

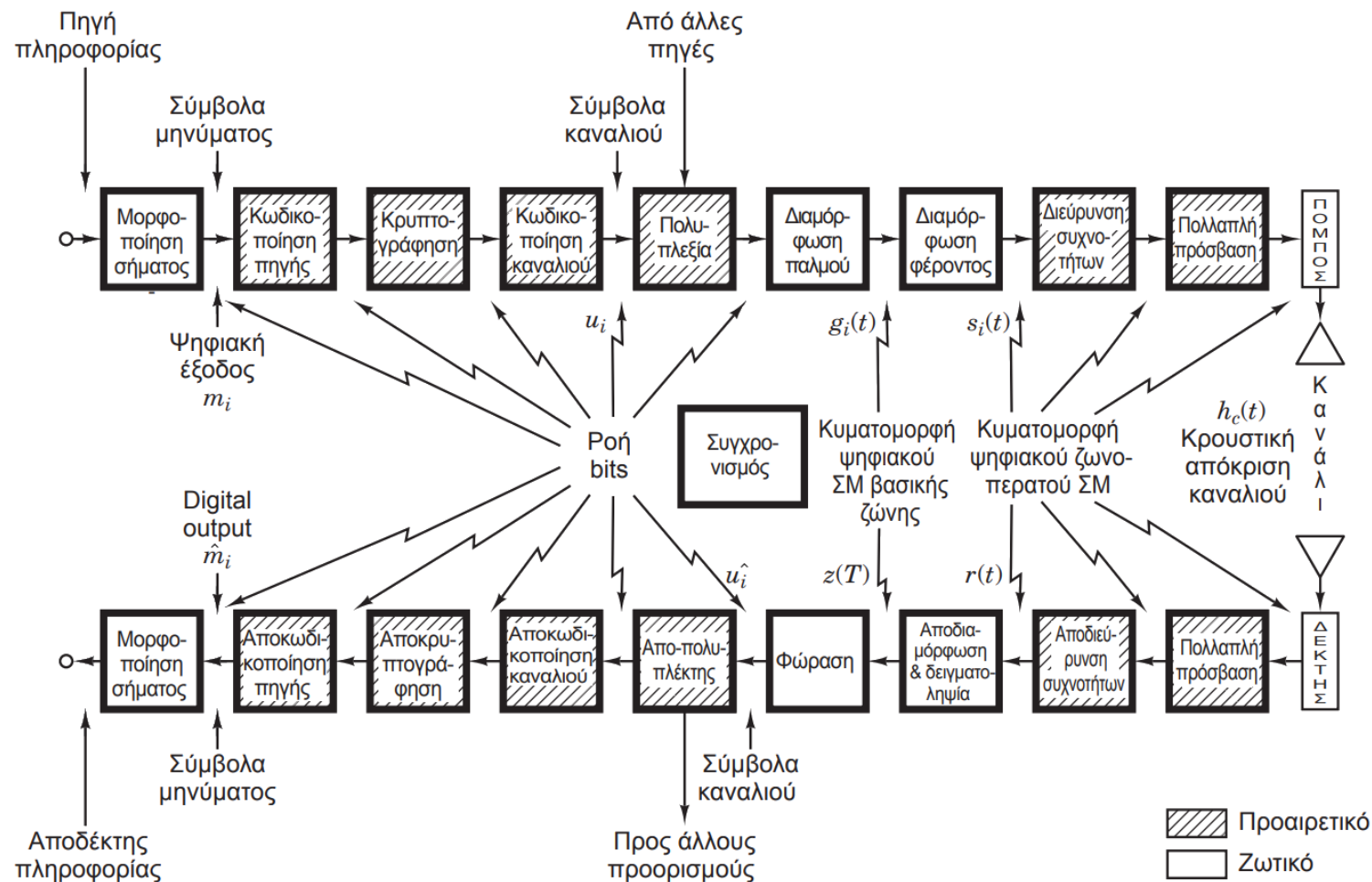
Ψηφιακές Επικοινωνίες

Κεφ 4: Διαμόρφωση & Αποδιαμόρφωση Ζώνης Διέλευσης

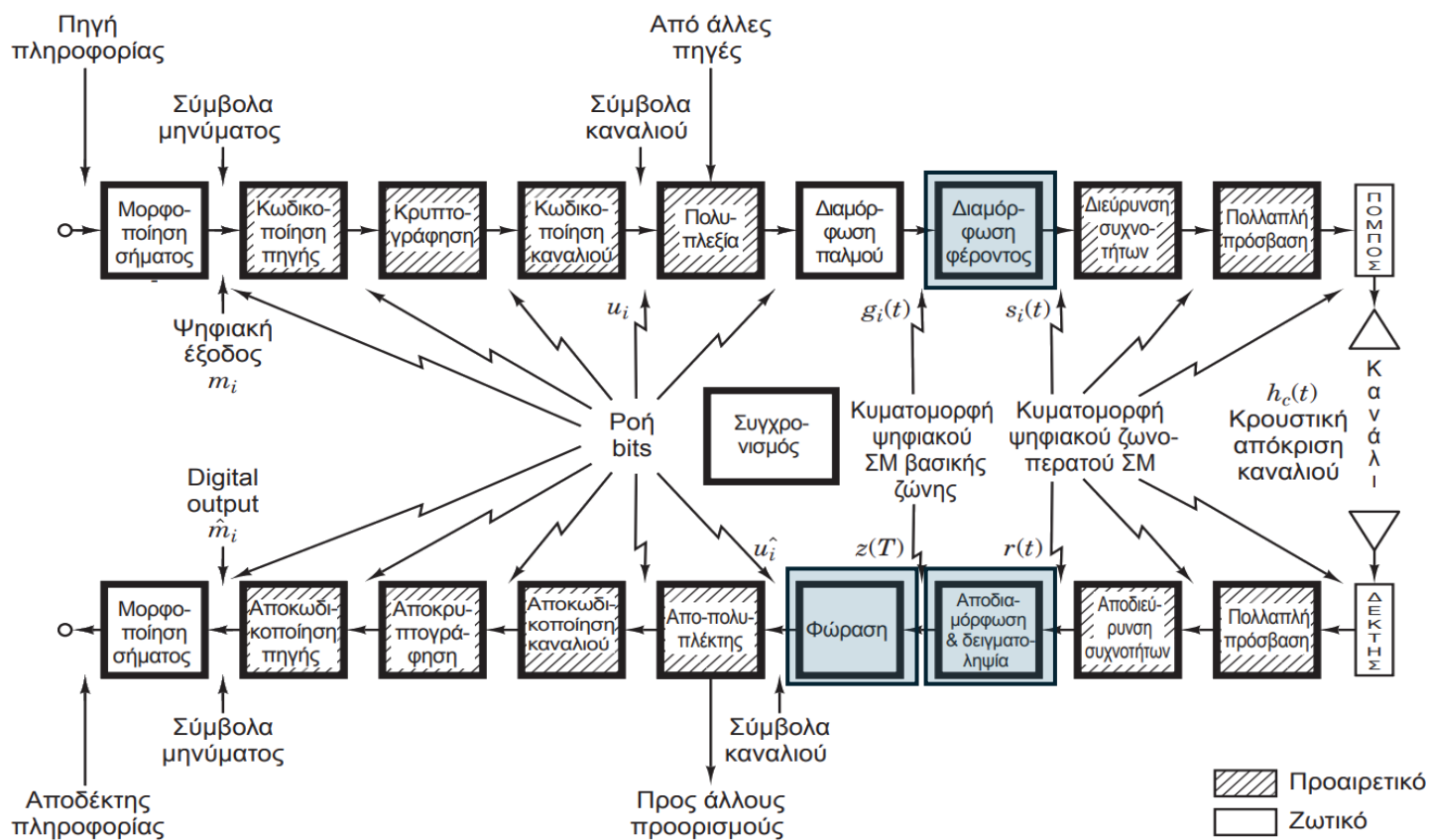
Περιεχόμενα: Κεφάλαιο 4

- Εισαγωγή
- Είδη Διαμόρφωσης
- Τεχνικές Ψηφιακής Διαμόρφωσης Ζώνης Διέλευσης
- Φώραση Σημάτων Παρουσία Γκαουσιανού Θορύβου
- Σύμφωνη Φώραση
- Ασύμφωνη Φώραση
- Μιγαδική Περιβάλλουσα
- Επίδοση Δυαδικών Συστημάτων ως προς τα Σφάλματα
- Μ-αδικη Σηματοδοσία και Επίδοση
- Πιθανότητα Σφάλματος Συμβόλου για Μ-αδικα Συστήματα ($M > 2$)

Δομικό Διάγραμμα - Block Diagram



Δομικό Διάγραμμα: Κεφάλαιο 4



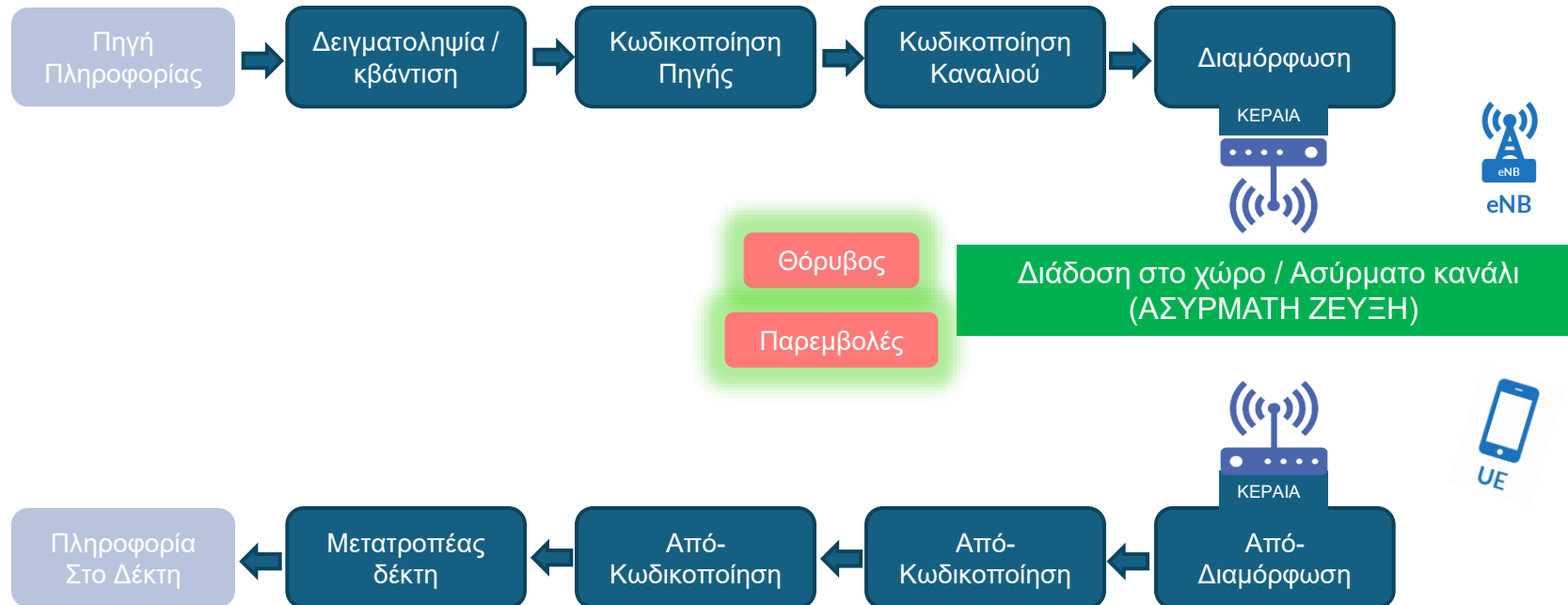
Ερώτημα: Ποια η διαφορά Αποδιαμόρφωσης και Φώρασης;

Εισαγωγή

Βασική Ορολογία

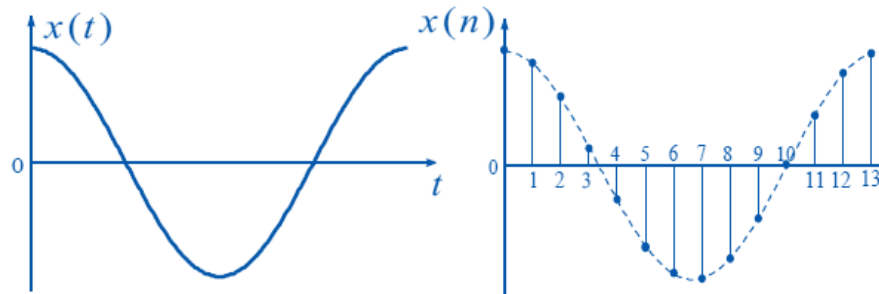
- Πηγή πληροφορίας – Information source
- Χαρακτήρας – Character
- Μήνυμα κειμένου – Textual Message
- Δυαδικό ψηφίο – Binary digit (bit)
- Ροή δυαδικών ψηφίων – Bit stream
- Σύμβολο (ψηφιακό μήνυμα) – Symbol (digital message)
- Ψηφιακή κυματομορφή – Digital waveform
- Ρυθμός δεδομένων – Data rate

Είσοδος διαμορφωτή

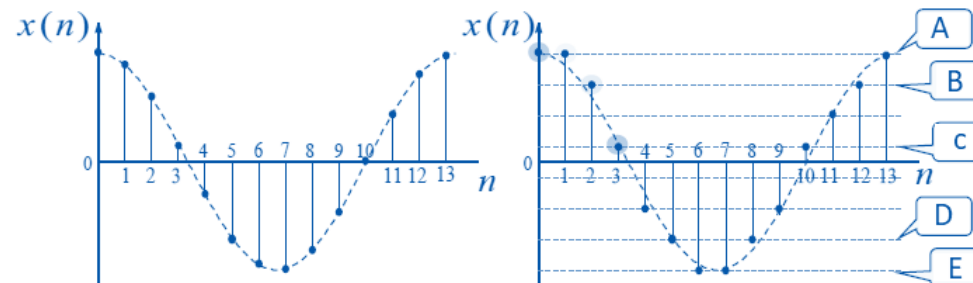


Είσοδος διαμορφωτή

- Δειγματοληψία
 - Συχνότητα Δειγματοληψίας Nyquist - Θεώρημα δειγματοληψίας ή Θεώρημα του Shannon $f_s \geq 2 f_{\max}$

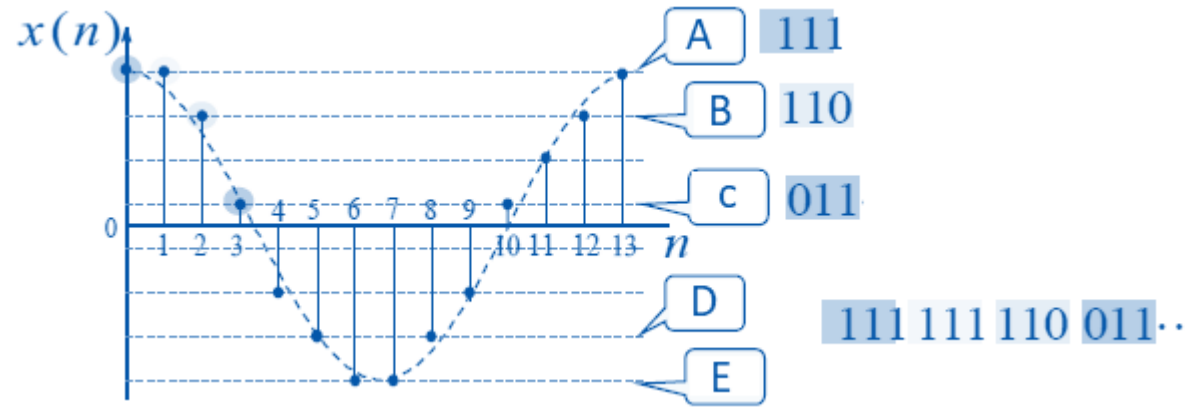


- Κβάντιση



Είσοδος διαμορφωτή

- Κωδικοποίηση Πηγής



- Πληροφορία συμβόλου k πηγής: Σε σχέση με την πιθανότητα εμφάνισης συμβόλου/γεγονότος.

$$I(p_k) = \log\left(\frac{1}{p_k}\right) = -\log(p_k)$$

Γιατί Διαμόρφωση

- Σήματα μεταδίδονται στο Η/Μ φάσμα
- Μήκος κεραίας: $\frac{\lambda}{4}$
- Κυματική εξίσωση: $c = \lambda \cdot f$
- Μετάδοση στα 3000Hz (Βασική Ζώνη) \Rightarrow κεραία μήκους 25km

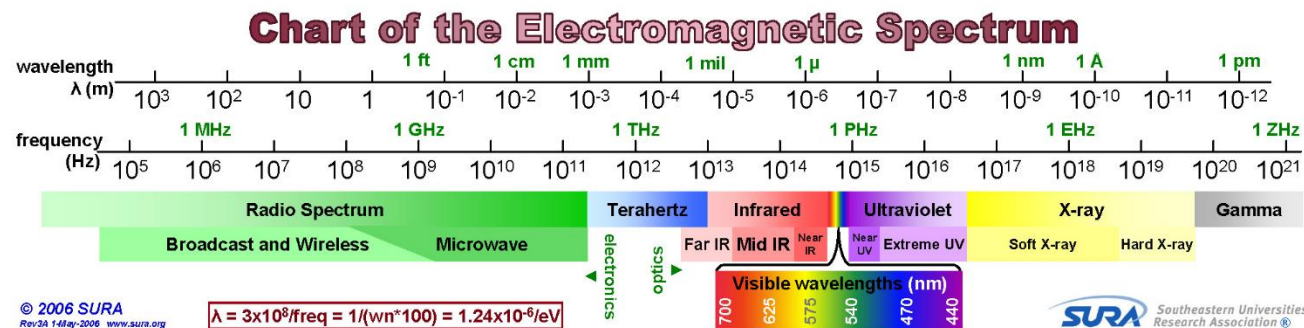
Πρόσθετα Κίνητρα

- Μετάδοση πολλών σημάτων σε ένα κανάλι
 - Πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας
- Ελαχιστοποίηση συνεπειών παρεμβολών
 - Διαμορφώσεις διεύρυνσης φάσματος
- Δυνατότητα φιλτραρίσματος και ενίσχυσης
 - Μετατροπή ραδιοσημάτων σε ενδιάμεσες συχνότητες στο δέκτη

Βασικές αρχές διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Η/Μ κύματα ως Φορέας μεταφοράς πληροφορίας
 - Mobile networks (π.χ. 0.9 - 6 GHz)

Όνομασία Ζώνης	Όρια Συχνοτήτων	Εφαρμογές
Extremely Low Frequencies (ELF)	1 Hz - 10 kHz	Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Very Low Frequencies (VLF)	10 kHz - 30 kHz	Ραδιοπλοήγηση, Ραδιοφωνία AM
Low Frequencies (LF)	30 kHz - 300 kHz	Ραδιοπλοήγηση, Ραδιοφωνία AM
Median Frequencies (MF)	300 kHz - 3 MHz	Ραδιοφωνία AM
High Frequencies (HF)	3 MHz - 30 MHz	Ραδιοφωνία AM
Very High Frequencies (VHF)	30 MHz - 300 MHz	Ραδιοφωνία FM, Τηλεόραση, Κινητή τηλεφωνία (1ης γενιάς)
Ultra High Frequencies (UHF)	300 MHz - 3 GHz	Ραδιοζεύξεις, Τηλεόραση, Ραδιοπλοήγηση, Κινητή τηλεφωνία (2ης γενιάς), RADAR
Super High Frequencies (SHF)	3 GHz - 30 GHz	Επίγειες και Δορυφορικές Ζεύξεις, Ψηφιακή Δορυφορική Τηλεόραση, RADAR
Extremely High Frequencies (EHF)	30 GHz - 300 GHz	Μετεωρολογία, Αστρονομία



Ζώνες συχνοτήτων

Name	Abbreviation Frequency	Frequency	Wave length
Very low	VLF	3 to 30 kHz	100 to 10km
Low	LF	30 to 300 kHz	10 to 1km
Medium	MF	300 to 3000 kHz	1km to 100 m
High	HF	3 to 30 MHz	100 to 10m
Very high	VHF	30 to 300 MHz	10 to 1cm
Ultrahigh	UHF	300 to 3000 MHz	1m to 10cm
Super high	SHF	3 to 30 GHz	10 to 1cm
Extremely high	EHF	30 to 300 GHz	10 to 1mm

Χαρακτηριστικά κύματος

1. Πλάτος

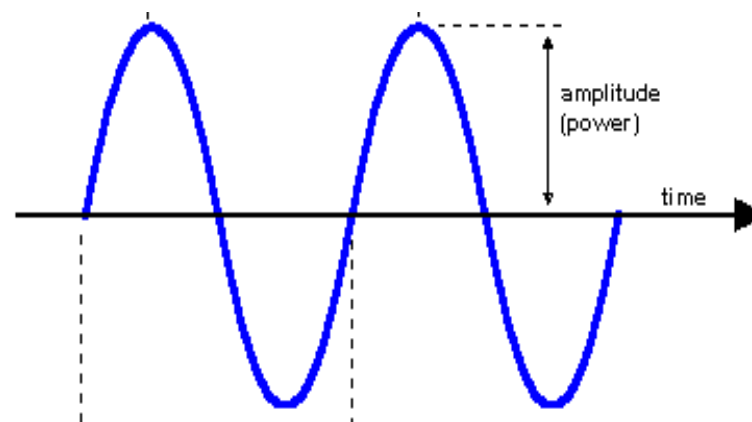
2. Μήκος

3. Συχνότητα

4. Ταχύτητα

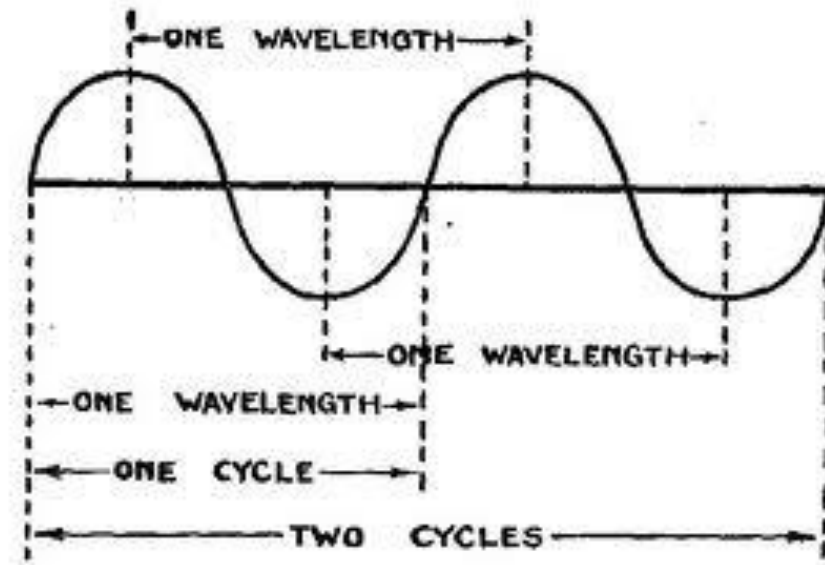
Πλάτος

- Πόσο ψηλά φτάνει το σήμα από το σημείο ακινησίας
- Ονομάζεται και ένταση του σήματος
- Το υψηλότερο σημείο ονομάζεται κορυφή και το χαμηλότερο κοίλο
- Ένδειξη ισχύος του σήματος
- Δεν επηρεάζει την ταχύτητα
- Η **ενέργεια** του κύματος είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους του



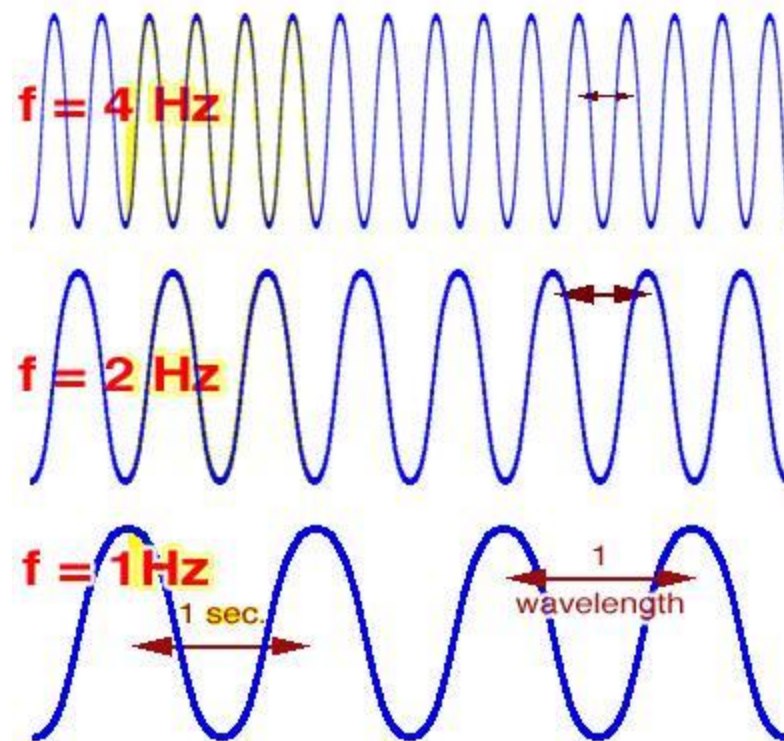
Μήκος κύματος λ

- Απόσταση μεταξύ δύο επαναλαμβανόμενων σημείων (κυρίως κορυφών)
- Αναφέρεται και ως κύκλος ή ταλάντωση

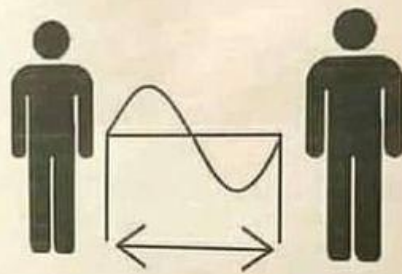


Συχνότητα f

- Ίση με τον αριθμό των κύκλων (ταλαντώσεων, μηκών κύματος) ανά δευτερόλεπτο
- Μετριέται σε **Hertz (Hz)**, ή κύκλοι/δευτ.
- Η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος
$$f = v / \lambda$$
- Η συχνότητα είναι ανάλογη της ενέργειας που μεταφέρεται



Social Distancing



Keep one Wavelength
Apart at 164 MHz

Ταχύτητα V

- Η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει το σήμα
- **Εξαρτάται από το μέσο**
 - Τα μηχανικά κύματα ταξιδεύουν ταχύτερα σε συμπαγείς επιφάνειες
 - Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν ταχύτερα σε μη συμπαγείς επιφάνειες
- Ταχύτητα = μήκος κύματος x συχνότητα

$$v = \lambda f$$

Είδη Διαμόρφωσης

Η διαδικασία της διαμόρφωσης

- **ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ** = Η **μεταβολή**, σύμφωνα με το **σήμα πληροφορίας**, των **παραμέτρων** ενός **φέροντος κύματος** (carrier wave) που είναι κατάλληλο για την μετάδοση μέσα από το δεδομένο κανάλι.
- **ΑΠΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ** είναι η αντιστροφή διαδικασία για ανάκτηση του **σήματος πληροφορίας**.
- Το είδος της διαμόρφωσης καθορίζει:
 - Την αντοχή στο 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 και λήψης.

Τι επιτυγχάνουμε με τη διαμόρφωση

- Τη μετάδοση **πολλών σημάτων** στον ίδιο χώρο με χρήση διαφορετικών φερουσών.
- Την ελάττωση των **απαιτήσεων** στα χαρακτηριστικά των συστημάτων εκπομπής.
- Τη **χρησιμοποίηση** περιοχών του φάσματος με καλύτερες συνθήκες μετάδοσης.

Διαμόρφωση Σήματος

- **Baseband:** Μετάδοση αδιαμόρφωτου σήματος
 - Μεγάλο εύρος σχετικά χαμηλών συχνοτήτων
 - Μεγάλη εξασθένιση και περιορισμένη μετάδοση
 - Καλό μόνο για μικρές αποστάσεις και χαμηλές ταχύτητες
- **Διαμόρφωση:** η ελεγχόμενη αλλαγή ενός παράγοντα του φέροντος σήματος (carrier) με βάση την πληροφορία που επιθυμούμε να μεταδώσουμε
 - Εύρος
 - Συχνότητα
 - Φάση
- **Modem:** Συσκευή διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης (modulator/demodulator)

Είδη Διαμόρφωσης

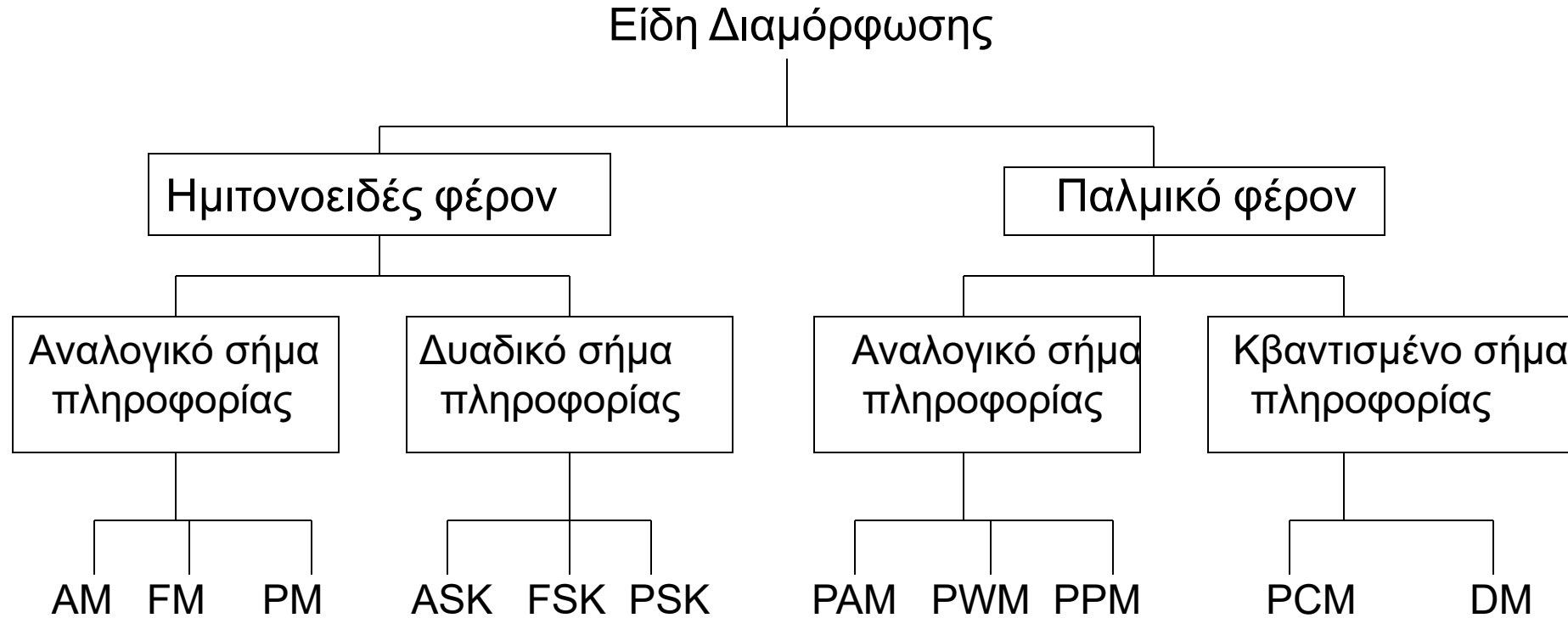
Ημιτονοειδές φέρον

- **Αναλογική διαμόρφωση συνεχούς κύματος (continuous wave–CW)**
 - Το φέρον είναι ένα ημιτονοειδές σήμα $x(t)=A\cos(2\pi f t + \varphi)$
 - **Διαμόρφωση πλάτους (AM)** αν το πλάτος $A = A[m(t)]$ όπου $m(t)$ είναι το σήμα πληροφορίας
 - **Διαμόρφωση συχνότητας (FM)** αν $f = f[m(t)]$
 - **Διαμόρφωση φάσης (PM)** αν $\varphi = \varphi[m(t)]$
- **Ψηφιακή διαμόρφωση συνεχούς κύματος**
 - Το φέρον είναι ένα ημιτονοειδές σήμα $x(t)=A\cos(2\pi f t + \varphi)$
 - Το σήμα **πληροφορίας** είναι μια ακολουθία παλμών
 - Παλμική διαμόρφωση πλάτους (ASK)
 - Παλμική διαμόρφωση συχνότητας (FSK)
 - Παλμική διαμόρφωση φάσης (PSK)

Ειδη Διαμορφωσης

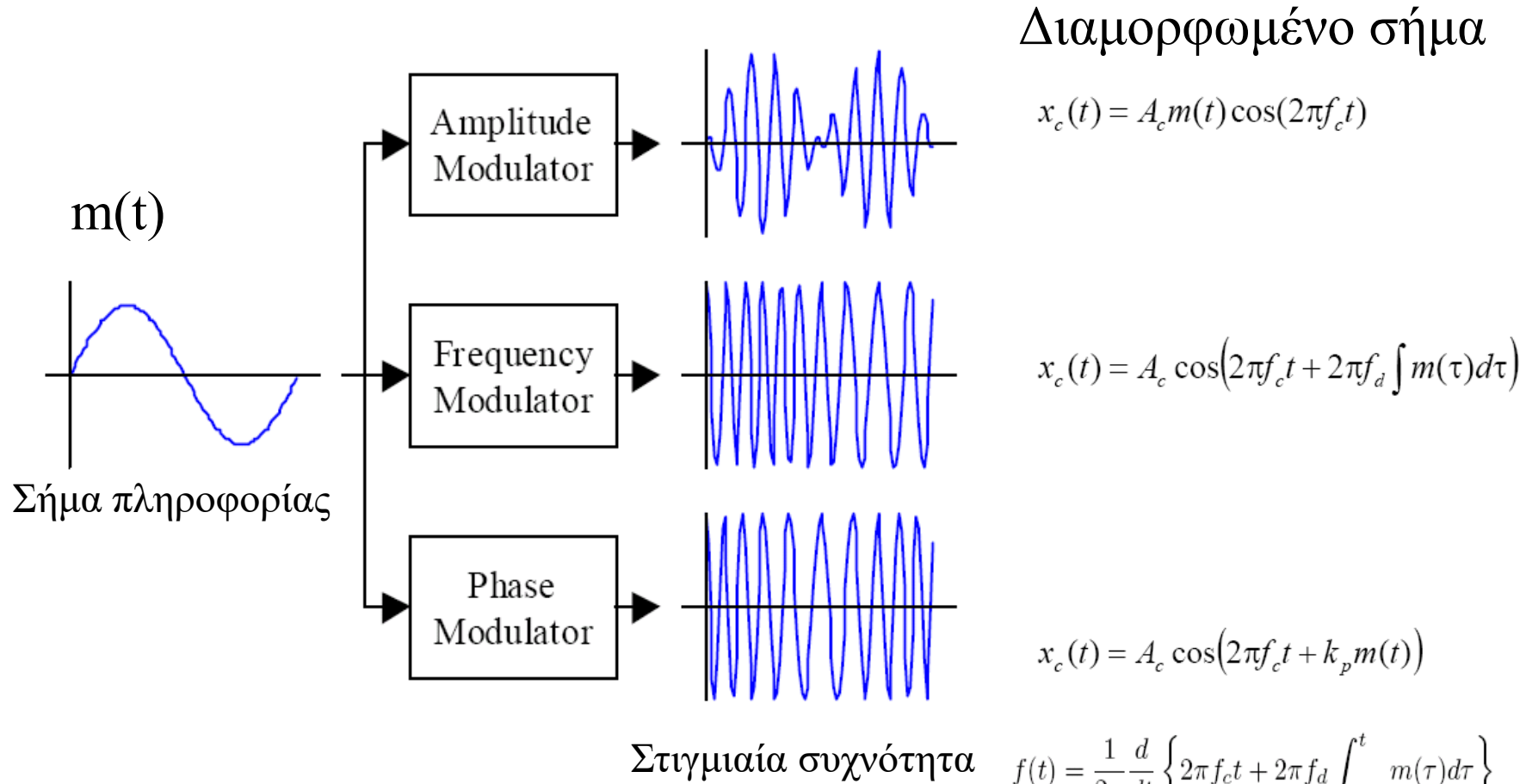
Παλμικο φερον

- **Αναλογική διαμόρφωση παλμών** (Analog pulse modulation)
 - Το φέρον είναι μια ακολουθία παλμών
 - Το σήμα πληροφορίας είναι αναλογικό
 - Διαμόρφωση ύψους παλμών** (PAM – Pulse Amplitude Modulation)
 - Διαμόρφωση διάρκειας παλμών** (PWM – Pulse Width Modulation)
 - Διαμόρφωση θέσης παλμών** (PPM – Pulse Position Modulation)
- **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 δυαδική κωδικοποίηση.
 - Σφάλματα δειγματοληψίας και κβαντισμού



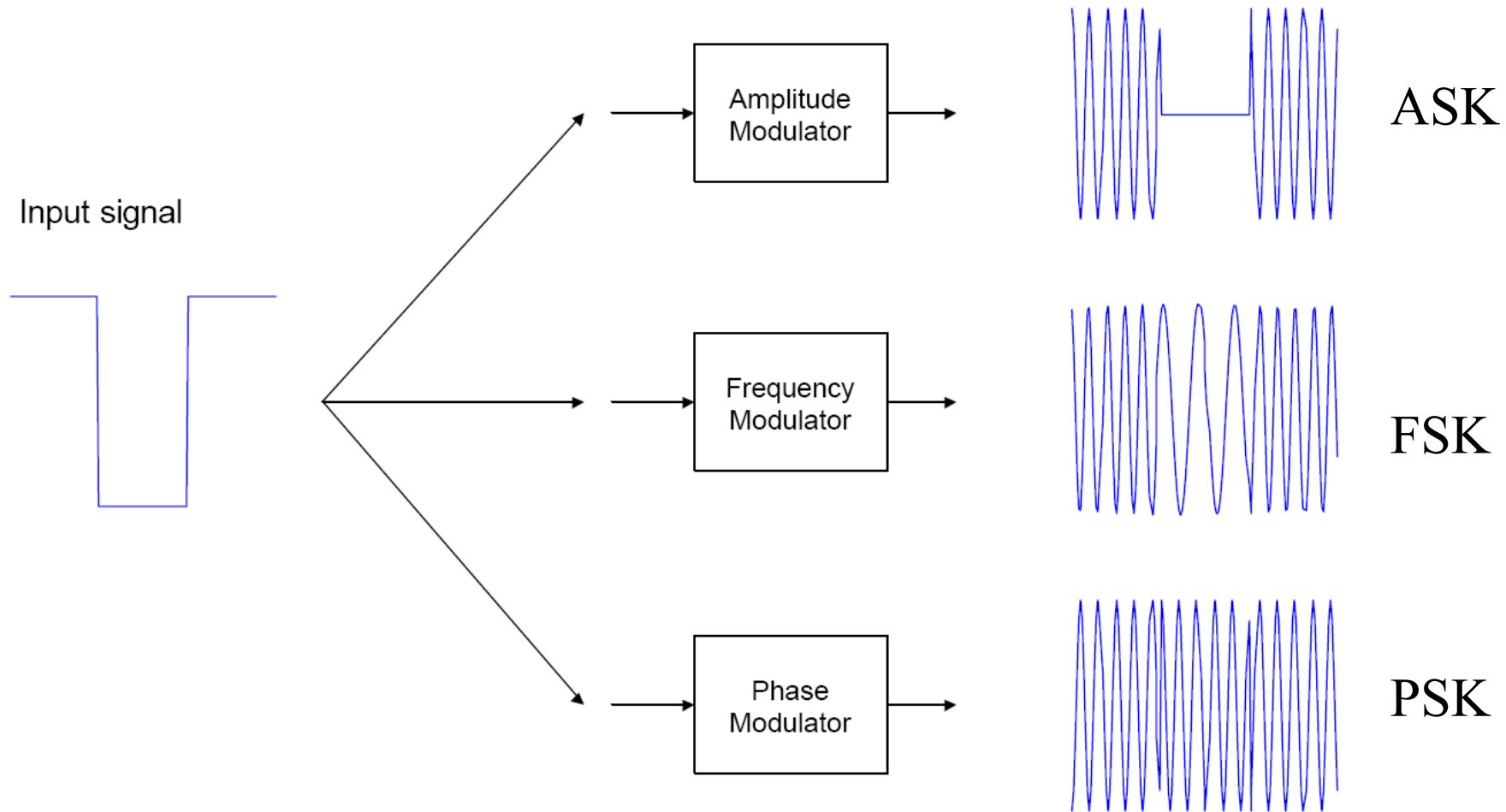
A=Amplitude, F=Frequency, P=Phase, M= Modulation
K=Keying W=Width, P=Pulse, Position
D=Delta C=Code

Βασικοί τύποι αναλογικής διαμόρφωσης



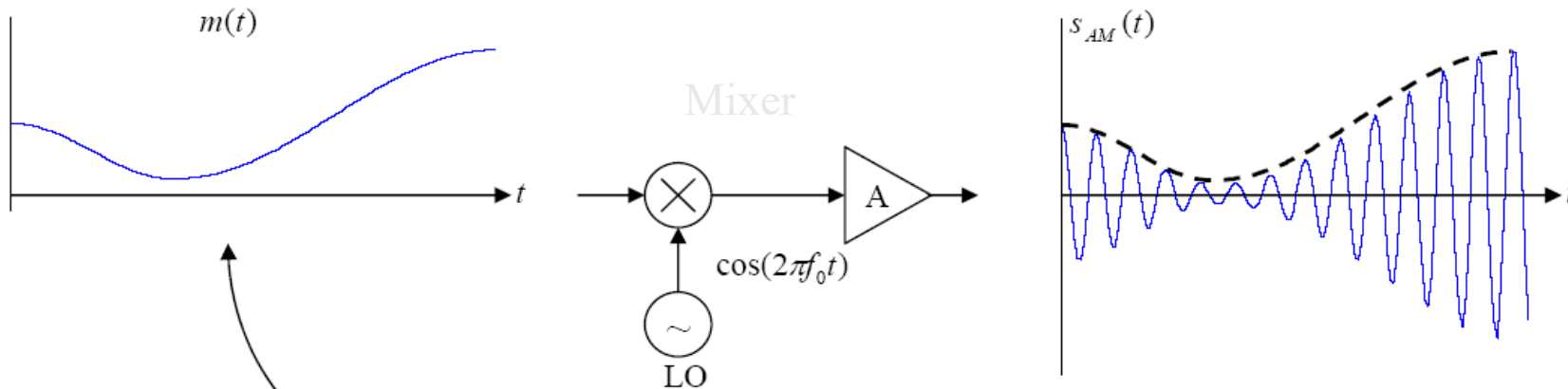
$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left\{ 2\pi f_c t + 2\pi f_d \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau \right\} \\ &= \frac{1}{2\pi} [2\pi f_c + 2\pi f_d m(t)] \\ &= f_c + f_d m(t) \end{aligned}$$

Βασικοί τύποι ψηφιακής διαμόρφωσης



AM

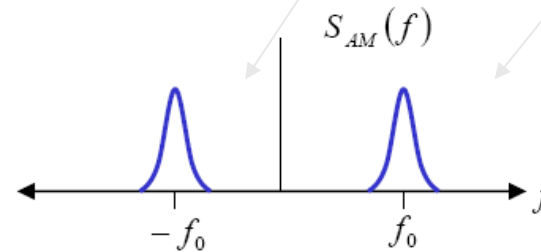
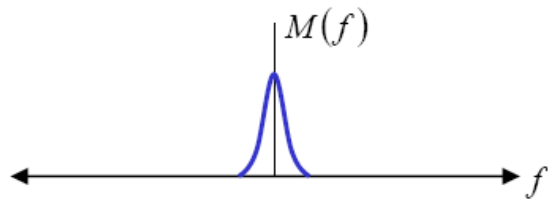
Mathematical Representation: $s_{AM}(t) = Am(t)\cos(2\pi f_0 t) \leftrightarrow S_{AM}(f) = \frac{A}{2}[M(f + f_0) + M(f - f_0)]$



$m(t)$ can assume an infinite number of possible waveforms

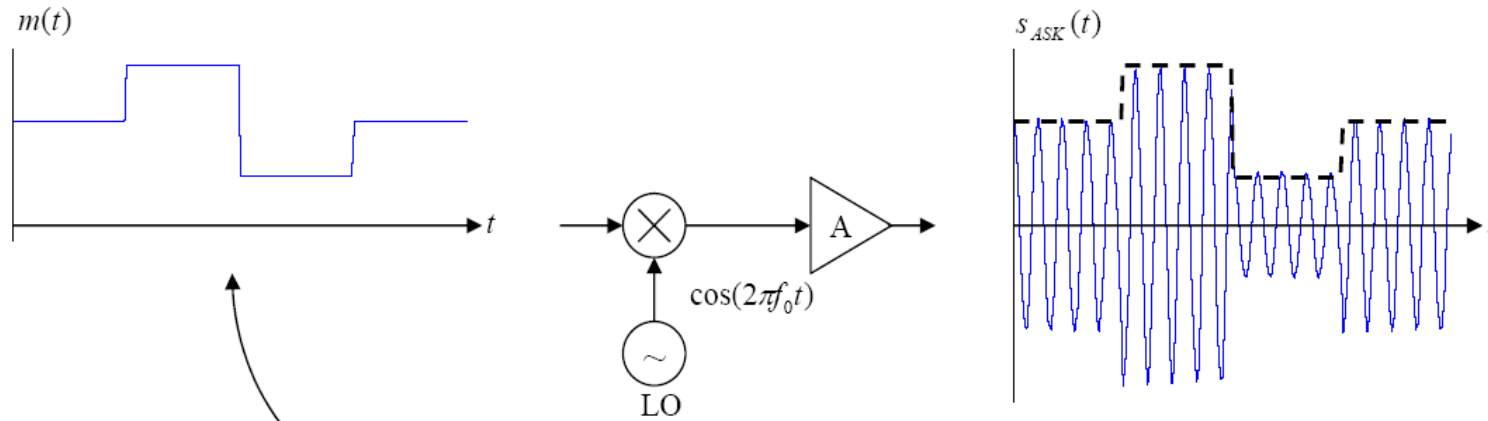
⇒ **Amplitude Modulation**

$$S_{AM}(f) = \frac{A}{2}[M(f + f_0) + M(f - f_0)]$$



Amplitude Shift Keying

Mathematical Representation: $s_{ASK}(t) = Am(t)\cos(2\pi f_0 t)$



$m(t)$ can assume one of 4 possible waveforms \Rightarrow **4-ary Amplitude Shift Keying**

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

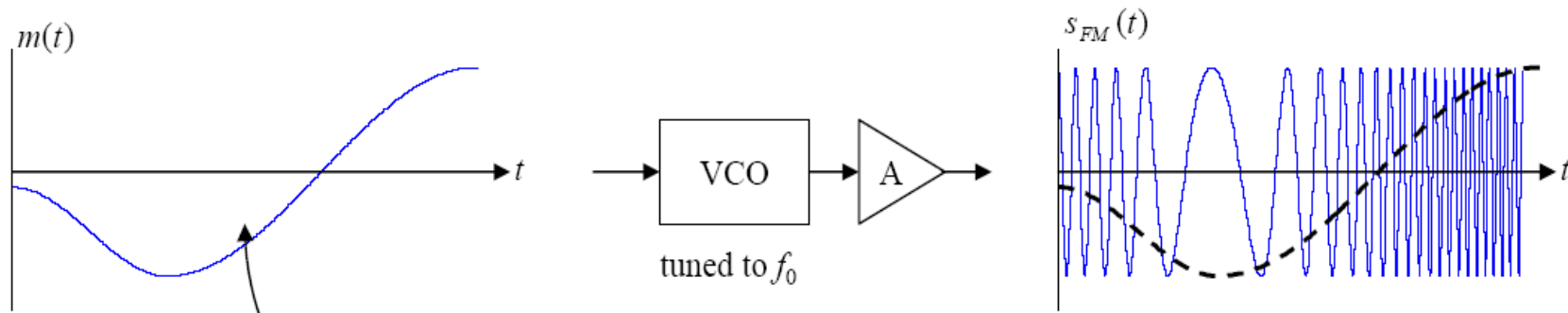
When $m(t)$ can assume only of of M possible waveforms, we have

M -ary Amplitude Shift Keying (MASK)

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

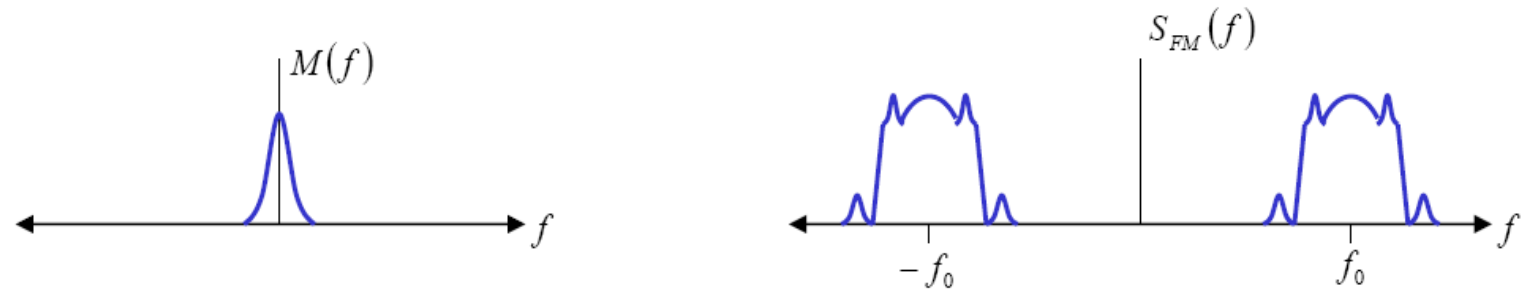
FM

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



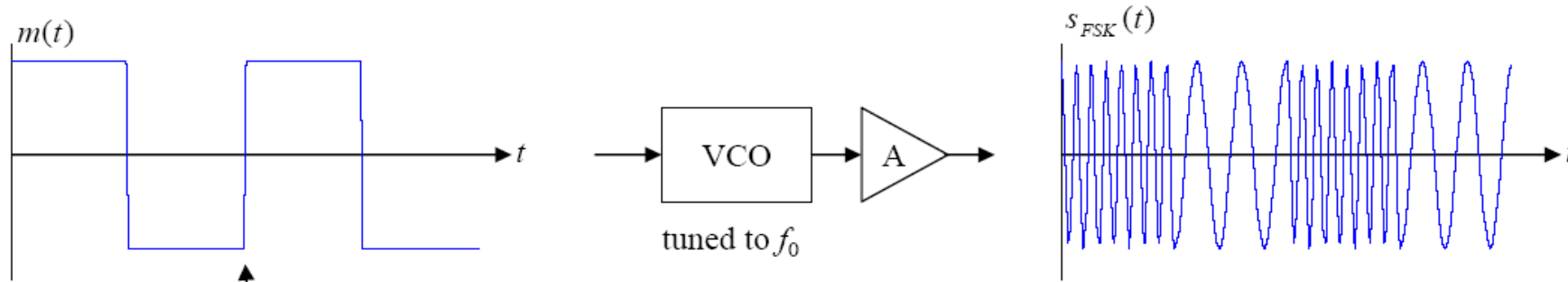
$m(t)$ can assume an infinite number of possible waveforms

⇒ **Frequency Modulation**



Frequency Shift Keying

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



$m(t)$ can assume one of two possible waveforms \Rightarrow **Binary (2-ary) Frequency 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

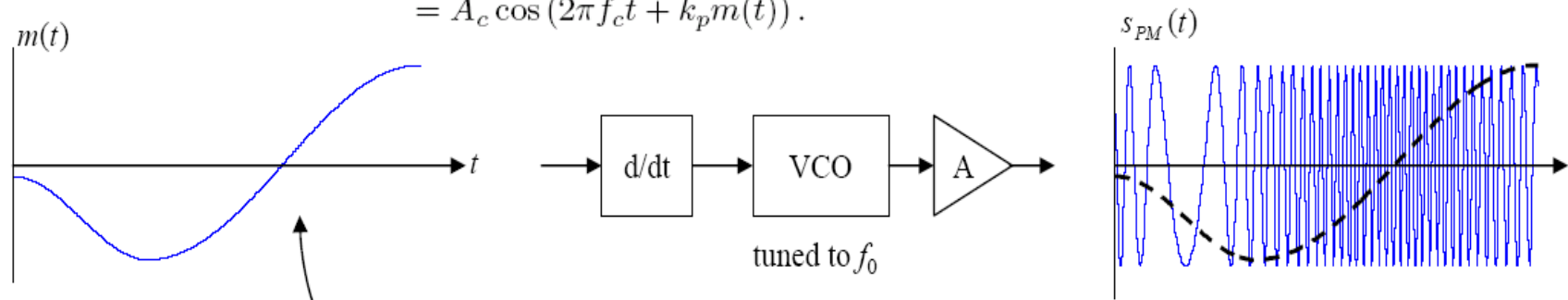
M -ary Frequency Shift Keying (MFSK)

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

PM

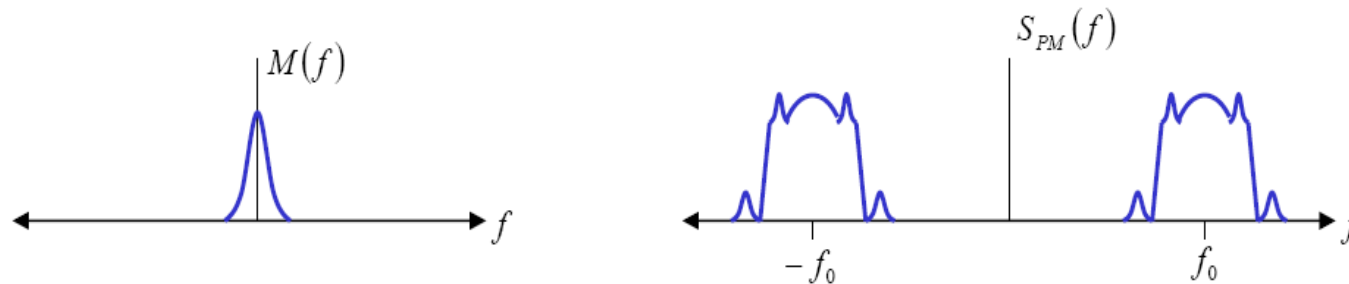
Mathematical Representation : $s_{PM}(t) = A \cos(2\pi f_0 t + k_p m(t))$

$$s_{PM}(t) = A_c \cos \left(2\pi f_c t + 2\pi f_d \int_{-\infty}^t \frac{k_p}{2\pi f_d} \frac{d}{d\tau} m(\tau) d\tau \right)$$
$$= A_c \cos (2\pi f_c t + k_p m(t)) .$$



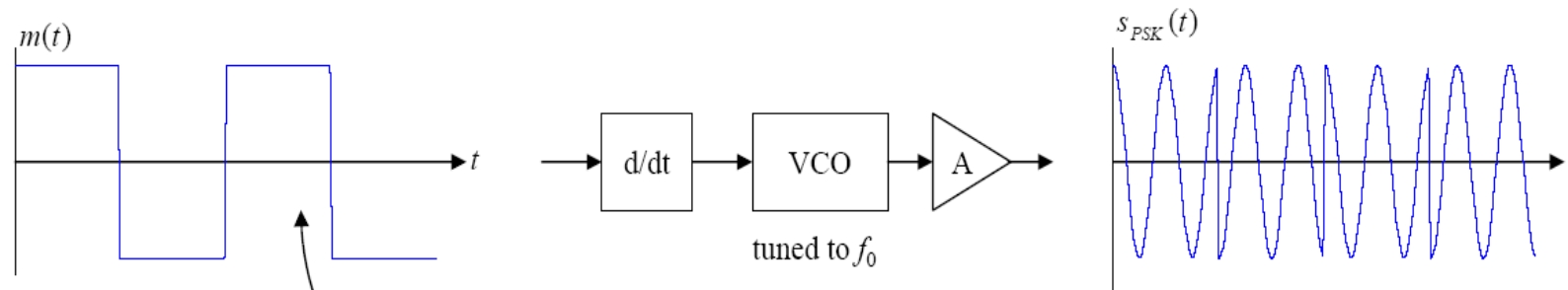
$m(t)$ can assume an infinite number of possible waveforms

\Rightarrow Phase Modulation



Phase Shift Keying

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



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

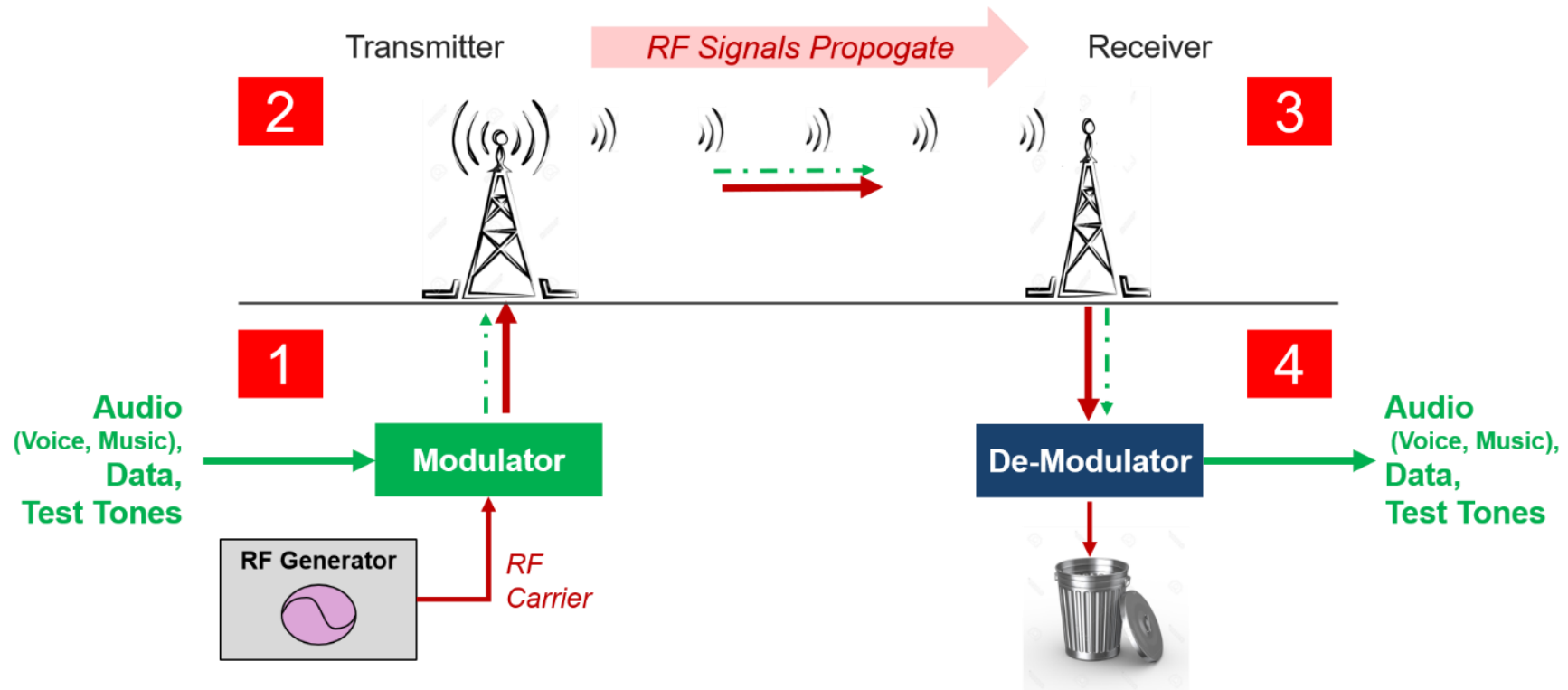
one bit is required to select one of the two possible amplitudes

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

M -ary Phase Shift Keying (MPSK)

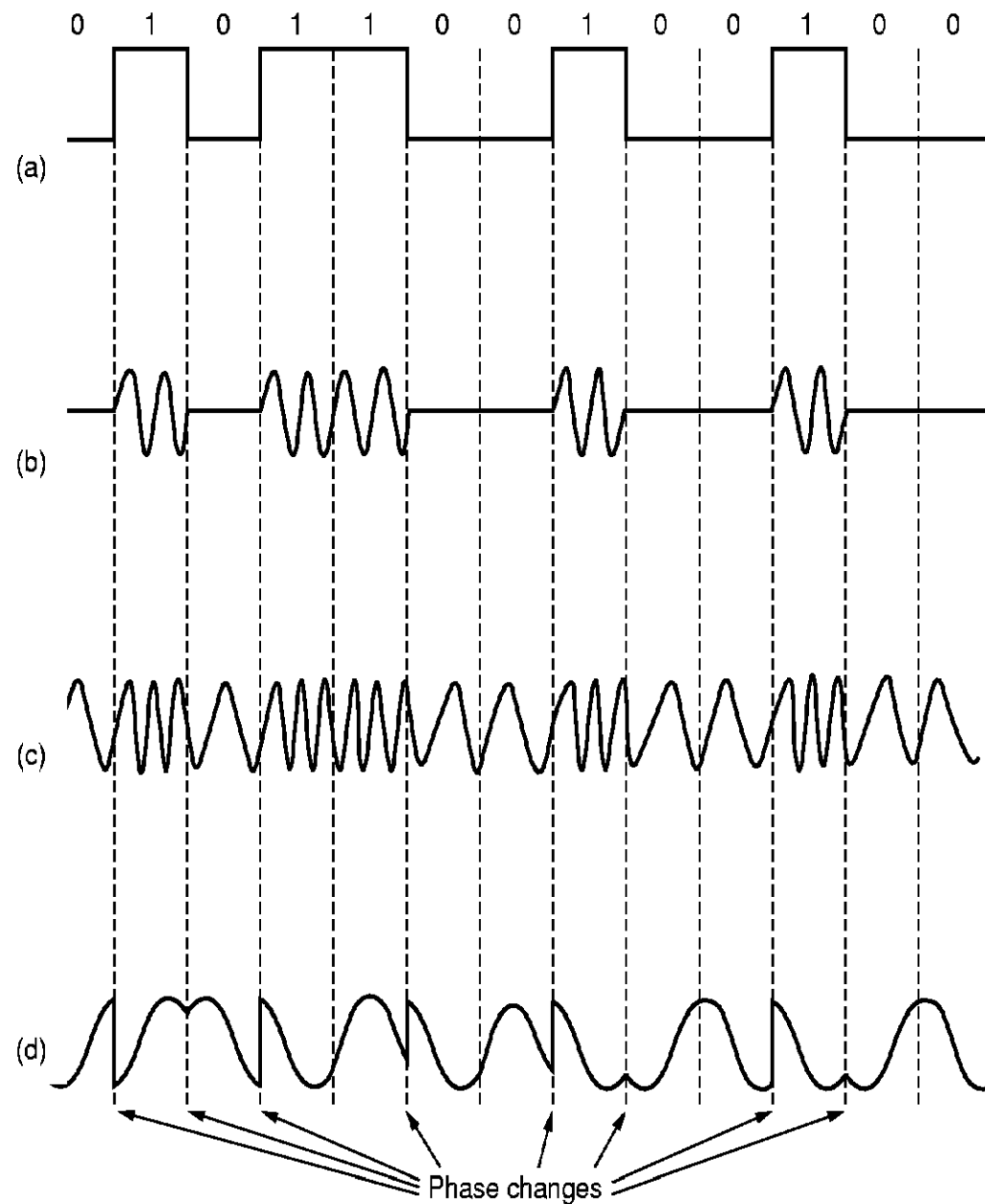
$\log_2(M)$ bits are required to select one of the M possible waveforms

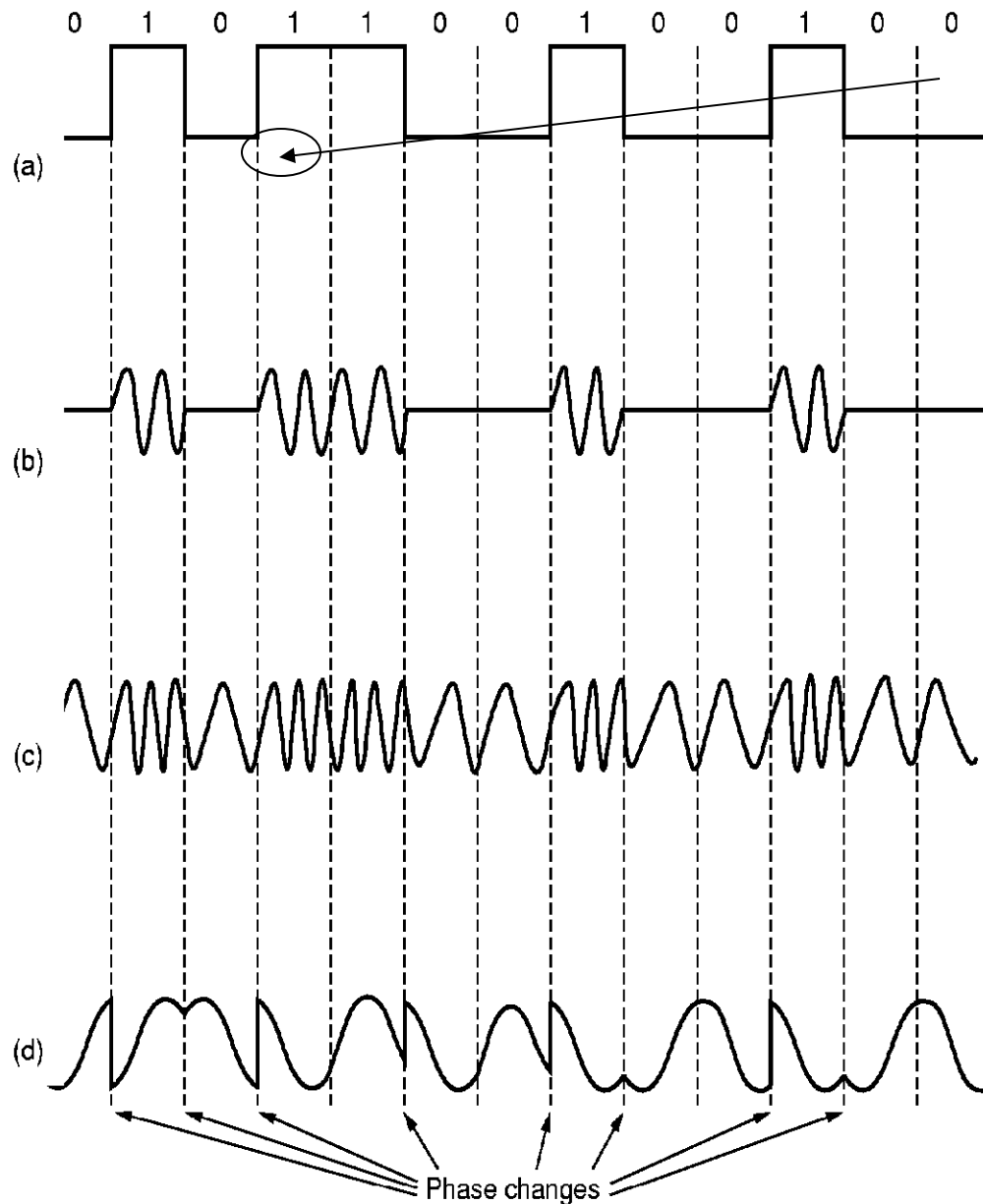
Διαμόρφωση - διαμόρφωσης



Ψηφιακή Διαμόρφωση Σήματος (Digital Modulation)

- a) μη διαμορφωμένο (ψηφιακό) σήμα
 - b) διαμόρφωση εύρους (AM)
ASK (amplitude shift keying)
τεχνική για ψηφιακά σήματα
 - c) διαμόρφωση συχνότητας (FM)
FSK (frequency shift keying)
τεχνική για ψηφιακά σήματα
 - d) διαμόρφωση φάσης (PM)
PSK (phase shift keying)
τεχνική για ψηφιακά σήματα
- f : **φέρουσα** συχνότητα





Sample

Sample Rate=Samples/sec (Baud Rate)

Κατά τη διάρκεια ενός Sample στέλνεται ένα **“symbol”**

Symbol=ελάχιστο τμήμα πληροφορίας

Στην απλούστερη περίπτωση AM με :

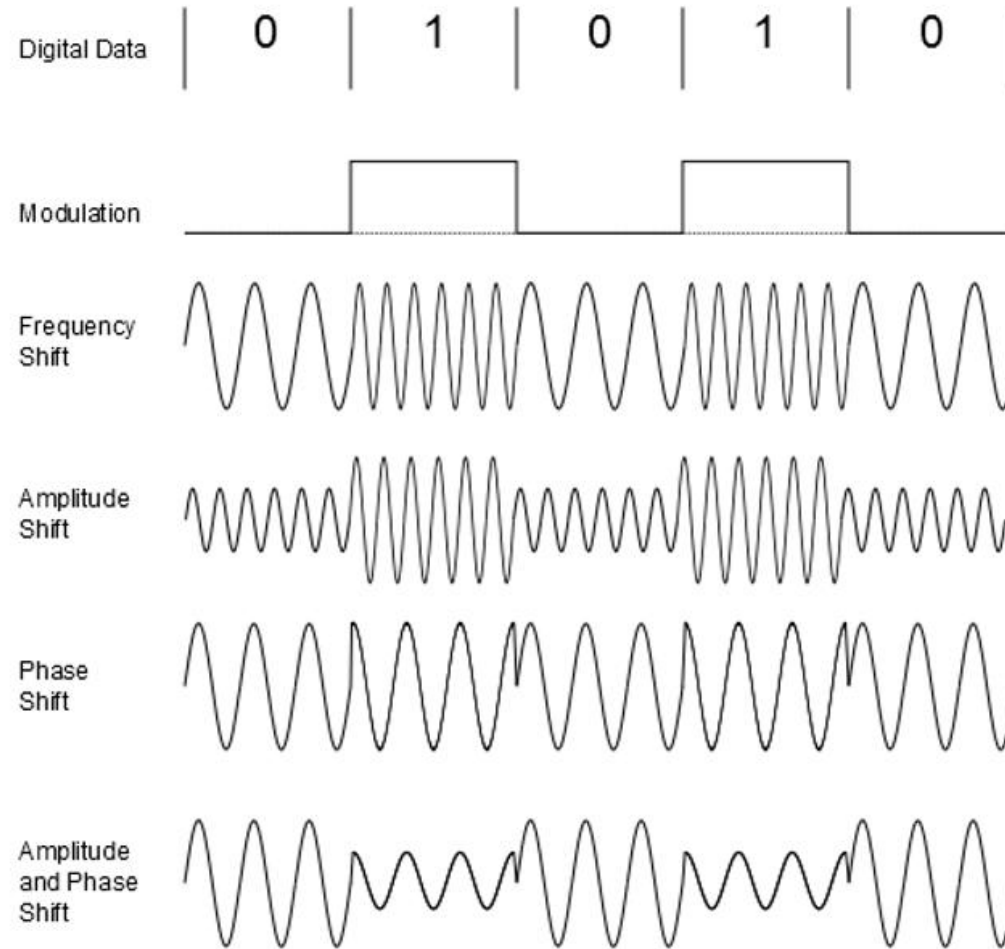
1 symbol = 1 bit (0/1) = voltage/no voltage

Για να αυξήσουμε την ταχύτητα μετάδοσης δε μπορούμε να μειώνουμε το sample επ’ άπειρον.

Μπορούμε όμως να αυξάνουμε τον αριθμό των πιθανών symbols (επιπέδων έντασης μετάδοσης, δηλαδή εύρους σήματος) του AM

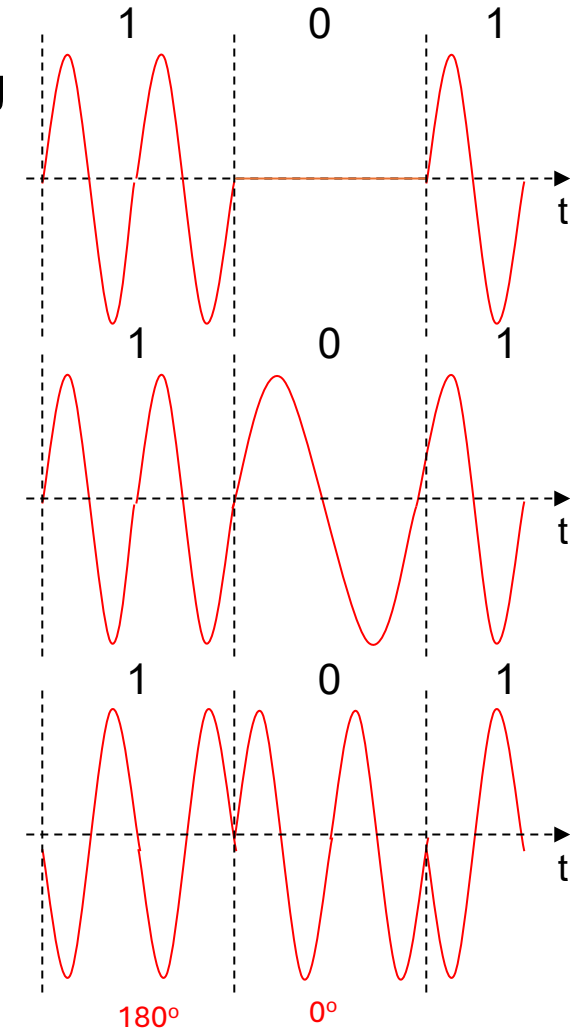
Συνηθέστερος συνδυασμός της τεχνικής αυτής με PSK.

Είδη διαμόρφωσης

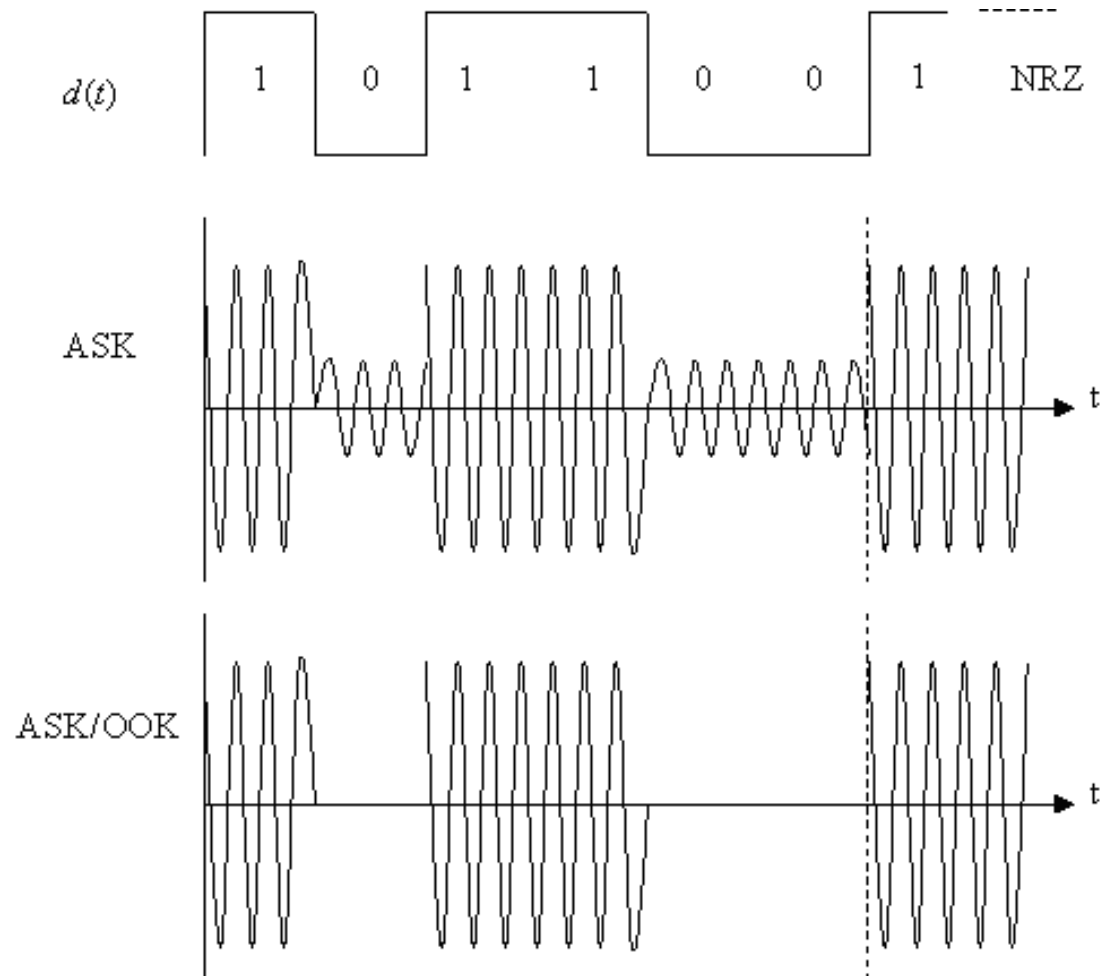


Ψηφιακή Διαμόρφωση

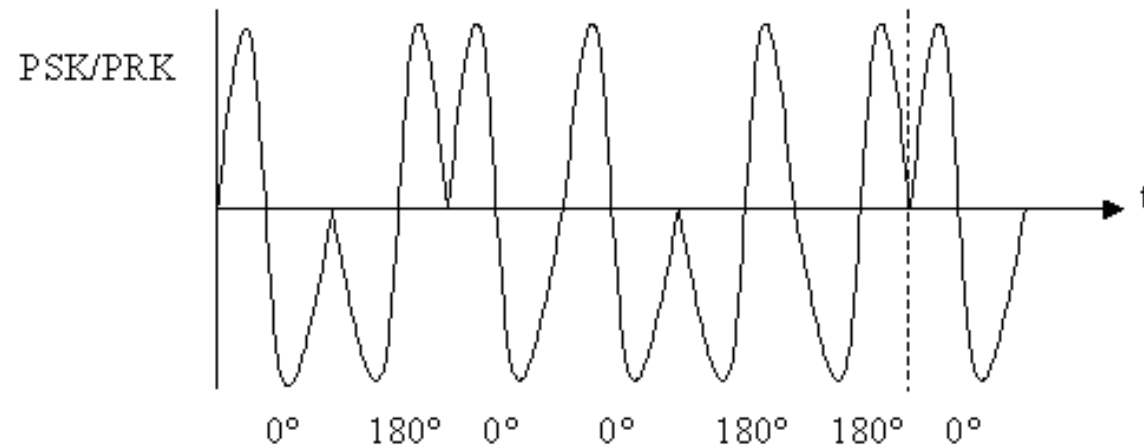
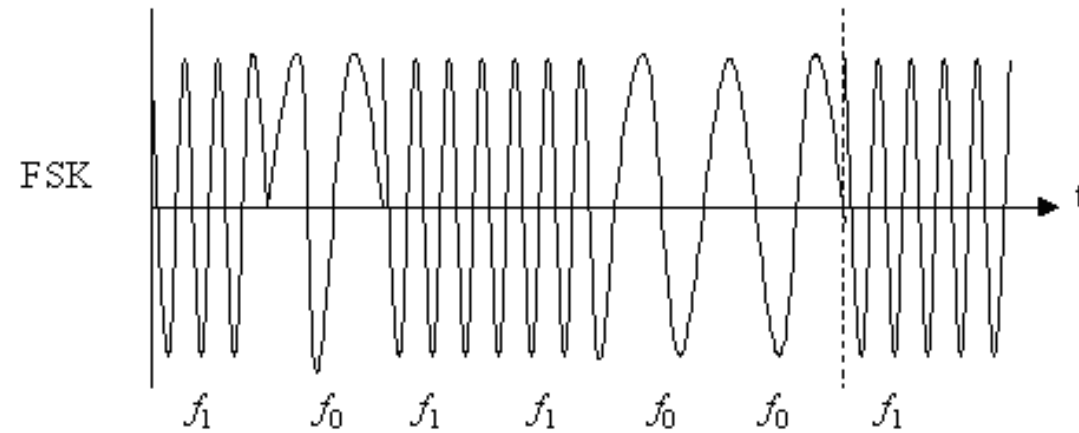
- Διαμόρφωση ψηφιακών σημάτων γνωστή και ως Shift Keying
- Amplitude Shift Keying (ASK):
 - Πολύ απλή
 - Για απαιτήσεις μικρού ρυθμού
 - Ευαίσθητη στην παρεμβολή
- Frequency Shift Keying (FSK):
 - Χρειάζεται μεγαλύτερο εύρος φάσματος
 - Ανθεκτική στην παρεμβολή
- Phase Shift Keying (PSK):
 - Πολύπλοκη
 - Πιο ακριβή



Modulation Types (Binary ASK, FSK, PSK)



Modulation Types (Binary ASK, FSK, PSK)

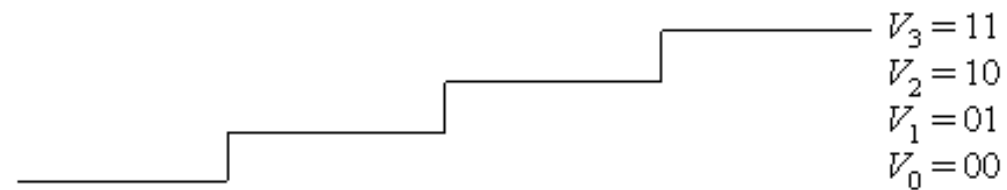


Modulation Types – 4 Level ASK, FSK, PSK

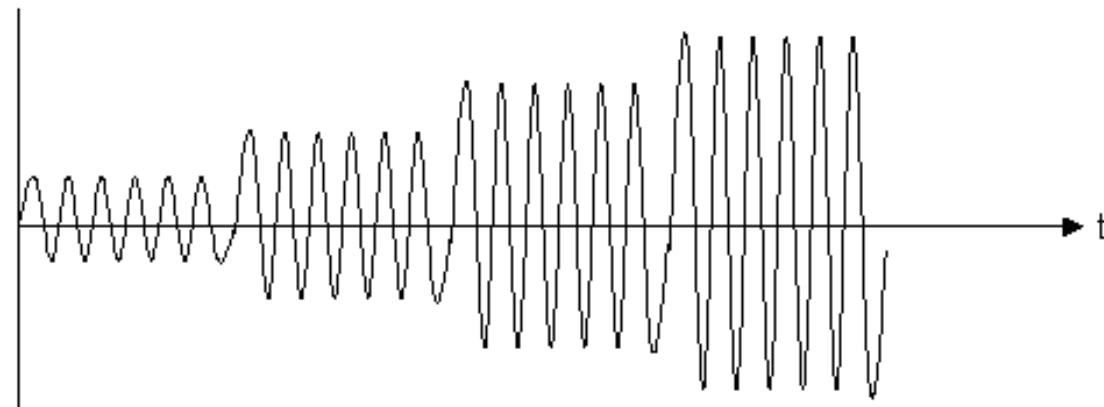
Information



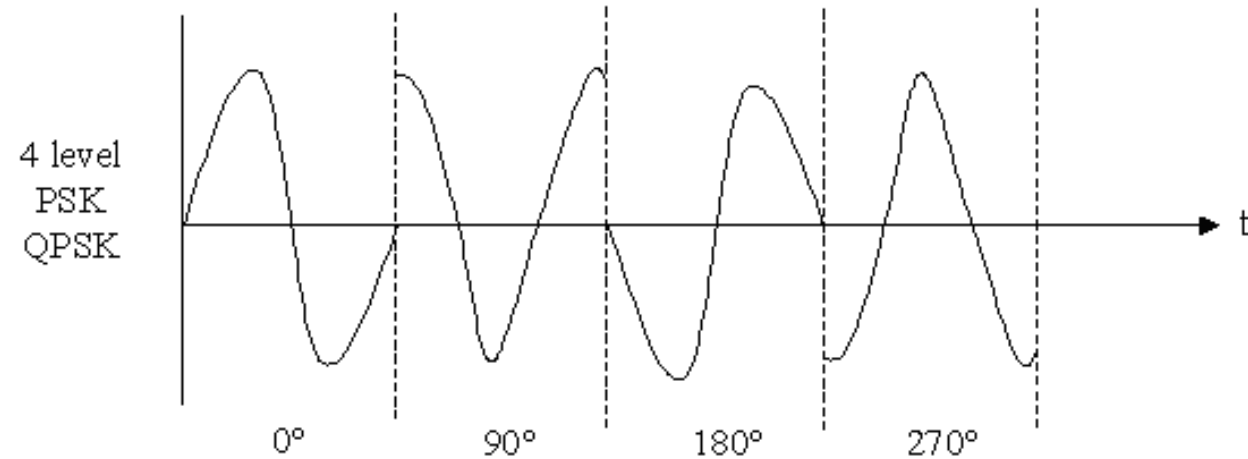
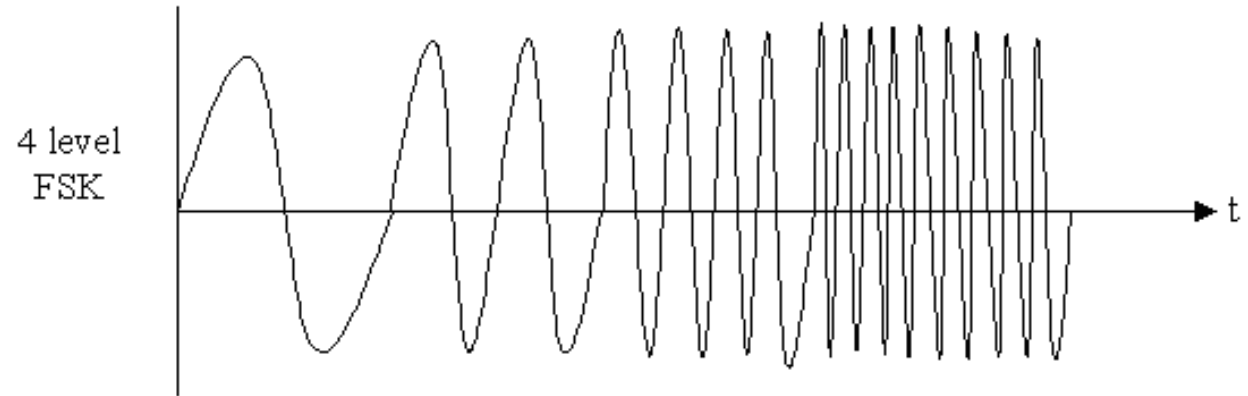
m levels
 $m = 4$



4 level
ASK

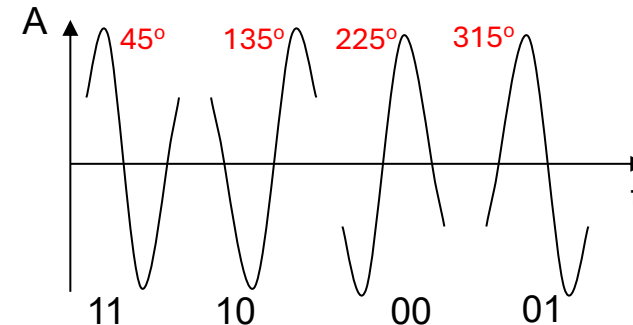
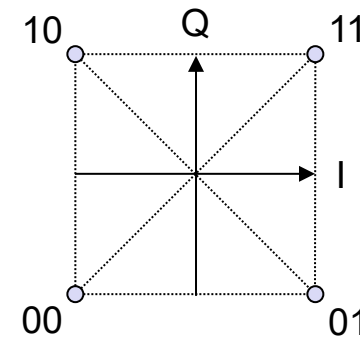
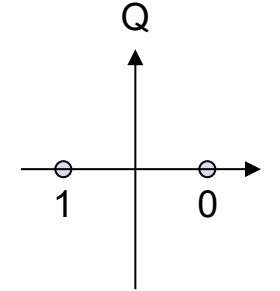


Modulation Types – 4 Level ASK, FSK, PSK



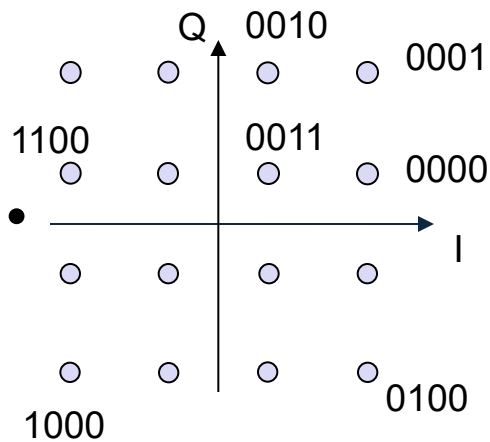
Advanced Phase Shift Keying

- BPSK (Binary Phase Shift Keying):
 - bit value 0: σήμα
 - bit value 1: ανεστραμμένο σήμα (180°)
 - Το απλούστερο PSK
 - Χαμηλή φασματική απόδοση
 - Ανθεκτικό (δορυφορικές)
- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying):
 - 2 bits σε κάθε σύμβολο
 - Πιο περίπλοκο
 - Καλύτερη φασματική απόδοση



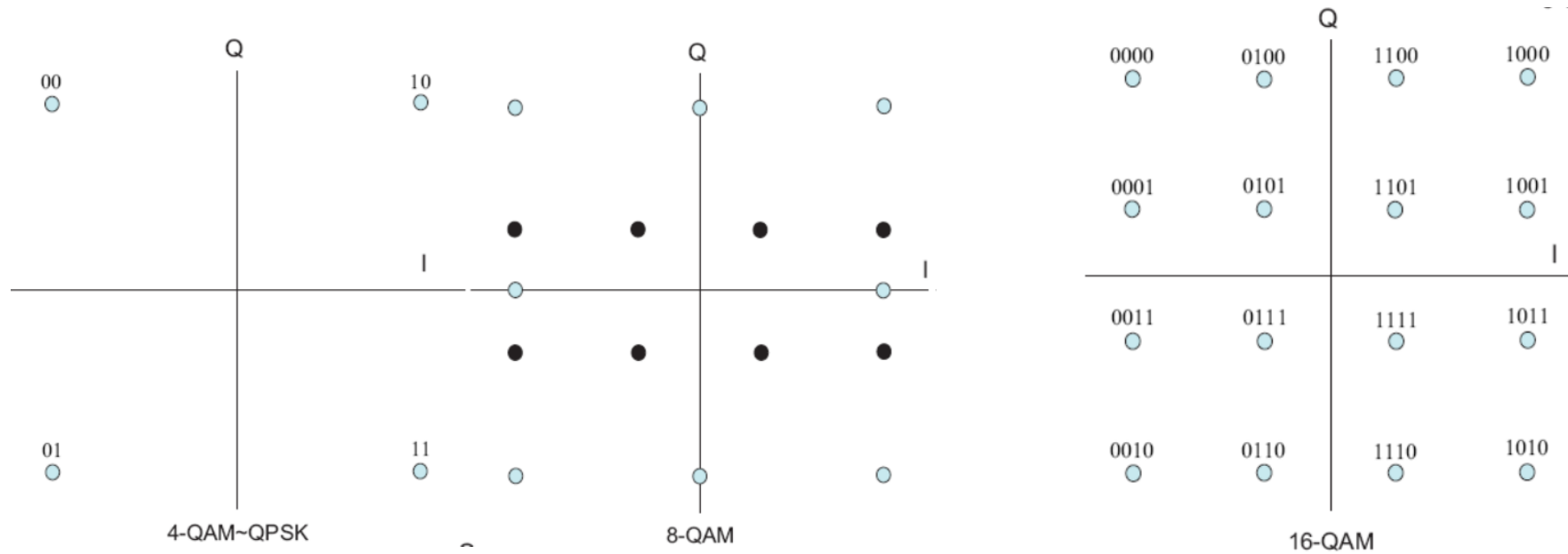
Quadrature Amplitude Modulation

- Quadrature Amplitude Modulation (QAM): συνδυασμός διαμόρφωσης εύρους και φάσης
- Κωδικοποίηση περισσότερων bits per symbol
- 2^n επίπεδα, $n=2$ ίδιο με το QPSK
- Ο ρυθμός αυξάνει όσο αυξάνει το n , αλλά περισσότερα λάθη σε σχέση με QPSK



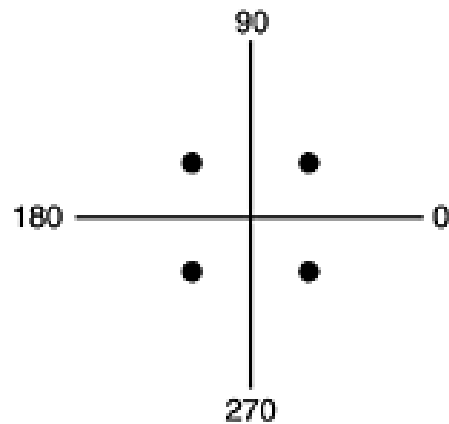
Example: 16-QAM (4 bits = 1 symbol)

Quadrature Amplitude Modulation

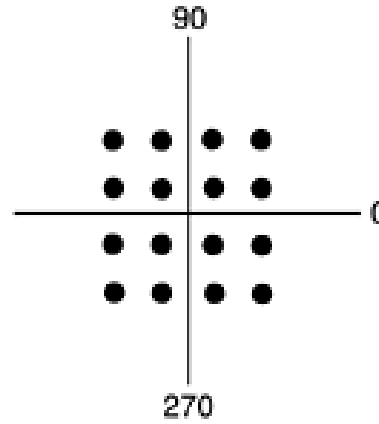


Πολλαπλές διαμορφώσεις

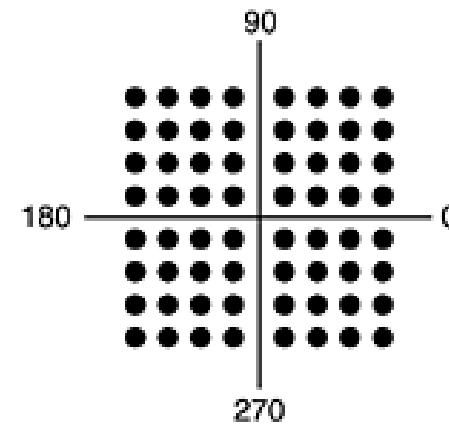
- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) = 4 phase shifts, 1 amplitude level, 2 bits/symbol
- QAM-16 = 4 phase shifts, 4 amplitude levels, 4 bits/symbol
- QAM-64 = 4 phase shifts, 16 amplitude levels, 6 bits/symbol



QPSK

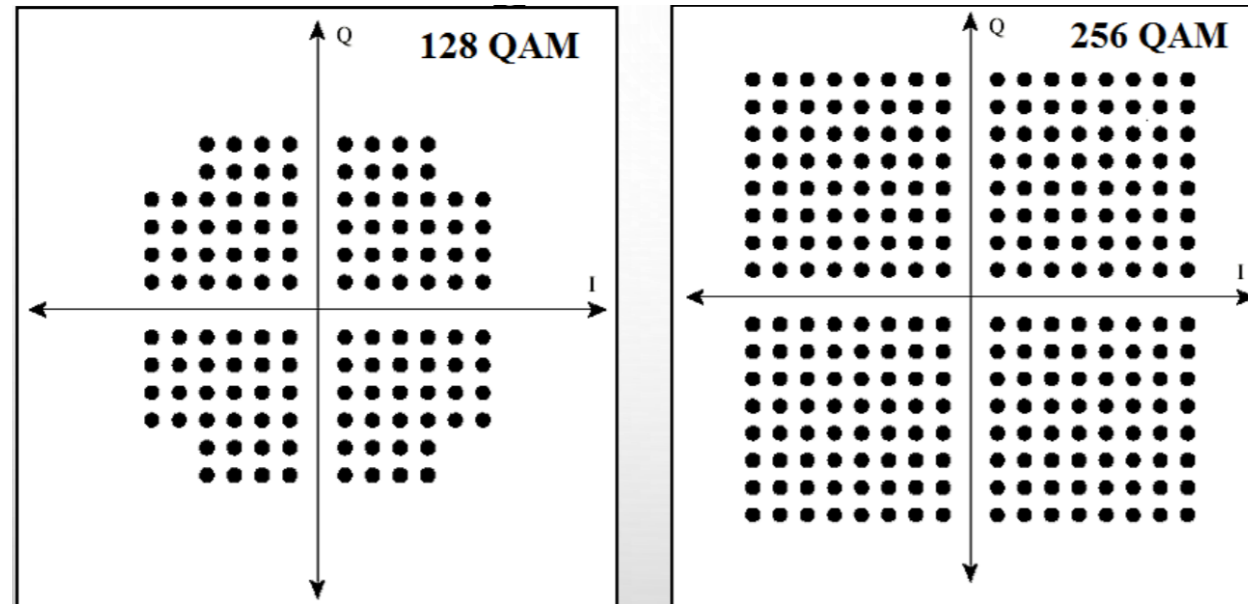
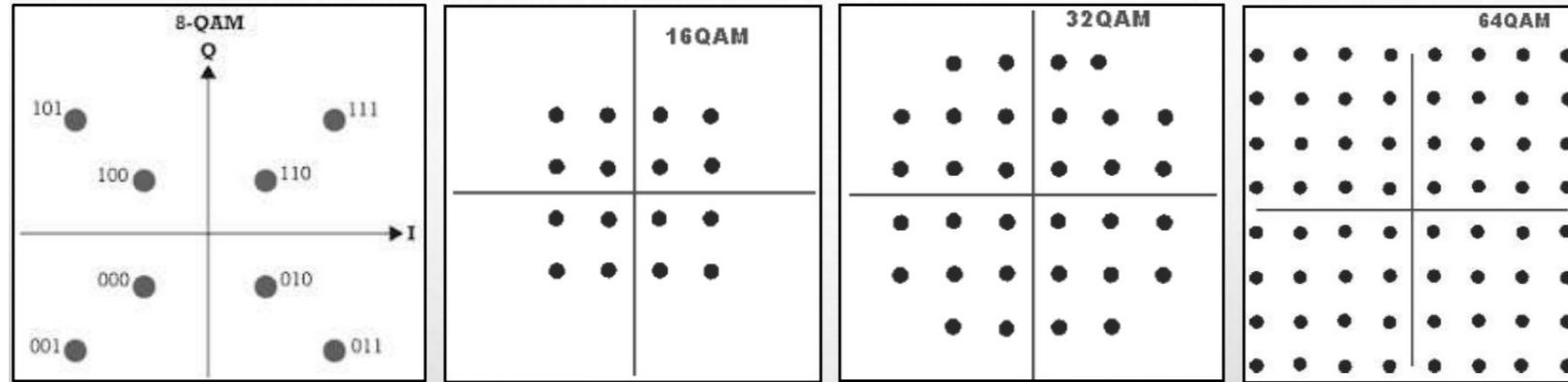


QAM-16

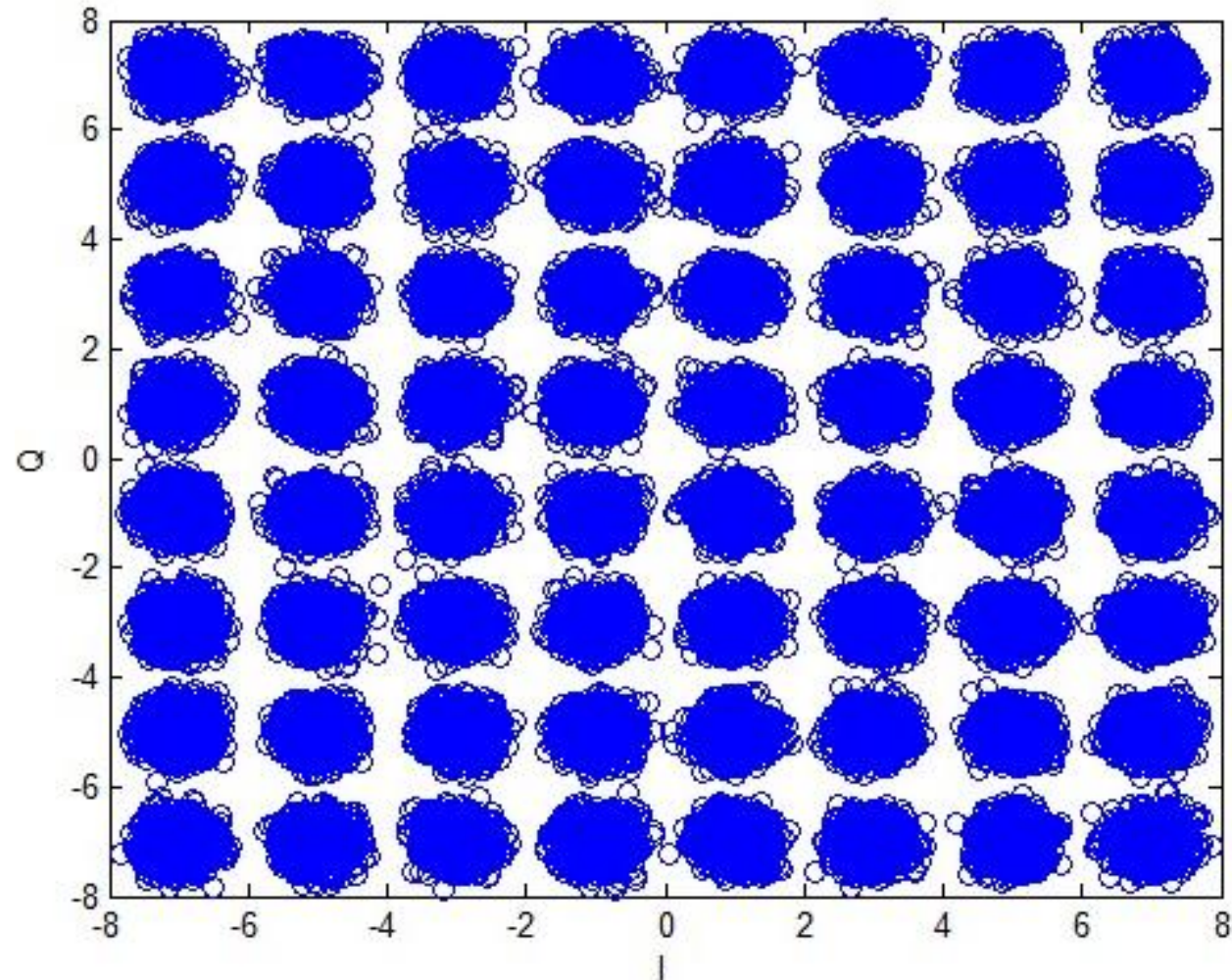


QAM-64

Πολλαπλές διαμορφώσεις

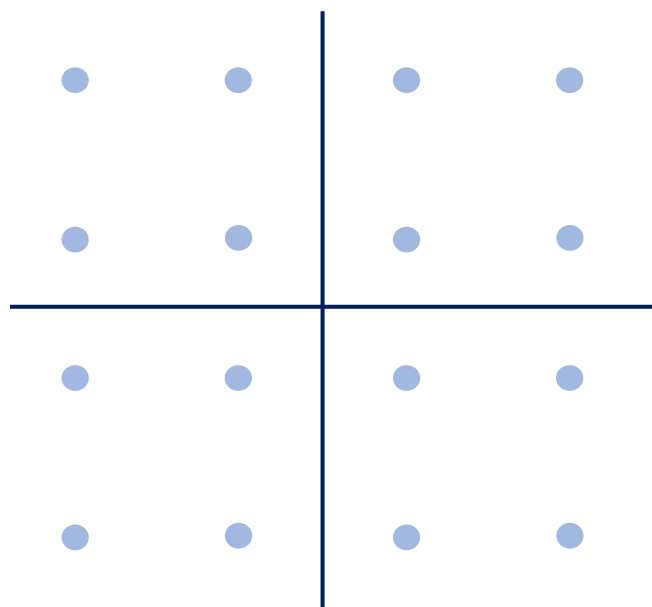


Πολλαπλές διαμορφώσεις



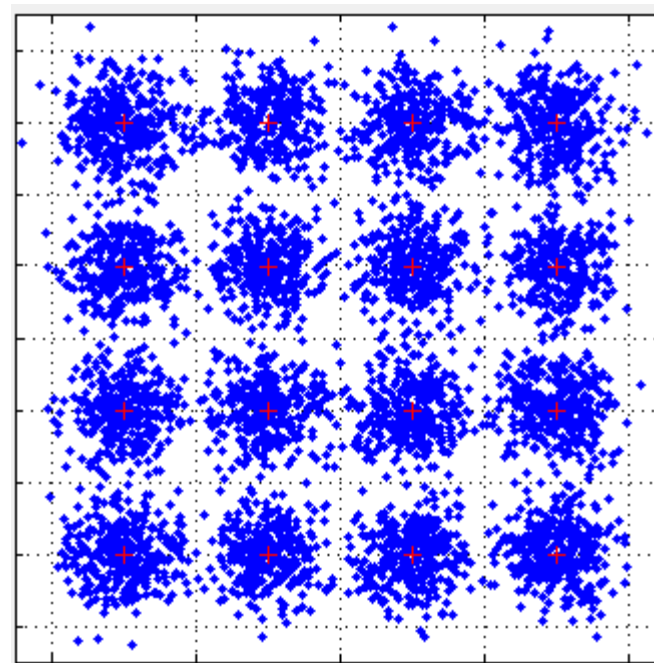
Αποδιαμόρφωση

- Τα λαμβανόμενα σήματα εξαρτώνται από τις αλλοιώσεις στο κανάλι
 - Στα ασύρματα τα πολλαπλά μονοπάτια είναι ο βασικός λόγος για διαφορές σε ισχύ και φάση



Transmitter

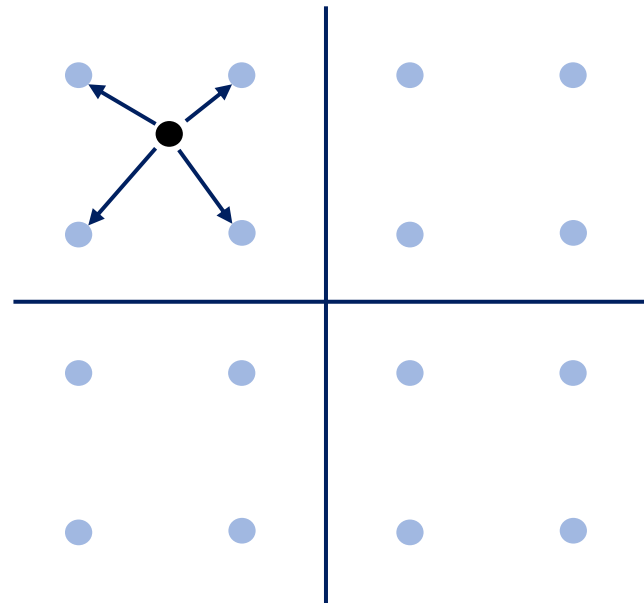
Inter-symbol interference



Receiver

Αποδιαμόρφωση

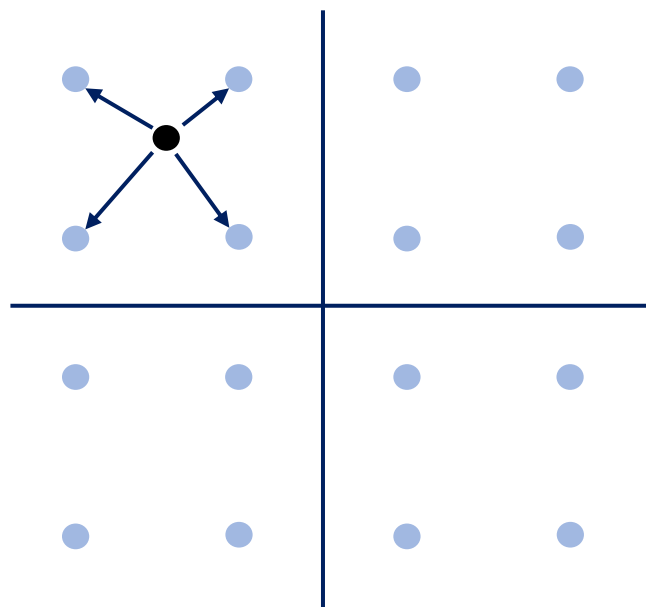
- Αυστηρή (hard) απόφαση
 - Υπολογισμός απόστασης και επιλογή της μικρότερης
 - Συντηρητική μέθοδος



Receiver

Αποδιαμόρφωση

- Χαλαρή (soft) απόφαση
- Υπολογισμός απόστασης και σύνδεση με πιθανότητα
- Συνδυασμός με αποτελέσματα FEC



Receiver

RSS, SNR και SINR

- Οι πιο συχνές μετρήσεις ποιότητας καναλιού
- RSS – Received Signal Strength
 - Measured in dBm
 - Often available through RSSI register on chipsets
- SNR – Signal to Noise Ratio (S/N)
 - Measured in dB
 - Ratio of RSS and measured noise, available or can be derived
- SINR – Signal to Noise and Interference Ratio (S/I+N)
 - Measured in dB
 - Considers how much interference is caused by other transmissions
 - Very useful metric but difficult to measure

Decibels

- Μονάδα σύγκρισης (κυρίως ενεργειών και ισχύων)
- Χρήσιμη :
 - Όταν τα μεγέθη μεταβάλλονται κατά αρκετές τάξεις μεγέθους
 - Όταν μας ενδιαφέρει κυρίως η σχέση (ο λόγος) δυο μεγεθών
- Για συγκρίσεις ενεργειών ή ισχύων: $db = 10 \log_{10}(P_1/P_2)$
- Μερικές φορές είναι χρήσιμη η σύγκριση της ισχύος ενός σήματος με μια ισχύ αναφοράς 1Watt (1W) ή 1 miliWatt (1mW).
 - $dbW = 10 \log_{10}(P_1/ 1W)$
 - $dbm = 10 \log_{10}(P_1/ 1mW)$

Decibels

- Παραδείγματα:

$$P_1=1\text{mW}=0\text{dbm}, P_1=10\text{mW}=10\text{dbm}$$

$$P_1=2\text{mW}=3\text{dbm}, P_1=4\text{mW}=6\text{dbm}$$

$$P_1=2.5\text{mW}=4\text{dbm}, P_1=1.25\text{mW}=1\text{dbm}$$

$$P_1=8\text{mW}=9\text{dbm}, P_1=5\text{mW}=7\text{dbm}$$

$$P_1=100\text{mW}=20\text{dbm}, P_1=1000\text{mW}=30\text{dbm}$$

10πλασιασμός +10db

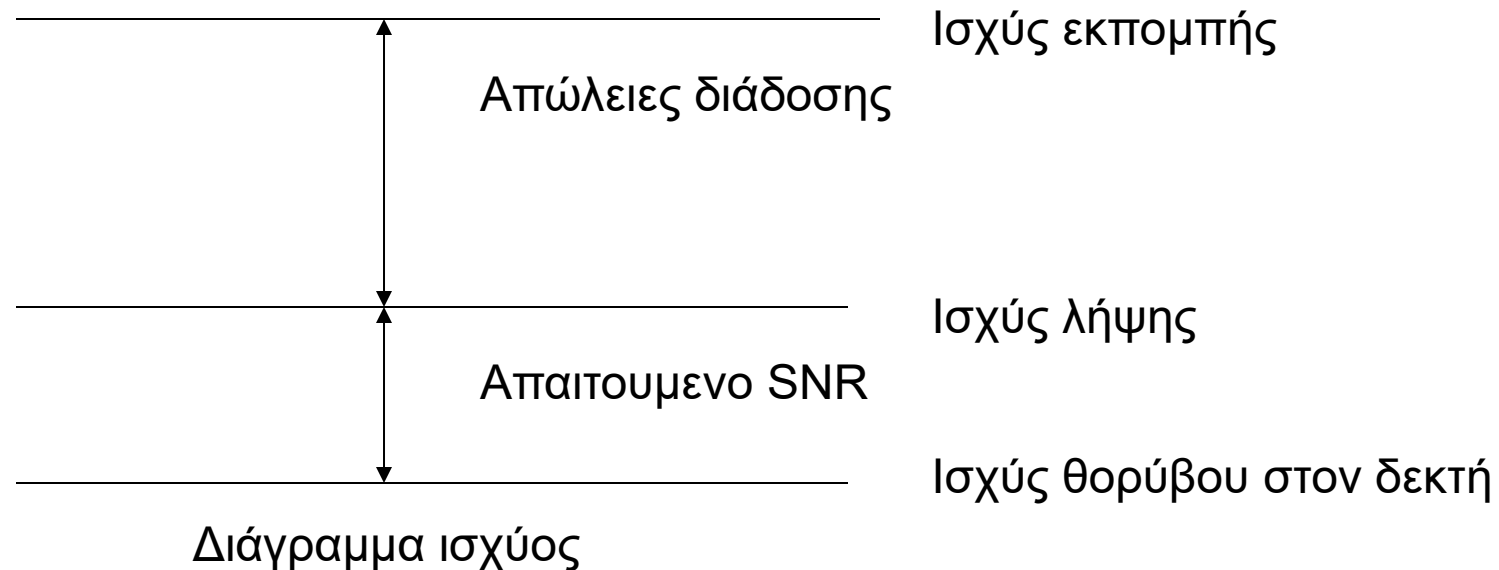
Υποδεκαπλασιασμός -10db

Διπλασιασμός +3db

Υποδιπλασιασμός -3db

Επίδραση του Θορύβου

- ❑ Οι επιδόσεις ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος καθορίζονται από την **σηματοθορυβική σχέση** (signal-to-noise ratio - SNR).
 - ❑ Μερικές φορές αναφέρεται και σαν λόγος φέροντος προς θόρυβο (carrier-to-noise ratio)
- ❑ Για την επίτευξη του επιθυμητού SNR στον δεκτή πρέπει:
 - ❑ Να υπολογίσουμε την ισχύ του θορύβου
 - ❑ Να εκπέμπουμε ικανοποιητική ισχύ με τον πομπό

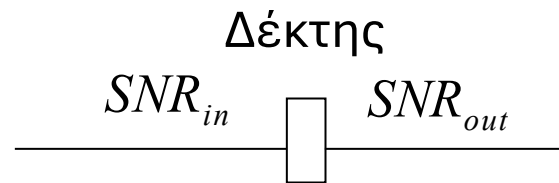


Signal to Noise Ratio (SNR)

- Ο SNR εκφράζεται σε decibels (dB)

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{N}$$

- Συνήθεις τιμές του SNR :
 - Ήχος τηλεφωνικής ποιότητας: 26 dB (= 400 φορές)
 - Ήχος hi-fi: 60 dB (= 10^6 φορές)
 - Τερματικό κινητής τηλεφωνίας: 14 - 18 dB (= 25 – 63 φορές)
- Όλα τα ηλεκτρικά κυκλώματα παράγουν θόρυβο:
 - Ο SNR στη έξοδο τους είναι πάντοτε μικρότερος από
 - τον λόγο στην είσοδο



$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} > 1 \quad = \text{παράγων θορύβου (noise figure)}$$

Ευαισθησία δέκτη

802.11a

Modulation	Data rate (Mbps)	Receiver sensitivity (dBm)
BPSK	6	-82
BPSK	9	-81
QPSK	12	-79
QPSK	18	-77
16-QAM	24	-74
16-QAM	36	-70
64-QAM	48	-66
64-QAM	54	-65

Ευαισθησία δέκτη

- Το 802.11ac εισάγει 256 QAM
 - 256 QAM – 8 bits per symbol

Modulation	Coding rate	Receiver sensitivity (dBm)
BPSK	1/2	-82
QPSK	1/2	-79
QPSK	3/4	-77
16-QAM	1/2	-74
16-QAM	3/4	-70
64-QAM	2/3	-66
64-QAM	3/4	-65
64-QAM	5/6	-64
256-QAM	3/4	-59
256-QAM	5/6	-57



Κριτήρια επιλογής τεχνικών ψηφιακής διαμόρφωσης

- Αποδοτικότητα Ισχύος (Power Efficiency): Το μέσο SNR που απαιτείται για την επίτευξη συγκεκριμένης επίδοσης σφάλματος (συνήθως 10^{-6})

M	M-PSK	M-QAM
2	10.6	-
4	13.6	13.6
8	18.5	17.6
16	24.3	20.5
32	31.5	24.4
64	36.5	26.6

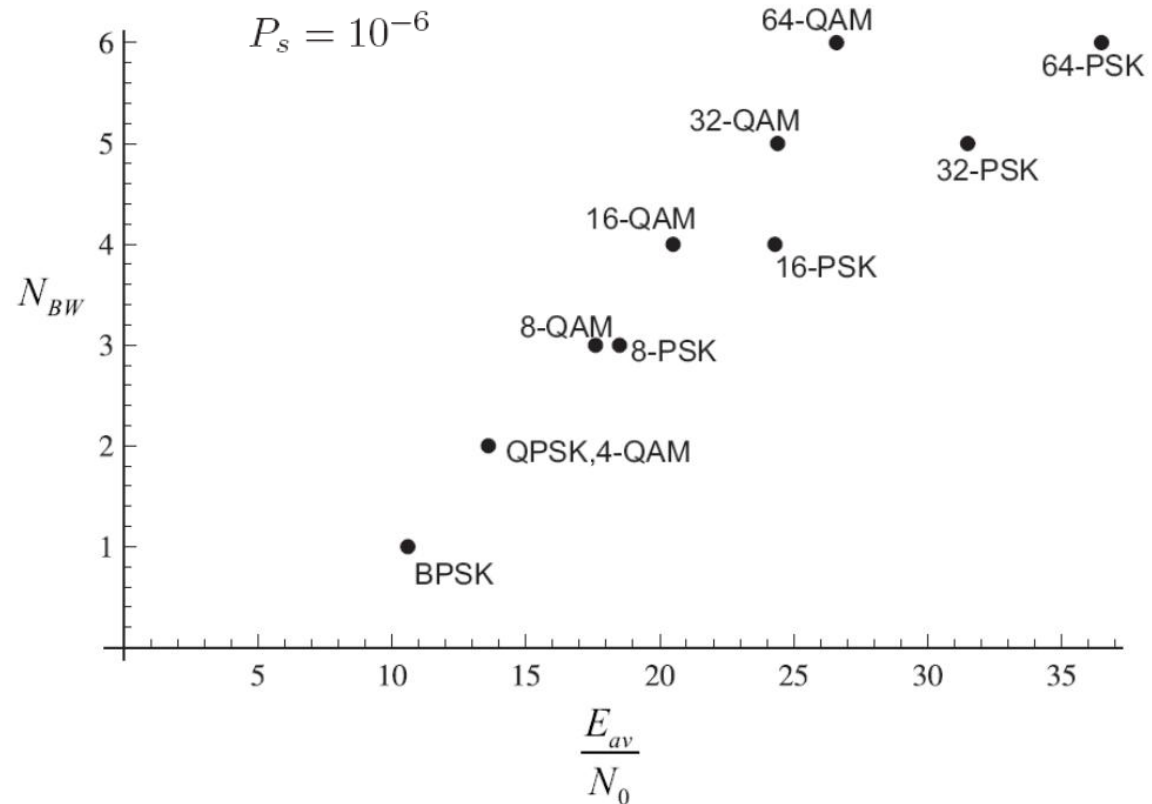
$$\frac{\mathcal{E}_s}{N_0} \text{ (dB)}, P_s = 10^{-6}$$

Κριτήρια επιλογής τεχνικών ψηφιακής διαμόρφωσης

Φασματική απόδοση

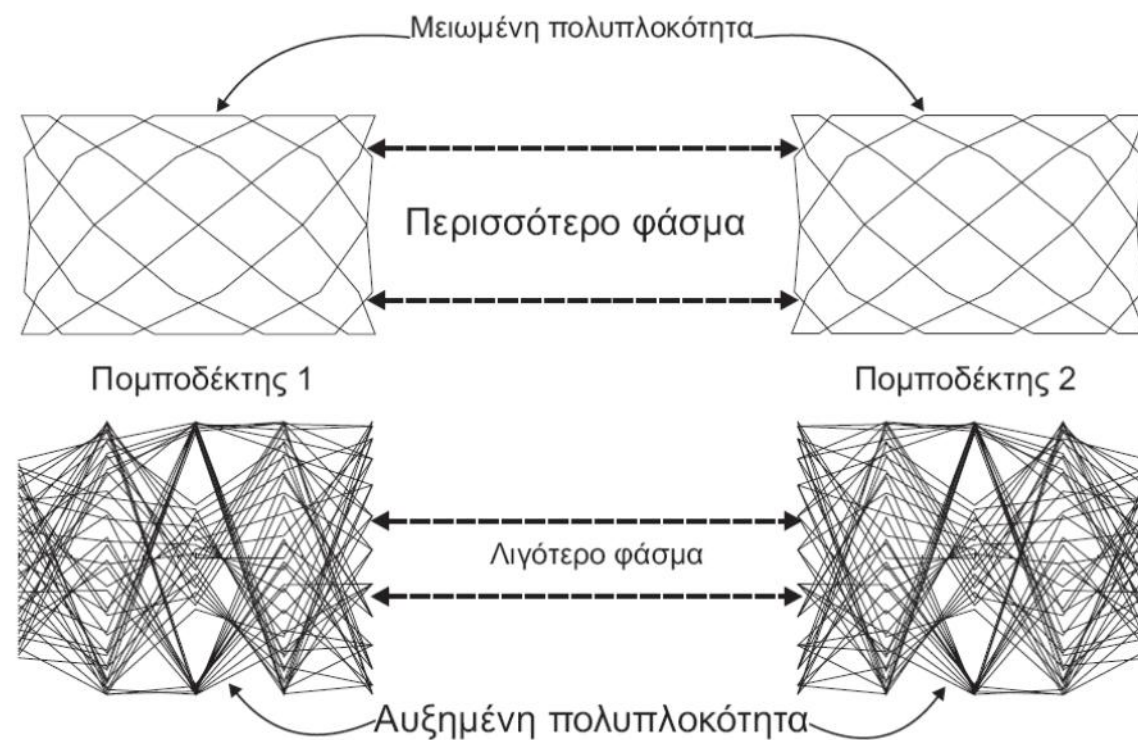
Spectral Efficiency

$$N_{BW} = \frac{R}{W} = \log_2 M \text{ b/s/Hz.}$$

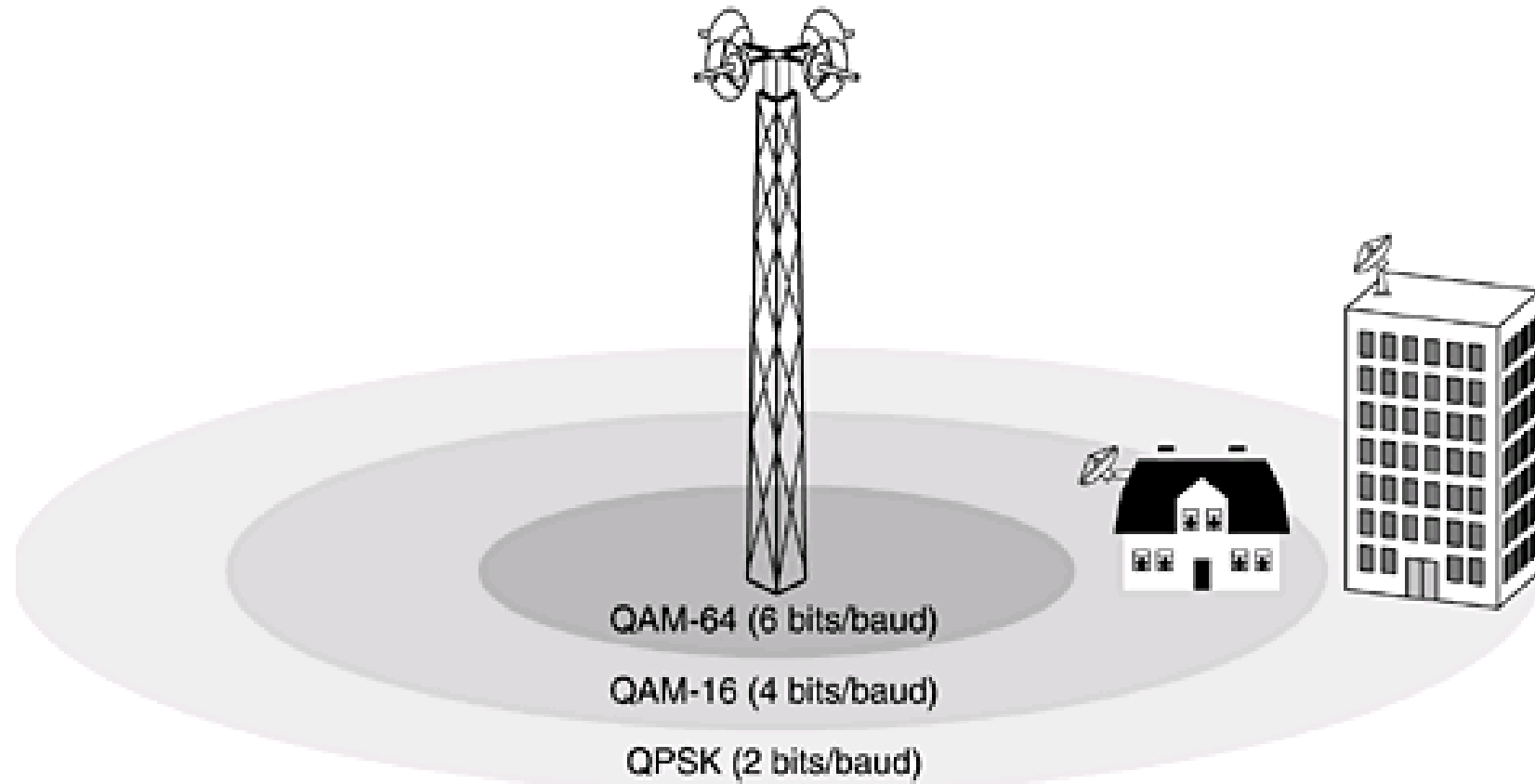


Κριτήρια επιλογής τεχνικών ψηφιακής διαμόρφωσης

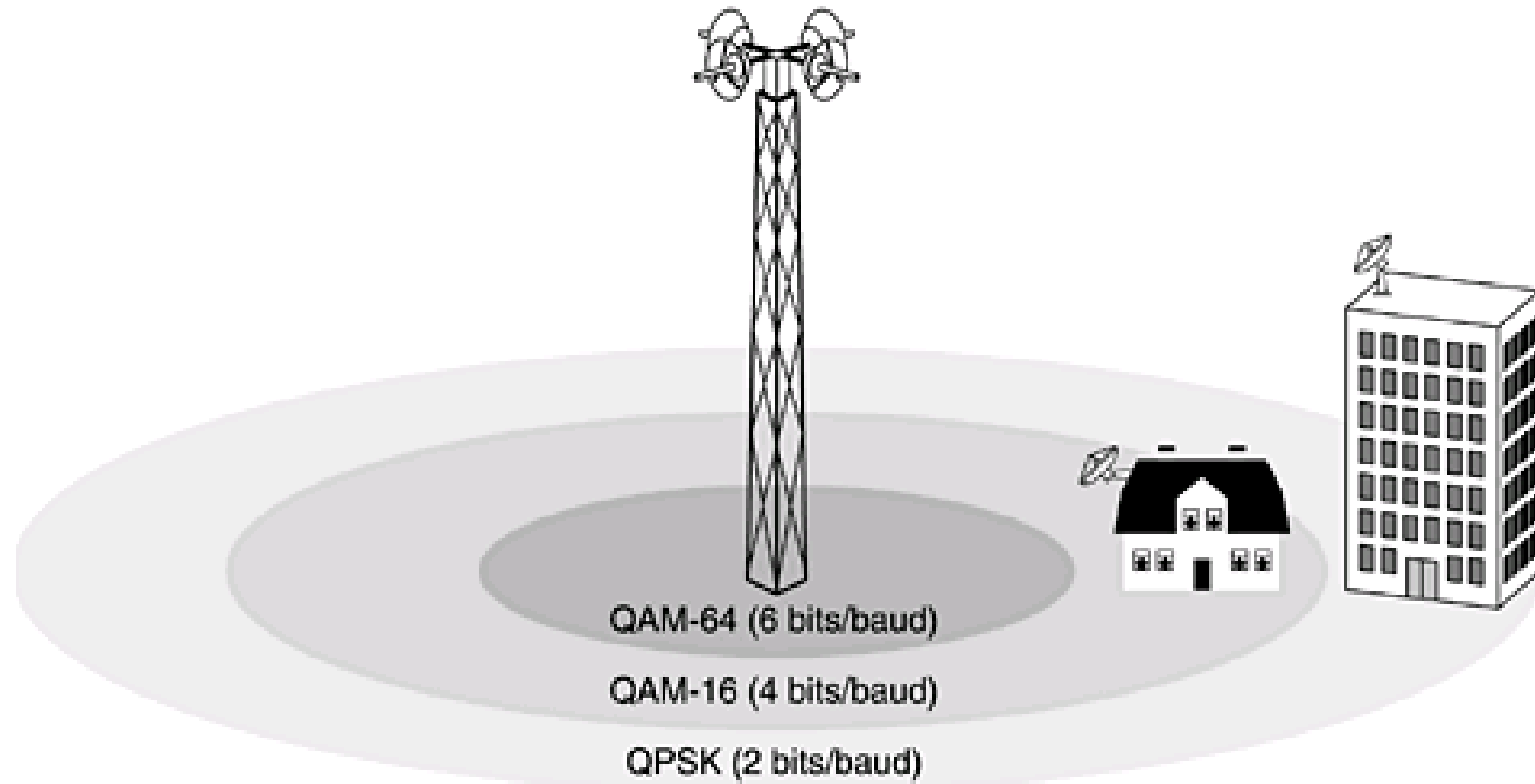
Πολυπλοκότητα
Υλοποίησης



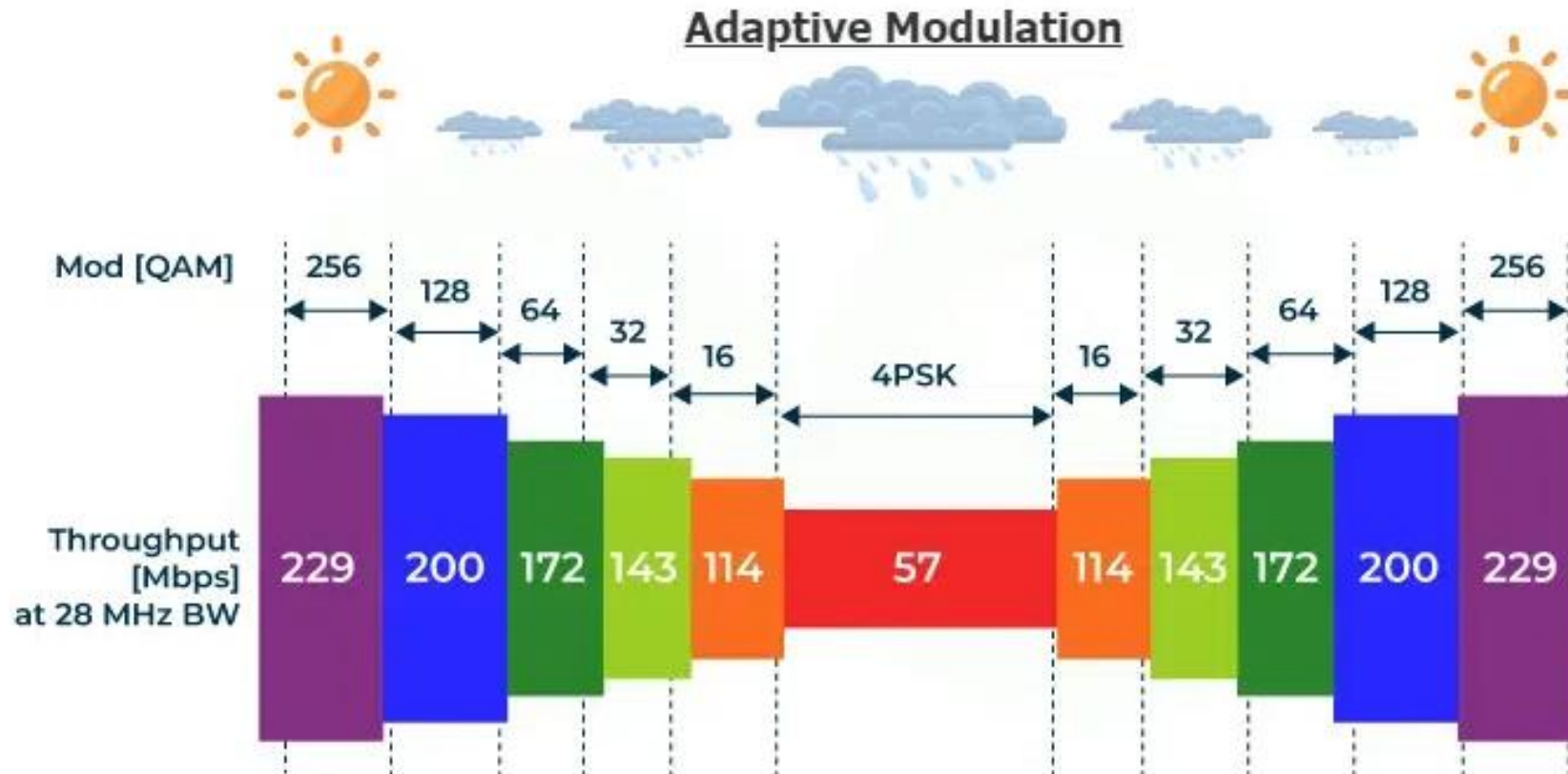
Προσαρμοζόμενη διαμόρφωση



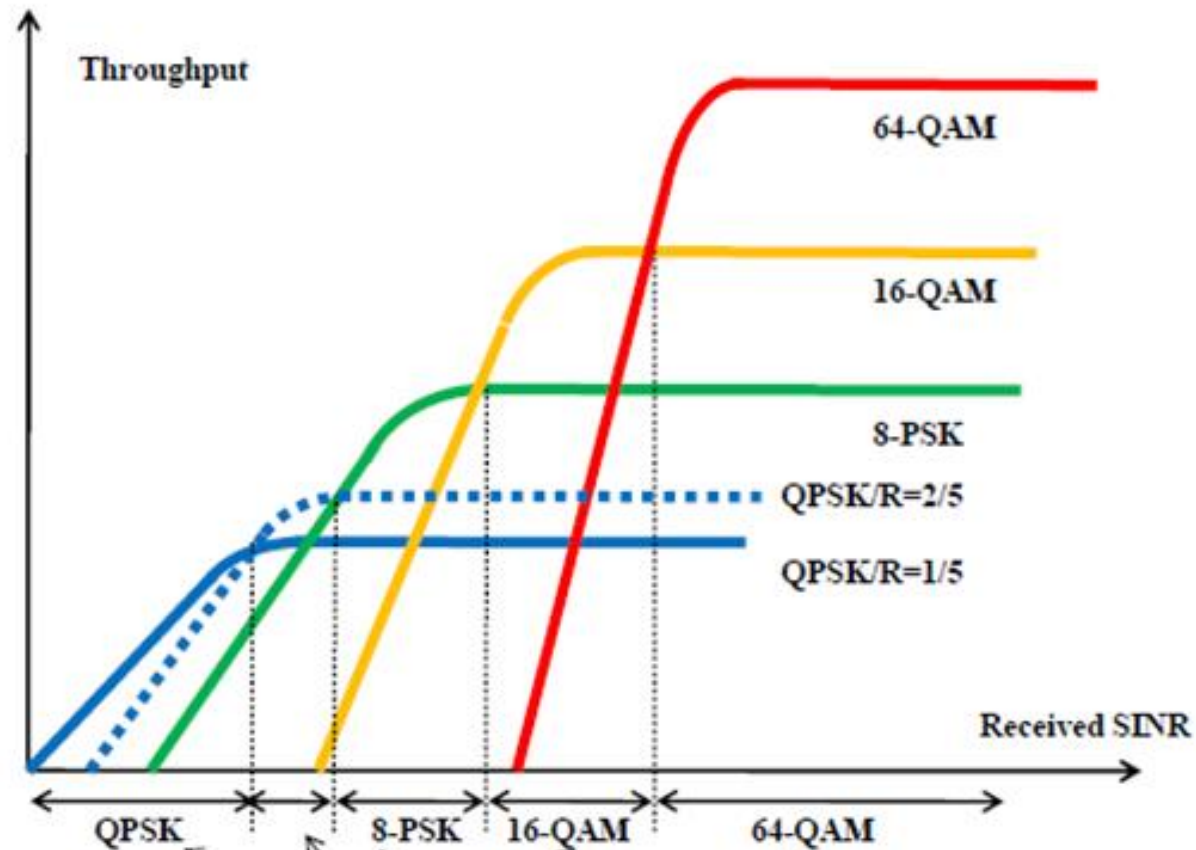
Προσαρμοζόμενη διαμόρφωση



Προσαρμοζόμενη διαμόρφωση



Προσαρμοζόμενη διαμόρφωση



Adaptively select the **modulation type** and **coding rate** depending on the received SINR