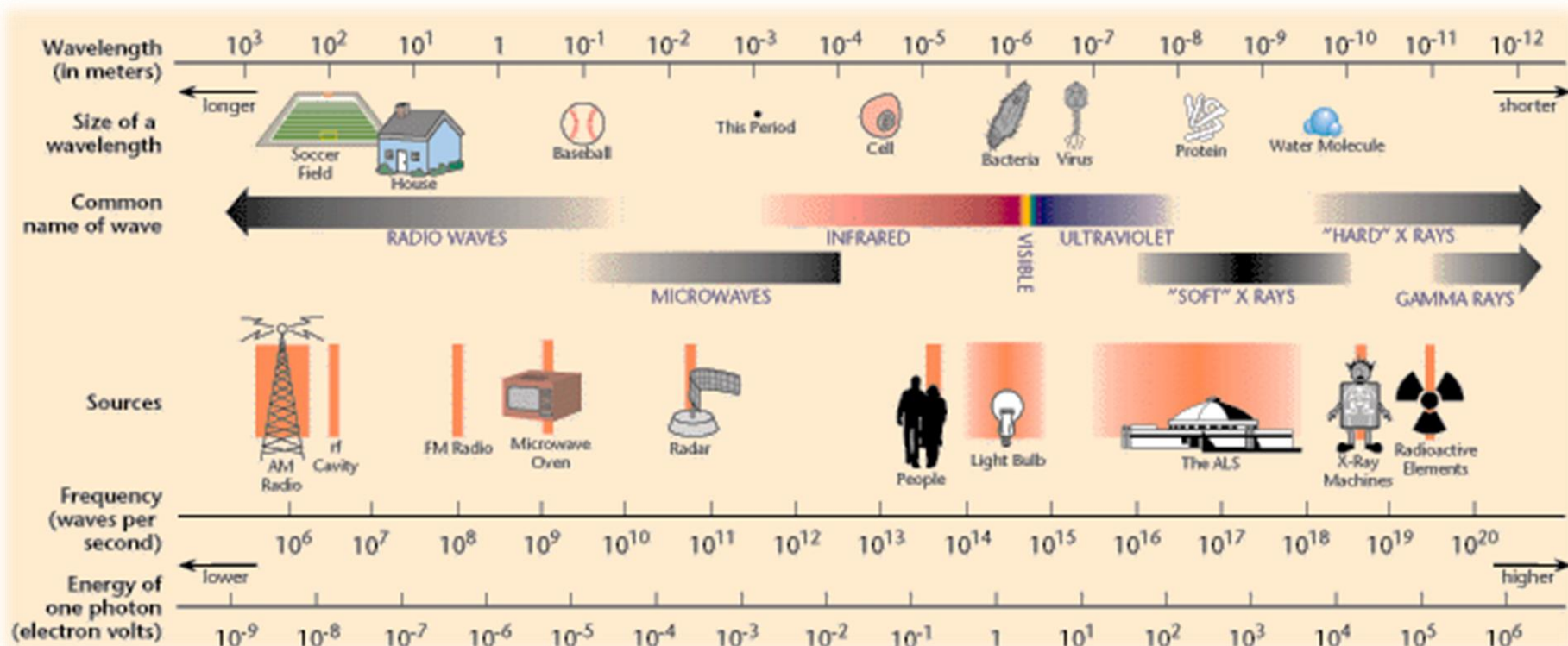
Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα (1/2)

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ονομάζεται το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο και χωρίζεται στις επιμέρους ζώνες:

- 1) Ραδιοκύματα
- 2) Μικροκύματα
- 3) Υπέρυθρη Ακτινοβολία
- 4) Ορατή Ακτινοβολία (φως)
- 5) Υπεριώδης Ακτινοβολία
- 6) Ακτίνες X
- 7) Ακτίνες γ

Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα (2/2)



Επιπτώσεις στα Σήματα από τα Κανάλια Επικοινωνίας (1/2)

1. Παραμορφώσεις ([Distortions](#))

- Μεταβολές φάσης με τη συχνότητα – Προκαλούν διαφορική καθυστέρηση ομάδας
- Μεταβολές απολαβής με τη συχνότητα – Προκαλούνται από το φιλτράρισμα που πραγματοποιεί το κανάλι
- Μεταβολές απολαβής με τον χρόνο
- Μετατοπίσεις συχνότητας λόγω σφαλμάτων τοπικού ταλαντωτή

2. Παρεμβολές ([Interferences](#))

- Δημιουργούνται όταν το κανάλι «μολύνεται» από εξωτερικά σήματα, π.χ. από ηλεκτρικές γραμμές ισχύος, μηχανήματα, άλλους χρήστες, κλπ.



3. Θόρυβος ([Noise](#))

- Απρόβλεπτα ηλεκτρικά σήματα από φυσικές πηγές
- Τεράστιο το πλήθος των πηγών θορύβου
- Προσθετικός Λευκός Γκαουσιανός Θόρυβος ([Additive White Gaussian Noise, AWGN](#))

Επιπτώσεις στα Σήματα από τα Κανάλια Επικοινωνίας (2/2)

Ενσύρματα ή ασύρματα κανάλια

- Τα ενσύρματα γενικά επηρεάζονται «λιγότερο» από τα πιο πάνω προβλήματα
- Τα οπτικά μέσα (fiber optic) έχουν σίγουρα την καλύτερη απόδοση
- Τα ασύρματα μέσα έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα:
 - Δεν χρειάζονται «φυσική» σύνδεση
 - Πιο εύκολη εγκατάσταση
 - Υποστηρίζουν κινητικότητα των χρηστών

Η έννοια της Διαμόρφωσης

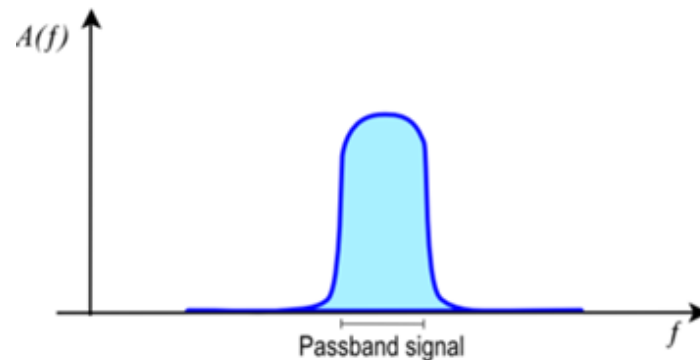
- Είδη διαμόρφωσης
- Διαμόρφωση με ημιτονοειδές φέρον
- Διαμόρφωση με παλμικό φέρον
- Σύγκριση αναλογικών – ψηφιακών διαμορφώσεων
- Σύγκριση αποδιαμορφωτών - Κριτήρια επιδόσεων

Η έννοια της Διαμόρφωσης

1. Η ανάγκη για διαμόρφωση
2. Είδη διαμόρφωσης
3. Διαμόρφωση με ημιτονοειδές φέρον
 - Αναλογική διαμόρφωση συνεχούς σήματος
 - Ψηφιακή διαμόρφωση συνεχούς σήματος
4. Διαμόρφωση με παλμικό φέρον
 - Αναλογική διαμόρφωση παλμών
 - Ψηφιακή διαμόρφωση παλμών
5. Σύγκριση αναλογικών – ψηφιακών διαμορφώσεων
6. Σύγκριση αποδιαμορφωτών
7. Κριτήρια επιδόσεων

Σηματοδοσία Διέλευσης Ζώνης

- Αν το κανάλι διαθέτει μία συγκεκριμένη ζώνη διέλευσης συχνοτήτων, τότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μετάδοση βασικής ζώνης, αλλά η σηματοδοσία διέλευσης ζώνης (bandpass signalling).
- Σήματα βασικής ζώνης των οποίων το φάσμα έχει μεταφερθεί σε μια συχνοτική περιοχή που είναι πιο κατάλληλη για μετάδοση μέσα από το συγκεκριμένο κανάλι μετάδοσης ονομάζονται **σήματα διέλευσης ζώνης** ([passband signals](#)).



- Το φάσμα των σημάτων αυτών είναι συγκεντρωμένο γύρω από μια συχνότητα που καλείται **φέρουσα συχνότητα** ([carrier frequency](#)).

Η Ανάγκη για Διαμόρφωση (1/3)

Διαμόρφωση : Η συστηματική μεταβολή κάποιου χαρακτηριστικού της (υψίσυχνης) φέρουσας κυματομορφής (φέρον) , όπως π.χ. πλάτος, συχνότητα, φάση, σε συνάρτηση με το πληροφοριακό σήμα (μήνυμα / χαμηλόσυχο σήμα).

Λόγοι Διαμόρφωσης

- **Εύκολη ακτινοβολία :** Για την αποτελεσματική εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον ελεύθερο χώρο, οι διαστάσεις της κεραίας πρέπει να είναι **συγκρίσιμες** με το μήκος κύματος (λ) του σήματος.

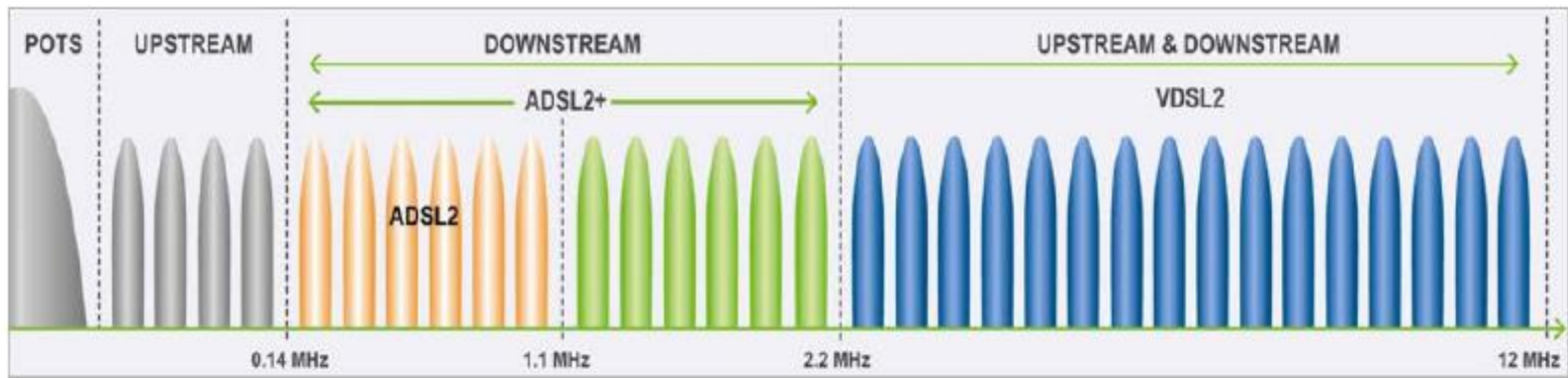
$$\text{Ισχύει: } \lambda = c/f \text{ όπου } c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

$$\text{Άρα, για } f = 300 \text{ Hz} \Rightarrow \lambda = 10^6 \text{ m}$$

$$\text{ενώ για } f = 300 \text{ MHz} \Rightarrow \lambda = 1 \text{ m}$$

Η Ανάγκη για Διαμόρφωση (2/3)

- Πολυπλεξία ([multiplexing](#)): Για τη μεταφορά των φασμάτων πολλών σημάτων σε διαφορετικές φασματικές περιοχές και την ταυτόχρονη μετάδοσή τους μέσα από το ίδιο κανάλι.



- Υπέρβαση περιορισμών από τις διατάξεις : Μεταφέροντας το φάσμα του σήματος σε φασματική περιοχή που προσφέρει ευνοϊκότερες συνθήκες σχεδίασης των διατάξεων.
- Περιορισμό θορύβου και παρεμβολών: Μπορούμε να επιτύχουμε περιορισμό του θορύβου μετάδοσης ανταλλάσσοντας ευρύτερο φάσμα.

Η Ανάγκη για Διαμόρφωση (3/3)

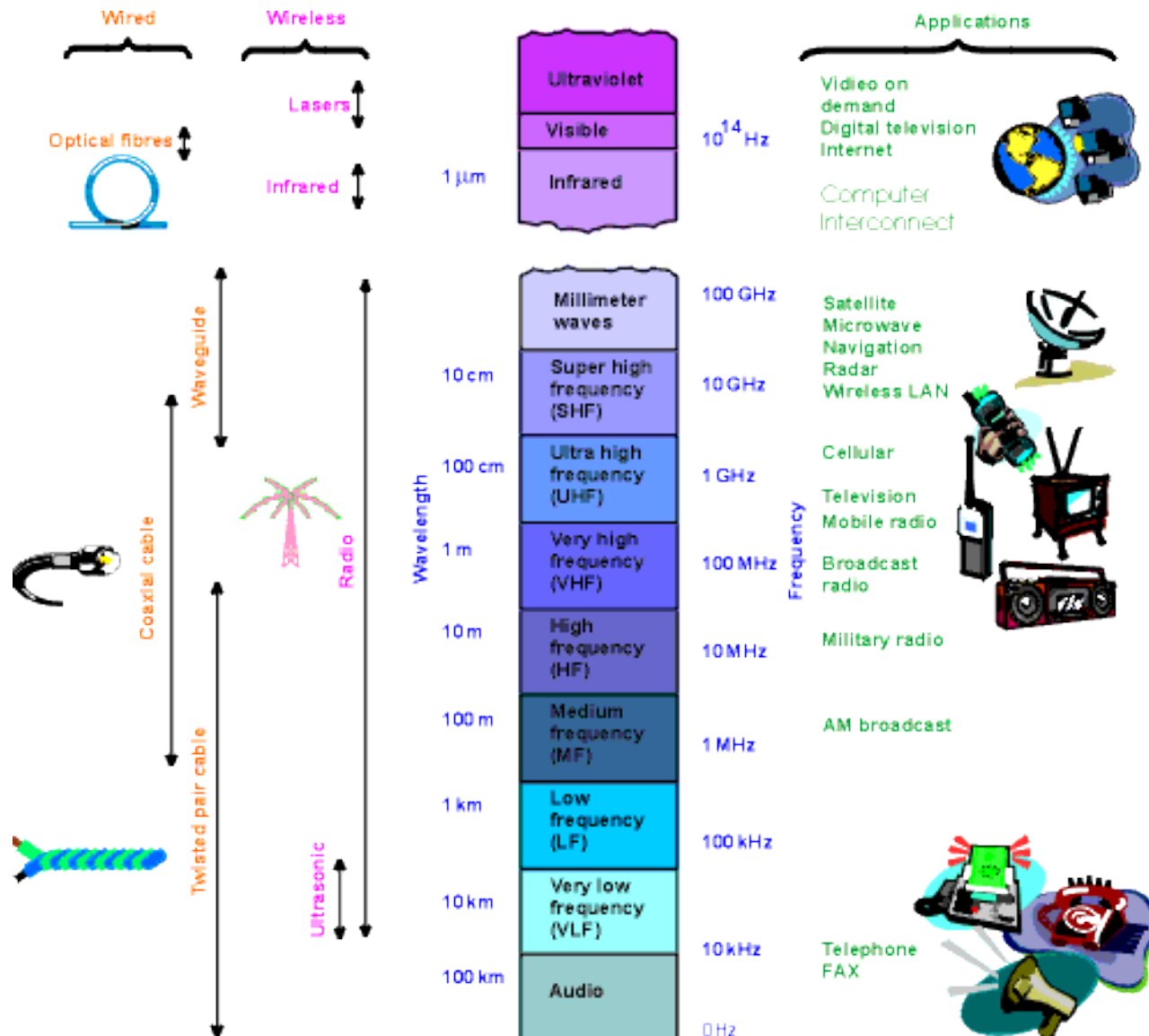
- **Εκχώρηση συχνότητας ([frequency allocation](#)):** Για την ραδιοφωνική ή τηλεοπτική εκπομπή σε **συγκεκριμένη** φασματική περιοχή ανά σταθμό ή ανά τύπο επικοινωνίας, σύμφωνα με τις κρατικές ή διεθνείς ρυθμίσεις.



THE RADIO SPECTRUM

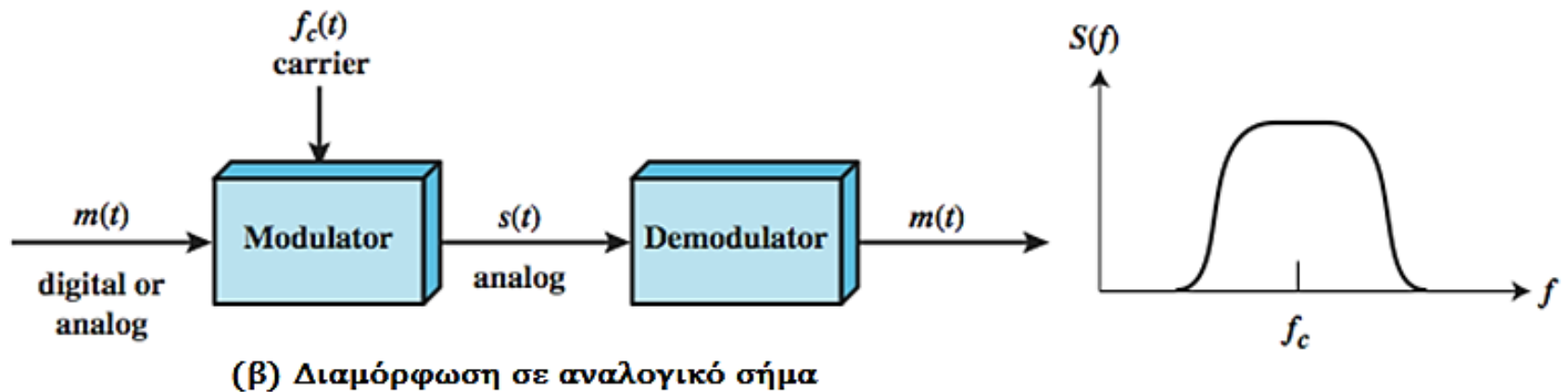
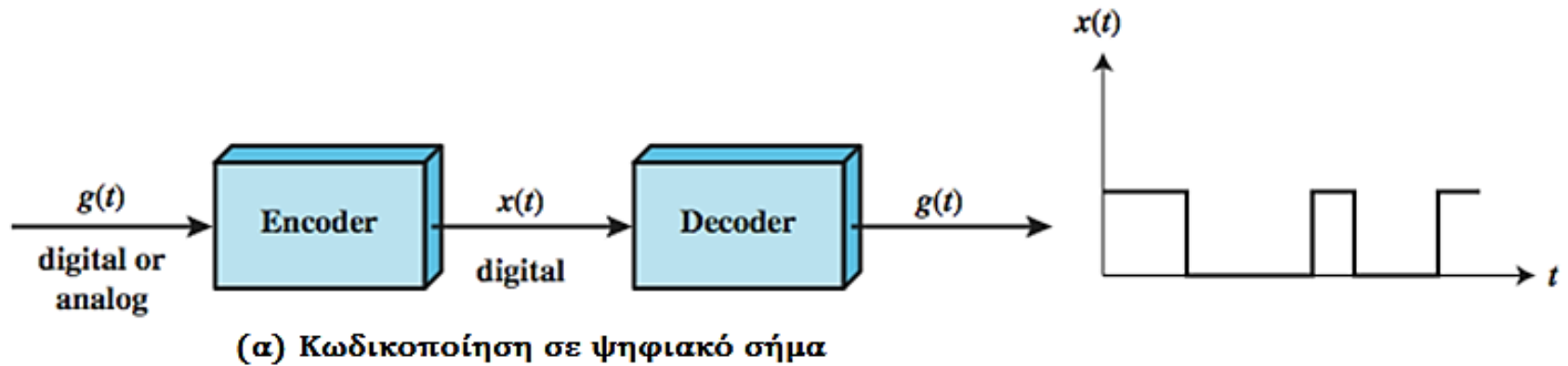


Εκχώρηση Συχνότητας

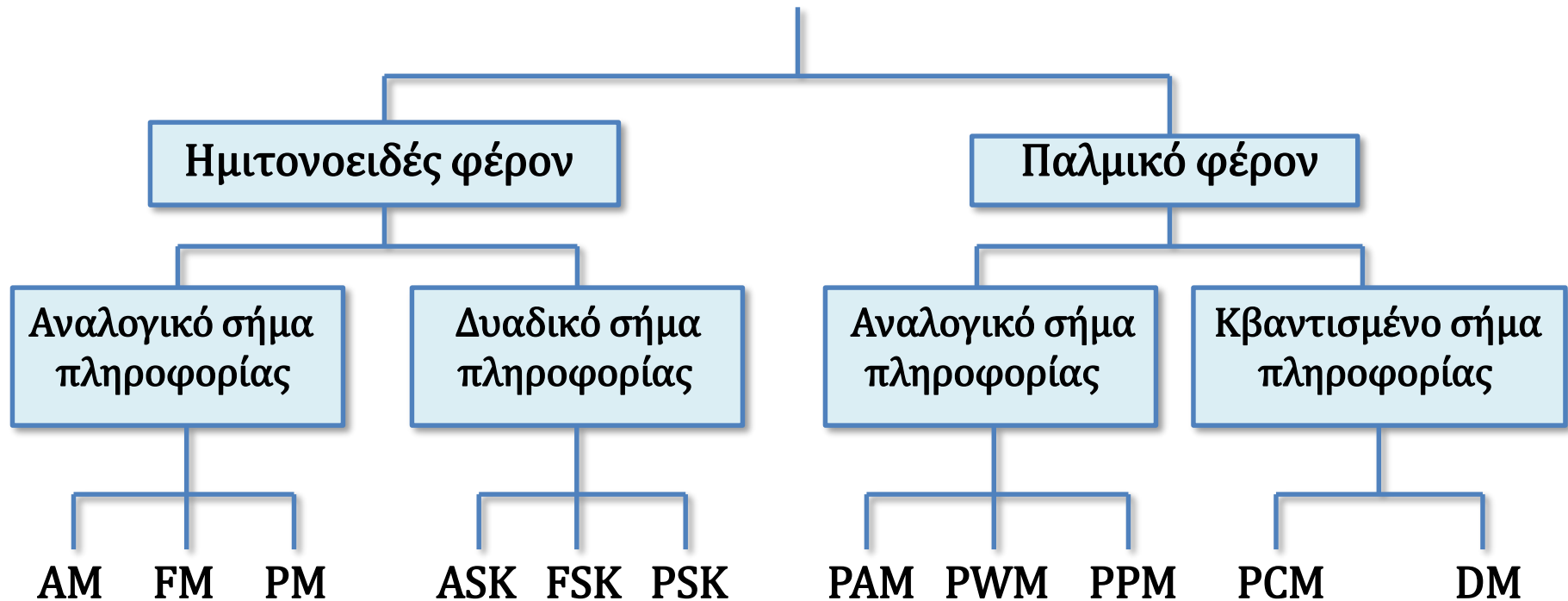


Τεχνικές Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης

Τεχνικές Διαμόρφωσης (Κωδικοποίησης)



Είδη Διαμόρφωσης



A = Amplitude, F = Frequency, P = Phase, M = Modulation
K = Keying
W = Width, P = Pulse, Position
D = Delta

Α. Διαμόρφωση με Ημιτονοειδές Φέρον

Α1. Αναλογική διαμόρφωση συνεχούς κύματος

Σήμα πληροφορίας $m(t)$ συνεχούς χρόνου
Ημιτονοειδές φέρον $x(t) = A_c \cos \omega_c t$

Διαμορφωμένο σήμα $x_c(t) = A(t) \cos[\omega_c t + \varphi(t)]$ όπου $\omega_c = 2\pi f_c$

- Διαμόρφωση πλάτους ή γραμμική (AM)
αν $A(t)$ συνδέεται γραμμικά με $m(t)$
- Διαμόρφωση συχνότητας (FM)
αν $\varphi'(t)$ συνδέεται γραμμικά με $m(t)$
- Διαμόρφωση φάσης (PM)
αν $\varphi(t)$ συνδέεται γραμμικά με $m(t)$

Βασικοί Τύποι Αναλογικής Διαμόρφωσης

Διαμόρφωση Πλάτους

$$x_c(t) = A(t) \cos(\omega_c t)$$

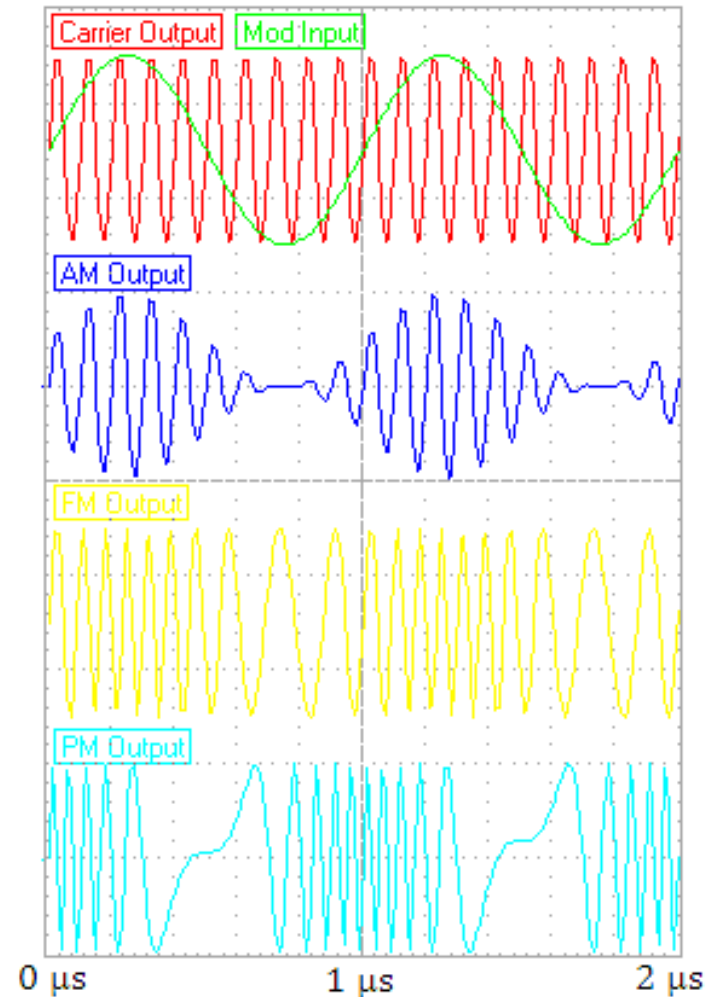
DSB	$A(t) = A_c m(t)$
AM	$A(t) = A_c [1 + m(t)]$

Διαμόρφωση συχνότητας (FM)

$$x_c(t) = A_c \cos \left(\omega_c t + k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau \right)$$

Διαμόρφωση Φάσης (PM)

$$x_c(t) = A_c \cos \left(\omega_c t + k_p m(t) \right)$$



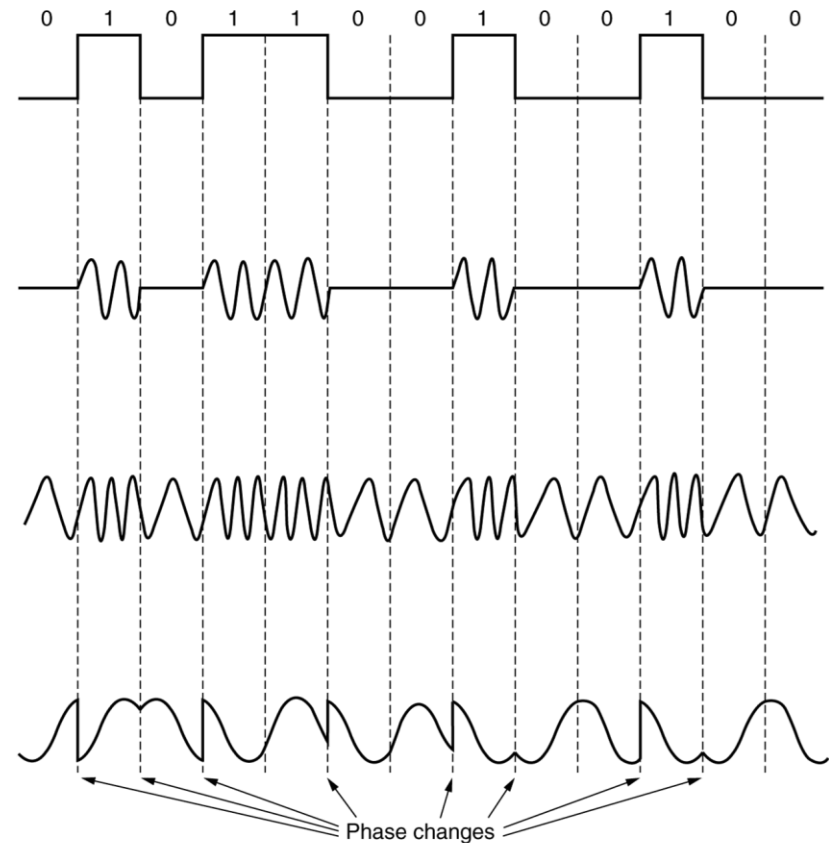
A. Διαμόρφωση με Ημιτονοειδές Φέρον

A2. Ψηφιακή διαμόρφωση συνεχούς κύματος ή ψηφιακή διαμόρφωση φέροντος

Σήμα πληροφορίας
Ημιτονοειδές φέρον

$m(t)$ ακολουθία παλμών
 $x(t) = A_c \cos \omega_c t$

- Ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους
(Amplitude Shift Keying - ASK)
- Ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας
(Frequency Shift Keying - FSK)
- Ψηφιακή διαμόρφωση φάσης
(Phase Shift Keying - PSK)



A2. Ψηφιακή Διαμόρφωση

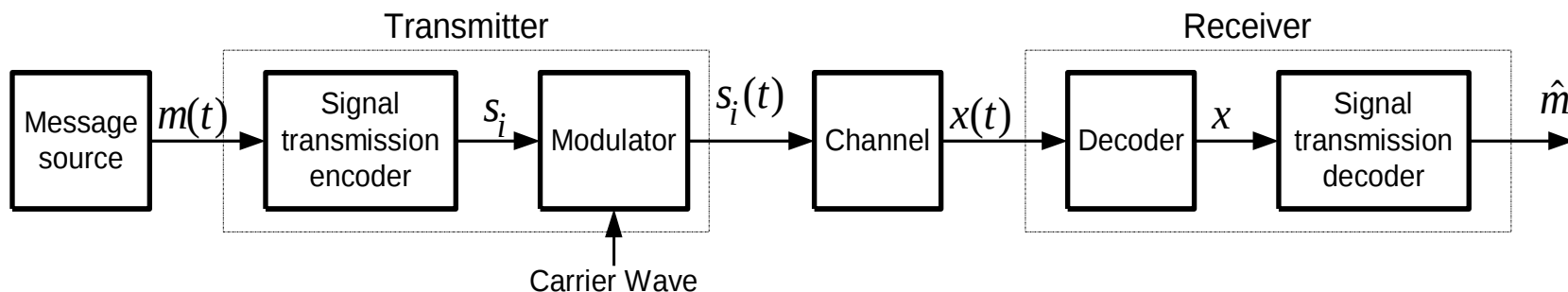
Χρησιμοποιείται για την μετάδοση ενός πληροφοριακού σήματος $m(t)$ ακολουθίας παλμών (ψηφιακό) μέσα από ένα δοσμένο κανάλι επικοινωνίας.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε **μετάδοση βασικής ζώνης**, αλλά τα περισσότερα κανάλια έχουν **φτωχή απόκριση** στις χαμηλές συχνότητες.

Επομένως, **διαμορφώνουμε** κατάλληλα το ψηφιακό σήμα $m(t)$ ώστε να το μεταφέρουμε στην επιθυμητή ζώνη διέλευσης συχνοτήτων του καναλιού. Η ψηφιακή πληροφορία $m(t)$ μπορεί να μεταβάλλει το **πλάτος**, τη **φάση** ή τη **συχνότητα** του **φέροντος**.

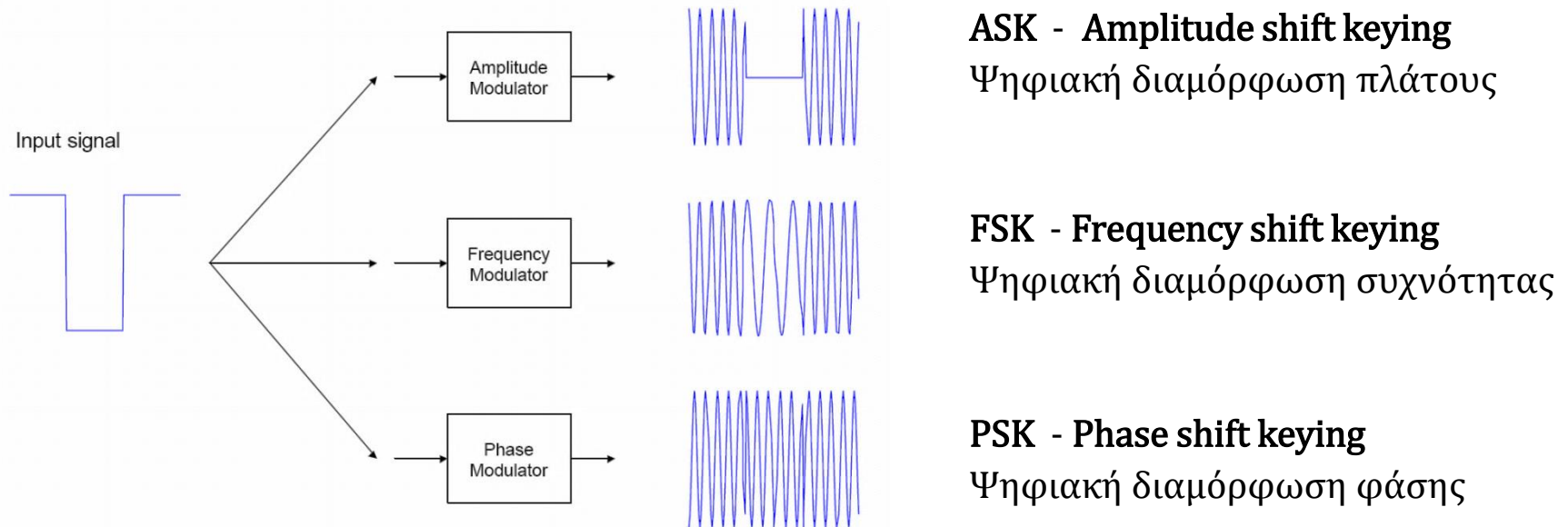
Σήμα πληροφορίας
Ημιτονοειδές φέρον

$m(t)$ ακολουθία παλμών
 $x(t) = A \cos \omega_c t$



Μέθοδοι Ψηφιακής Διαμόρφωσης

Στην ψηφιακή διαμόρφωση στέλνουμε bits με τη χρήση ενός υψίσυχνου φέροντος σήματος $x(t) = A \cos \omega_c t$. Κάθε bit διαρκεί T και ο ρυθμός μετάδοσης είναι $r = 1/T$.



- Για Δυαδικά (Binary) σήματα ($M = 2$), έχουμε:
 - Binary Amplitude Shift Keying (BASK)
 - Binary Frequency Shift Keying (BFSK)
 - Binary Phase Shift Keying (BPSK)
- Για $M > 2$ έχουμε τις M-ιαδικές τεχνικές π.χ. M-ary Phase Shift Keying (MPSK)

Β. Διαμόρφωση με Παλμικό Φέρον

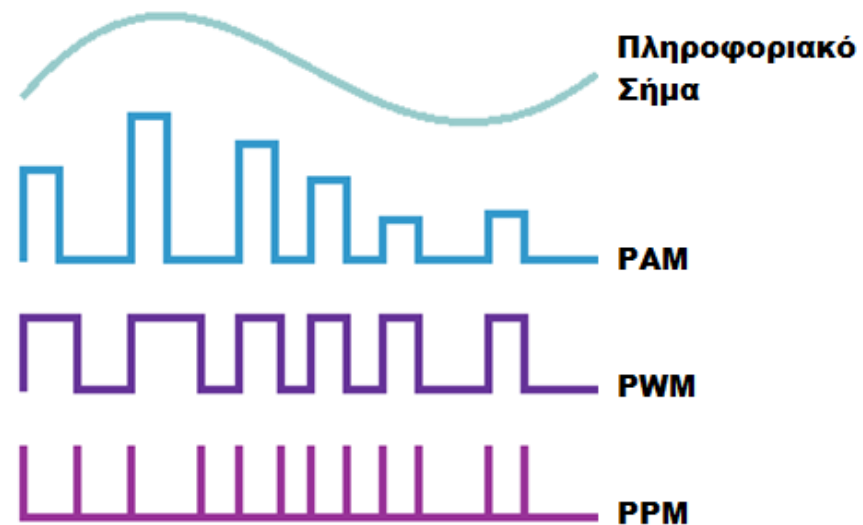
B1. Αναλογική διαμόρφωση παλμών (Analog pulse modulation)

– Το φέρον είναι μία ακολουθία παλμών

– Διαμόρφωση ύψους παλμών
(PAM – Pulse Amplitude Modulation)

– Διαμόρφωση διάρκειας παλμών
(PWM – Pulse Width Modulation)

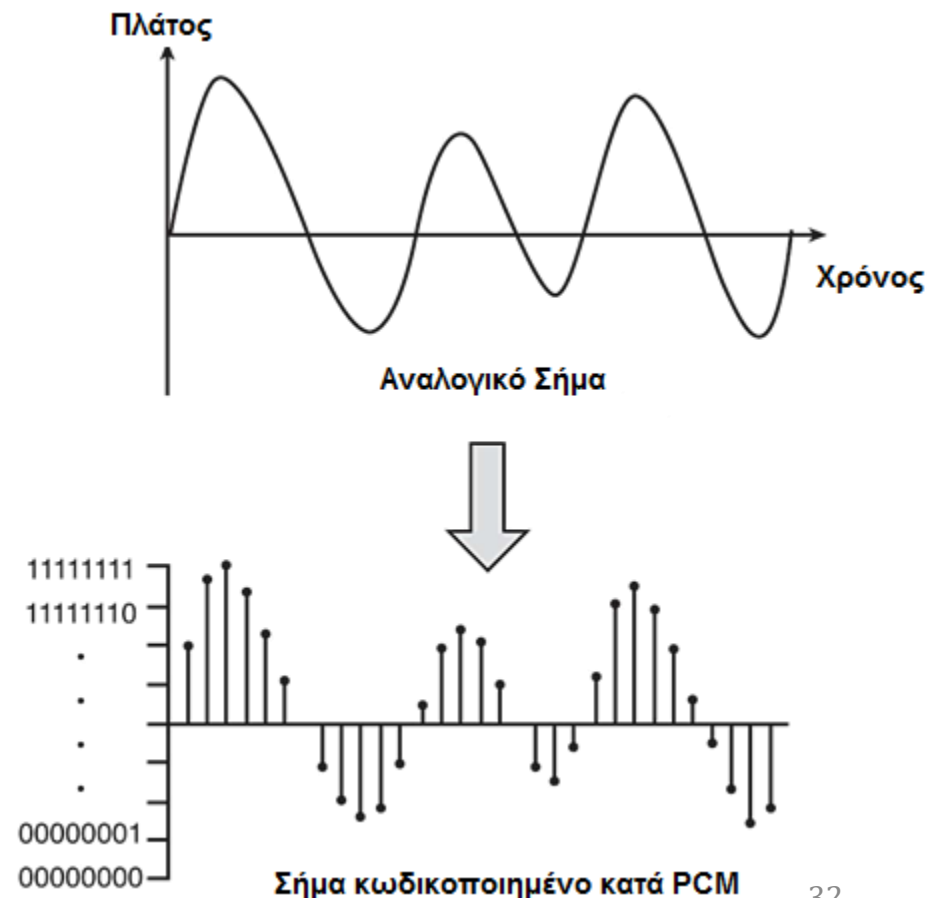
– Διαμόρφωση θέσης παλμών
(PPM – Pulse Position Modulation)



Β. Διαμόρφωση με Παλμικό Φέρον

Β2. Ψηφιακή διαμόρφωση παλμών (Digital Pulse Modulation)

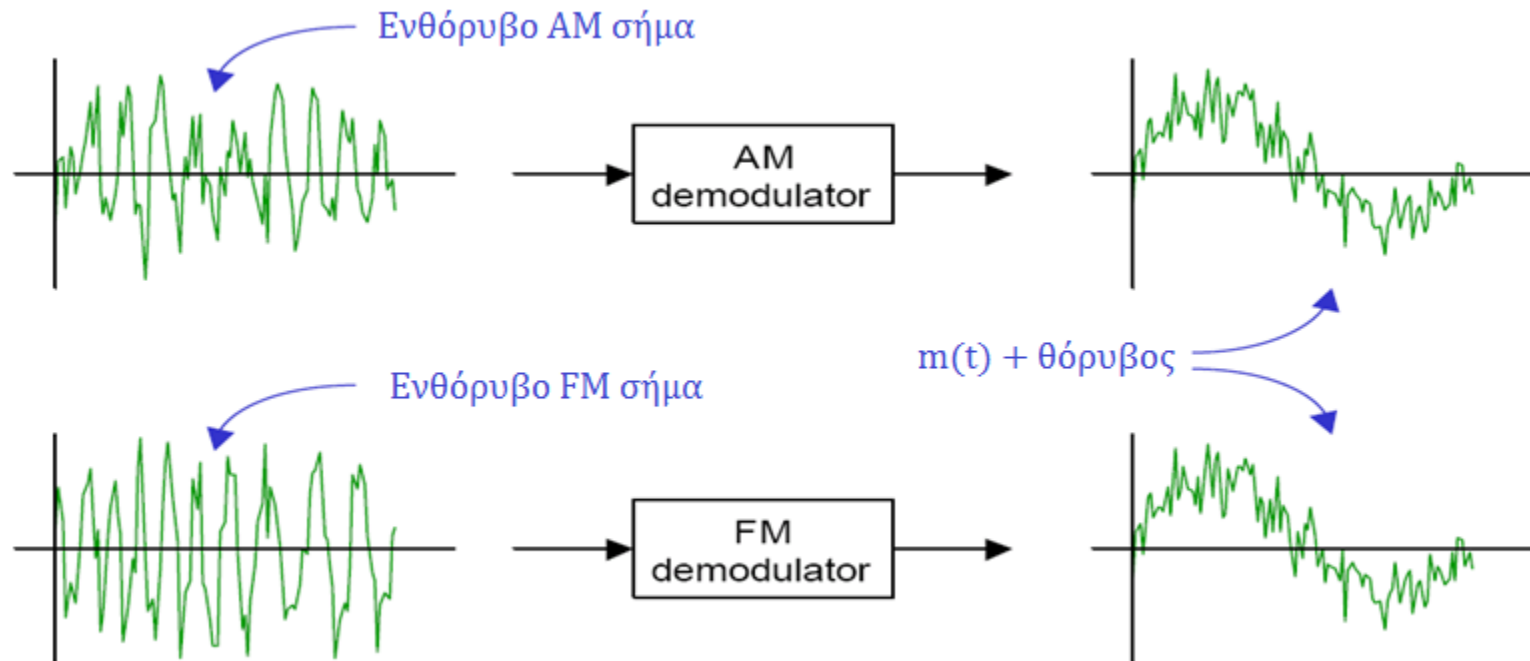
- Το σήμα πληροφορίας είναι μια ακολουθία **δυαδικών** παλμών
- **Παλμοκωδική Διαμόρφωση** (PCM – Pulse Code Modulation)
 - A/D μετατροπή: Δειγματοληψία, κβαντισμός και κωδικοποίηση
 - Σφάλματα δειγματοληψίας και κβαντισμού



Σύγκριση Αναλογικών Ψηφιακών Διαμορφώσεων

Αναλογική διαμόρφωση

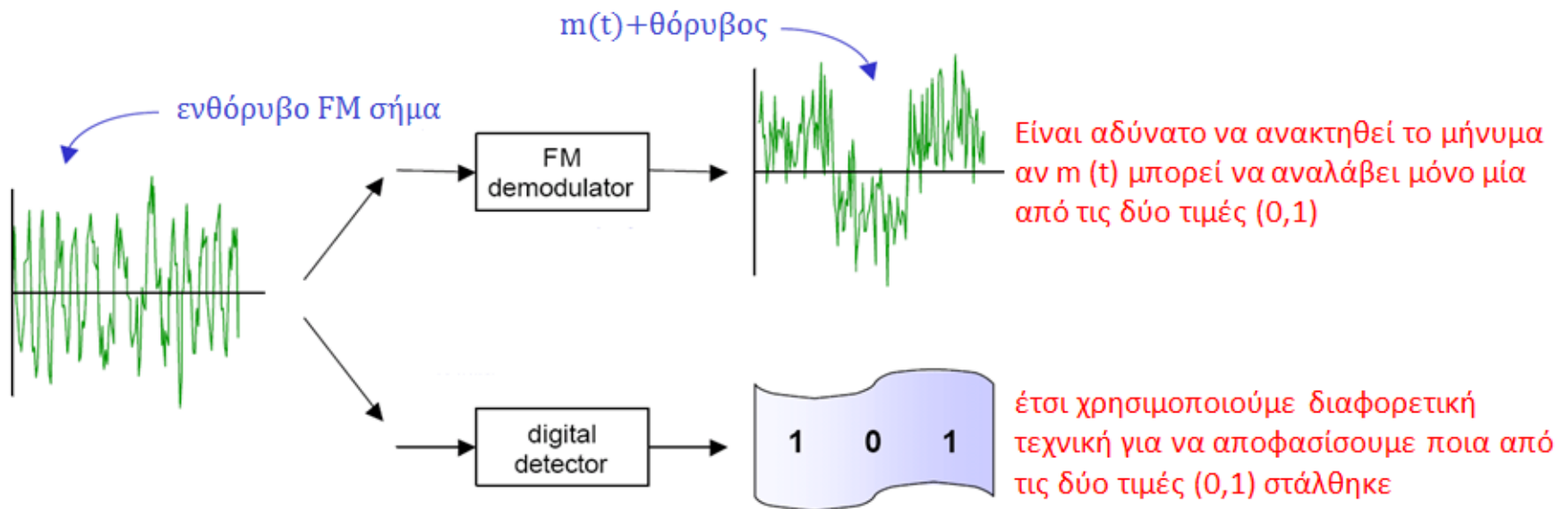
1. Το σήμα $m(t)$ είναι αναλογικό
2. Ο αποδιαμορφωτής πρέπει να αναπαραγάγει το $m(t)$ όσο καλύτερα μπορεί



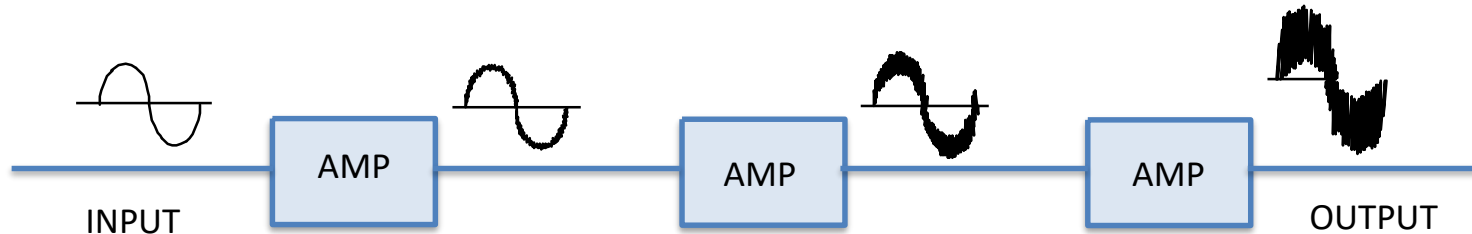
Σύγκριση Αναλογικών Ψηφιακών Διαμορφώσεων

Ψηφιακή διαμόρφωση

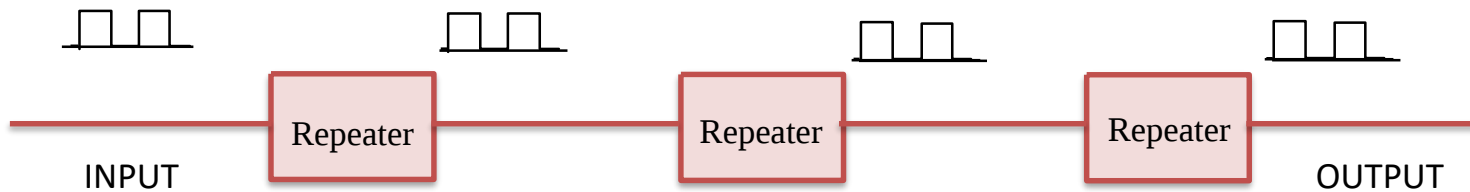
1. Το $m(t)$ παίρνει μια τιμή από ένα πεπερασμένο σύνολο τιμών
2. Ο αποδιαμορφωτής πρέπει να αποφασίσει ποιά από τις πιθανές τιμές έχει μεταδοθεί. Δεν υπάρχει ανάγκη πιστής αναπαραγωγής του $m(t)$



Γιατί Ψηφιακά Συστήματα;



Αναλογικοί επαναλήπτες (ενισχυτές): Ο θόρυβος συσσωρεύεται

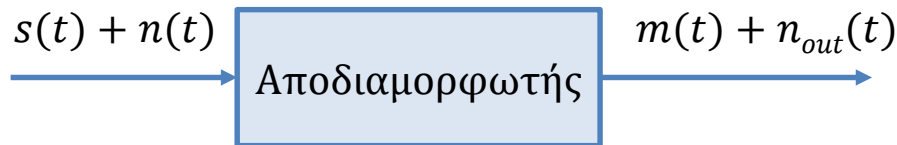


Ψηφιακοί επαναλήπτες: «Τέλεια» αναπαράγωγή του σήματος

Σύγκριση αποδιαμορφωτών {AM, FM, PM} και {ASK, FSK, PSK}

Οι αποδιαμορφωτές για AM, FM και PM:

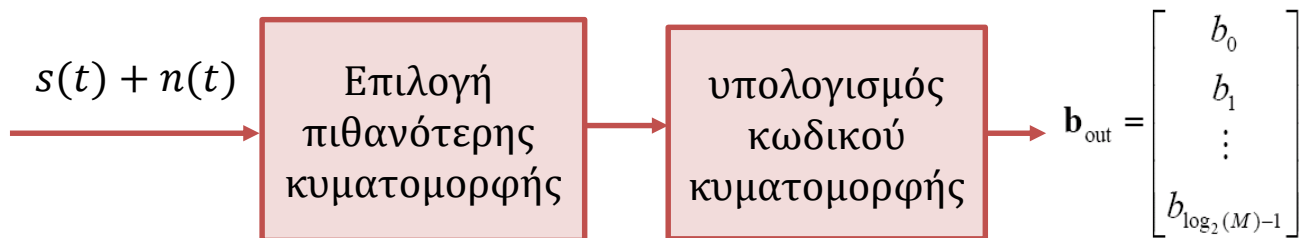
- Αναπαράγουν πιστά το $m(t)$ απο το διαμορφωμένο φέρον
- Κριτήριο επιτυχίας : η σηματοθορυβική σχέση SNR



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

Οι αποδιαμορφωτές για ASK, FSK και PSK:

- Αποφασίζουν για ποιά απο τις M δυνατές κυματομορφές έχει μεταδοθεί
- Έχουν σαν έξοδο τον κωδικό της κυματομορφής αυτής
- Κριτήριο επιτυχίας : η μικρή πιθανότητα σφάλματος



$$P(E) = \Pr\{\mathbf{b}_{out} \neq \mathbf{b}_{transmitted}\}$$

Κριτήρια Επιδόσεων

- Αναλογικά Συστήματα Επικοινωνίας
 - Κριτήριο είναι η **πιστότητα** της μετάδοσης.
 - Στόχος: λαμβανόμενο = εκπεμπόμενο σήμα.
- Ψηφιακά Συστήματα Επικοινωνίας
 - Κριτήρια είναι ο **ρυθμός μετάδοσης** ($R \text{ bits/s}$) και η **πιθανότητα σφάλματος** ενός bit ($P_b = p(b_r \neq bt)$).
 - Με ιδανικό κανάλι και χωρίς θόρυβο, δεν έχουμε σφάλματα.
 - Με ύπαρξη θορύβου στο κανάλι, η P_b εξαρτάται από τη ισχύ του σήματος, την ισχύ του θορύβου, τον ρυθμό μετάδοσης και τα χαρακτηριστικά του καναλιού (εύρος ζώνης συχνοτήτων, πλάτος, φάση).

Σύγκριση Αναλογικών και Ψηφιακών Συστημάτων Επικοινωνίας

Αναλογικά Συστήματα

- Απλούστερη δομή
- Δυσκολότερη σχεδίαση
- Ελάχιστες δυνατότητες υλοποίησης βέλτιστων διατάξεων
- Δυσκολότερη υλοποίηση και συντήρηση
 - Ανάγκη συνεχών ρυθμίσεων
 - Απαιτήσεις γραμμικότητας εξαρτημάτων
 - Εξάρτηση από τις θερμοκρασιακές μεταβολές των εξαρτημάτων
 - Εξάρτηση από τη γήρανση του υλικού
- Χρησιμοποιούνται για υλοποίηση συστημάτων πολύ υψηλών ταχυτήτων ή πολύ μικρής κατανάλωσης

Ψηφιακά Συστήματα

- Μεγαλύτερη αντοχή στο θόρυβο
- Συμπίεση δεδομένων
- Μείωση κόστους
- Βελτίωση Ασφάλειας
- Μικρότερη απαιτούμενη ισχύς
- Πολυπλοκότερη δομή
- Ευκολότερη σχεδίαση
- Δυνατότητα υλοποίησης βέλτιστων διατάξεων
- Καλύτερη προσαρμογή προς το κανάλι
- Ευελιξία κατασκευής
 - DSPs, μPs
 - FPGAs, ASICs
- Μικρότερο κόστος

Αναλογική Διαμόρφωση - Εισαγωγή

- Μετατροπή σήματος από αναλογικό σε αναλογικό είναι μία αναπαράσταση της αναλογικής πληροφορίας από ένα αναλογικό σήμα.
- Γιατί να μετατρέψουμε (διαμορφώσουμε) ένα σήμα από μία αναλογική μορφή σε μια άλλη; (επίσης αναλογική)
- Η διαμόρφωση απαιτείται όταν το κανάλι επικοινωνίας είναι ζωνοδιαβατό.

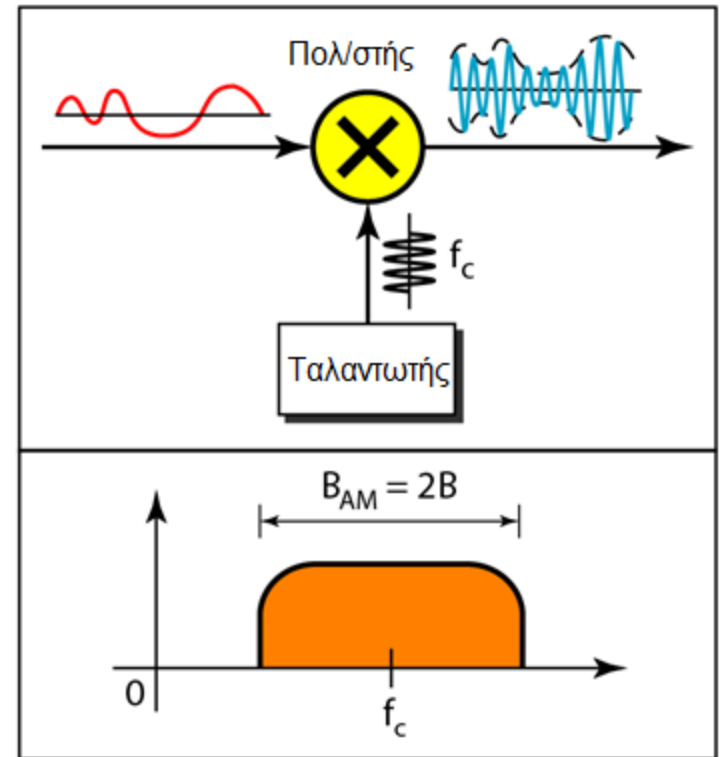
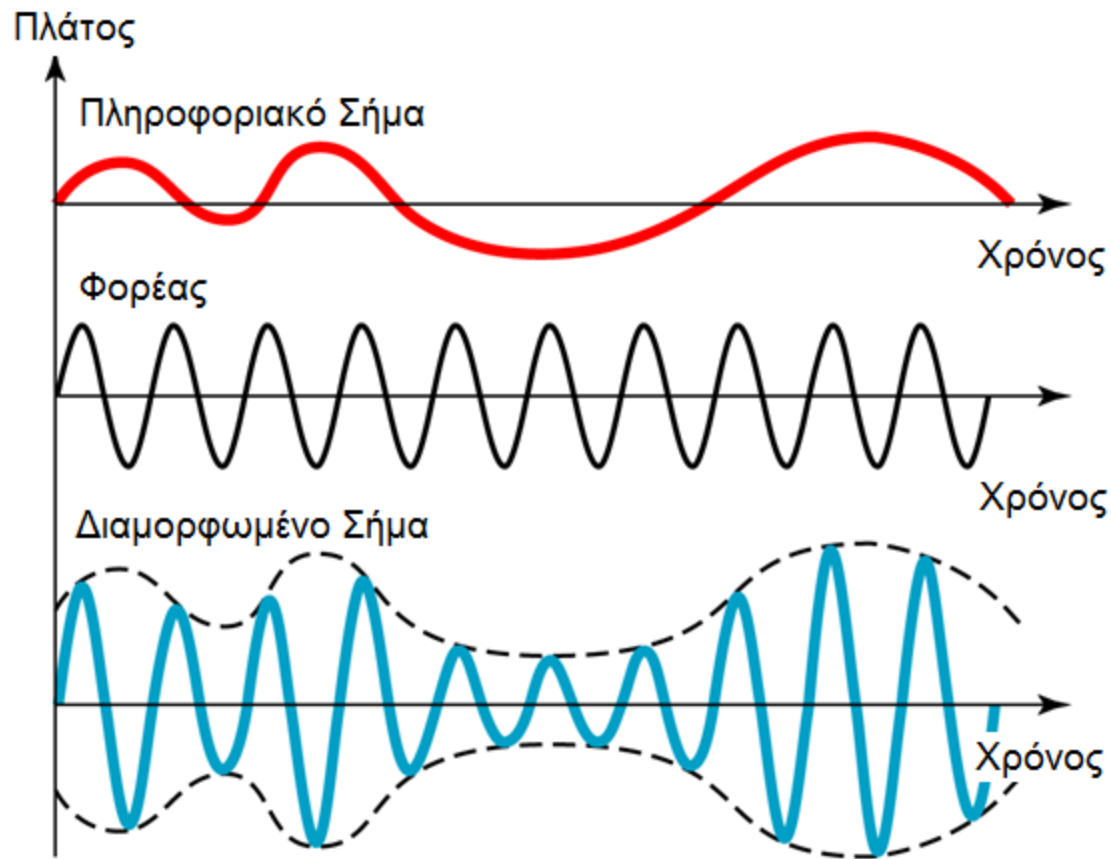
Εισαγωγή στις Αναλογικές Διαμορφώσεις

- Διαμόρφωση Πλάτους (AM)
- Διαμόρφωση Συχνότητας (FM)
- Διαμόρφωση Φάσης (PM)

Διαμόρφωση Πλάτους (AM)

- Ένα σήμα **φορέα** (carrier) διαμορφώνεται (μόνο) κατά πλάτος σύμφωνα με το **πληροφοριακό** σήμα.
- Το πληροφοριακό σήμα είναι η **περιβάλλουσα** (envelope) του φορέα.
- Το απαιτούμενο **εύρος ζώνης** (bandwidth) είναι **$2B$** , όπου B είναι το bandwidth του πληροφοριακού σήματος ($B_{AM}=2B$).
- Επειδή και στις δύο πλευρές του φορέα συχνότητας f_c , το φάσμα είναι ίδιο, μπορούμε να **αγνοήσουμε το μισό** έτσι ώστε να απαιτείται μικρότερο εύρος ζώνης για την εκπομπή του διαμορφωμένου σήματος.

Διαμόρφωση Πλάτους (AM)



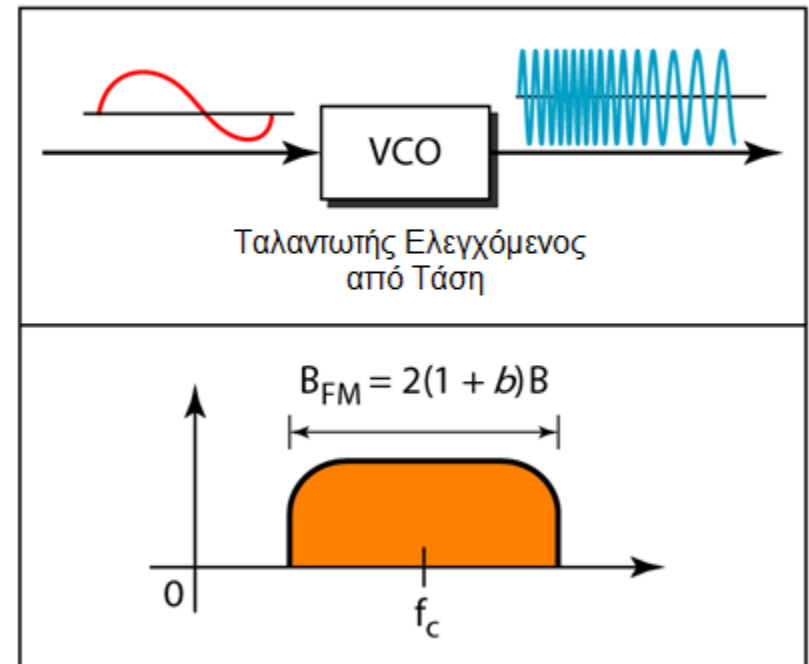
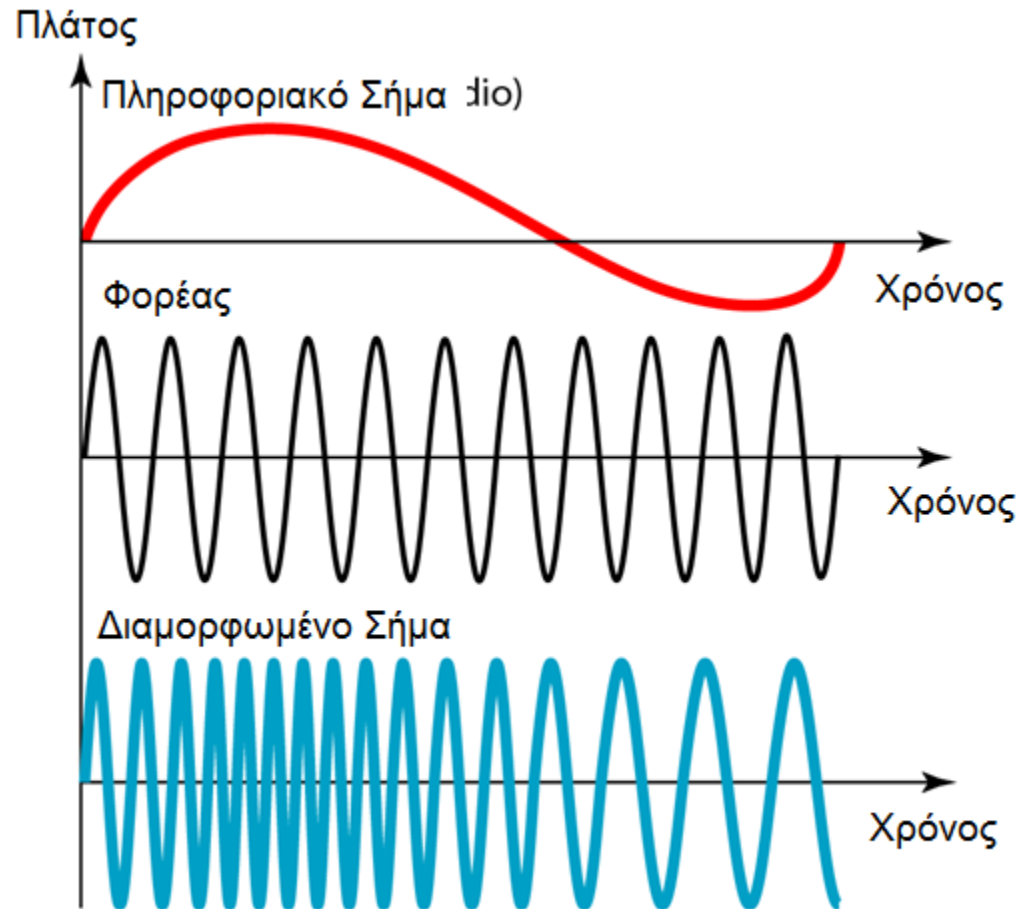
Διαμόρφωση Συχνότητας (FM)

- Το πληροφοριακό σήμα αλλάζει τη **συχνότητα** f_c του φορέα.
- Το απαιτούμενο εύρος ζώνης (bandwidth) της FM είναι **υψηλό** ($\sim$ δεκαπλάσιο του πληροφοριακού σήματος).
- Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B_{FM} = 2(1 + \beta)B$$

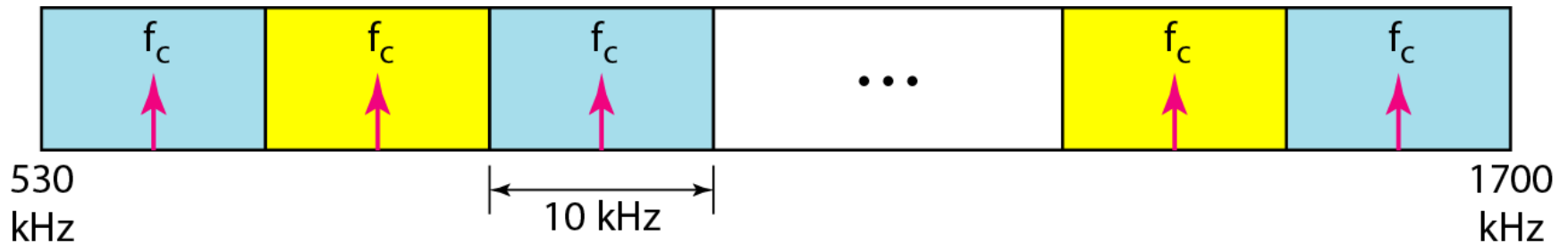
όπου B το εύρος ζώνης του πληροφοριακού σήματος και $\beta=4$ (συνήθως).

Διαμόρφωση Συχνότητας (FM)

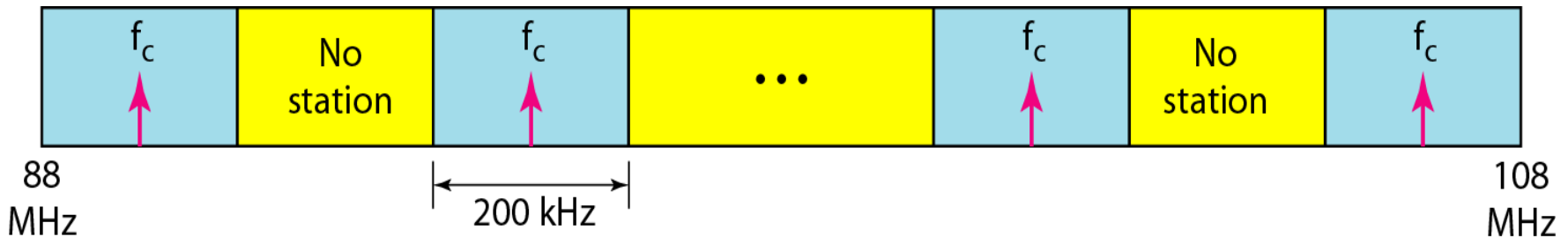


Ανάθεση Καναλιών στις Αναλογικές Διαμορφώσεις

Διαμόρφωση Πλάτους (AM)



Διαμόρφωση Συχνότητας (FM)



Διαμόρφωση Φάσης (PM)

- Το πληροφοριακό σήμα αλλάζει μόνο τη **φάση** του φορέα.
- Η αλλαγή φάσης εκδηλώνεται ως αλλαγή της στιγμιαίας συχνότητας και είναι αναλογική με την παράγωγο (ρυθμό μεταβολής) του πλάτους του πληροφοριακού σήματος.
- Το απαιτούμενο εύρος ζώνης (bandwidth) της PM είναι **υψηλό**.
- Εξαρτάται από το εύρος ζώνης και τη μέγιστη τιμή πλάτους του πληροφοριακού σήματος. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B_{PM} = 2(1 + \beta)B$$

όπου **B** το εύρος ζώνης του πληροφοριακού σήματος και **$\beta=2$** (συνήθως).

Διαμόρφωση Φάσης (PM)

