

# Ψηφιακές Επικοινωνίες

**Κεφ 4: Διαμόρφωση & Αποδιαμόρφωση Ζώνης  
Διέλευσης**

**Συνέχεια**

# Τεχνικές Ψηφιακής Διαμόρφωσης Ζώνης Διέλευσης

# Βασικές Τεχνικές Διαμόρφωσης

**Σύμφωνη Φώραση:** Όταν ο δέκτης αξιοποιεί γνώση της φάσης του φέροντος (μειωμένη πιθανότητα σφάλματος)

**Ασύμφωνη Φώραση:** Όταν ο δέκτης δεν αξιοποιεί γνώση της φάσης του φέροντος (μειωμένη πολυπλοκότητα)

**Βασική προϋπόθεση σωστής  
λειτουργίας σύμφωνης φώρασης**



• **τοπικά** παραγόμενο φέρον να είναι της **ίδιας  
συχνότητας** και της **ίδιας φάσης** με το φέρον του σήματος



**συγχρονισμός (synchronization)** του δέκτη  
με το εκπεμπόμενο φέρον σήμα

**Λύση:** ενσωμάτωση με διάφορους τρόπους στο  
διαμορφωμένο σήμα αδιαμόρφωτο φέρον μικρής ισχύος,  
το οποίο ανιχνεύεται στο δέκτη μέσω κατάλληλου  
φίλτρου

# Βασικές Τεχνικές Διαμόρφωσης

Σήμα Πληροφορίας  $\rightarrow$  Ημιτονοειδές [ΣΥΜΒΟΛΟ]

Σύμφωνη Φώραση

Ασύμφωνη Φώραση

Διαμόρφωση Φάσης - PSK

Διαμόρφωση Πλάτους - ASK

Διαφορική Διαμόρφωση Φάσης - DPSK

Διαμόρφωση Συχνότητας - FSK

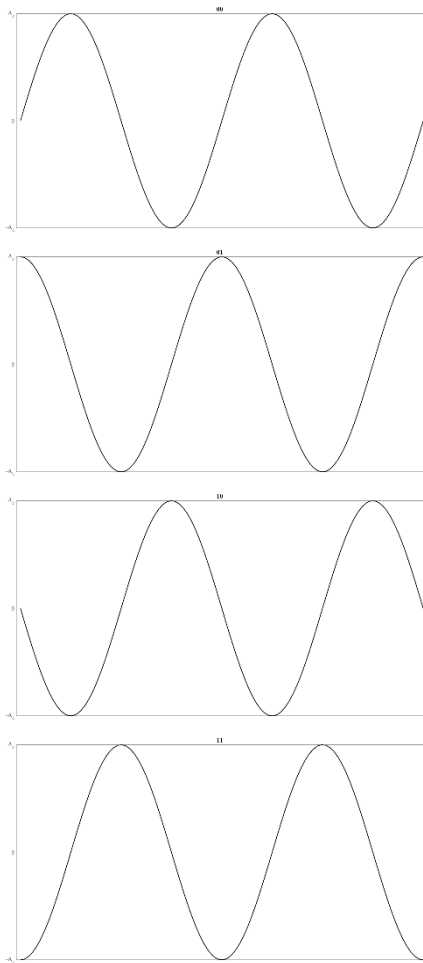
Διαμόρφωση Συνεχούς Φάσης - CPM

Υβρίδια

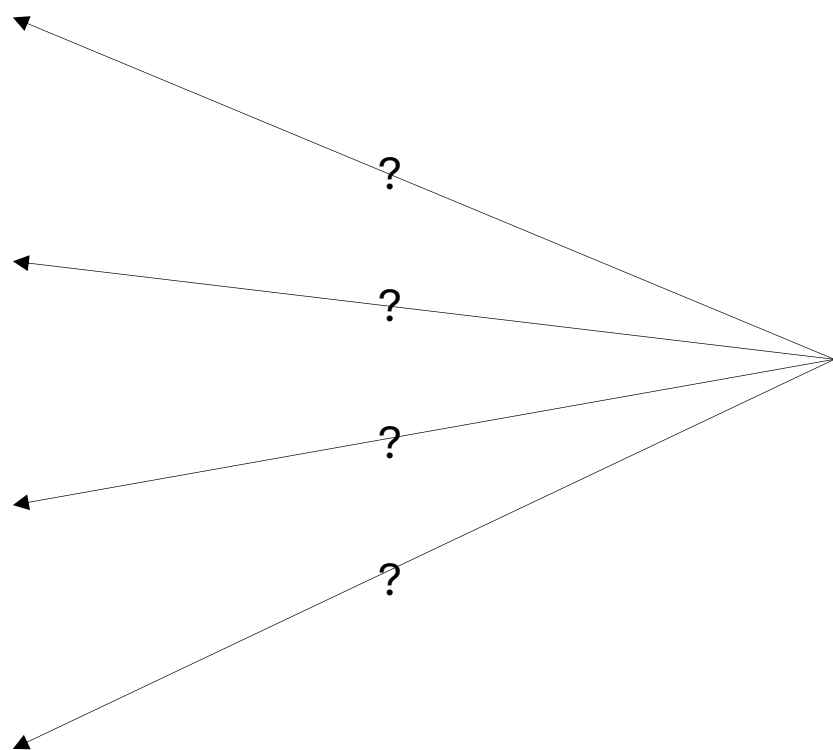
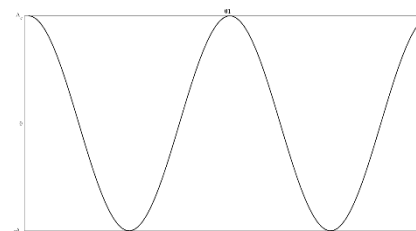
Trade-off: Πολυπλοκότητα vs. Πιθανότητα Σφάλματος

# Σύμφωνη Φώραση – Κλείδωμα Φάσης

Σήματα Αναφοράς  
ή Πρότυπα

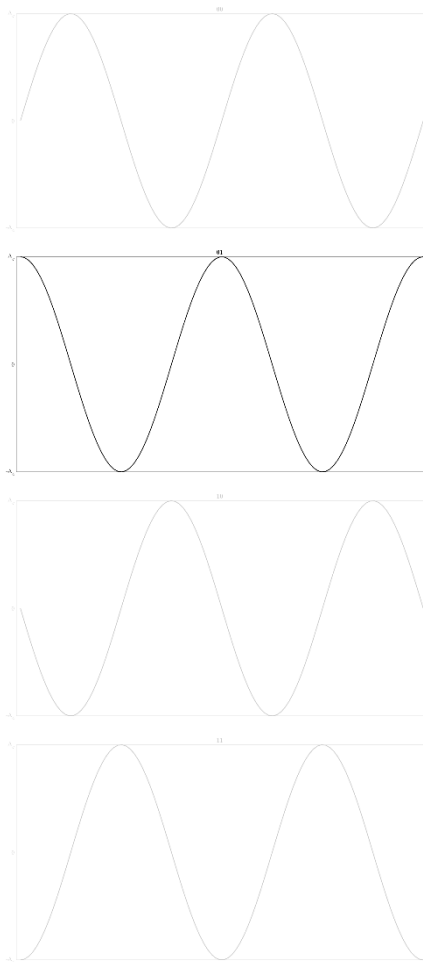


Ληφθέν Σήμα

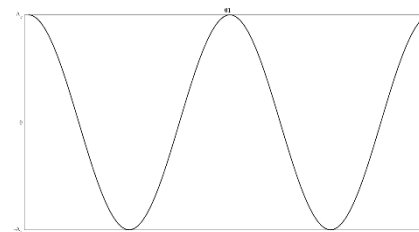


# Σύμφωνη Φώραση – Κλείδωμα Φάσης

Σήματα Αναφοράς  
ή Πρότυπα

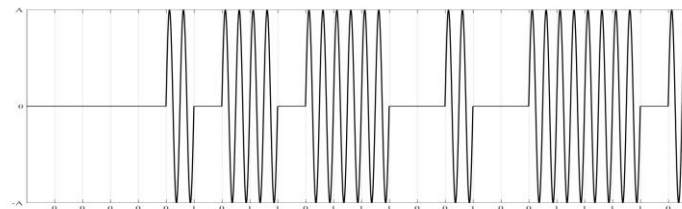


Ληφθέν Σήμα

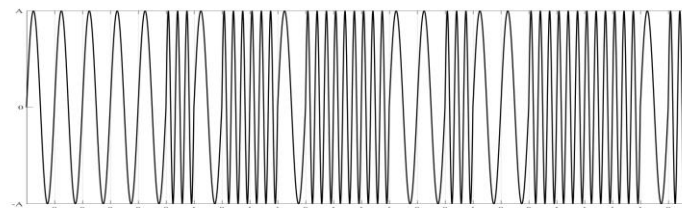


# Αναλυτικές Εκφράσεις και Κυματομορφές

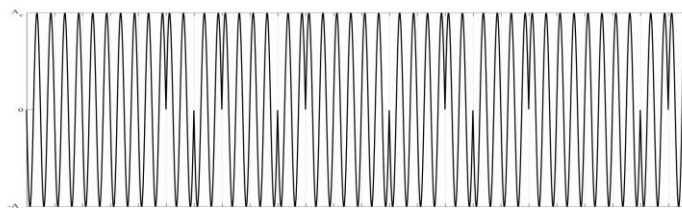
ASK  $s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \varphi)$



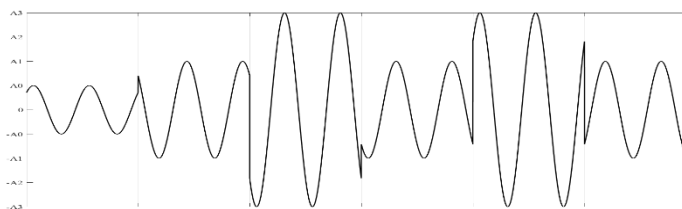
FSK  $s_i(t) = \sqrt{\frac{2E(t)}{T}} \cos(\omega_i t + \varphi)$



PSK  $s_i(t) = \sqrt{\frac{2E(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \varphi_i(t))$

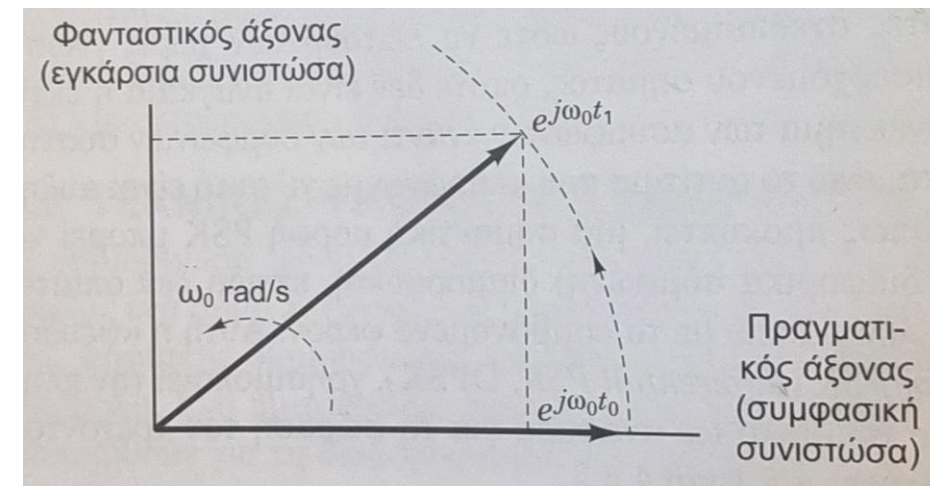


APK  
(QAM)  $s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \varphi_i(t))$

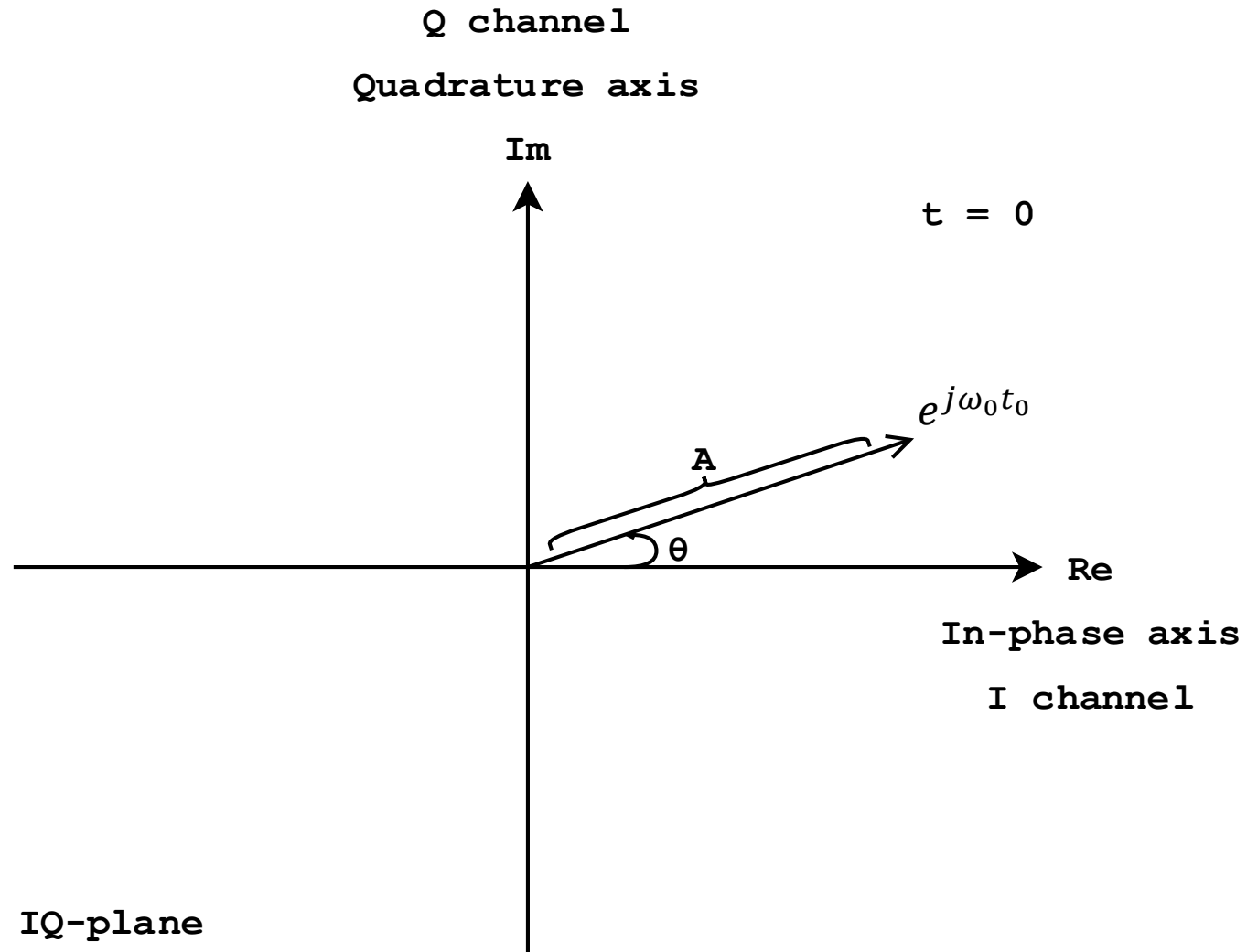


# Φάσορας (Phasor)

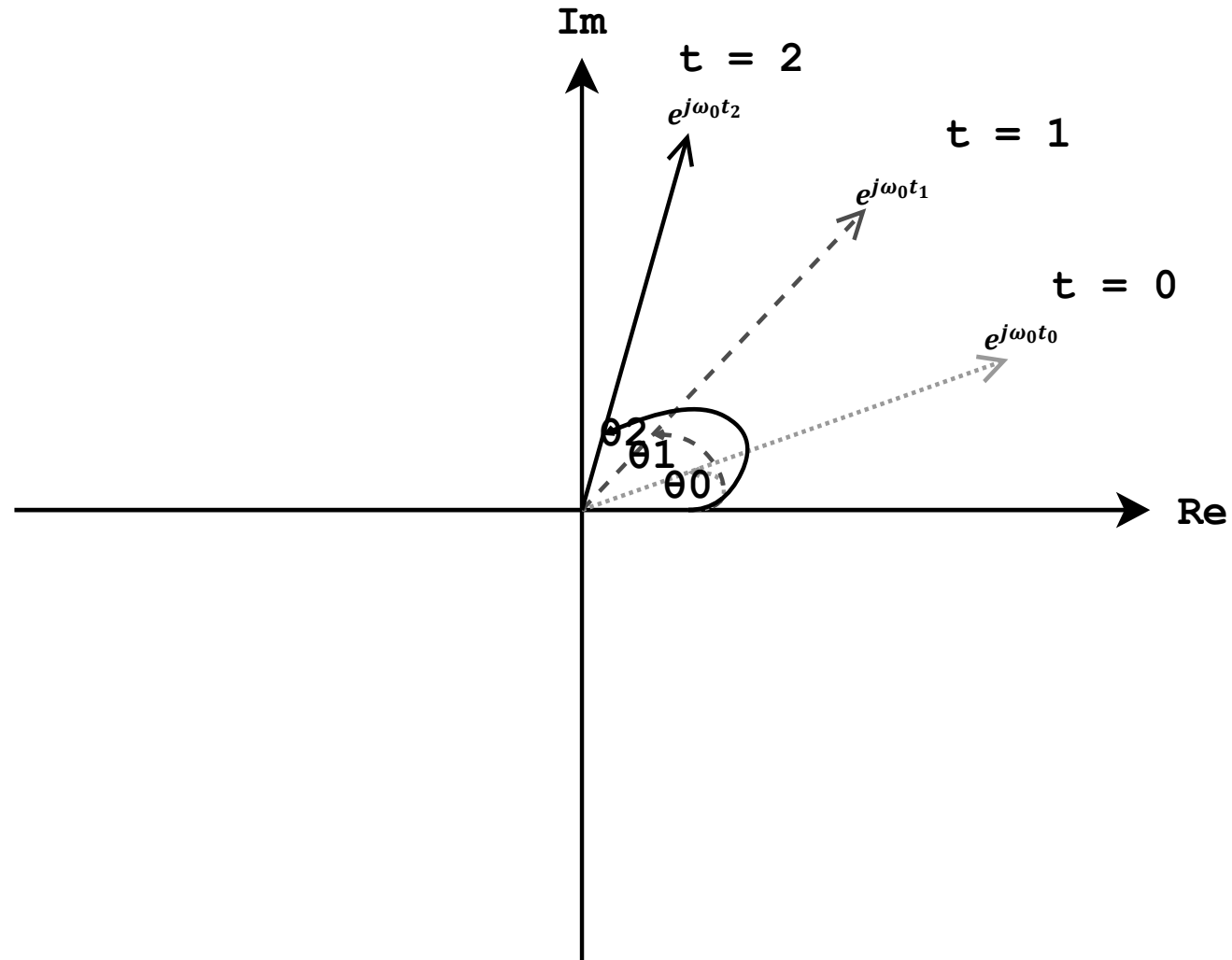
- Μιγαδικός αριθμός που αναπαριστά ένα ημιτονοειδές σήμα
- Τύπος του Euler:  $e^{j\omega_0 t} = \cos(\omega_0 t) + j \sin(\omega_0 t)$
- Χρήση
  - Σχεδιασμός περιοχών απόφασης (decision regions)
    - Αστερισμοί (Constellations)
  - Περιγραφή υλοποίησης mod / demod σε υλισμικό
    - Μιγαδική περιβάλλουσα (Complex envelope)



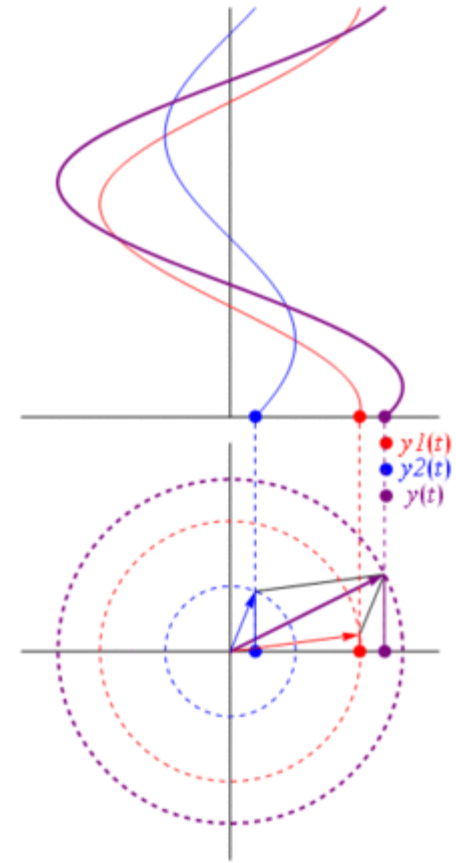
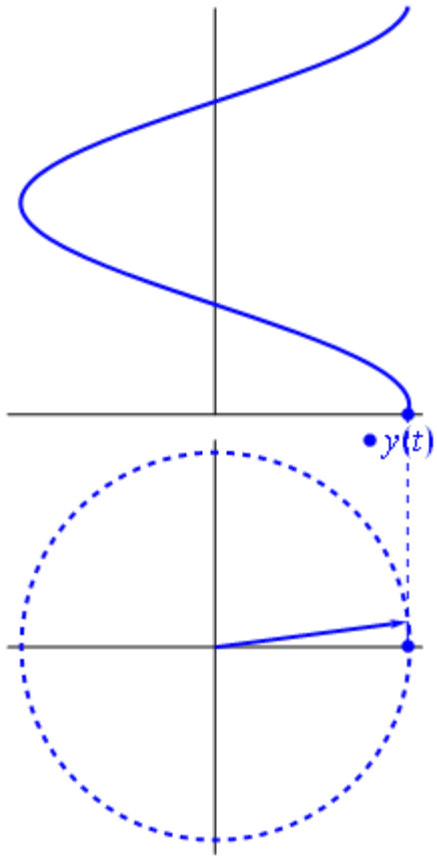
# Φάσοντας – Γεωμετρία



# Φάσορας – Γεωμετρία



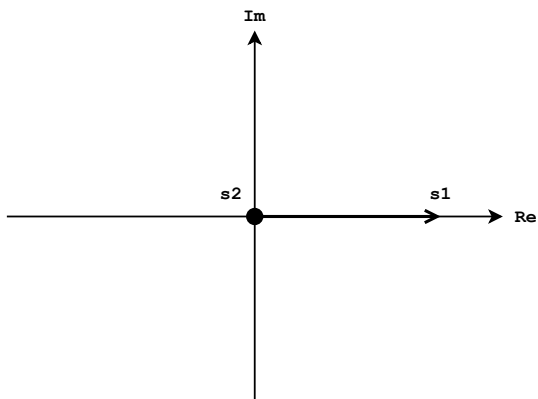
# Φάσορας – Γεωμετρία



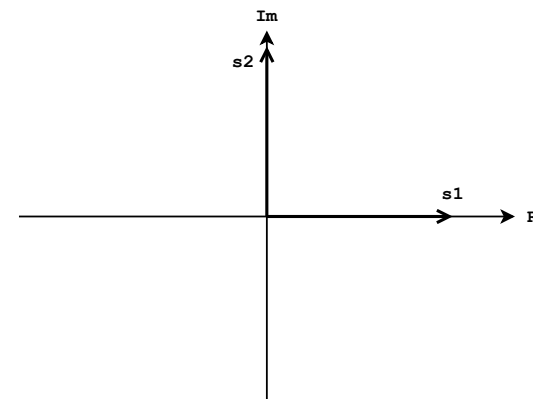
Ref: Phasor in Wikipedia

# Διανυσματικές Αναπαραστάσεις

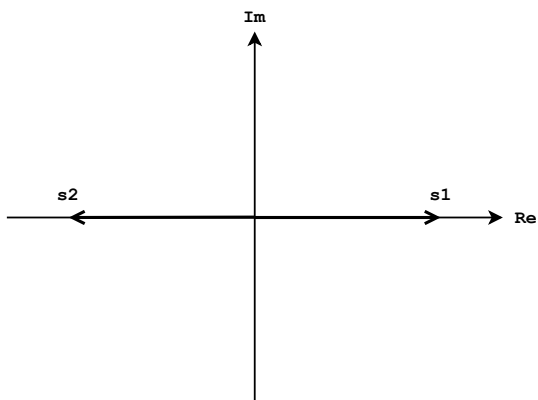
ASK



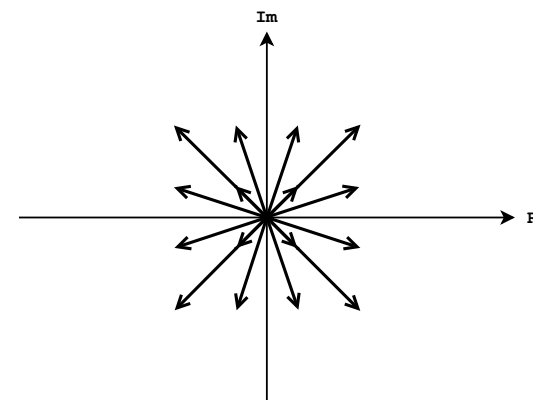
FSK



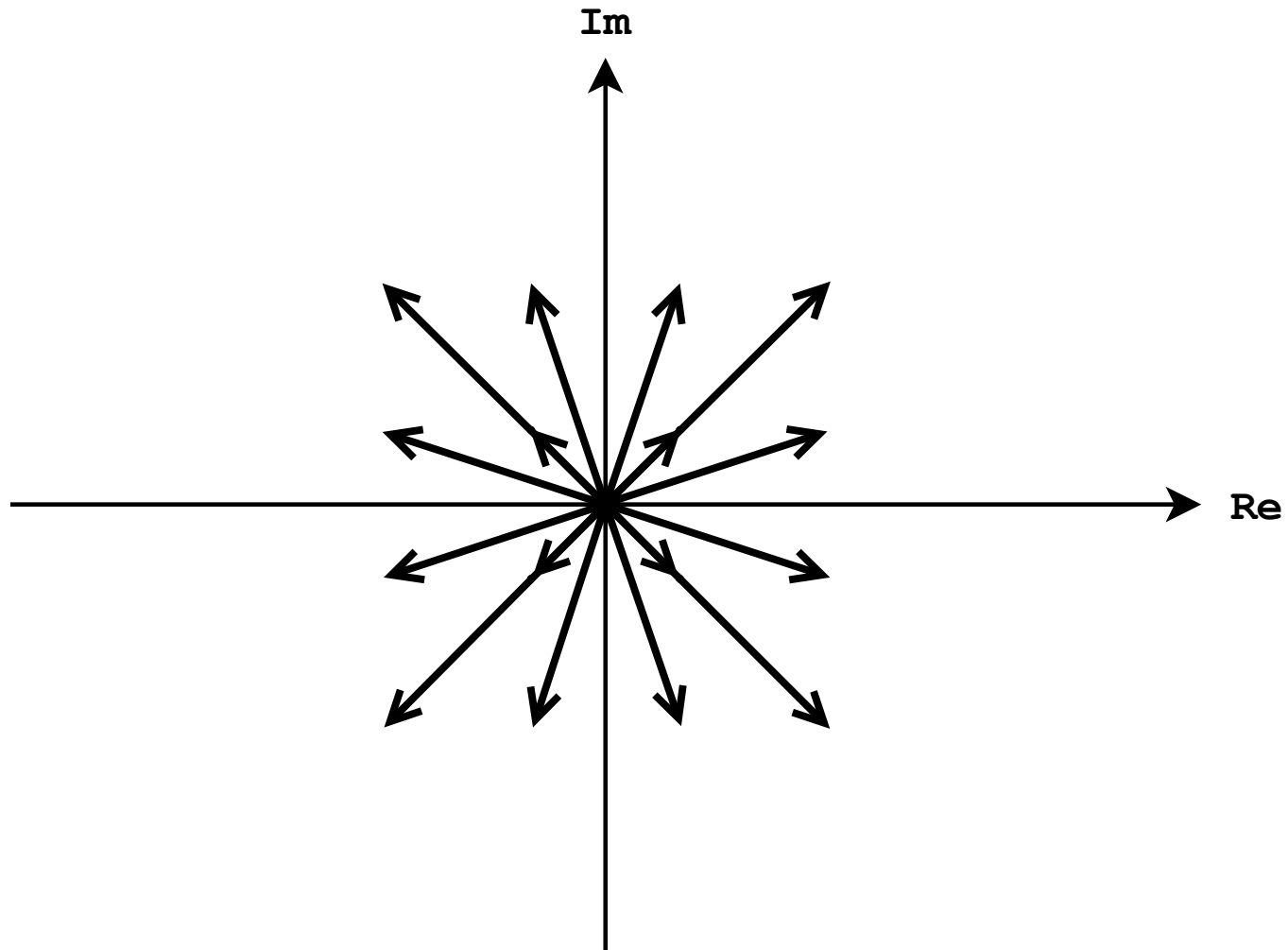
PSK



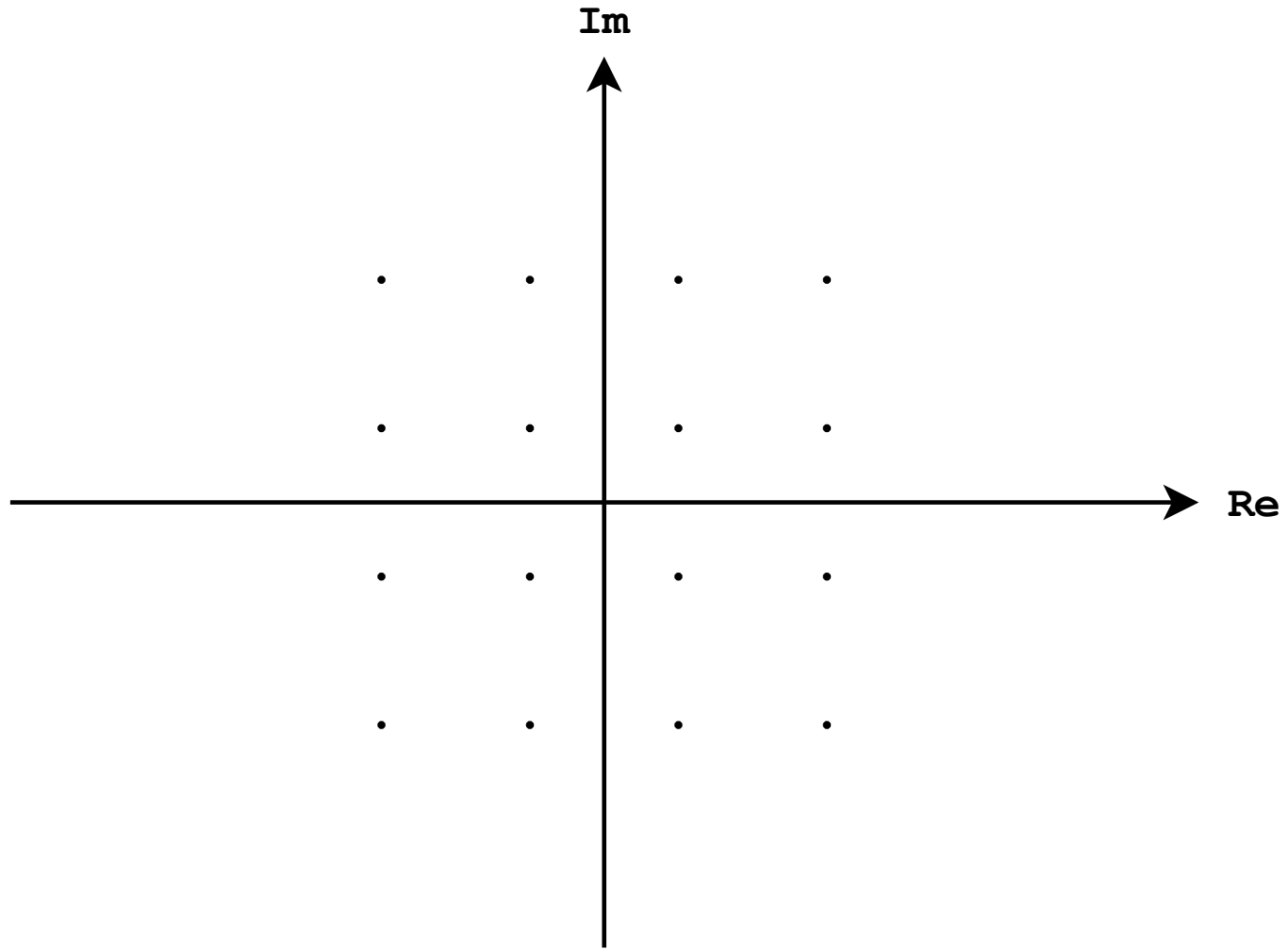
APK  
(QAM)



# Από τις Διανυσματικές Αναπαράσεις...

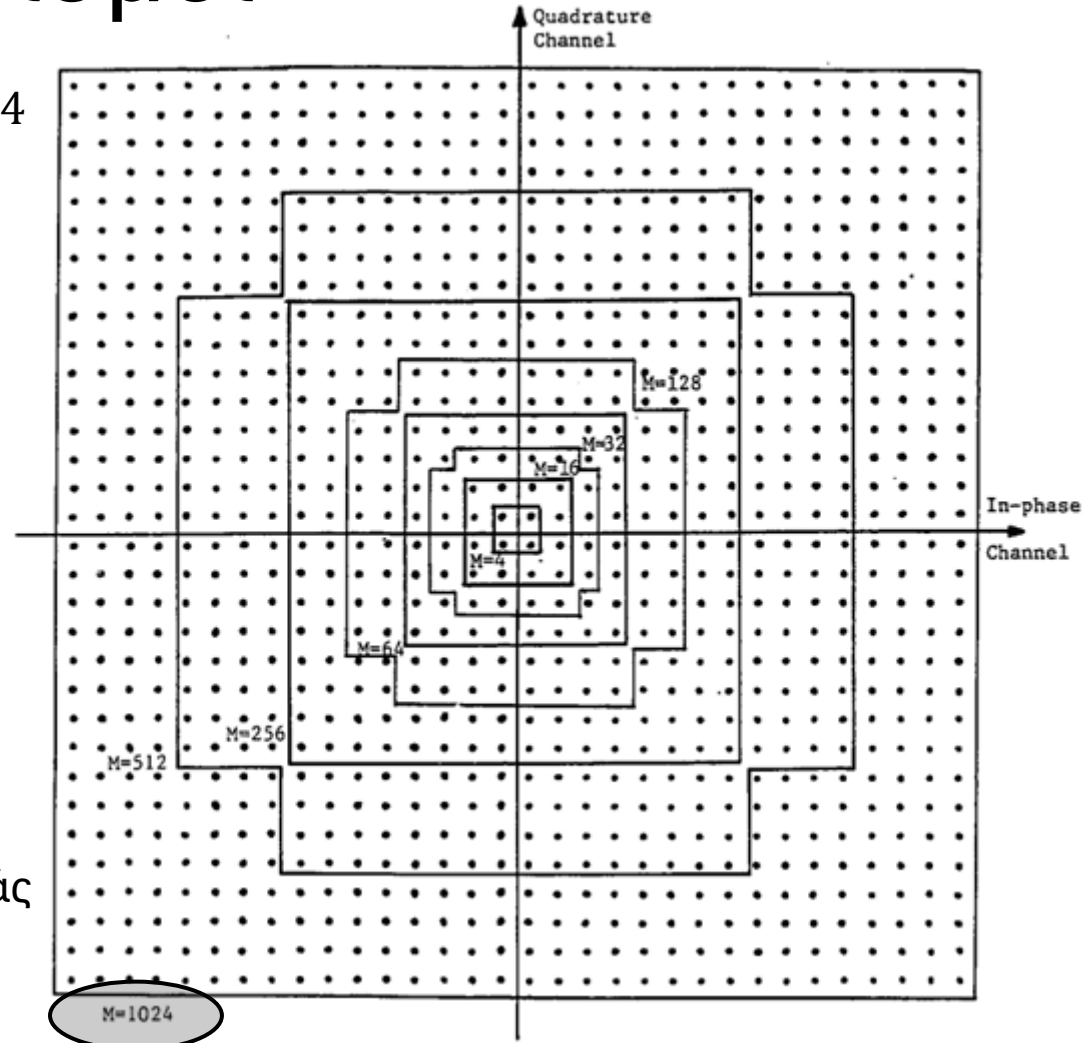


# ...στα Διαγράμματα Αστερισμών



# QAM Αστερισμοί

Για  $M = 4, 16, 64, 256, 1024$   
παρατηρούμε "τέλεια"  
τετράγωνα



Τα δίκτυα 802.11 έκτης γενιάς  
χρησιμοποιούν QAM-1024

Ref: P. Mathiopoulos, "On bandwidth efficient QAM transmission systems," Ph.D. Thesis, University of Ottawa, Dept. of Electrical Engineering, 1989

# Φώραση Σημάτων Παρουσία Γκαουσιανού Θορύβου

# Θεώρημα Ισοδυναμίας

## Θεώρημα

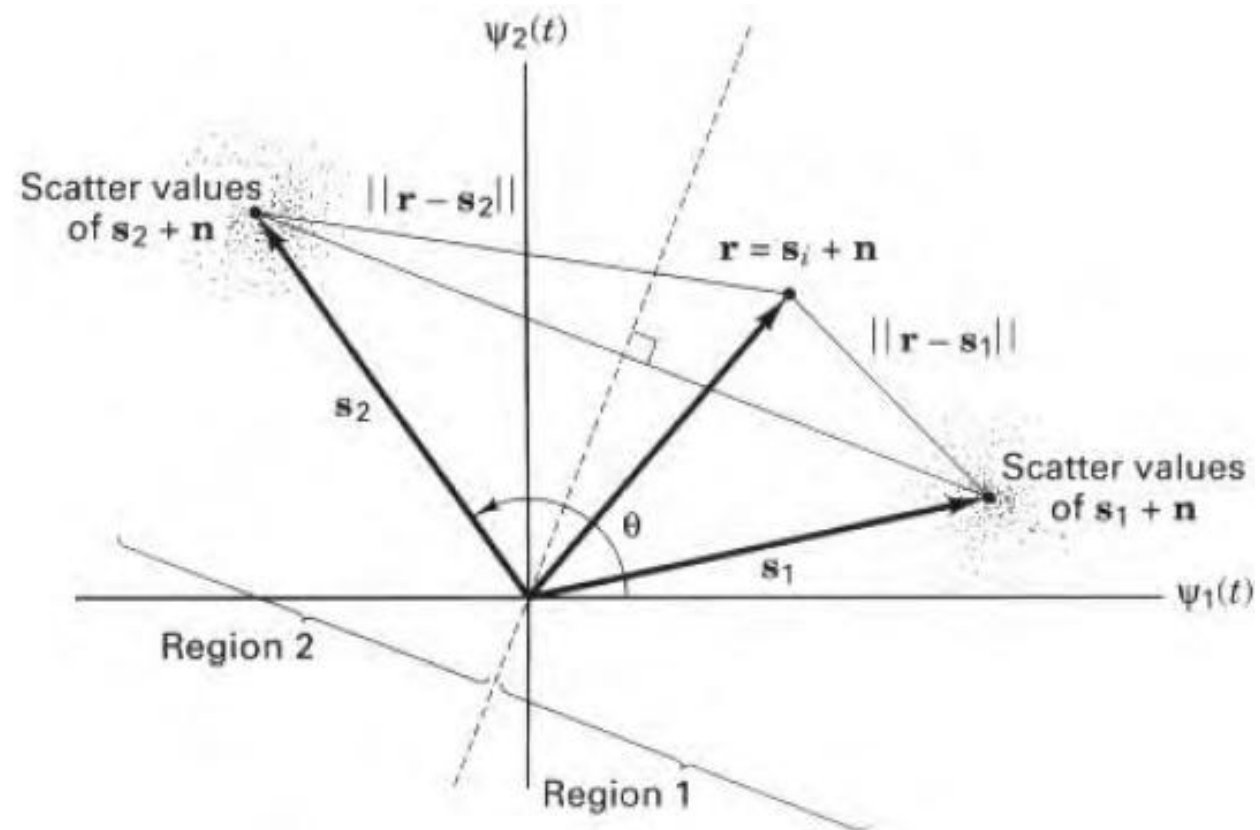
Η εκτέλεση γραμμικής επεξεργασίας ενός ζωνοπερατού σήματος ακολουθούμενη από την ετεροδύνωση του σήματος στη βασική ζώνη δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την ετεροδύνωση του ζωνοπερατού σήματος στη βασική ζώνη ακολουθούμενη από γραμμική επεξεργασία του σήματος στη βασική ζώνη.

## Συνέπεια Θεωρήματος

Ετεροδύνωση (μετατόπιση) στη βασική ζώνη και μετά γραμμική επεξεργασία (Απλούστερο)

# Περιοχές Απόφασης

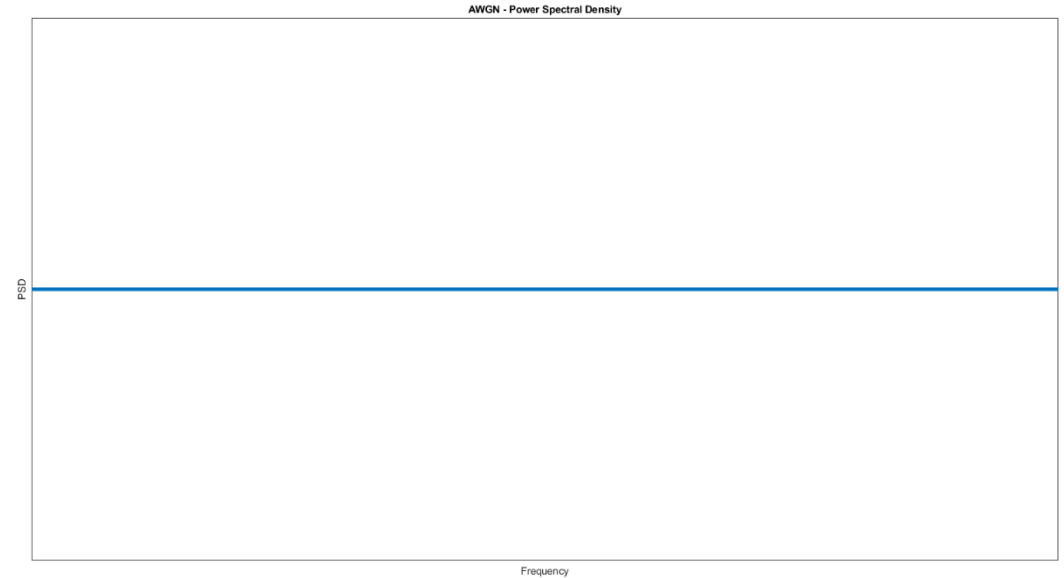
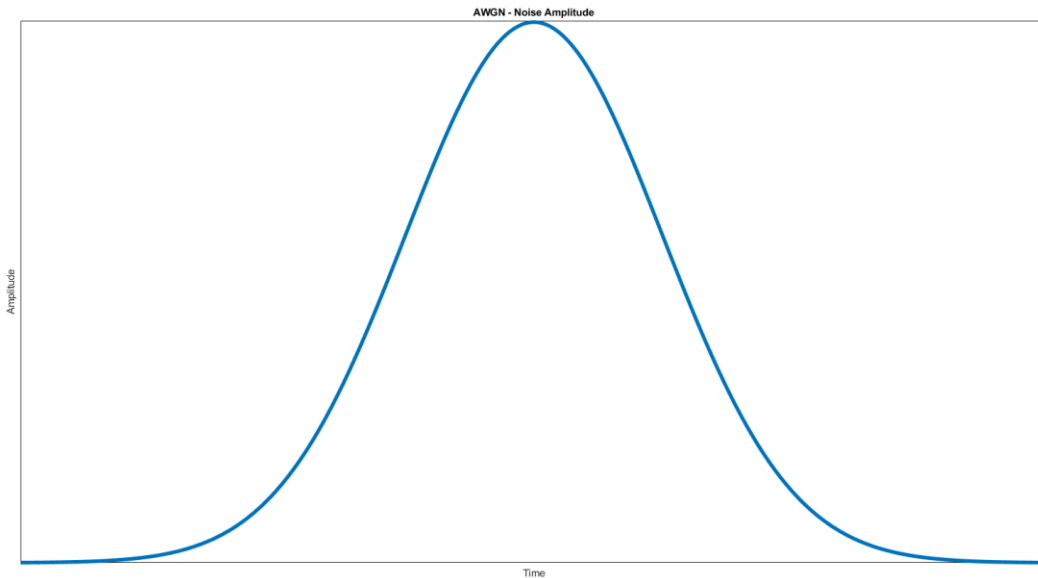
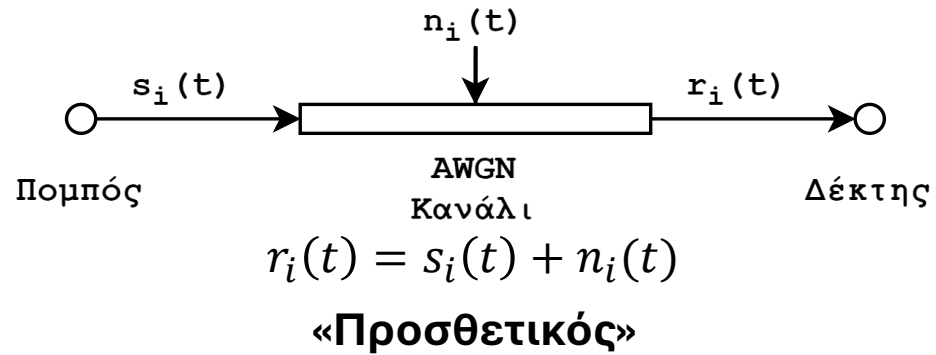
- Έστω σήματα αναφοράς  $s_1$  και  $s_2$
- Λαμβάνω σήμα  $r$  μέσω AWGN καναλιού
- Δε θα λάβω  $s_1$  ή  $s_2$
- Ποιο σήμα μεταδόθηκε;
- Κανόνας απόφασης – decision rule:  
 $\min(d(r, s_i))$  για  $i = 1, 2, \dots$



# AWGN

- Προσθετικός Λευκός Γκαουσιανός Θόρυβος – Additive White Gaussian Noise (AWGN)
  - **Προσθετικός** Προστίθεται στο σήμα
  - **Λευκός** Ομοιόμορφη φασματική πυκνότητα ισχύος (από το «λευκό» φως που είναι η ομοιόμορφη εκπομπή όλων των ορατών συχνοτήτων)
  - **Γκαουσιανός** Γκαουσιανή (Κανονική) κατανομή του πλάτους στο πεδίο του χρόνου
- Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει AWGN κανάλι, αλλά χρησιμοποιείται στις μοντελοποιήσεις και δίνει καλά αποτελέσματα (άνω φράγμα)
  - Περαιτέρω επιδείνωση από άλλα φαινόμενα, π.χ., διαλείψεις, πολυδιόδευση

# AWGN



$$S_n(f) = \frac{N_0}{2}, f \in (-\infty, +\infty)$$

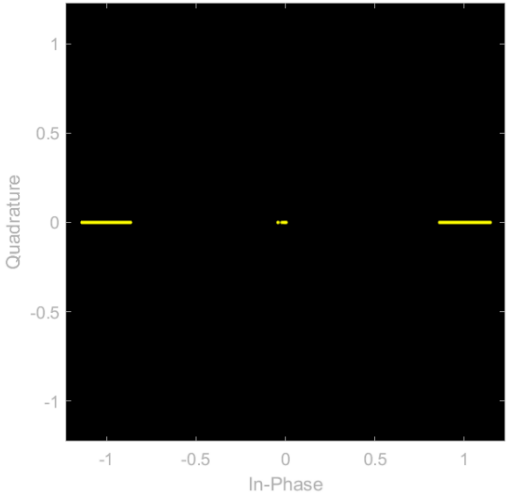
«Λευκός»

$$f_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

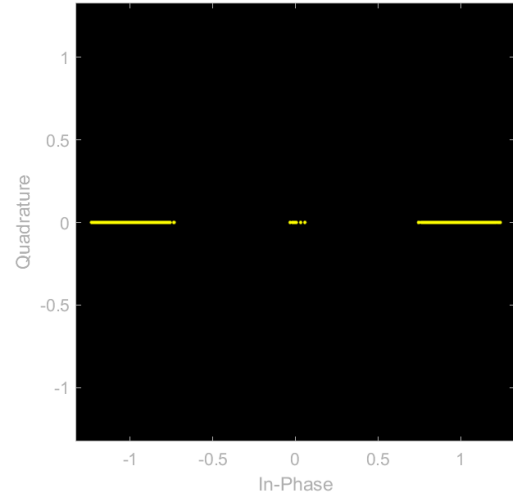
«Γκαουσιανός»

# Αστερισμοί και Απόφαση – BPSK

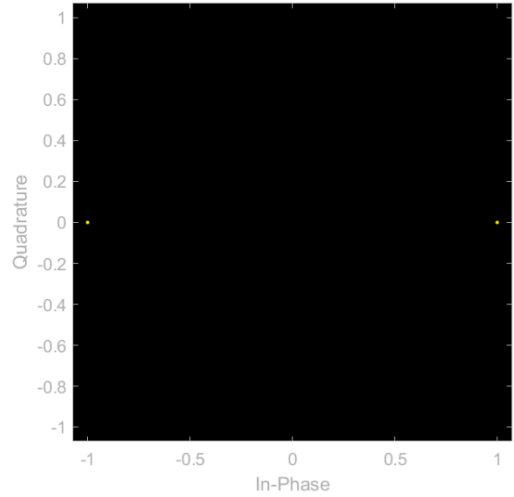
60kbits, SNR = 20dB



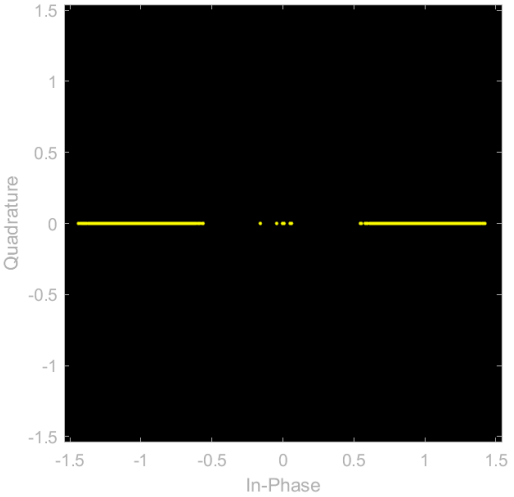
60kbits, SNR = 15dB



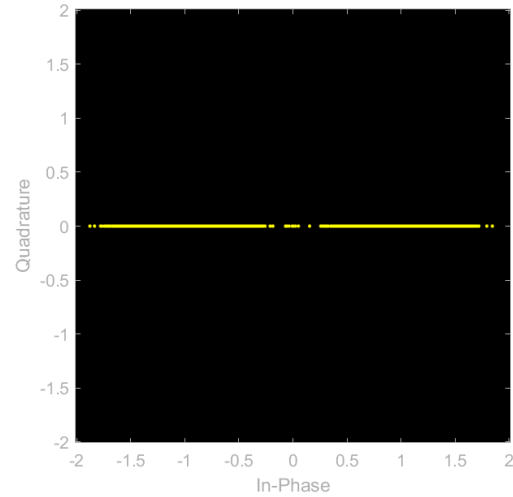
60kbits, χωρίς AWGN



60kbits, SNR = 10dB

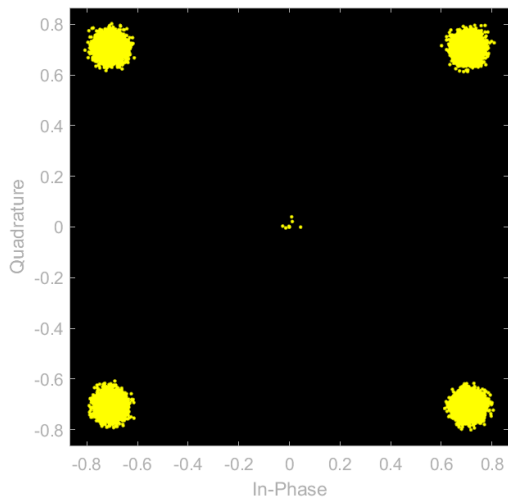


60kbits, SNR = 5dB

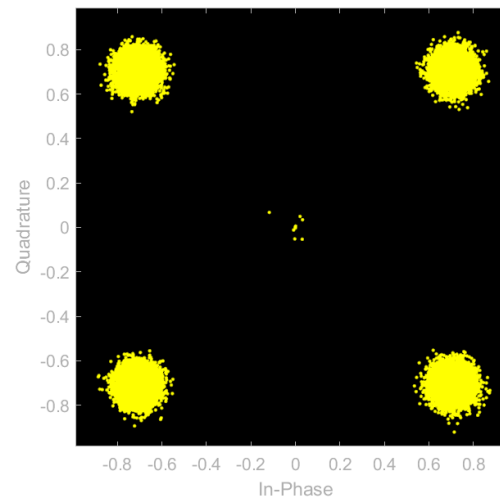


# Αστερισμοί και Απόφαση – QPSK

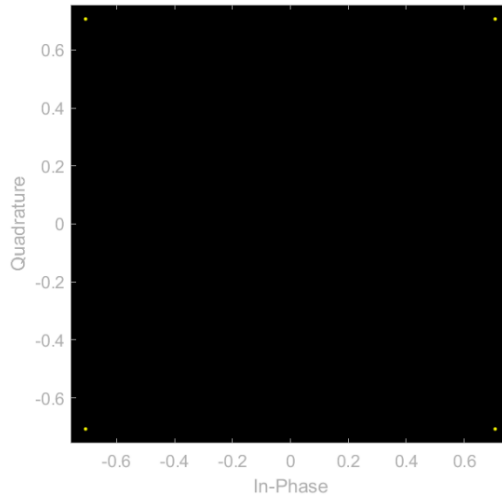
60kbits, SNR = 20dB



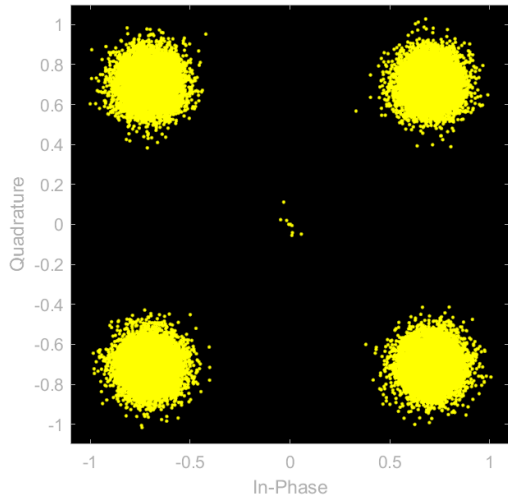
60kbits, SNR = 15dB



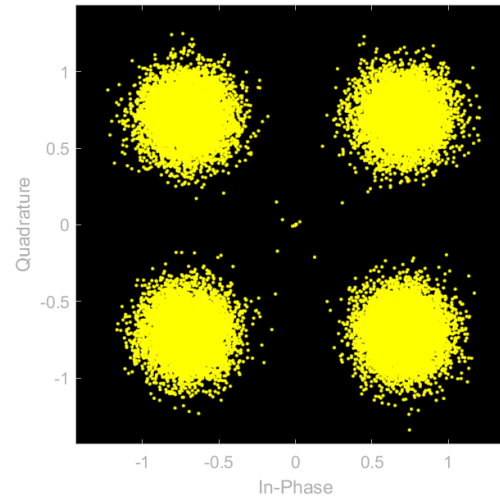
60kbits, χωρίς AWGN



60kbits, SNR = 10dB

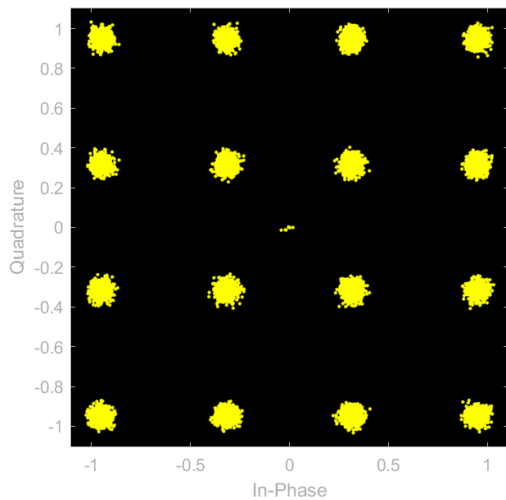


60kbits, SNR = 5dB

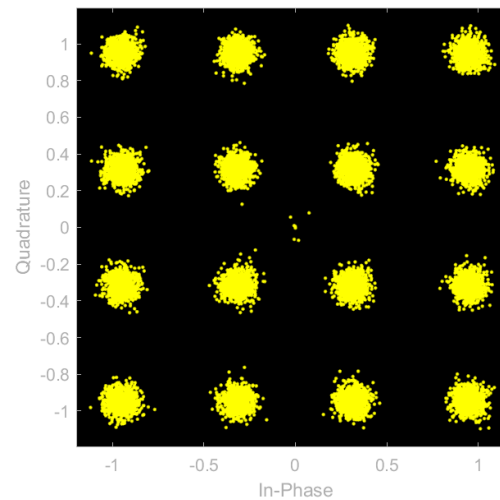


# Αστερισμοί και Απόφαση – QAM-16

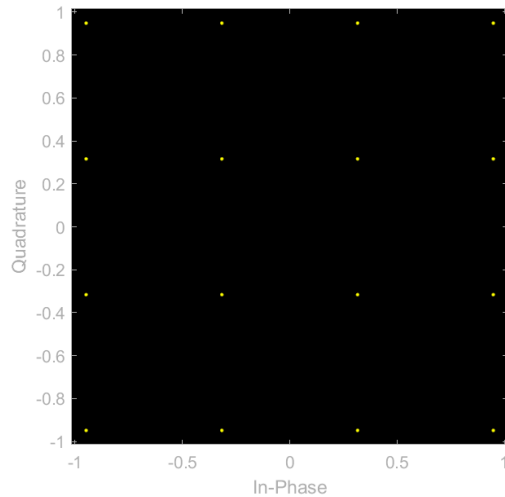
60kbits, SNR = 20dB



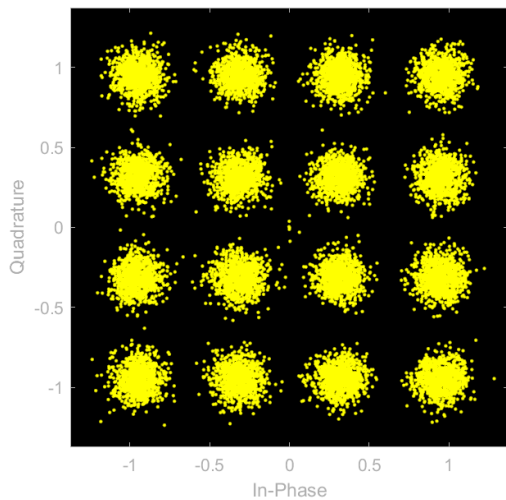
60kbits, SNR = 15dB



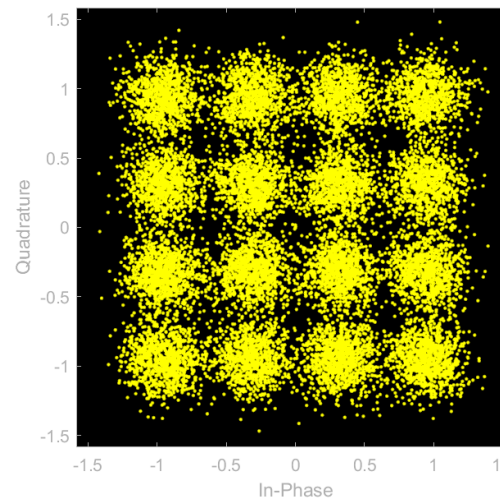
60kbits, χωρίς AWGN



60kbits, SNR = 10dB

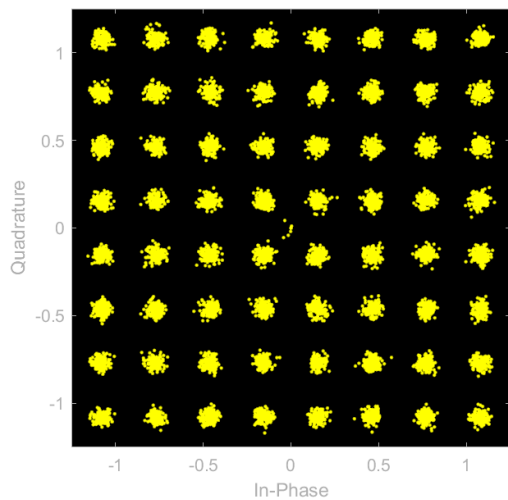


60kbits, SNR = 5dB

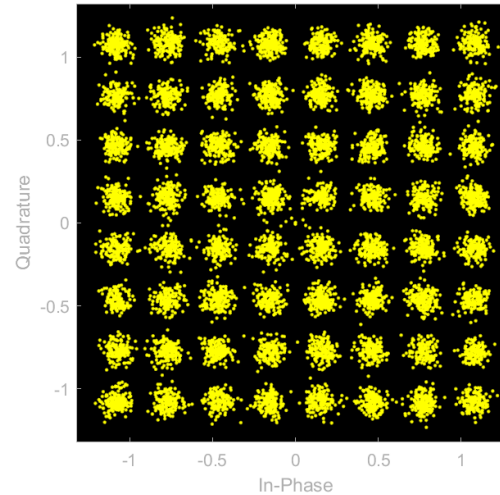


# Αστερισμοί και Απόφαση – QAM-64

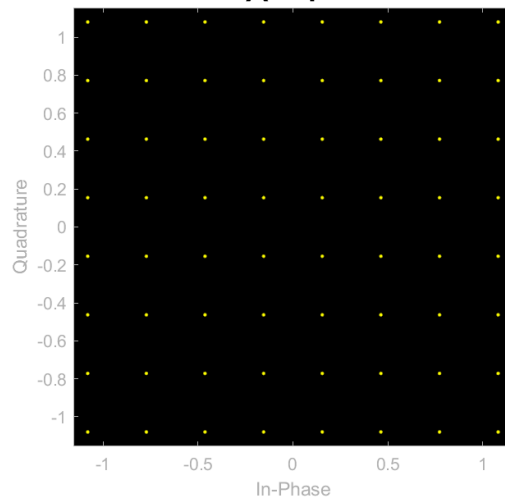
60kbits, SNR = 20dB



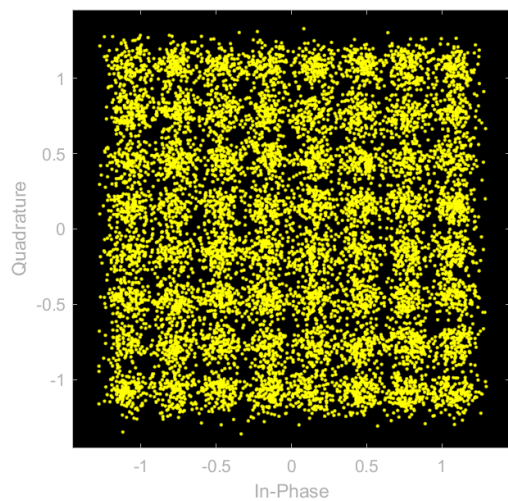
60kbits, SNR = 15dB



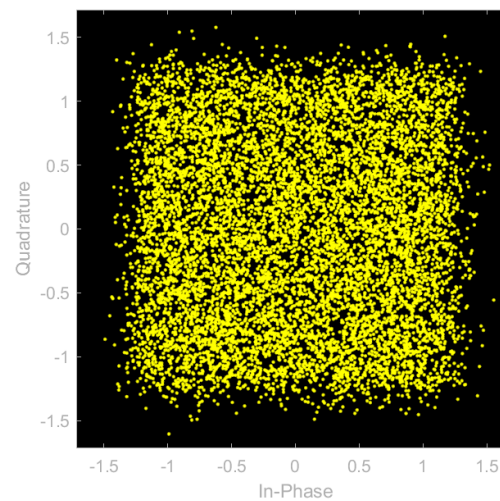
60kbits, χωρίς AWGN



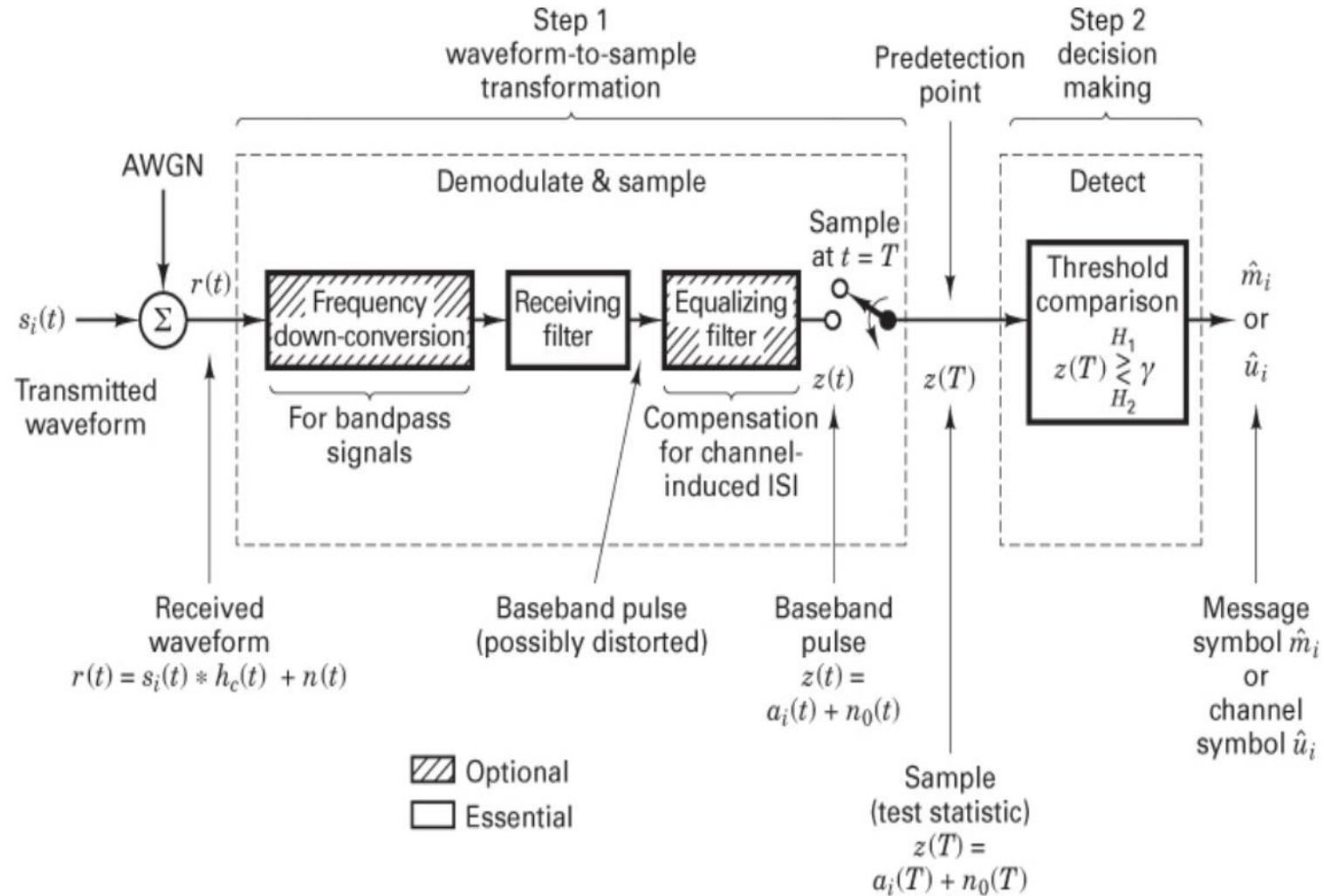
60kbits, SNR = 10dB



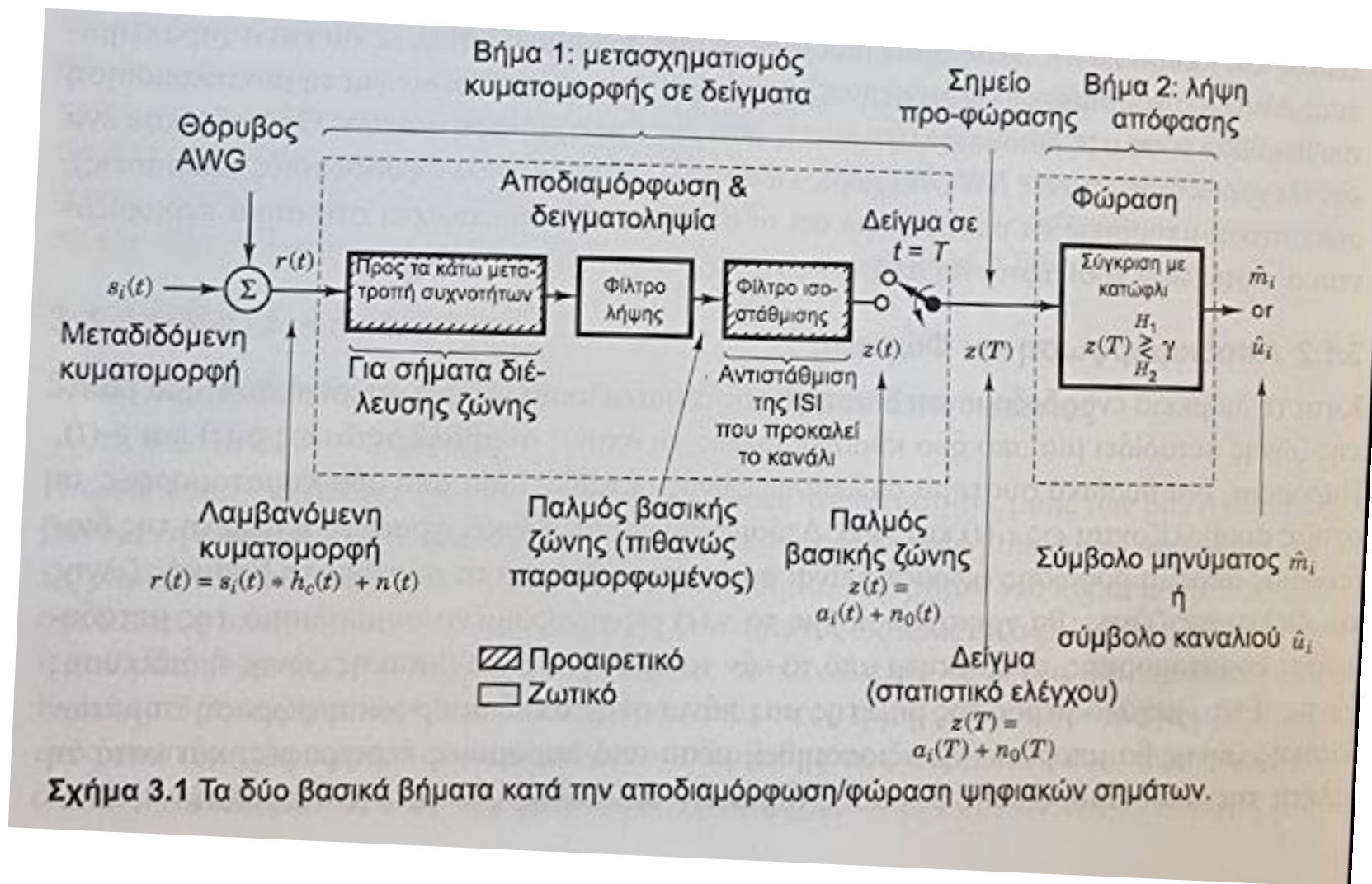
60kbits, SNR = 5dB



# Αποδιαμόρφωση και Ανίχνευση



# Αποδιαμόρφωση και Ανίχνευση



# Αποδιαμόρφωση και Ανίχνευση

## 1. Προ-φώραση (Βήμα 1)



Μετασχηματισμός της κυματομορφής σε ένα σημείο στο χώρο αποφάσεων (τυχαία μεταβλητή)

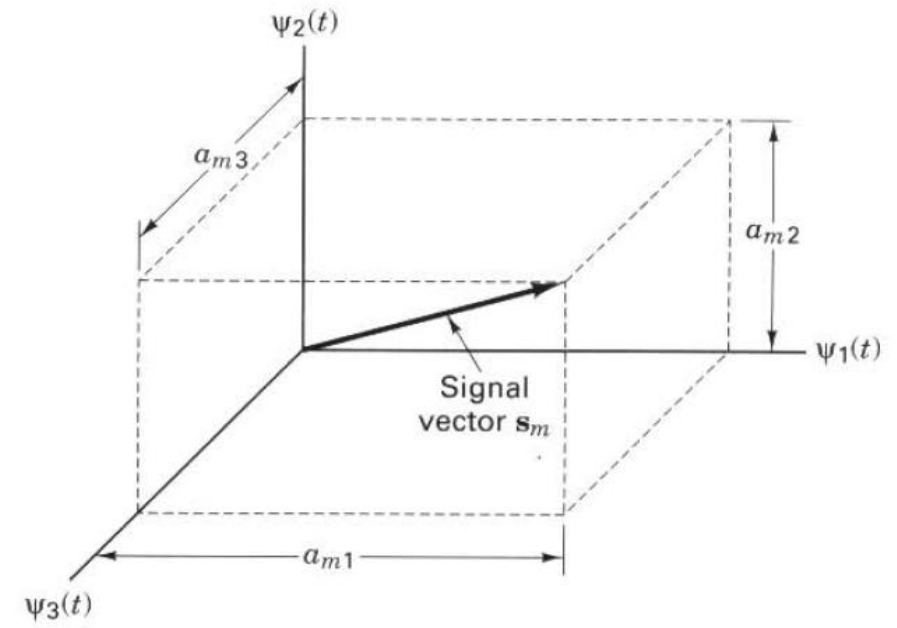
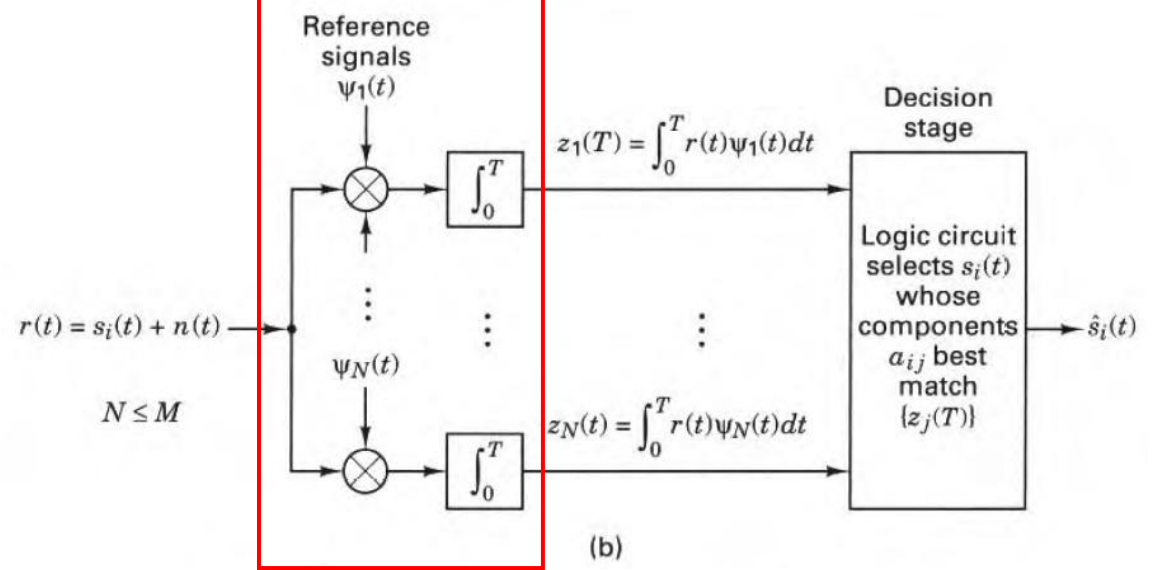
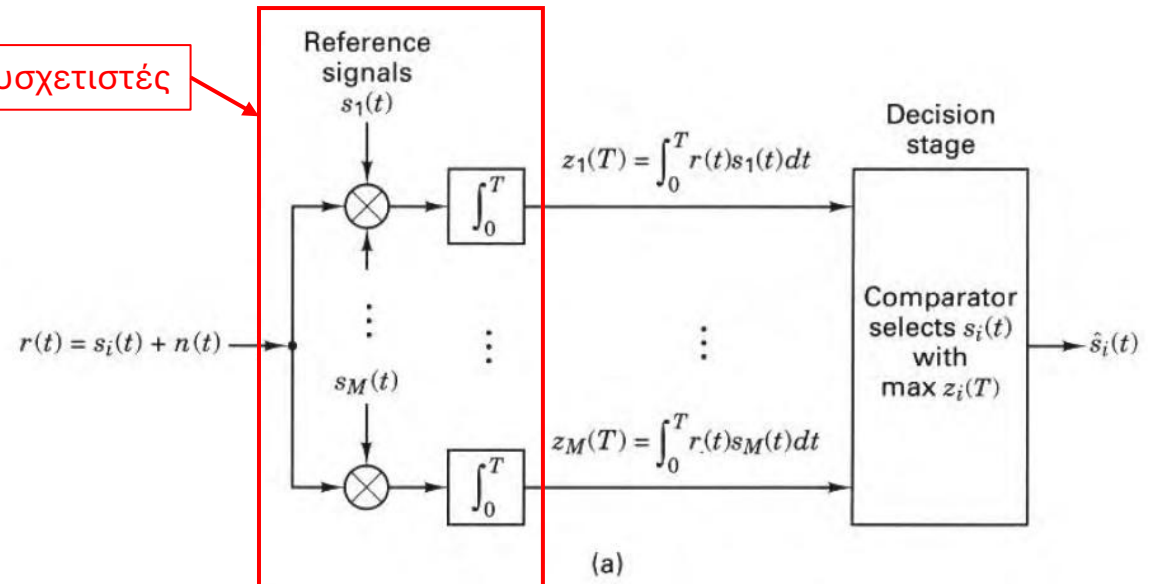
- i. Από Θ. Ισοδυναμίας, ετερεδύνηση
- ii. Επεξεργασία με χρήση φίλτρου
  - Ιδανικό φίλτρο: Συσχετιστής (Correlator) ή Προσαρμοσμένο Φίλτρο (Match Filter)
- iii. (Προαιρετικά) Φίλτρο για διασυμβολική παρεμβολή – ISI
  - Υλοποιείται στο ίδιο φίλτρο με τον συσχετιστή

## 2. Απόφαση (Βήμα 2)

- i. Επιλογή  $\hat{s}_i(t)$  για  $i$  που βελτιστοποιεί το  $z_i(T)$

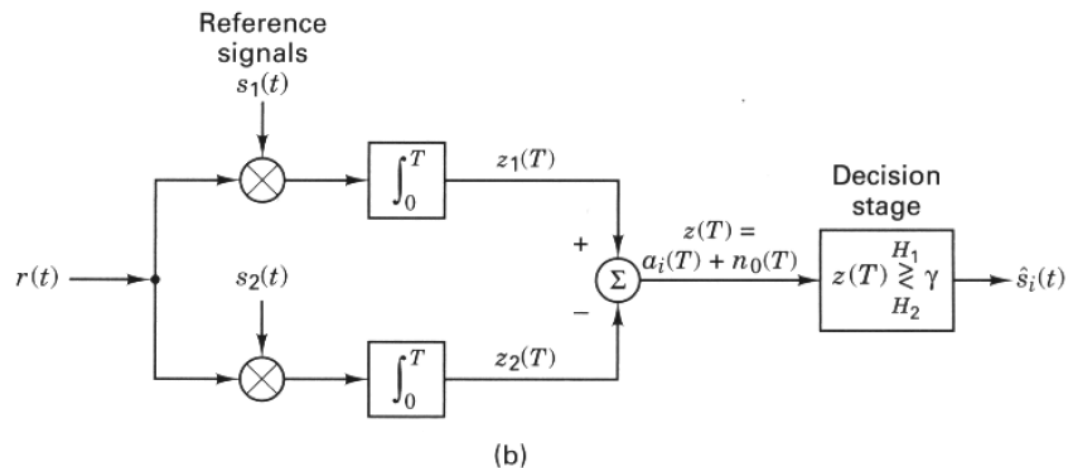
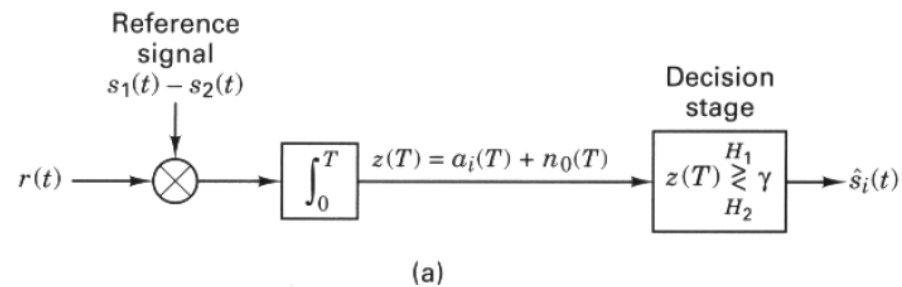
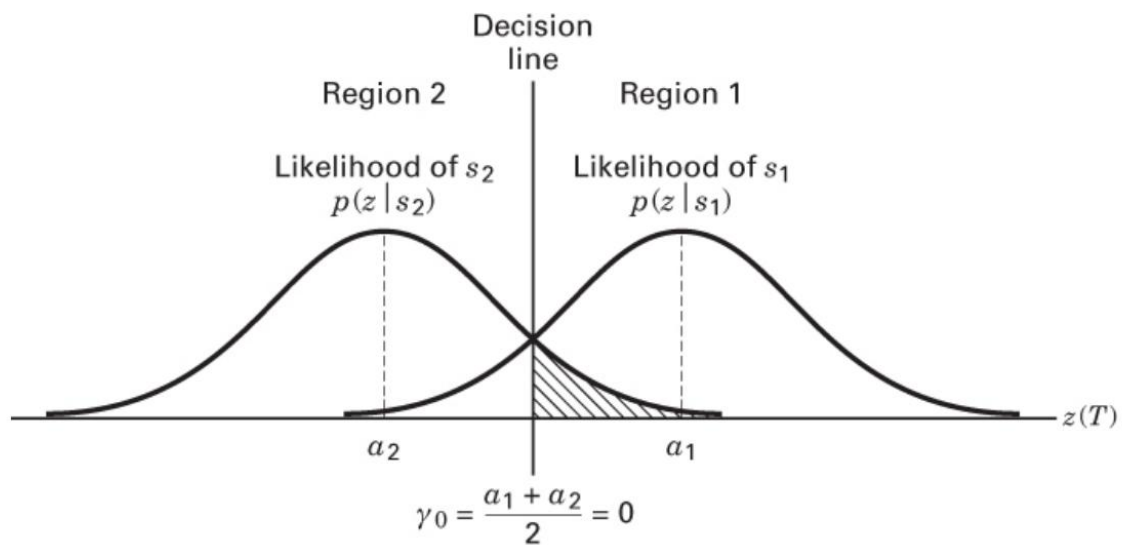
# Αποδιαμόρφωση και Ανίχνευση

Συσχετιστές



$$\begin{aligned}
 s_1(t) &= a_{11}\psi_1(t) + a_{12}\psi_2(t) + \dots + a_{1N}\psi_N(t) \\
 s_2(t) &= a_{21}\psi_1(t) + a_{22}\psi_2(t) + \dots + a_{2N}\psi_N(t) \\
 &\vdots \\
 s_M(t) &= a_{M1}\psi_1(t) + a_{M2}\psi_2(t) + \dots + a_{MN}\psi_N(t)
 \end{aligned}$$

# Απόφαση σε Δυαδική Φώραση (BPSK)



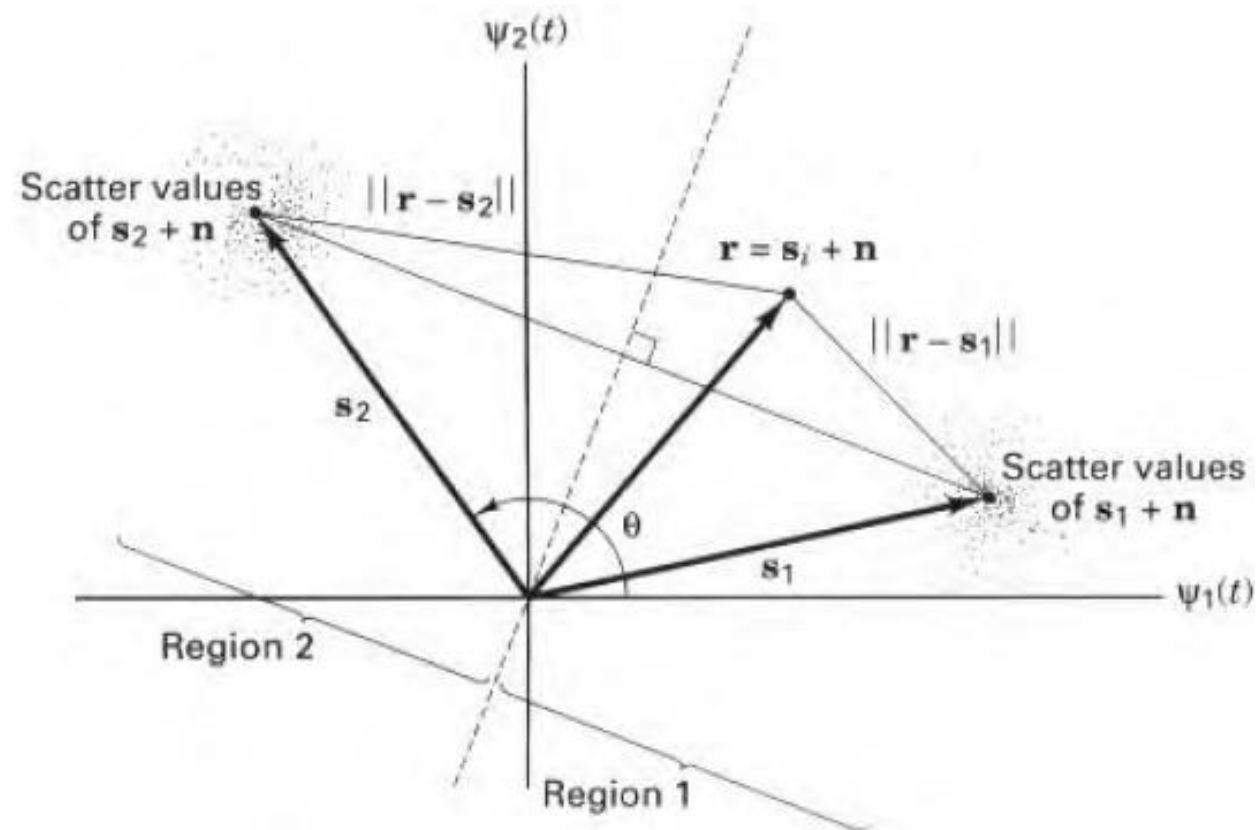
Δύο εναλλακτικές αποδιαμόρφωσης

α) συσχέτιση με σήμα διαφοράς

β) 2 συγκρίσεις και υπολογισμός διαφοράς

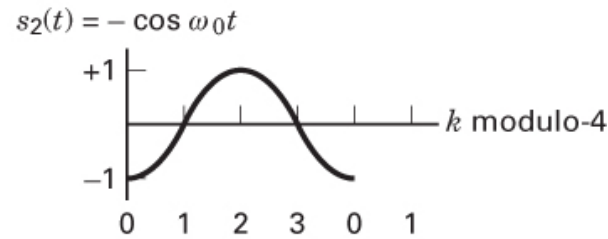
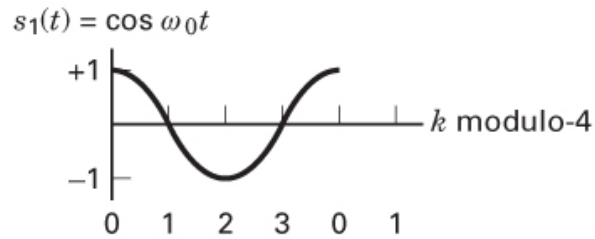
# Περιοχές Απόφασης

- Έστω σήματα αναφοράς  $s_1$  και  $s_2$
- Λαμβάνω σήμα  $r$  μέσω AWGN καναλιού
- Δε θα λάβω  $s_1$  ή  $s_2$
- Ποιο σήμα μεταδόθηκε;
- Κανόνας απόφασης – decision rule:  
 $\min(d(r, s_i))$  για  $i = 1, 2, \dots$

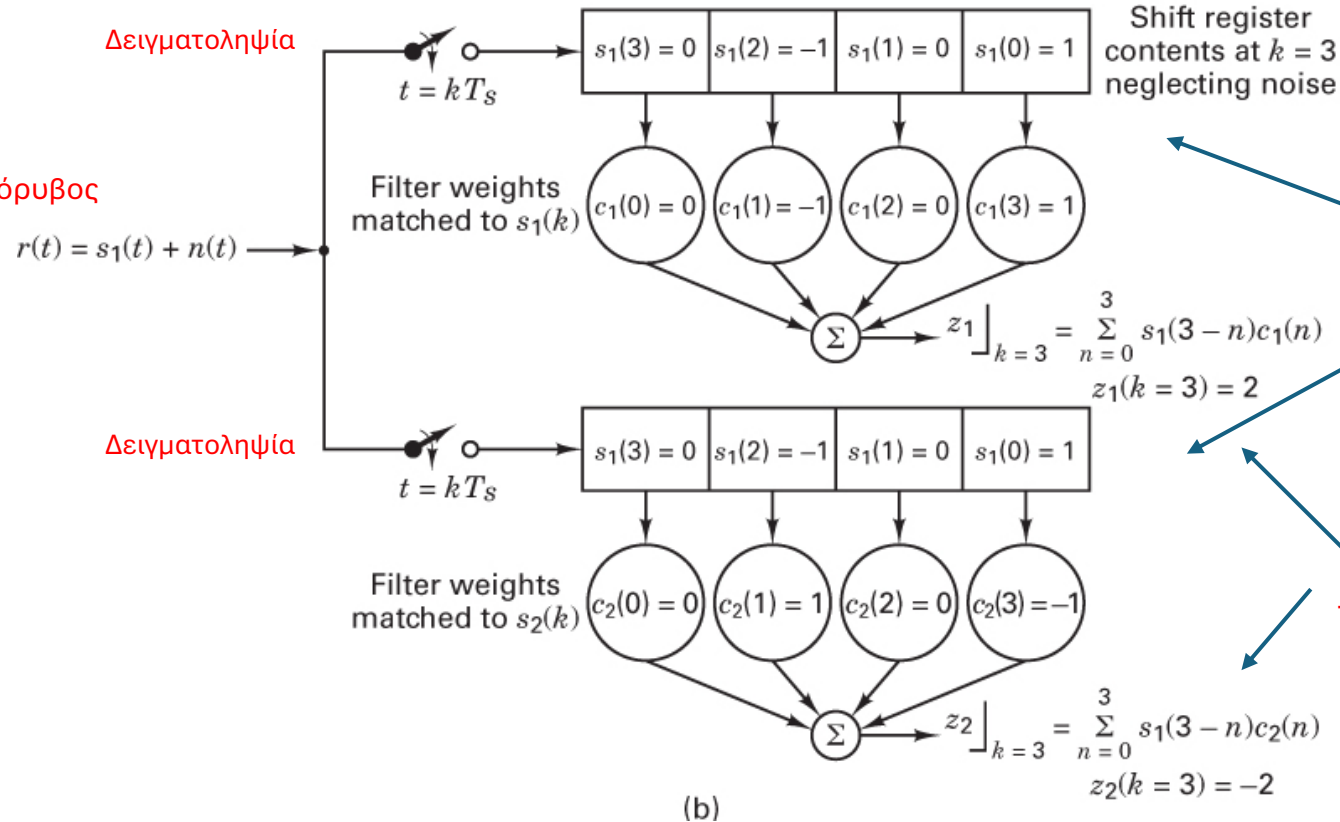


Σύμφωνη Φώραση

# PSK με Προσαρμοσμένο Φίλτρο



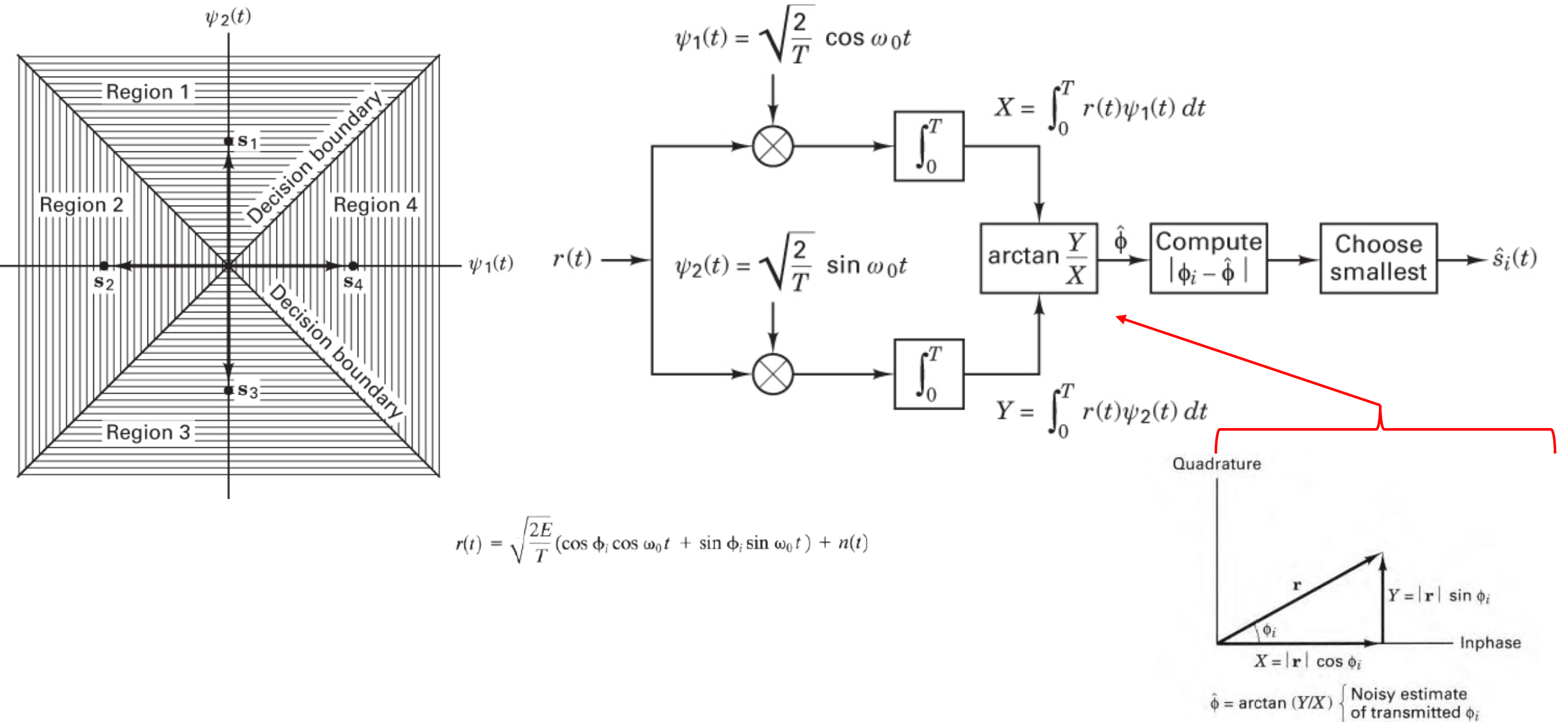
Εισερχόμενο σήμα συν θόρυβος



Καταχωρητές ολίσθησης

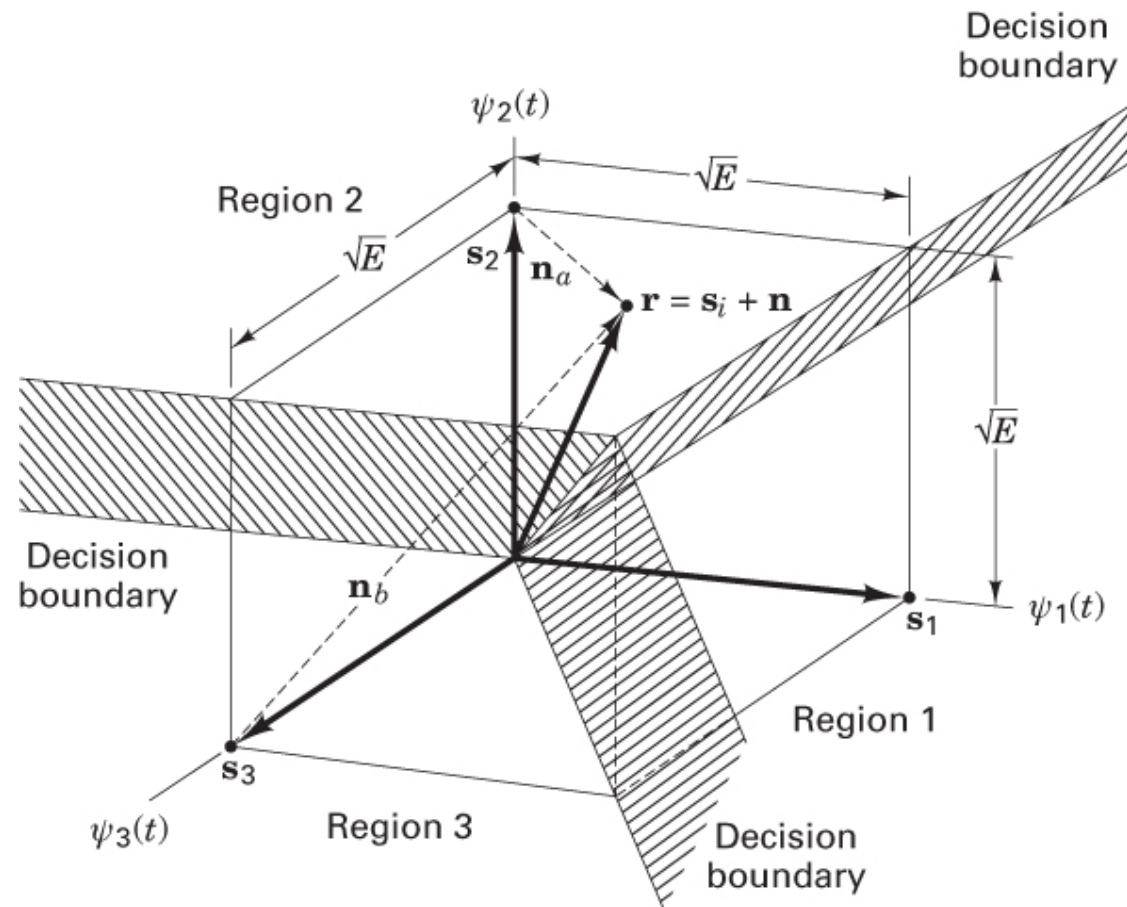
Από τα  $s_1$  και  $s_2$  επιλέγουμε αυτό με το μεγαλύτερο άθροισμα  $z$  (λιγότερα λάθη)

# Περιοχές Απόφασης και αποδιαμορφωτής QPSK



# Σύμφωνη Φώραση M-ary FSK

$M = 3$



Ασύμφωνη Φώραση

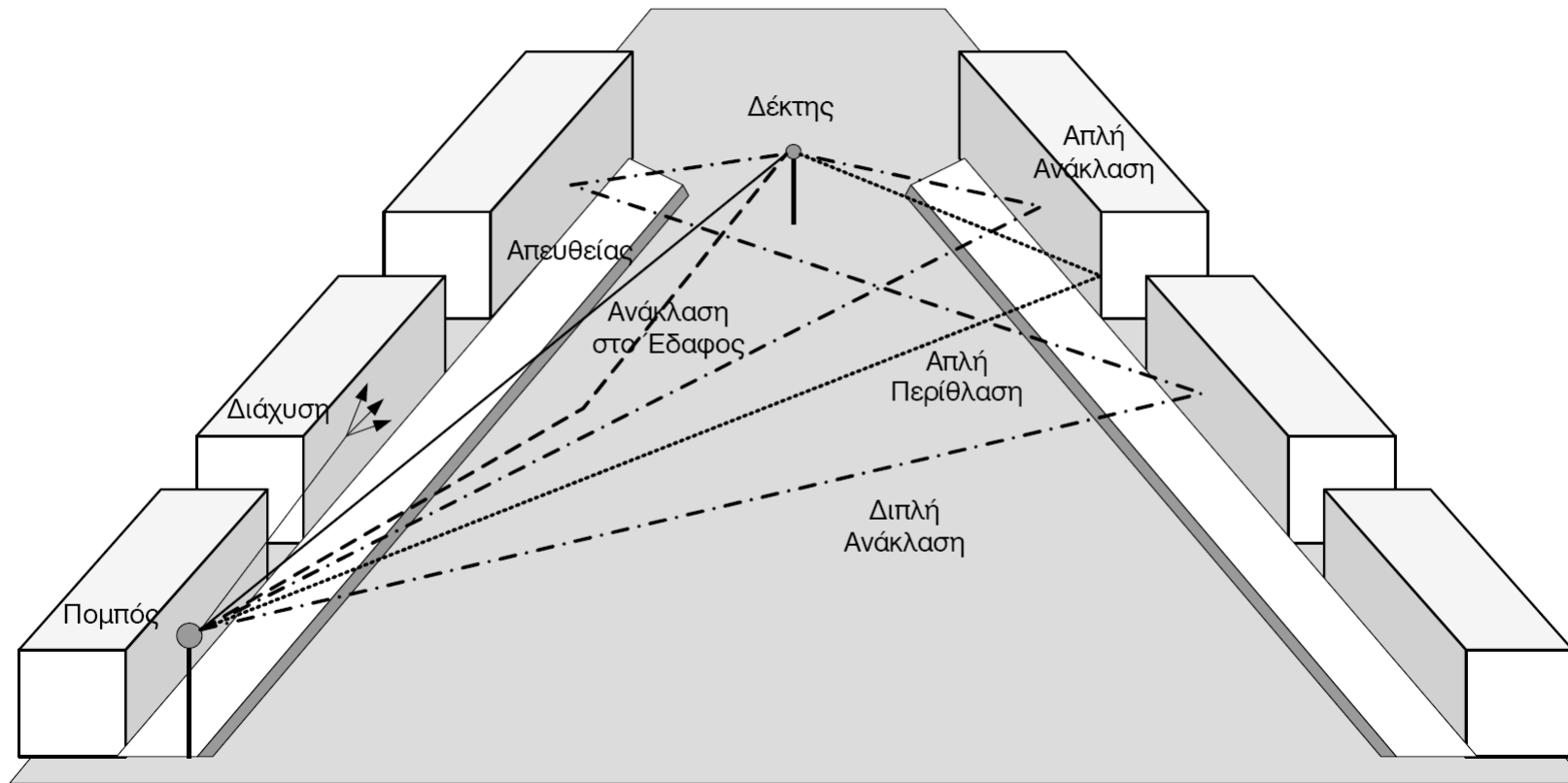
# Διαμόρφωση διαφορικής ολίσθησης φάσης (Differential PSK-DPSK)

- Όταν χρησιμοποιείται σε δέκτες PSK σύμφωνη αποδιαμόρφωση, παρουσιάζονται **ασάφειες της φάσης** οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά την επίδοση του δέκτη.
- Το φαινόμενο αυτό είναι έντονο σε εφαρμογές όπως οι ασύρματες επικοινωνίες, εξαιτίας της **γρήγορης μεταβολής του καναλιού**.



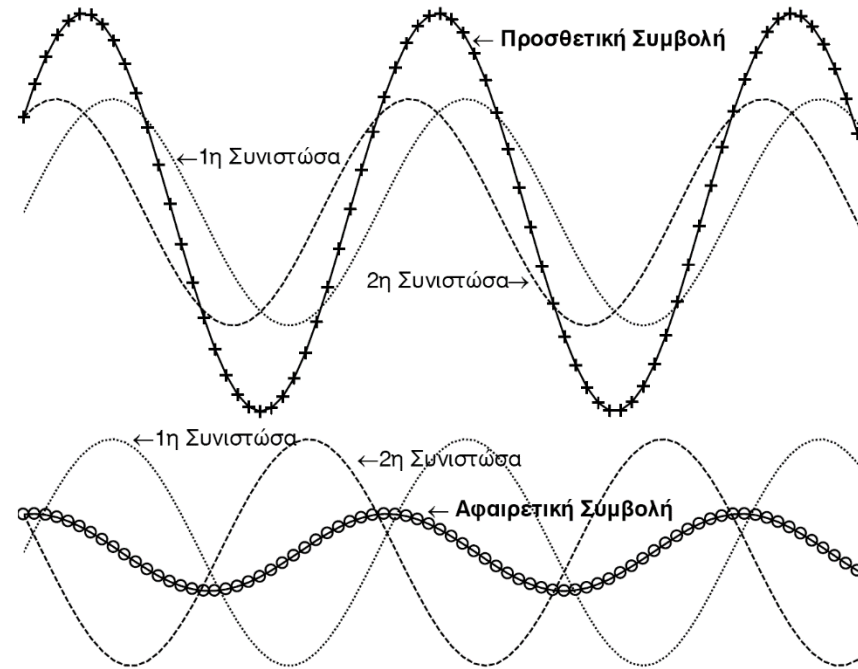
- Διαφορική κωδικοποίηση (differential encoding) των δεδομένων στον πομπό και διαφορική αποκωδικοποίηση (differential decoding) στο δέκτη.
- Η τεχνική διαμόρφωσης που υλοποιεί αυτές τις διαδικασίες, ονομάζεται Διαφορικό (Differential) PSK-DPSK.

# Περιβάλλον Διάδοσης=Διαλείψεις



Ανάλογα με το περιβάλλον, ο δέκτης λαμβάνει πολλαπλές συνιστώσες (εκδόσεις) του ίδιου σήματος

# Συμβολή Κυμάτων

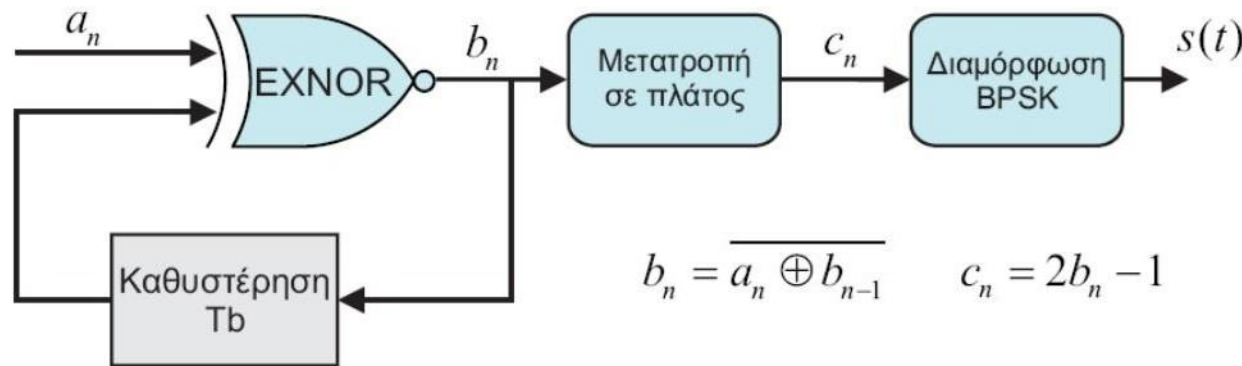


- Διαφορετικό μονοπάτι = Ολίσθηση φάσης = Αφαιρετική ή Προσθετική συμβολή
- Κινούμενο δέκτης ή/και κινούμενα αντικείμενα = Πλήρως δυναμικό περιβάλλον

# DBPSK

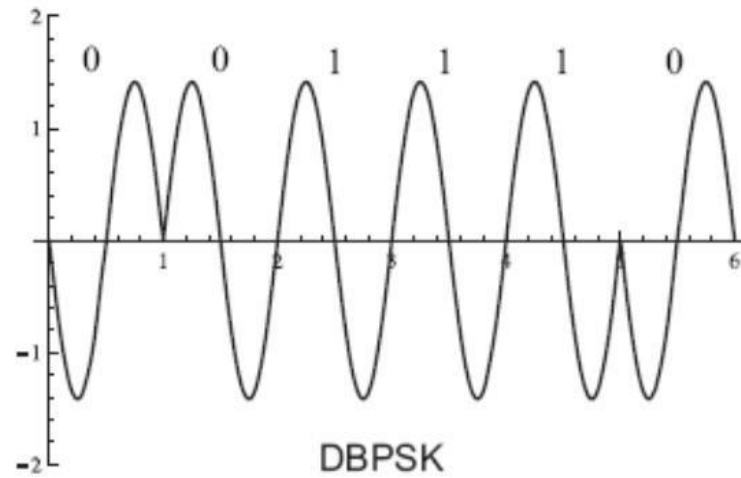
- Με τη διαφορική κωδικοποίηση του BPSK ένα bit 0 ή 1 διαμορφώνεται κατά DBPSK λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του προηγούμενου bit.
- Με τον τρόπο αυτό και με την υπόθεση ότι το λάθος,  $\varepsilon$  στην εκτίμηση της φάσης είναι το ίδιο σε δύο διαδοχικά διαστήματα συμβόλου, η διαφορά φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών συμβόλων θα είναι ανεξάρτητη από το  $\varepsilon$ .

# DBPSK – Πομπός (1)

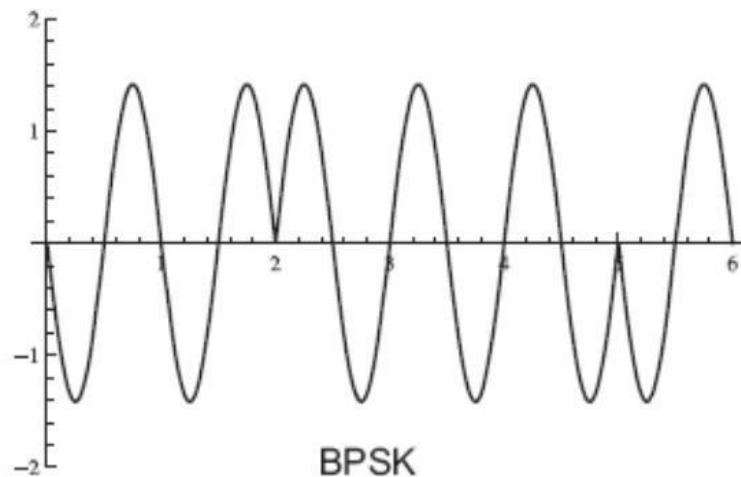


- Η διαφορική κωδικοποίηση υλοποιείται μέσω μιας πύλης EXNOR και ενός καθυστερητή που προκαλεί καθυστέρηση,  $T_b$ .
- Η έξοδος της πύλης EXNOR,  $b_n$ , είναι 1 αν το bit πληροφορίας,  $a_n$ , και το προηγούμενο κωδικοποιημένο bit,  $b_{n-1}$ , είναι τα ίδια. Διαφορετικά, το  $b_n$ , είναι 0.
- Κατόπιν τα κωδικοποιημένα bits μετατρέπονται σε πλάτη, +1, -1 και εκπέμπονται με BPSK αφού γίνει η αντιστοιχία στις φάσεις,  $\Theta_1=0$  και  $\Theta_2=\pi$ .

# DBPSK – Πομπός (2)



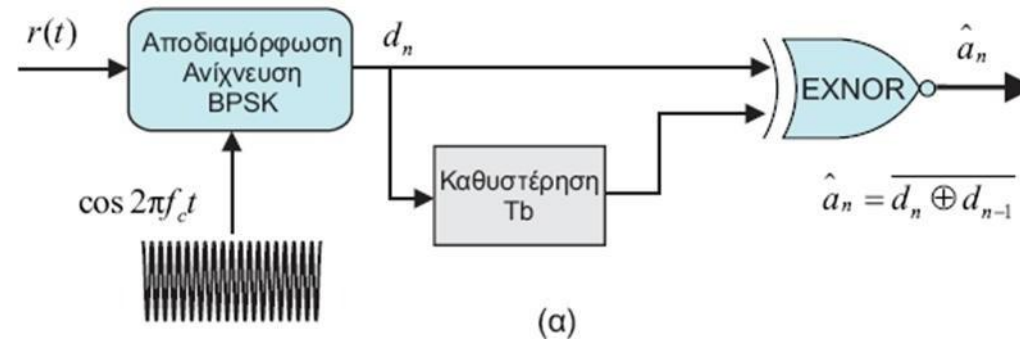
$a_n$		0	0	1	1	1	0
$b_n$	1	0	1	1	1	1	0
$c_n$	1	-1	1	1	1	1	-1
$\Theta_n$	0	$\pi$	0	0	0	0	$\pi$



# DBPSK – Δέκτης

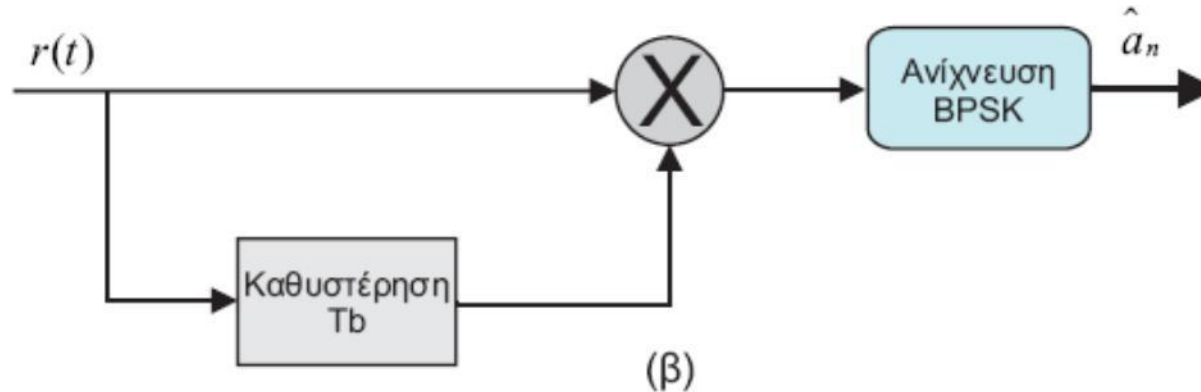
- Η ονομασία DBPSK αναφέρεται τόσο στο τρόπο κωδικοποίησης της πληροφορίας (differential encoding), όσο και στη διαδικασία της αποδιαμόρφωσης-ανίχνευσης.
- Ανάλογα με την μέθοδο που ακολουθείται το DBPSK διακρίνεται σε **σύμφωνο** και **ασύμφωνο**.
- Το **σύμφωνο** DBPSK απαιτεί την εκτίμηση της απόλυτης τιμής της φάσης και κατόπιν ακολουθεί αποκωδικοποίηση των δεδομένων, προκειμένου να ανακτηθεί η εκπεμπόμενη ακολουθία bits.
- Όμως, η μέθοδος αυτή σπάνια χρησιμοποιείται στην πράξη σε αντίθεση με την **ασύμφωνη** διαφορική ανίχνευση η οποία δεν απαιτεί γνώση της φάσης του φέροντος.

# DBPSK – Ασύμφωνος Δέκτης 1



- Χρησιμοποιεί ένα τοπικά παραγόμενο φέρον το οποίο είναι σε συμφωνία ως προς τη συχνότητα με το λαμβανόμενο σήμα **αλλά όχι απαραίτητα ως προς τη φάση**.
- Αφού αποδιαμορφωθούν και ανιχνευθούν τα διαφορετικά κωδικοποιημένα δεδομένα, οδηγούνται στον αποκωδικοποιητή ώστε να εξαχθούν τα bits Πληροφορίας.
- Ο αποκωδικοποιητής υλοποιείται (όπως και ο κωδικοποιητής) με μια πύλη EXNOR και ένα καθυστερητή.
- Βέλτιστος ως προς BER.

# DBPSK – Ασύμφωνος Δέκτης 2



- Δεν απαιτεί γνώση της συχνότητας του λαμβανόμενου σήματος.
- Ο χρησιμοποιούμενος πολλαπλασιαστής συσχετίζει το λαμβανόμενο σήμα με την καθυστερημένη κατά μια περίοδο συμβόλου έκδοση αυτού.
- Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται για την υπόλοιπη ακολουθία bits.
- Υποβέλτιστος ως προς το BER αλλά λιγότερο πολύπλοκος

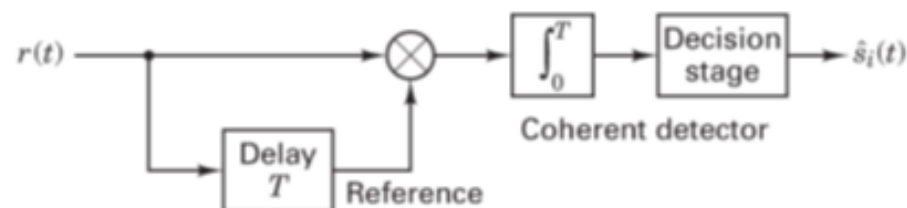
# Διαφορική PSK - DPSK

- **Διαφορική:** Ο πομπός κωδικοποιεί και ο δέκτης συγκρίνει τη φάση του τρέχοντος εισερχόμενου συμβόλου με αυτήν του προηγούμενου. (EXNOR  $1+1=1$ ,  $0+0=1$ ,  $1+0=0$ ,  $0+1=0$ )
- Λιγότερο αποτελεσματική (διάδοση θορύβου)/απλούστερη

Sample index, $k$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Information message, $m(k)$		1	1	0	1	0	1	1	0	0	1
Differentially encoded message (first bit arbitrary), $c(k)$	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
Corresponding phase shift, $\theta(k)$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	0	0	$\pi$	$\pi$	$\pi$	0	$\pi$	$\pi$

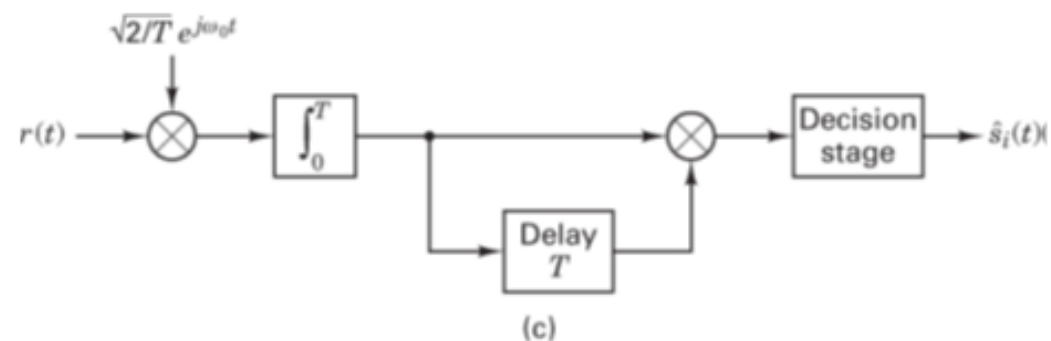
(a)

Υποβέλτιστη φώραση



Detected message,  $\hat{m}(k)$  1 1 0 1 0 1 1 0 0 1

(b)



Βέλτιστη φώραση με σήμα αναφοράς

# Διαφορική PSK – DPSK με 4 συνδυασμούς

$$c(k) = c(k - 1) \oplus m(k)$$

$$c(k) = \overline{c(k - 1) \oplus m(k)}$$

The bit stream

1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 1 1

is to be transmitted using DPSK modulation. Show four different differentially encoded sequences that can represent the data sequence above, and explain the algorithm that generated each.

# DPSK – Παράδειγμα διάδοσης μεμονωμένου σφάλματος

$a_n$		0	0	1	1	1	0
$b_n$	1	0	1	1	1	1	0
$c_n$	1	-1	1	1	1	1	-1
$\Theta_n$	0	$\pi$	0	0	0	0	$\pi$
$\hat{\Theta}_n$		$\pi$	$\pi$	0	0	0	$\pi$
$d_n$	1	0	0	1	1	1	0
$\hat{a}_n$		0	1	0	1	1	0

← Λάθος μετάδοσης

Αν ήταν όμως συνεχόμενα τα σφάλματα;

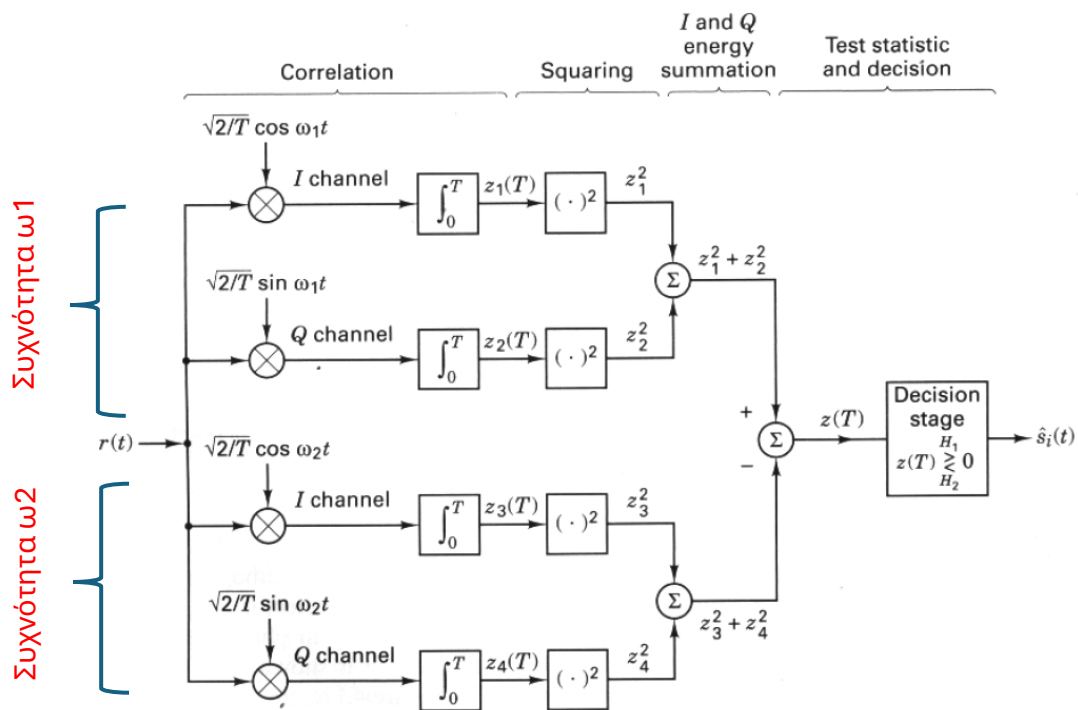
# PSK – Εφαρμογές (1)

- Συστήματα κινητών επικοινωνιών EGPRS (ονομαζόμενα και EDGE ή IMT Single Carrier (IMT-SC)). Τα συστήματα αυτά είναι μια εξέλιξη του GSM και επιτρέπουν μετάδοση σε μεγαλύτερες ταχύτητες, διατηρώντας όμως τη συμβατότητα με το GSM. Αν και το EGPRS μπορεί να θεωρηθεί σαν τεχνολογία κινητών επικοινωνιών 3ης γενιάς (3G) συνήθως αναφέρεται σαν 2.75G.
- Συστήματα κινητών επικοινωνιών 3ης γενιάς UMTS, WCDMA, HSDPA.
- Επικοινωνίες δεδομένων σε δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας (πρότυπο ITU-T).
- Ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless LANs) σύμφωνα με τα πρότυπα 802.11b και 802.11g.
- Δορυφορικές επικοινωνίες.

## PSK – Εφαρμογές (2)

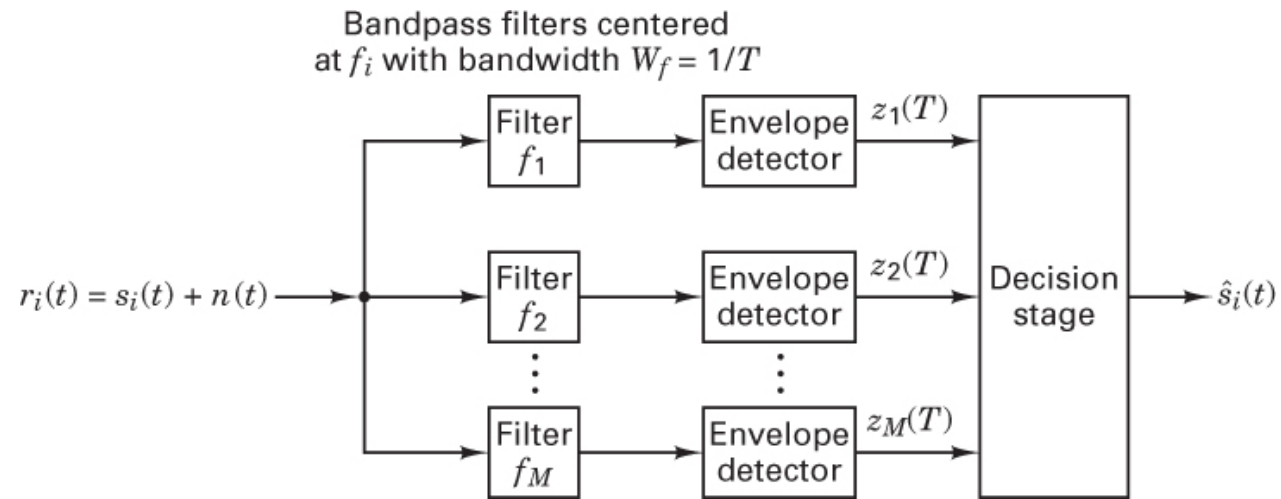
- Σε βιομετρικά διαβατήρια, πιστωτικές κάρτες και γενικά σε περιπτώσεις αναγνώρισης με χρήση ραδιοσυχνοτήτων (Radio-frequency identification- RFID).
- Στο σύστημα ασύρματης επικοινωνίας Bluetooth 2.
- Στα συστήματα επίγειας και δορυφορικής ψηφιακής τηλεόρασης (DVB-T, DVB-RCS).
- Στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας Worldwide Interoperability for Microwave Access-WiMAX.

# Ασύμφωνη Φώραση FSK



BFSK με ανίχνευση ενέργειας

Προτιμώμενο λόγω ψηφιακής υλοποίησης



(M)-FSK με φωρατή περιβάλλουσας

Μεγαλύτερο βάρος και κόστος