

# Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα ΙΙ

## Διάλεξη 3: Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους Amplitude Shift Keying (ASK)

Δρ. Μιχάλης Παρασκευάς  
Επίκουρος Καθηγητής

# Ατζέντα

- Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους (ASK)
- Μαθηματική περιγραφή δυαδικής ASK (BASK)
- Φάσμα σήματος διαμορφωμένου κατά BASK
- Μαθηματική περιγραφή MASK
- Φασματική πυκνότητα ισχύος και φασματική απόδοση σήματος MASK
- Πιθανότητα εμφάνισης λανθασμένων ψηφίων
- Ρυθμός εμφάνισης λαθών σε διαμόρφωση MASK
- Παραγωγή και Ανίχνευση σήματος BASK
- Σύγκριση μεταξύ Σύμφωνης & Ασύμφωνης Ανίχνευσης
- Διαγράμματα Αστερισμού

# Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους - ASK

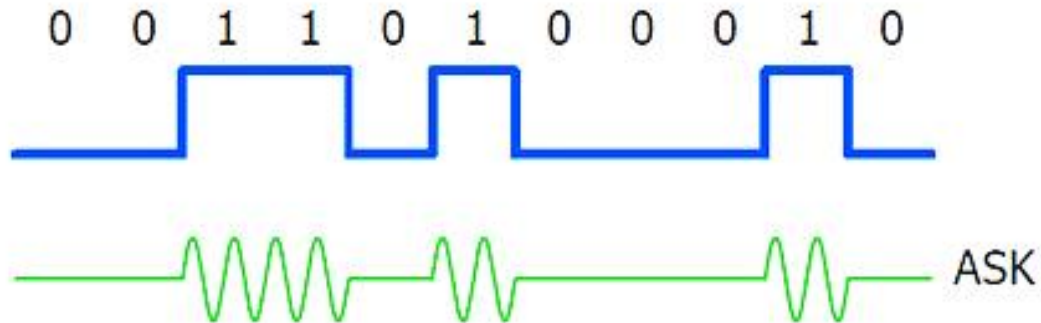
- **ASK**      Amplitude Shift Keying
- **BASK**     Binary ASK
- **MASK**    M/ary ASK

# Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους (ASK)

Στη [διαμόρφωση ASK](#) το πλάτος του φέροντος μεταπηδά (switched) μεταξύ δύο (ή περισσότερων) επιπέδων, ανάλογα με την ψηφιακή πληροφορία που θέλουμε να μεταδώσουμε.

Συγκεκριμένα:

- Για bit = 1 στέλνουμε επί χρόνο  $T$  το σήμα  $A \cos \omega_c t$
- Για bit = 0 στέλνουμε επί χρόνο  $T$  το μηδέν



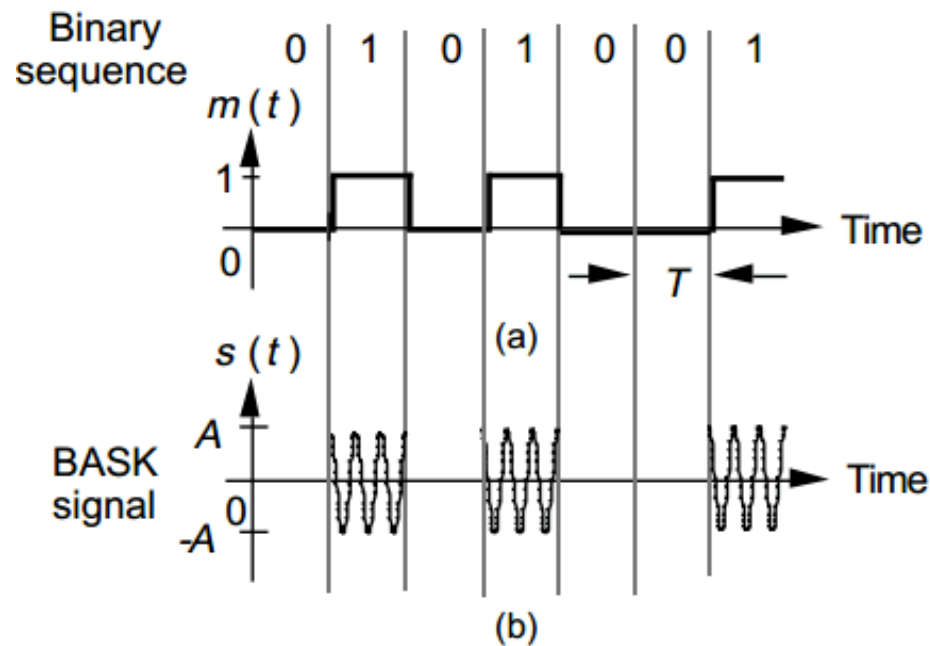
Για **Binary ASK** (BASK, ονομάζεται επίσης **ON-OFF Keying (OOK)**), τα ψηφία 1 και 0 αντιπροσωπεύονται από δύο επίπεδα πλάτους  $A_1$  και  $A_0$  ή  $A$  και  $-A$ .

# Μαθηματική περιγραφή BASK

Σήμα διαμορφωμένο κατά BASK:

$$s(t) = m(t) A \cos \omega_c t \quad 0 \leq t \leq T \text{ όπου } m(t) = \{0, 1\} \text{ και } T \text{ η διάρκεια του bit.}$$

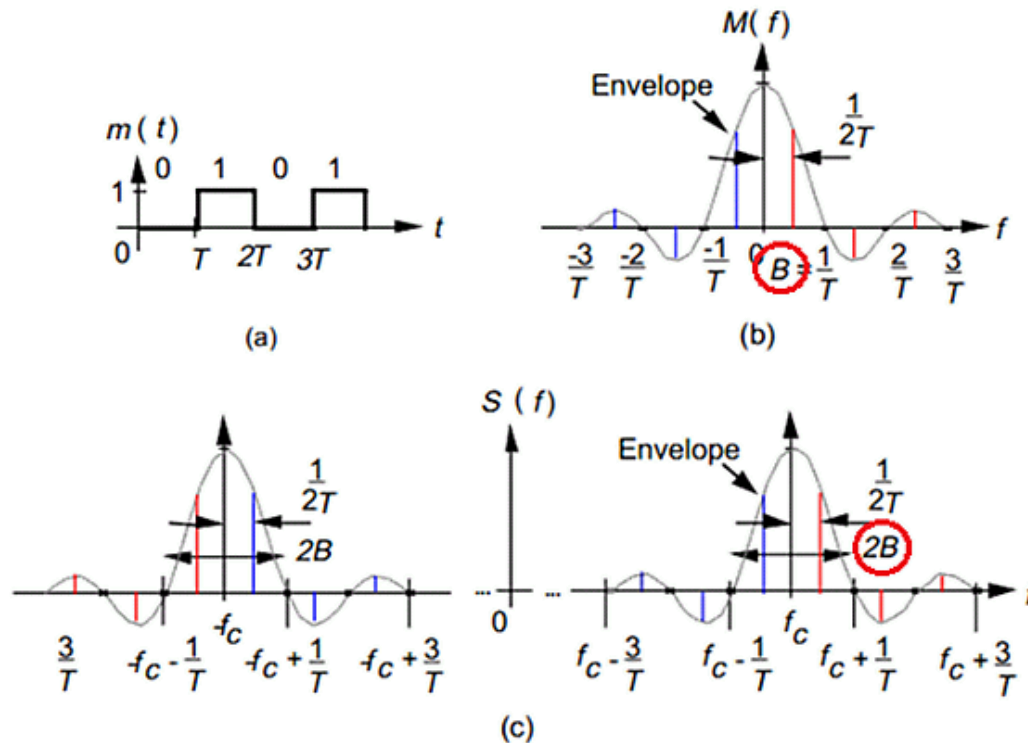
Ισχύει  $s(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \omega_c t \quad 0 \leq t \leq T$ , όπου  $E = P T$  η ενέργεια και  $P = \frac{A^2}{2}$  η ισχύς ενός bit.



(a) Δυαδικό σήμα εισόδου, (b) Διαμορφωμένο κατά BASK σήμα

# Φάσμα σήματος διαμορφωμένου κατά BASK

Ο Fourier του σήματος  $s(t)$  είναι:  $S(f) = \frac{A}{2} [M(f - f_c) + M(f + f_c)]$ , όπου  $f_c = \omega_c/2\pi$



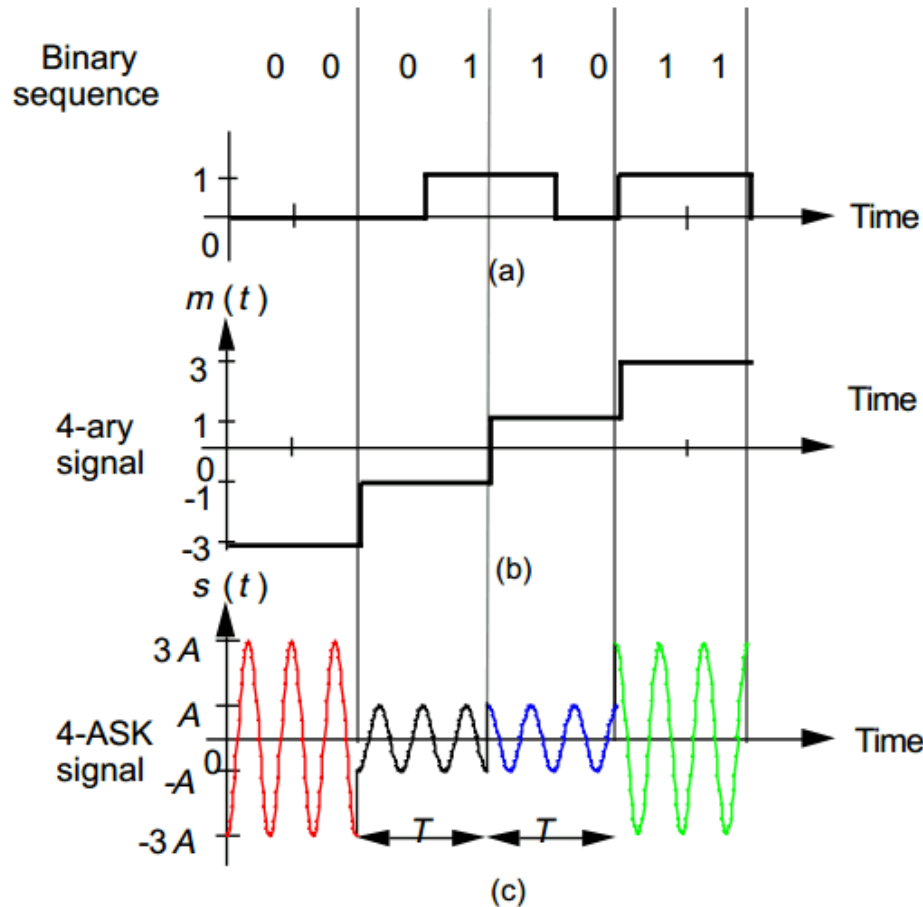
(a) Δυαδικό σήμα εισόδου (b) Φάσμα σήματος εισόδου (c) Φάσμα διακριτού σήματος διαμορφωμένου κατά BASK (διπλής πλευρικής ζώνης DSB με φορά)

Παρατηρούμε ότι η BASK απαιτεί διπλάσιο εύρος ζώνης σε σχέση με το αρχικό σήμα.

# Μαθηματική περιγραφή MASK

Διαμόρφωση ASK  $M$  επιπέδων (MASK): 
$$s_i(t) = \begin{cases} A_i \cos \omega_c t, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

όπου  $A_i = A[2i - (M - 1)]$  για  $i = 0, 1, \dots, M - 1$  και  $M > 4$



Διαμόρφωση 4-ASK

(a) Δυαδική είσοδος

(b) 4/δικό σήμα  $m(t)$

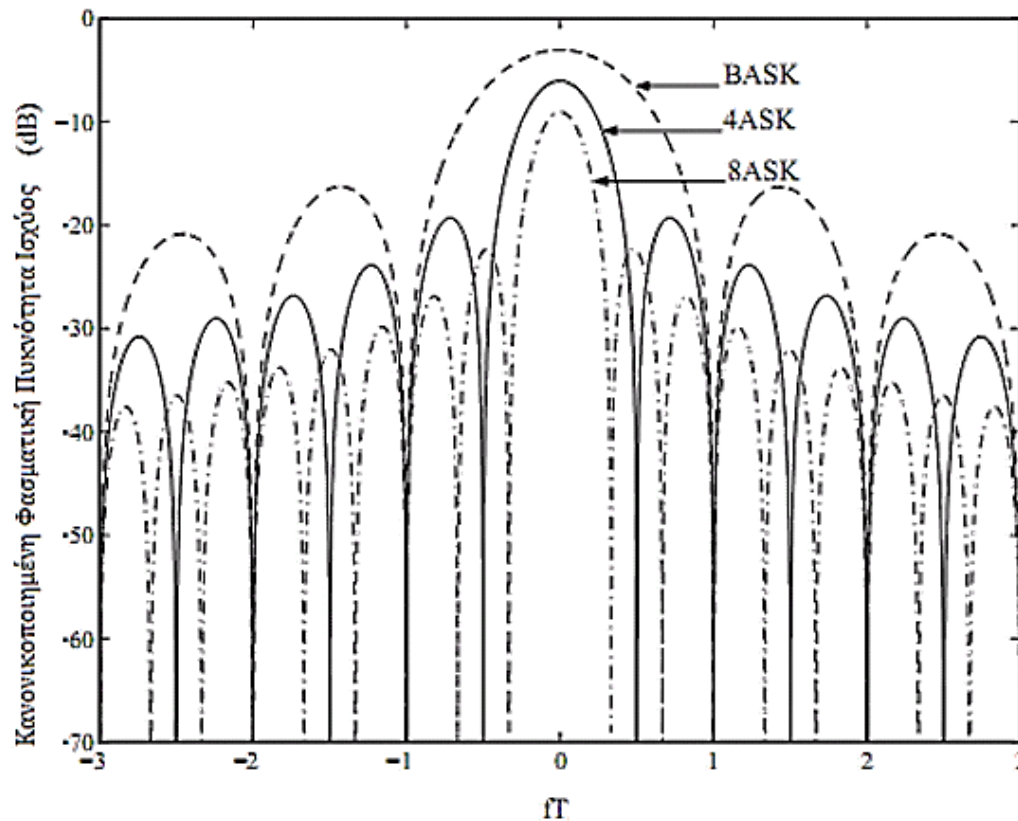
(c) Σήμα διαμορφωμένο κατά 4-ASK

# Φασματική πυκνότητα ισχύος σήματος MASK

Φασματική πυκνότητα ισχύος ([Power Spectral Density](#) - PSD) [ $f_c$  συχνότητα φέροντος]:

$$P(f) = K \frac{T}{M} \left\{ \left[ \frac{\sin \pi (f - f_c) m T}{\pi (f - f_c) m T} \right]^2 + \left[ \frac{\sin \pi (f + f_c) m T}{\pi (f + f_c) m T} \right]^2 \right\}$$

όπου  $T$  η διάρκεια του bit,  $m$  το πλήθος των bits/symbol. Ισχύει  $M = 2^m$





# Φασματική απόδοση σήματος MASK

## Φασματική Απόδοση ( $Q$ )

$$Q = \frac{R}{W} = \frac{R_s \log_2 M}{R_s} = \log_2 M = \mathbf{m} \text{ bits/s/Hz}$$

- $m$  πλήθος bits/symbol [Ισχύει  $M = 2^m$ ]
- $R$  ρυθμός μεταφοράς δεδομένων
- $W$  απαιτούμενο εύρος ζώνης
- $R_s$  ρυθμός μετάδοσης συμβόλων

Παρατηρούμε **αύξηση** της φασματικής απόδοσης ( $Q$ ) με την αύξηση των ομαδοποιημένων bits ανά σύμβολο ( $m$ ).

# Ρυθμός εμφάνισης λαθών σε διαμόρφωση MASK

Ο ρυθμός λήψης λανθασμένων συμβόλων  $P_S$  συναρτήσει του λόγου  $E_b/N_0$  δίνεται από:

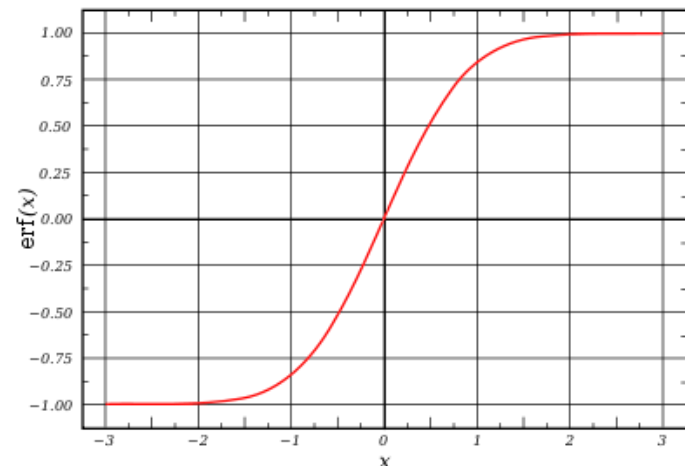
$$P_S = \frac{M-1}{M} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M^2 - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

Όπου:

- $E_b$  η ελάχιστη απαιτούμενη **ενέργεια σήματος** στην είσοδο του δέκτη στη διάρκεια ενός bit για την επίτευξη συγκεκριμένου ρυθμού σφαλμάτων, παρουσία **θορύβου** φασματικής πυκνότητας ισχύος  $N_0$ .
- **erfc** η συμπληρωματική συνάρτηση λάθους ([Error function](#)):

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$



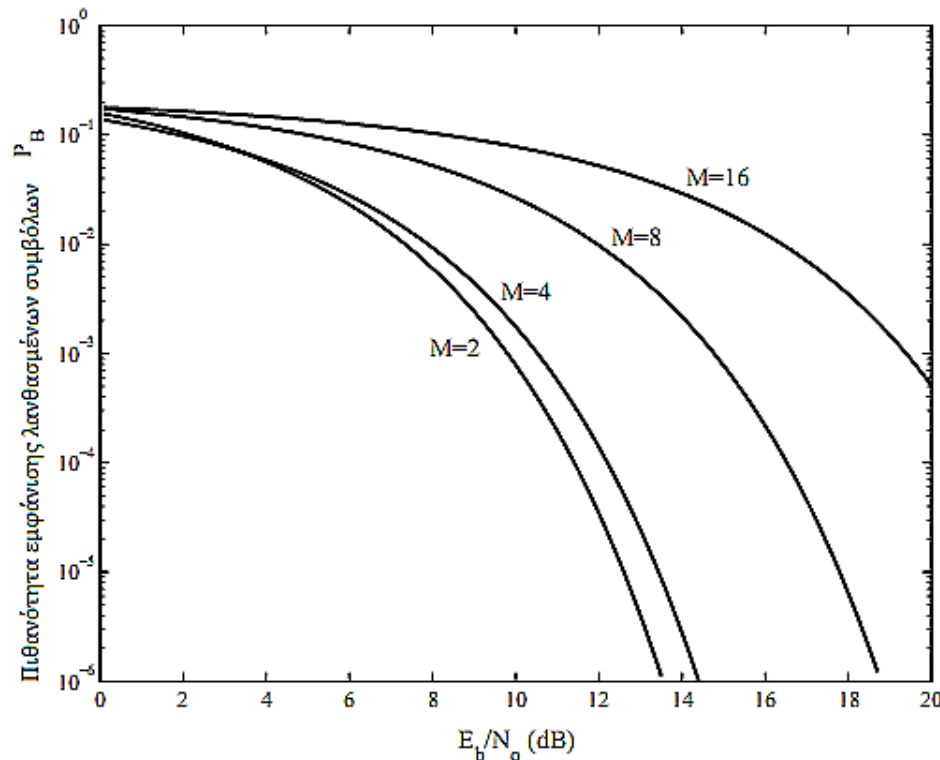
# Ρυθμός εμφάνισης λαθών σε διαμόρφωση MASK

Η πιθανότητα εμφάνισης λανθασμένων bits (Bit Error Rate – BER) ( $P_B$ ) είναι:

$$P_B = \frac{P_S}{\log_2 M}$$

Για δυαδική διαμόρφωση ( $M=2$ ), έχουμε  $P_B = P_S$

Η απόδοση ισχύος των ASK είναι **σχετικά χαμηλή** και παρουσιάζουν **μεγάλη ευαισθησία** στις ατέλειες του καναλιού. Πρακτικά χρησιμοποιείται **μόνο** η BASK.



# Άσκηση 1

Χρησιμοποιείται η μέθοδος ASK για τη μετάδοση δεδομένων με ρυθμό 28,8 kbps σε ένα τηλεφωνικό κανάλι με εύρος ζώνης από 300 έως 3.400 Hz.

(α) Πόσες καταστάσεις συμβόλων απαιτούνται για να επιτευχθεί αυτός ο ρυθμός;

(β) Ποιος θα ήταν ο απαιτούμενος αριθμός καταστάσεων συμβόλων αν η ζώνη διέλευσης του καναλιού εκτεινόταν από τα 0 έως τα 3.100 Hz και χρησιμοποιούνται M-αδική σηματοδοσία βασικής ζώνης;

(γ) Ποια είναι η θεωρητική χωρητικότητα του συστήματος ASK αν  $S/N=33$  dB;

## Απάντηση:

(α) Η χωρητικότητα του καναλιού ASK διέλευσης ζώνης, είναι  $C_{ASK} = B \log_2 M$ .

Οπότε:

$$28.800 = (3.400 - 300) \log_2 M \Rightarrow M = 626,1$$

ή  $M = 1024$  καταστάσεις, που είναι η πλησιέστερη δύναμη του 2.

Παρατήρηση: Θυμηθείτε ότι στη μετάδοση βασικής ζώνης ισχύει:

$$C_{baseband} = 2B \log_2 M$$

# Άσκηση 1

(β) Για το ισοδύναμο βασικής ζώνης έχουμε:

$$28.800 = 2 \times 3.100 \log_2 M$$

από την οποία προκύπτει  $M = 25,02$  ή  $M = 32$  καταστάσεις που είναι η πλησιέστερη δύναμη του 2.

(γ) Εφαρμόζοντας το θεώρημα Shannon-Hartley έχουμε:

$$C = B \log_2(1 + S/N)$$

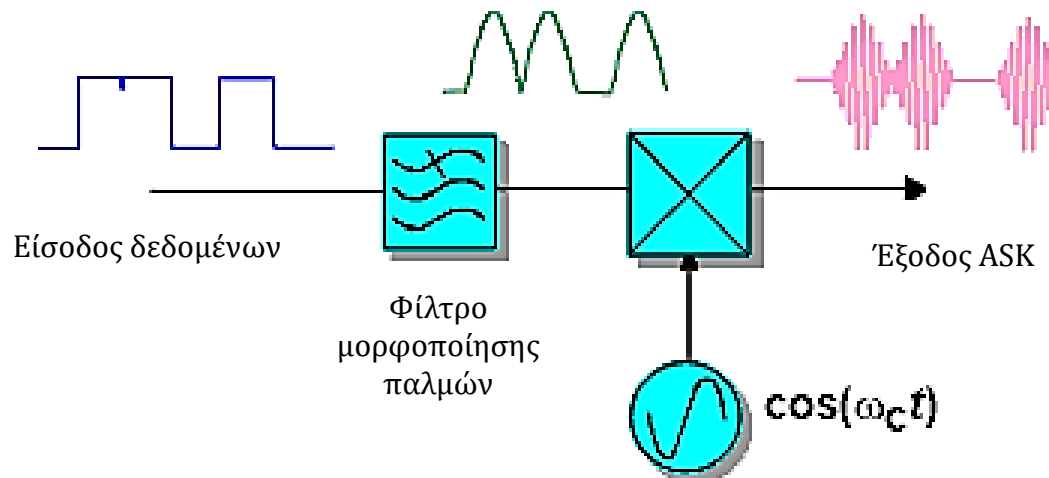
και λαμβάνουμε:

$$C = (3.400 - 300) \log_2(1 + 10^{3,3}) = 33,996$$

Σημείωση: Το θεώρημα Shannon-Hartley ισχύει τόσο για κανάλια βασικής ζώνης όσο και για ζώνης διέλευσης. Κανονικά, πρέπει να αυξάνεται ο αριθμός των καταστάσεων συμβόλων, αλλά όπως θα δούμε στη μέθοδο QPSK, αυτό δεν συνεπάγεται απαραίτητα ότι το πηλίκο  $E_b/N_0$  θα πρέπει να υποβιβαστεί σε σύγκριση με τη ζεύξη βασικής ζώνης.

# Παραγωγή σήματος BASK

1. Μέθοδος φιλτραρίσματος διέλευσης ζώνης [δύσκολη κατασκευή]
2. Μέθοδος φιλτραρίσματος βασικής ζώνης
  - Φιλτράρισμα του ψηφιακού σήματος εισόδου με ένα φίλτρο μορφοποίησης παλμών ([υψωμένου συνημιτόνου](#)), ώστε να περιοριστεί το εύρος ζώνης και να παραχθεί η ακολουθία δεδομένων βασικής ζώνης.
  - Πολλαπλασιασμός φέροντος με την ακολουθία δεδομένων βασικής ζώνης, μέσω μίας γραμμικής διαμόρφωσης παλμών.



Διαμορφωτής BASK

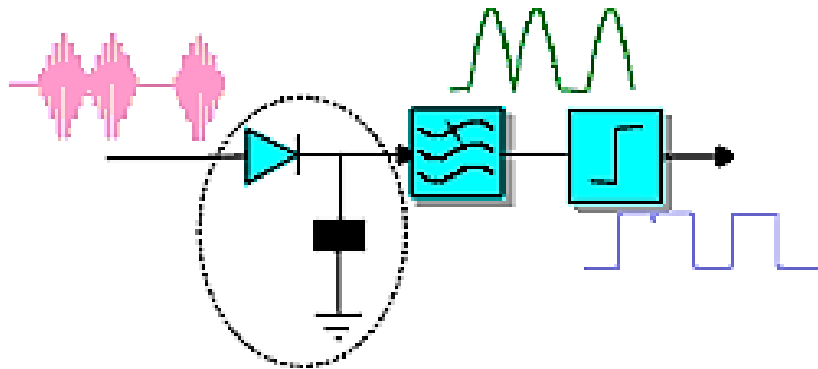
# Λήψη σήματος BASK

Ο δέκτης ASK (αλλά και FSK, PSK) «διαβάζει» το διαμορφωμένο σήμα και κάθε  $T$  sec «αποφασίζει» αν στο αντίστοιχο διάστημα έλαβε 1 ή 0.

## 1. Ασύμφωνη ανίχνευση (non-coherent detection)

Η πληροφορία που μεταδίδεται με την ASK μεταφέρεται στην **περιβάλλουσα** (envelope) του διαμορφωμένου σήματος. Έτσι τα δεδομένα μπορούν να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή (φωρατή) περιβάλλουσας ([envelope detector](#)).

Υλοποίηση: χρήση μιας διόδου που λειτουργεί ως ανορθωτής και ενός φίλτρου εξομάλυνσης. Στις υψηλές τιμές έχουμε 1 και στις χαμηλές 0.



Ασύμφωνος αποδιαμορφωτής BASK

- Απλότα κατασκευής, αλλά και μειωμένη ικανότητα διαχωρισμού του σήματος από τον θόρυβο.

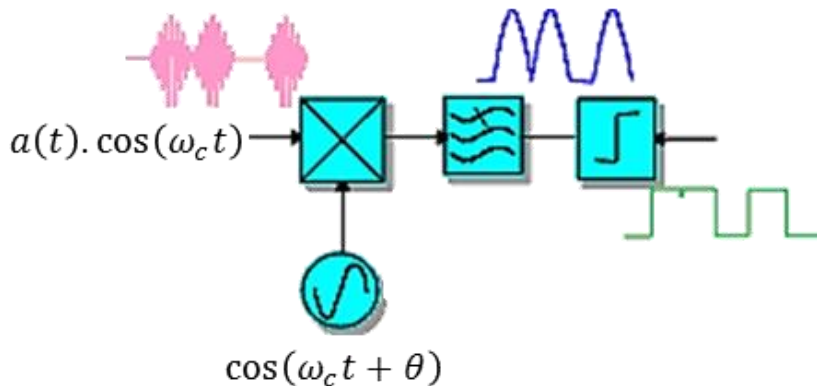
# Λήψη σήματος BASK

## 2. Σύμφωνη ανίχνευση (coherent detection)

Ένας σύμφωνος ανιχνευτής (coherent detector) αναμιγνύει το εισερχόμενο στο δέκτη διαμορφωμένο σήμα δεδομένων με ένα **φέρον αναφοράς**, το οποίο δημιουργεί **τοπικά** επιλέγοντας τη συνιστώσα διαφοράς από την έξοδο του μίκτη.

$$\text{Έξοδος μίκτη: } a(t) \cdot \cos(\omega_c t) \cdot \cos(\omega_c t + \theta) = \frac{1}{2} a(t) \cdot \cos \theta + \frac{1}{2} a(t) \cdot \cos(2\omega_c t + \theta)$$

- Εάν ο τοπικός φορέας είναι **σύμφωνος σε φάση** ( $\theta = 0^\circ$ ) με το εισερχόμενο σήμα, τότε η έξοδος είναι ανάλογη του εισερχόμενου σήματος και έχουμε **τέλεια ανίχνευση**.
- Αν  $\theta = 90^\circ$ , τότε  $\cos(\theta) = 0$ , άρα η έξοδος είναι **μηδέν**.



Σύμφωνος αποδιαμορφωτής BASK

Για το «κλείδωμα» ως προς τη φάση ( $\theta = 0^\circ$ ) του τοπικού ταλαντωτή στο δέκτη με αυτόν του πομπού χρησιμοποιείται η τεχνική βρόχου κλειδωμένης φάσης ([phase-locked loop](#) – PLL).



# Σύγκριση μεταξύ Σύμφωνης & Ασύμφωνης Ανίχνευσης ASK

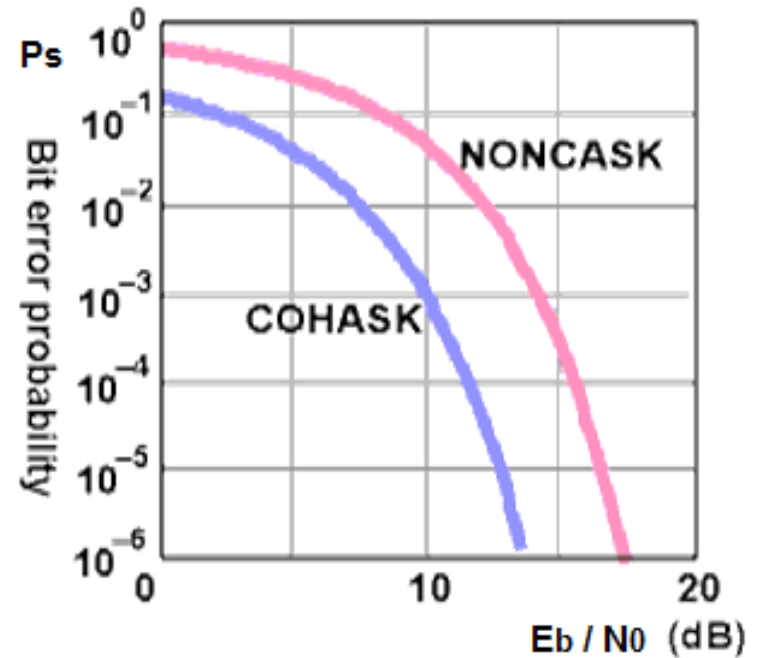
Πιθανότητα εμφάνισης λανθασμένων συμβόλων ( $P_S$ ):

- Σύμφωνη ανίχνευση (COH-ASK)

$$P_S = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{2 N_0}} \right)$$

- Ασύμφωνη ανίχνευση (NONC-ASK)

$$P_S = \frac{1}{2} \left[ e^{-\frac{E_b}{4N_0}} + \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{2 N_0}} \right) \right]$$



Παρατηρούμε ότι η σύμφωνη ανίχνευση έχει μεγαλύτερη αντοχή στον θόρυβο.

# Άσκηση 2

Ένας σύμφωνος αποδιαμορφωτής ASK έχει απόκλιση  $5^\circ$  στο τοπικά παραγόμενο φέρον αναφοράς. Ποια είναι η υποβάθμιση που προκαλείται στην ανοχή στο θόρυβο του συστήματος, σε σύγκριση με έναν ιδανικό αποδιαμορφωτή;

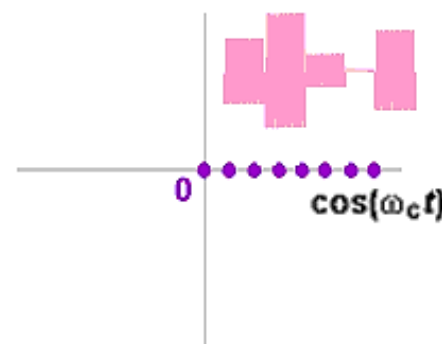
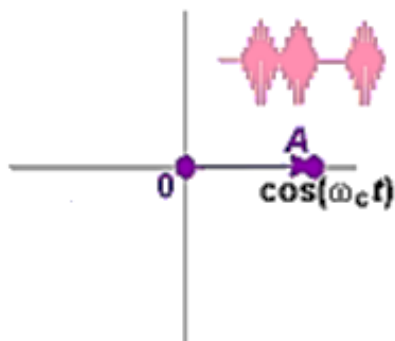
## Απάντηση:

- Εξαιτίας του σφάλματος φάσης του φέροντος, η τάση εξόδου του μίκτη που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση του εισερχόμενου συμβόλου  $a(t) \cos \omega_c t$  με το σήμα αναφοράς  $\cos(\omega_c t + 5^\circ)$ , θα μειωθεί κατά τον παράγοντα  $\cos(5^\circ)$ , από τη μέγιστη τιμή του.
- Αυτό με τη σειρά του ισοδυναμεί με μείωση της ενέργειας των συμβόλων που φτάνουν στην είσοδο του δέκτη κατά  $\cos^2(5^\circ) = 0,9924$  (η ενέργεια των συμβόλων είναι ανάλογη της ισχύος επί τη διάρκεια του συμβόλου ή αλλιώς ίση με την ταση<sup>2</sup> επί τη διάρκεια του συμβόλου).
- Οι συνιστώσες του θορύβου που περνούν από τον μίκτη επηρεάζονται επίσης από το σφάλμα φάσης. Επειδή όμως τα διανύσματα του θορύβου κατανέμονται τυχαία από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ , το σφάλμα θα μειώσει κάποιες συνιστώσες θορύβου και θα αυξήσει κάποιες άλλες, με συνολικό αποτέλεσμα τη διατήρηση της μέσης τάσης του θορύβου στην έξοδο του μίκτη στα ίδια επίπεδα.
- Έτσι, μόνο η ενέργεια των συμβόλων θα επηρεαστεί από το σφάλμα φάσης και όχι η ισχύς του θορύβου. Αυτό σημαίνει ότι το πηλίκο της ενεργού λαμβανόμενης ενέργειας συμβόλων προς την πυκνότητα ισχύος του θορύβου θα μειωθεί κατά έναν παράγοντα  $1 / \cos^2(5^\circ) = 1,0076$  ή κατά **0, 0033 dB** ως αποτέλεσμα του μη-μηδενικού σφάλματος φάσης.

# Διαγράμματα Αστερισμού

Το διάγραμμα αστερισμού ([constellation diagram](#)) είναι μία αναπαράσταση των καταστάσεων συμβόλων ως προς πλάτος και τη φάση του διαμορφωμένου φέροντος.

- Ο οριζόντιος άξονας θεωρείται ως αναφορά και περιγράφει σύμβολα που είναι σε φάση με τον φορέα  $\cos\omega_c t$ .
- Ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει τον ορθογωνική συνιστώσα  $\sin\omega_c t$ .
- Στη δυαδική διαμόρφωση ASK ( $M=2$ ), υπάρχουν μόνο δύο καταστάσεις για απεικόνιση στο διάγραμμα αστερισμού, οι  $a(t) = 0$  και  $a(t) = A \cos\omega_c t$ .
- Στην οκταδική διαμόρφωση ASK ( $M=8$ ), υπάρχουν οκτώ καταστάσεις στο διάγραμμα αστερισμού μεταξύ των  $a(t) = 0$  και  $a(t) = A \cos\omega_c t$ .



Διάγραμμα αστερισμού ASK (α) Δυαδικής και (β) Οκταδικής διαμόρφωσης ASK

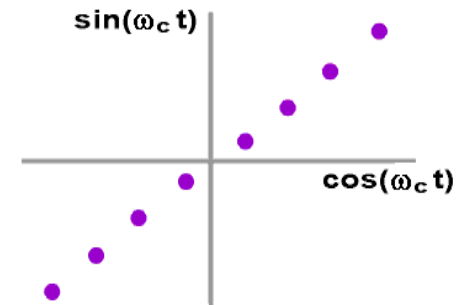
# Άσκηση 3

Να σχεδιάσετε το διάγραμμα αστερισμού για οκταδική διαμόρφωση ASK με διπολικό διαμορφώνων σήμα και φέρον της μορφής ( $\cos\omega_c t + 45^\circ$ ).

Ποια θα είναι η έξοδος ενός ασύμφωνου αποδιαμορφωτή για αυτή τη διαμόρφωση;

## Απάντηση:

Σε ένα διάγραμμα αστερισμού τα σύμβολα με φάση ( $\cos\omega_c t + 0^\circ$ ) σχεδιάζονται στον οριζόντιο άξονα, ενώ τα σύμβολα με φάση ( $\cos\omega_c t + 90^\circ$ ) σχεδιάζονται στον κατακόρυφο άξονα. Επειδή στην περίπτωση της άσκησης είναι ( $\cos\omega_c t + 45^\circ$ ), σημαίνει ότι τα σύμβολα θα βρίσκονται σε μια γραμμή με γωνία  $45^\circ$  ως προς τον οριζόντιο άξονα.



Η διπολική φύση διαμόρφωση του διαμορφώνοντος σήματος εισόδου σημαίνει ότι τα πλάτη των συμβόλων της ASK θα έχουν τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές. Ένα πλάτος με αρνητική τιμή σημαίνει απλά ότι η φάση του φέροντος αντιστρέφεται για τα σύμβολα αυτά, δηλ. εμφανίζεται στο αντίθετο τεταρτημόριο του διαγράμματος.

Ένα διπολικό σήμα ASK δεν μπορεί να ανιχνευθεί ικανοποιητικά από έναν ανιχνευτή περιβάλλουσας, επειδή αυτός δεν μπορεί να λάβει υπόψη την αναστροφή φάσης του φέροντος. Επομένως, όλα τα σύμβολα με αρνητικό πλάτος θα ανιχνευθούν λανθασμένα ως τα αντίστοιχα θετικά τους.

# Άσκηση 4

Ένα οκταδικό σύστημα διαμόρφωσης ASK εκπέμπει σε ένα κανάλι με ρυθμό 2.400 *baud*. Ποιο είναι το εύρος ζώνης που καταλαμβάνεται από το διαμορφωμένο σήμα, θεωρώντας ότι το σήμα φιλτράρεται από ένα ιδανικό ορθογώνιο φίλτρο; Αν χρησιμοποιηθεί φίλτρο υψωμένου συνημιτόνου με  $\alpha = 0,5$  ποιο θα είναι τότε το καταλαμβανόμενο εύρος ζώνης;

## Απάντηση:

- Για ένα κανάλι βασικής ζώνης, ο ρυθμός των 2.400 *baud* συνεπάγεται ένα ελάχιστο εύρος ζώνης ίσο με  $2.400 / 2 \text{ Hz} = 1.200 \text{ Hz}$ . Η διαμόρφωση ASK απαιτεί διπλάσιο εύρος ζώνης, αφού η διαδικασία της διαμόρφωσης δημιουργεί άνω και κάτω ζώνες, αντίγραφα του σήματος βασικής ζώνης. Έτσι, το καταλαμβανόμενο εύρος ζώνης είναι 2.400 *Hz*.
- Εναλλακτικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον τύπο  $C_{bandpass} = B \log_2 M$  όπου  $M = 8$  και η χωρητικότητα είναι  $2.400 \times 3 \text{ bps}$ . Έτσι προκύπτει  $B = 2.400 \text{ Hz}$ .
- Για ένα φίλτρο υψωμένου συνημιτόνου με  $\alpha = 0,5$  το απαιτούμενο εύρος ζώνης αυξάνεται κατά έναν συντελεστή  $(1 + \alpha)$ . Αυτό είναι αληθές για σηματοδοσία βασικής ζώνης και διέλευσης ζώνης. Έτσι, το νέο καταλαμβανόμενο εύρος ζώνης είναι  $2.400 \times (1 + 0,5) = 3.600 \text{ Hz}$

# Άσκηση 5

Ένα σύμφωνο, δυαδικό σύστημα διαμόρφωσης ASK εμφανίζει σφάλμα φάσης ίσο με  $25^\circ$  στο ανακτημένο σήμα φέροντος. Ποια θα είναι η επί τοις εκατό μείωση στην τάση των συμβόλων εξόδου που δίνει ο μίκτης ανιχνευτής και πόσο πρέπει να αυξηθεί η ενέργεια των εισερχόμενων συμβόλων ώστε να αντισταθμίσει την απώλεια λόγω του σφάλματος στο φέρον;

## Απάντηση:

- Η τάση εξόδου του μίκτη που χρησιμοποιείται για να συγκρίνει το εισερχόμενο σύμβολο  $a(t) \cos \omega_c t$  με την αναφορά  $\cos(\omega_c t + 25^\circ)$  θα μειωθεί κατά έναν συντελεστή  $\cos(25^\circ)$  ή στο 90,6% της μέγιστης τιμής του, σαν αποτέλεσμα του σφάλματος φάσης του φορέα.
- Αυτό με τη σειρά του αντιστοιχεί σε μείωση της ενέργειας συμβόλου στην είσοδο του δέκτη κατά έναν συντελεστή ίσο με  $\cos^2(25^\circ) = 0,82$  ή 0,85 dB. (Η ενέργεια συμβόλων είναι ανάλογη της ισχύος επί το μήκος του συμβόλου ή με την τάση<sup>2</sup> επί το μήκος του συμβόλου).

# Άσκηση 6

Ένα modem δυαδικής διαμόρφωσης ASK χρησιμοποιεί ασύμφωνη ανίχνευση. (α) Με βάση τις καμπύλες πιθανότητας εμφάνισης εσφαλμένων bit να προσδιορίσετε την τιμή που πρέπει να έχει ο λόγος  $E_b/N_0$ , ώστε να επιτευχθεί πιθανότητα σφάλματος μικρότερη από 1 προς  $10^2$ . (β) Ποια είναι η ισοδύναμη απόδοση ενός συστήματος σύμφωνης διαμόρφωσης ASK για αυτήν την τιμή του λόγου  $E_b/N_0$ ;

## Απάντηση:

(α) Μία πιθανότητα σφάλματος 1 προς  $10^2$  απαιτεί έναν λόγο  $E_b/N_0$  περίπου ίσο με 12 dB.

(β) Η ισοδύναμη απόδοση BER για  $E_b/N_0 = 12 \text{ dB}$  είναι περίπου ίση με 1 προς  $10^5$ .

# Άσκηση 7

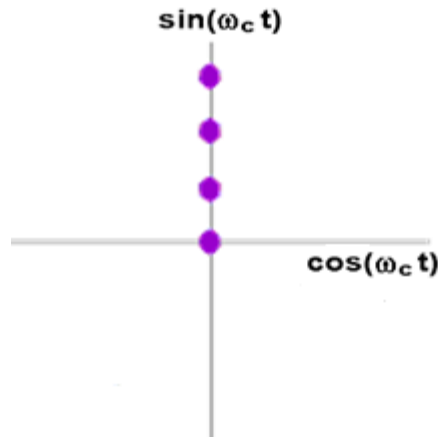
Σχεδιάστε το διάγραμμα αστερισμού για μία διαμόρφωση ASK τεσσάρων επιπέδων χρησιμοποιώντας ένα φέρον της μορφής  $\sin\omega_c t$ , όταν η είσοδος του διαμορφωτή είναι:

(α) ένα μονοπολικό σήμα τεσσάρων επιπέδων

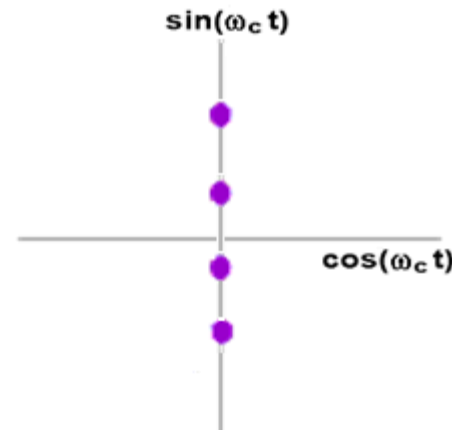
(β) ένα διπολικό σήμα τεσσάρων επιπέδων

Απάντηση:

Παρακάτω φαίνονται τα Διαγράμματα Αστερισμού, για τα σήματα:



(α) μονοπολικό 4 επιπέδων



(β) διπολικό σήμα 4 επιπέδων



# Άσκηση 8

Μια ζεύξη ψηφιακής αποστολής φωνής απαιτεί πιθανότητα εμφάνισης εσφαλμένων bits όχι χειρότερη από 1 προς  $10^3$ . Από τα σχετικά διαγράμματα BER για την περίπτωση M-αδικής μεθόδου διαμόρφωσης ASL, ποια πρέπει να είναι η προσεγγιστική τιμή του λόγου  $E_b/N_0$  αν η ASK είναι δυαδική και αν είναι 16-αδική;

## Απάντηση:

Μία πιθανότητα σφάλματος 1 προς  $10^2$  απαιτεί έναν λόγο  $E_b/N_0$  περίπου ίσο με 7 dB για δυαδική διαμόρφωση και 21 dB για 16-αδική ASK.

# Άσκηση 9

Μια μέθοδος διαμόρφωσης 8-ASK χρησιμοποιεί φίλτρα ρίζας υψωμένου συνημιτόνου στον πομπό και το δέκτη, με  $\alpha=0,33$ . Ποιο είναι το εύρος ζώνης που απαιτείται ώστε να υποστηριχθεί ρυθμός δεδομένων 64 kbps;

Απάντηση:

Η χωρητικότητα ενός ζωνοδιαβατού καναλιού δίνεται από τη σχέση:

$$C = (B \log_2 M) / (1 + a)$$

Έτσι  $64.000 = (B \times \log_2 8) / (1,33)$ , από την οποία έχουμε  **$B = 28,373 \text{ kHz}$**