

Ψηφιακές Επικοινωνίες

Κεφ 4: Διαμόρφωση & Αποδιαμόρφωση Ζώνης Διέλευσης

Συνέχεια

Φώραση Σημάτων Παρουσία Γκαουσιανού Θορύβου

Θεώρημα Ισοδυναμίας

Θεώρημα

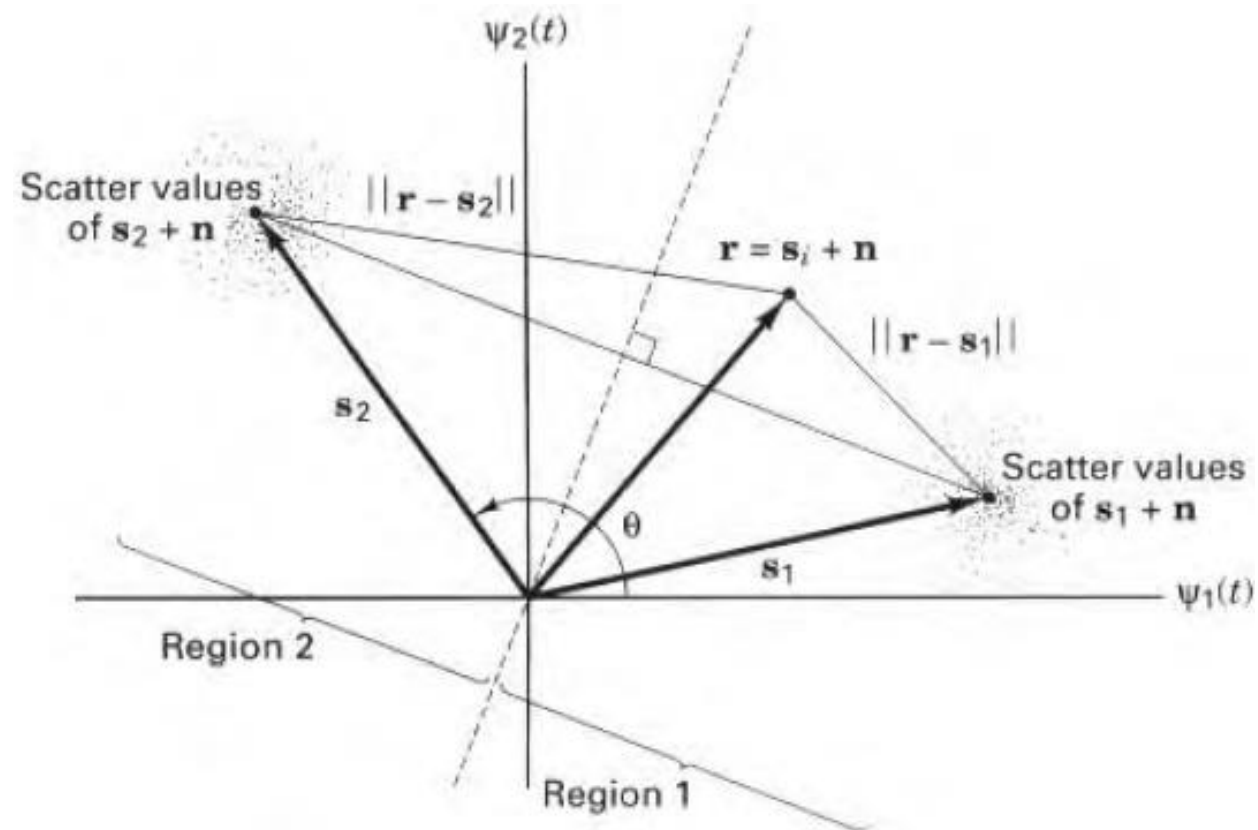
Η εκτέλεση γραμμικής επεξεργασίας ενός ζωνοπερατού σήματος ακολουθούμενη από την ετεροδύνωση του σήματος στη βασική ζώνη δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την ετεροδύνωση του ζωνοπερατού σήματος στη βασική ζώνη ακολουθούμενη από γραμμική επεξεργασία του σήματος στη βασική ζώνη.

Συνέπεια Θεωρήματος

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

Περιοχές Απόφασης

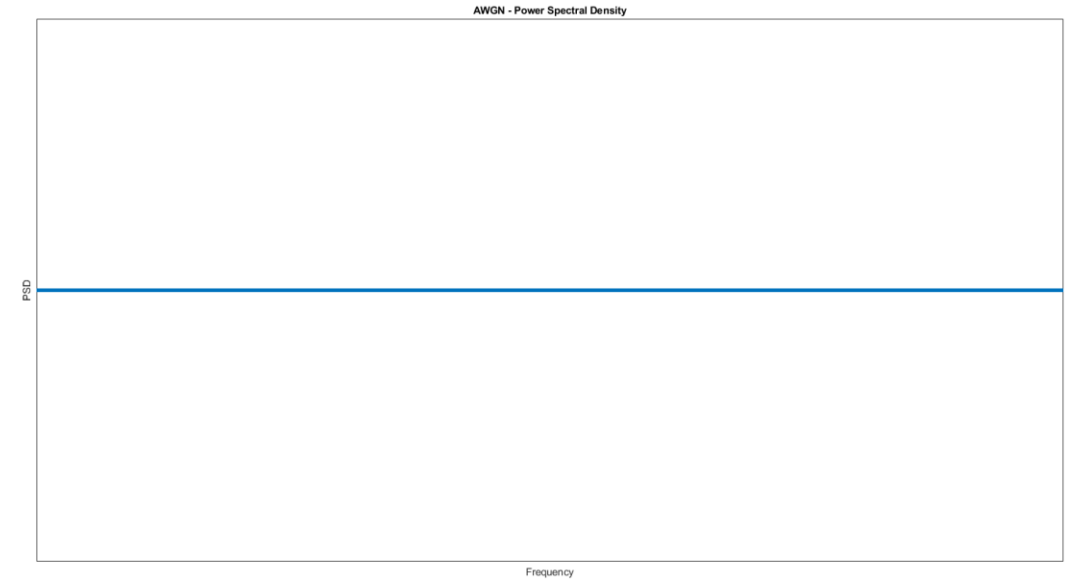
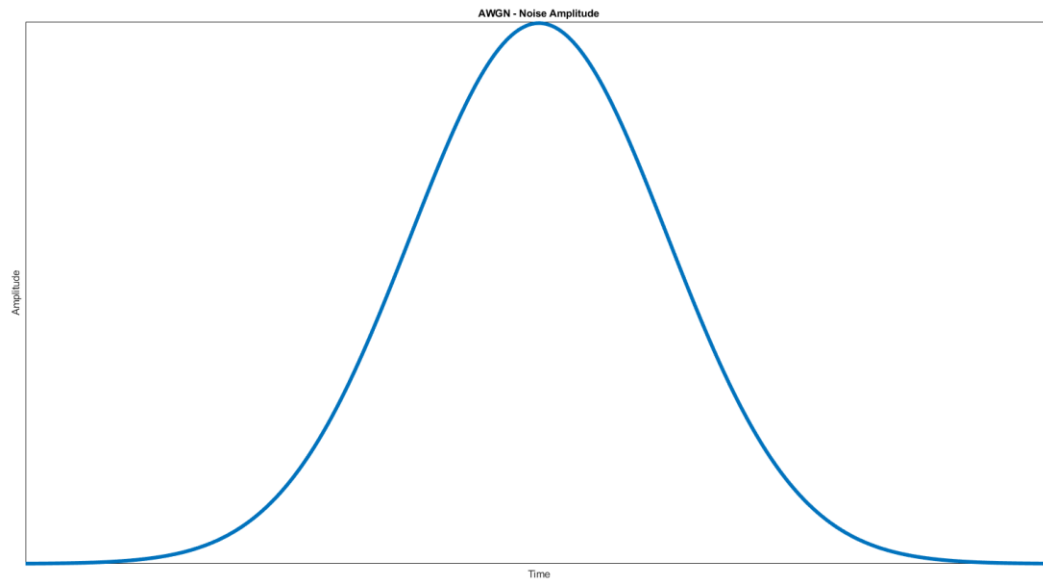
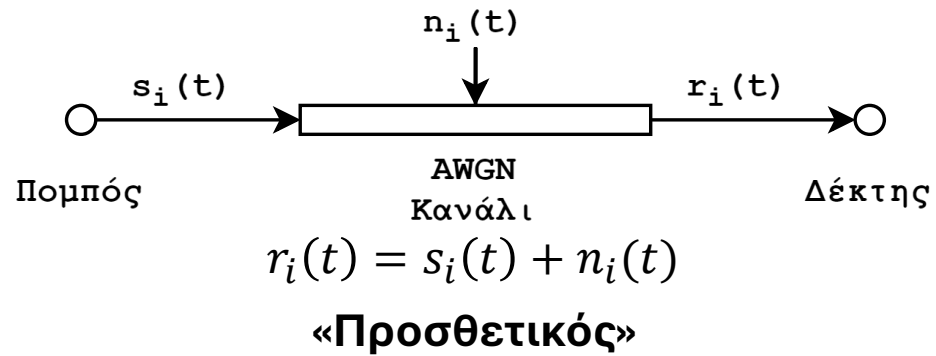
- Έστω σήματα αναφοράς s_1 και s_2
- Λαμβάνω σήμα r μέσω AWGN καναλιού
- Δε θα λάβω s_1 ή s_2
- Ποιο σήμα μεταδόθηκε;
- Κανόνας απόφασης – decision rule:
 $\min(d(r, s_i))$ για $i = 1, 2, \dots$



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 με μέση τιμή 0
- 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



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

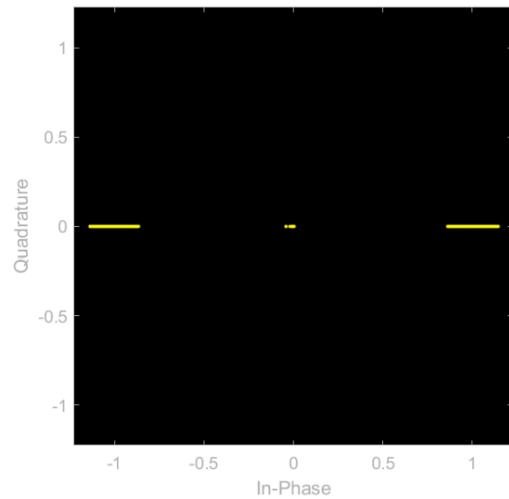
«Λευκός»

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

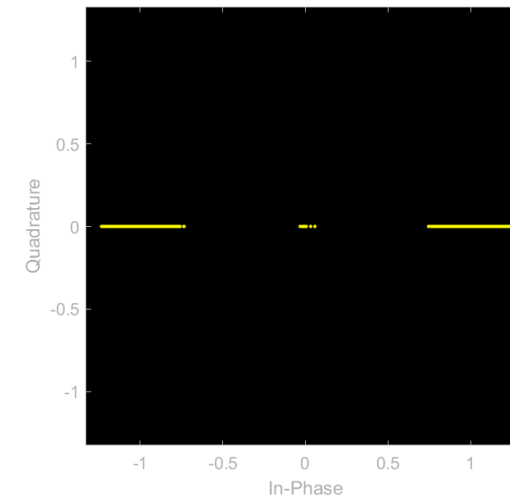
«Γκαουσιανός»

Αστερισμοί και Απόφαση – BPSK

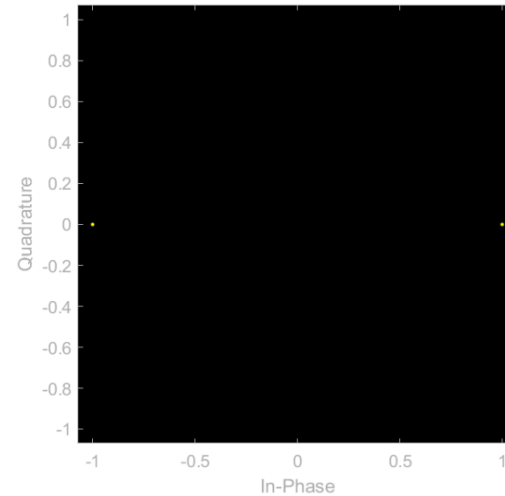
60kbits, SNR = 20dB



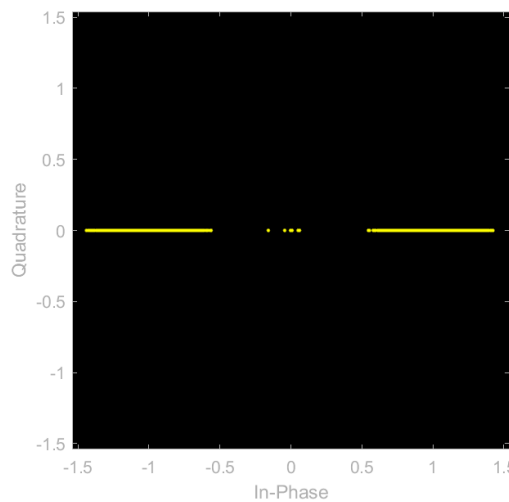
60kbits, SNR = 15dB



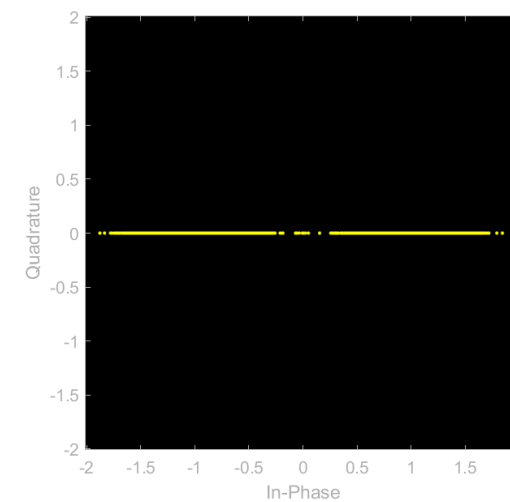
60kbits, χωρίς AWGN



60kbits, SNR = 10dB

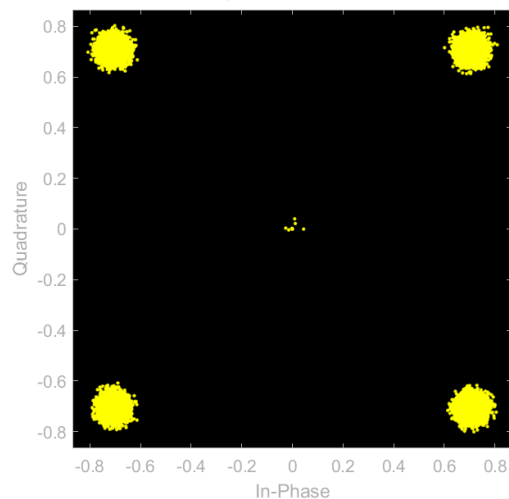


60kbits, SNR = 5dB

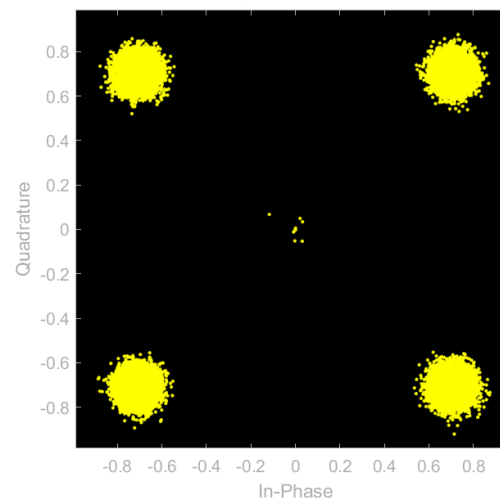


Αστερισμοί και Απόφαση – QPSK

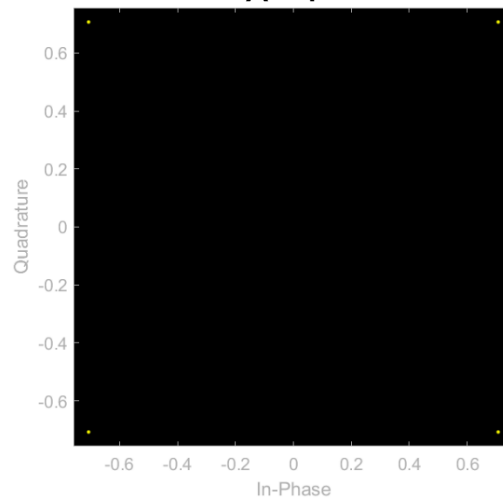
60kbits, SNR = 20dB



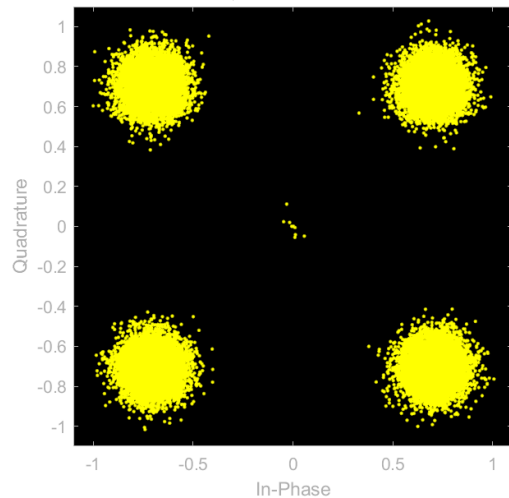
60kbits, SNR = 15dB



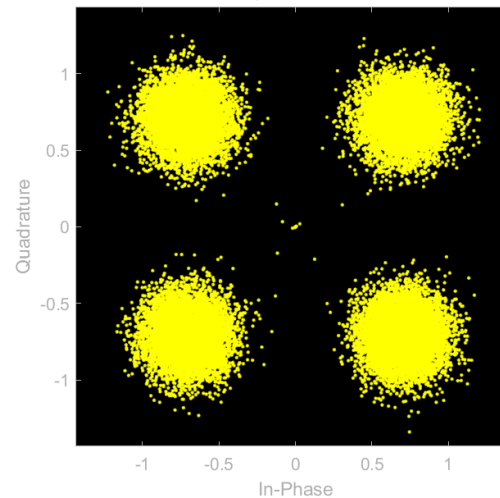
60kbits, χωρίς AWGN



60kbits, SNR = 10dB

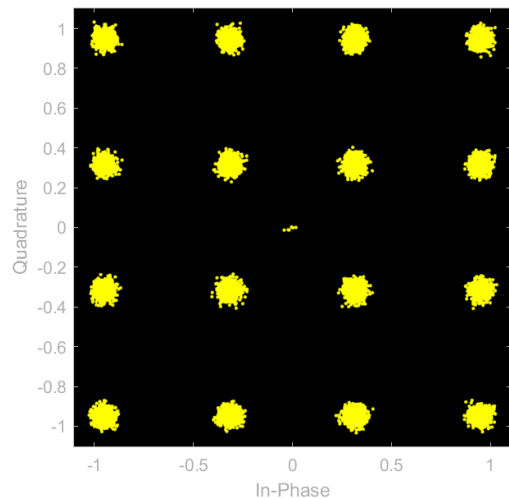


60kbits, SNR = 5dB

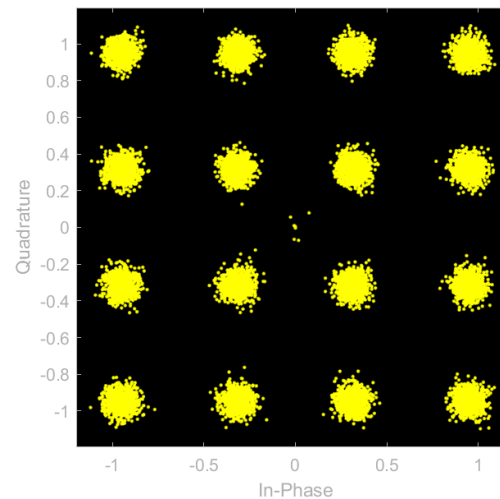


Αστερισμοί και Απόφαση – QAM-16

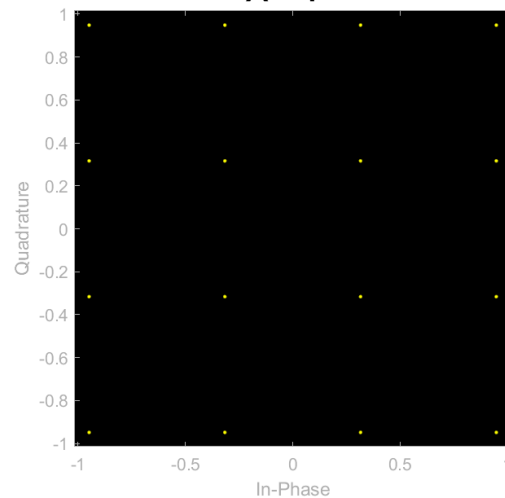
60kbits, SNR = 20dB



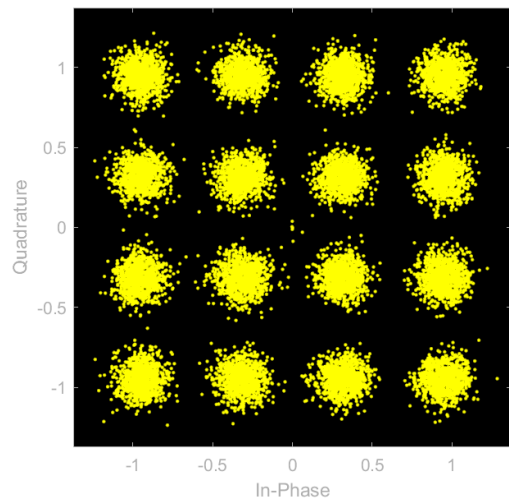
60kbits, SNR = 15dB



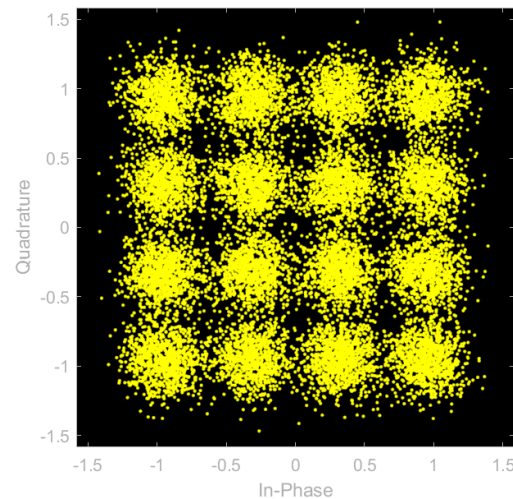
60kbits, χωρίς AWGN



60kbits, SNR = 10dB

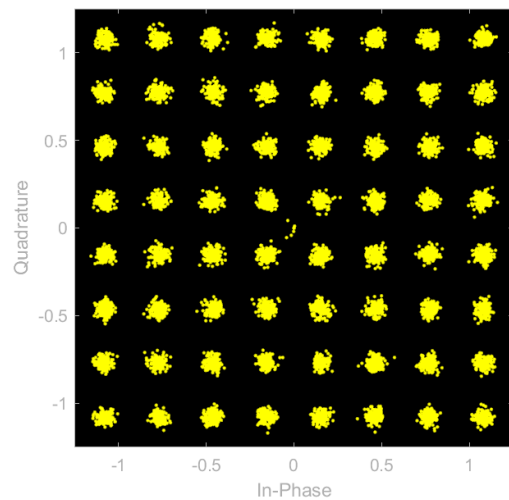


60kbits, SNR = 5dB

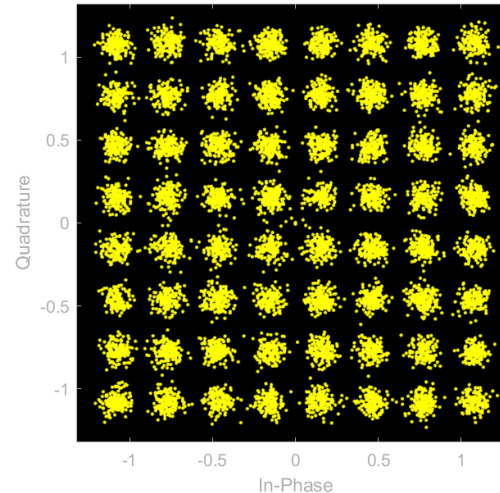


Αστερισμοί και Απόφαση – QAM-64

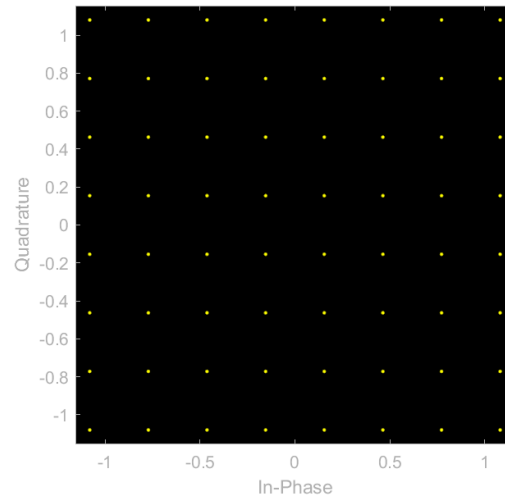
60kbits, SNR = 20dB



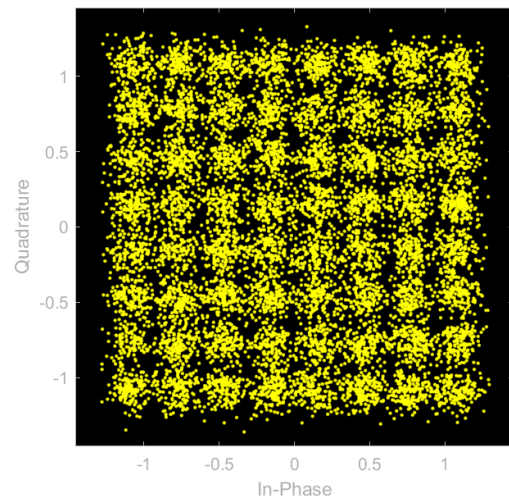
60kbits, SNR = 15dB



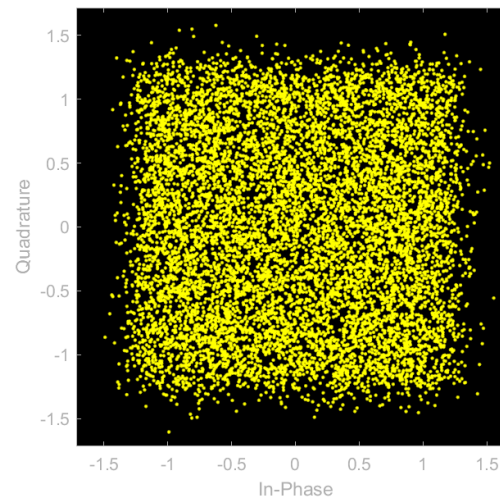
60kbits, χωρίς AWGN



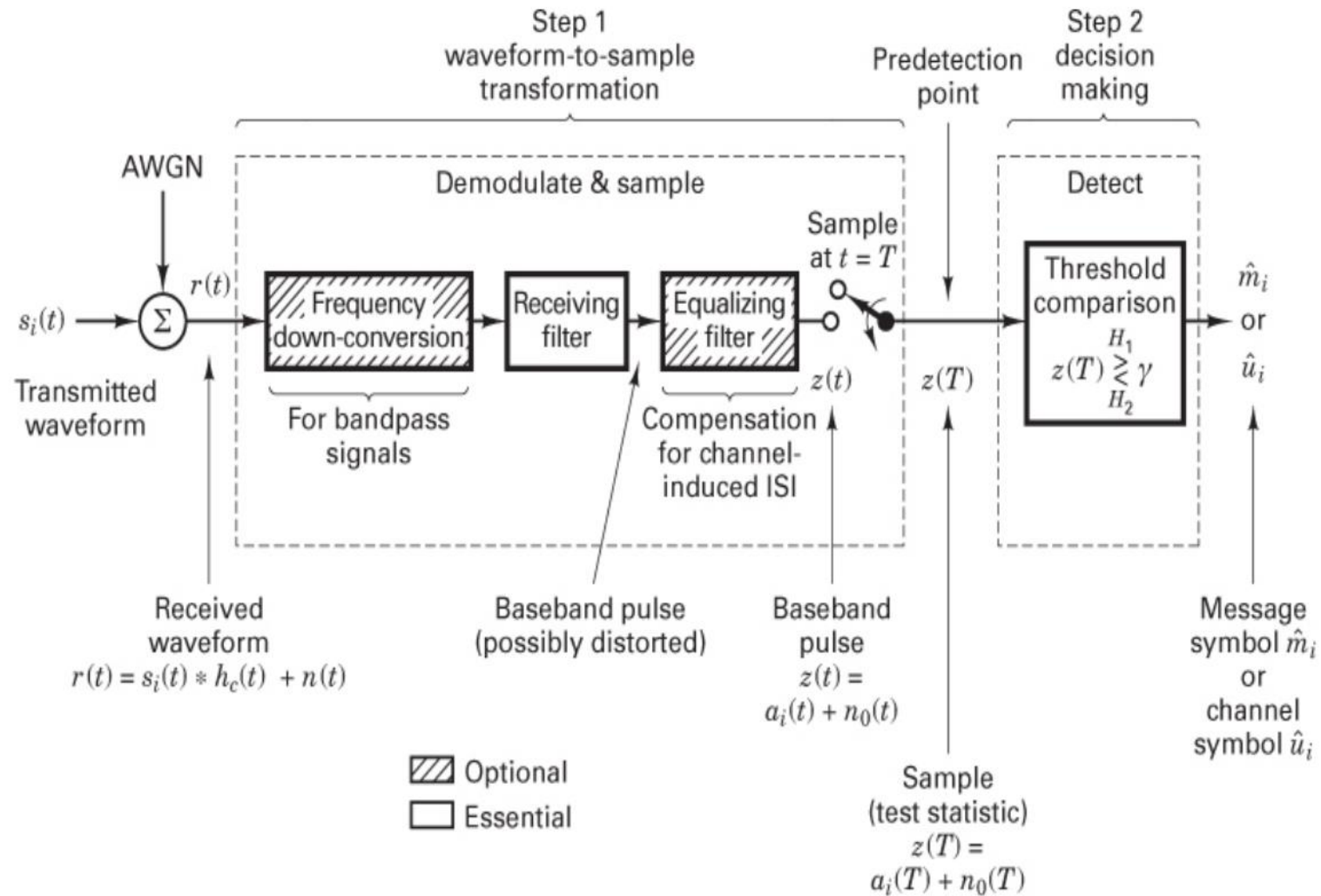
60kbits, SNR = 10dB



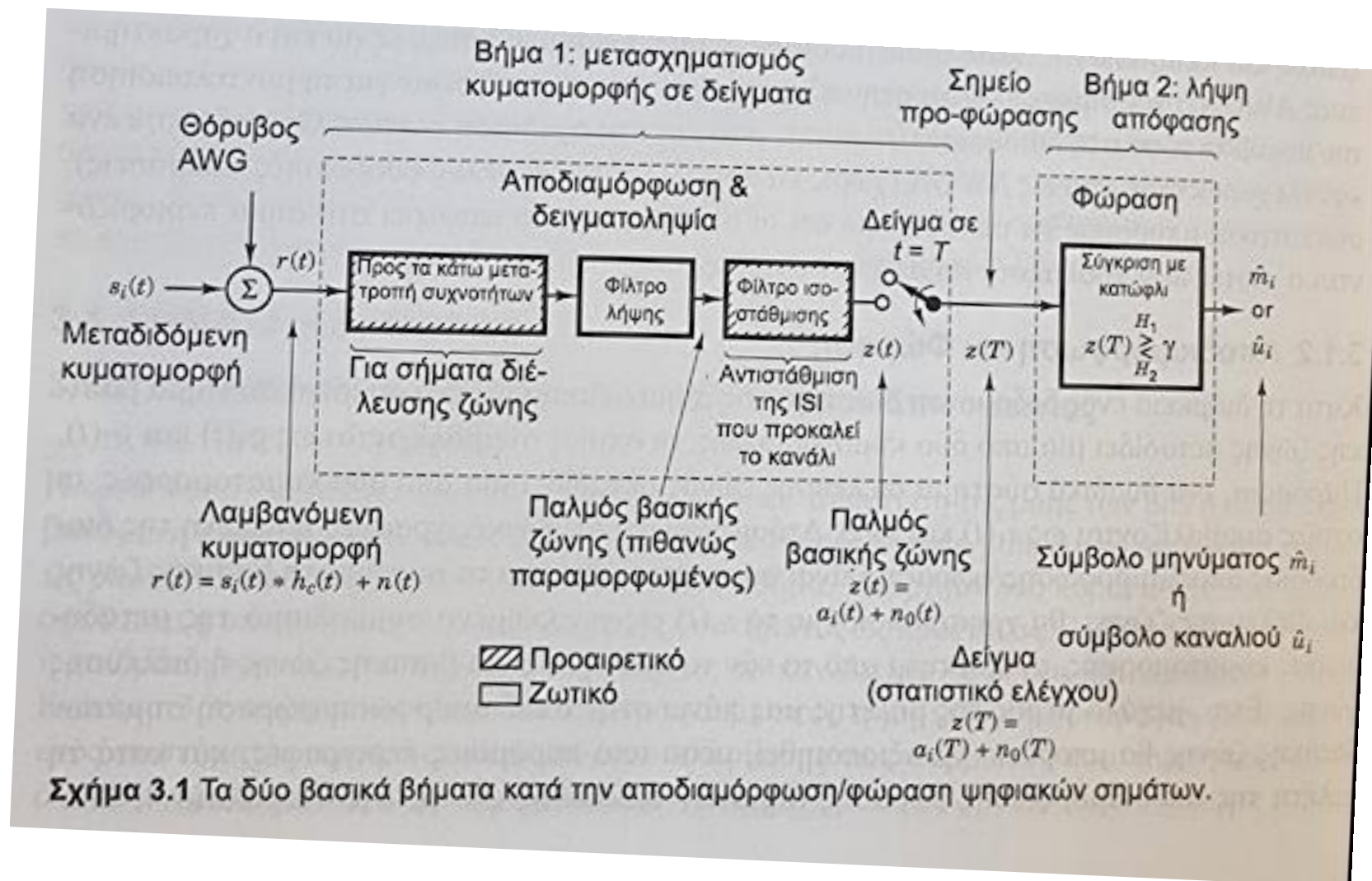
60kbits, SNR = 5dB



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)

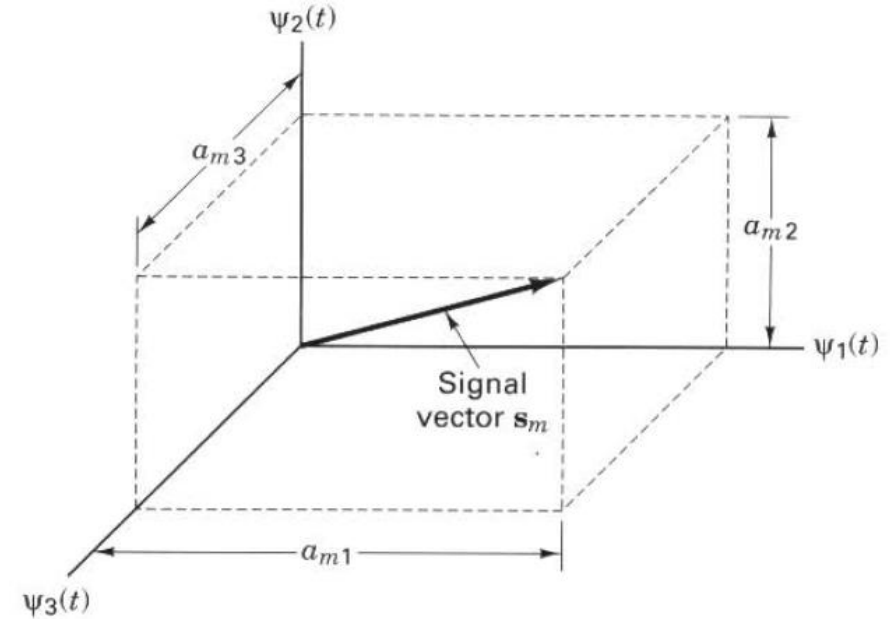
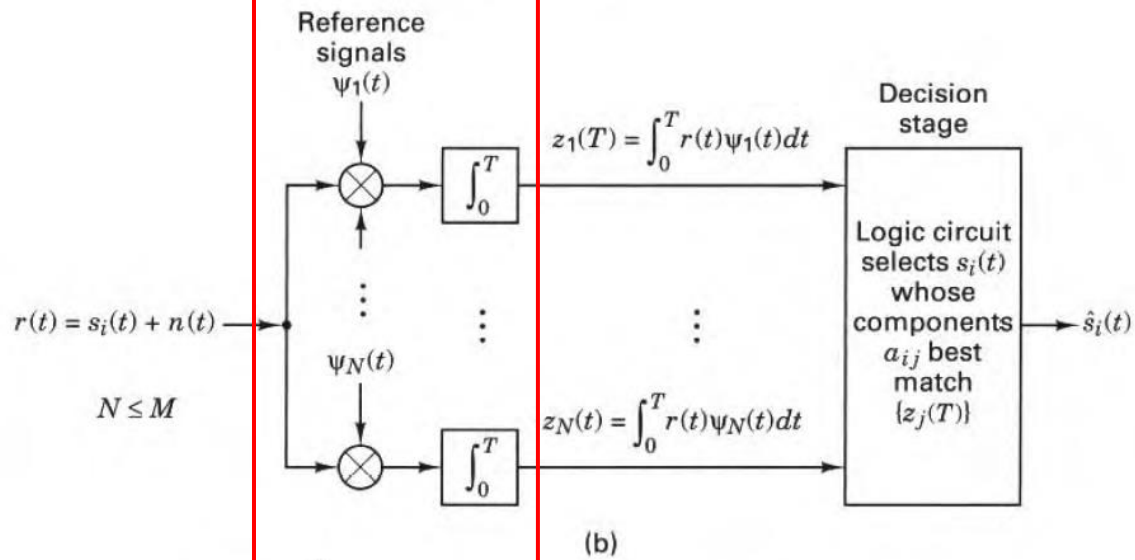
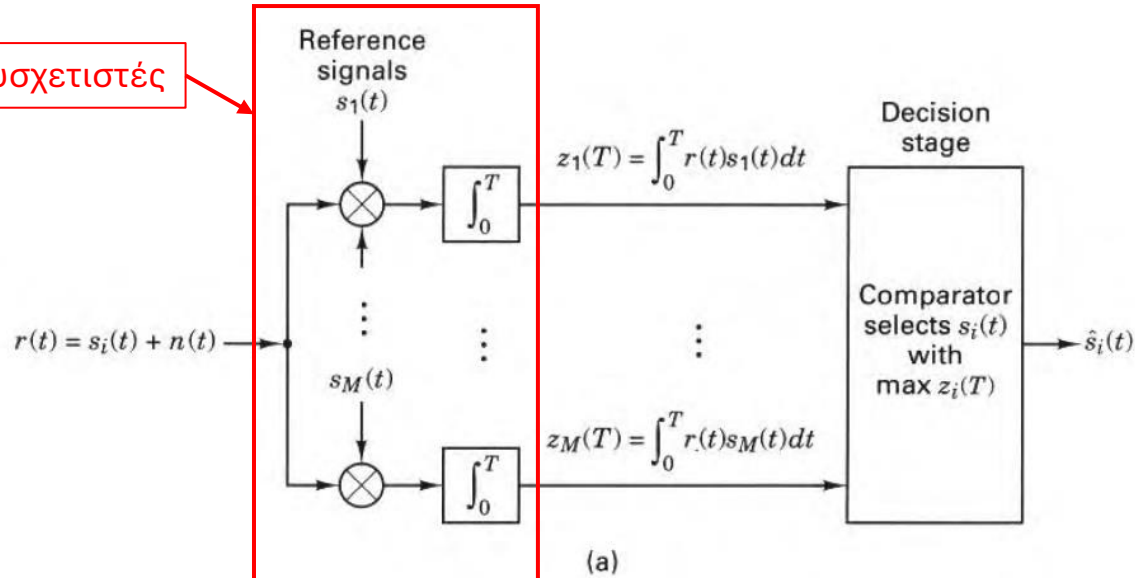
- i. Από Θ. Ισοδυναμίας, ετερεδύνωση
- ii. Επεξεργασία με χρήση φίλτρου
 - Ιδανικό φίλτρο: Συσχετιστής (Correlator) ή Προσαρμοσμένο Φίλτρο (Match Filter)
- iii. (Προαιρετικά) Φίλτρο για διασυμβολική παρεμβολή – ISI
 - Υλοποιείται στο ίδιο φίλτρο με τον συσχετιστή

2. Απόφαση (Βήμα 2)

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

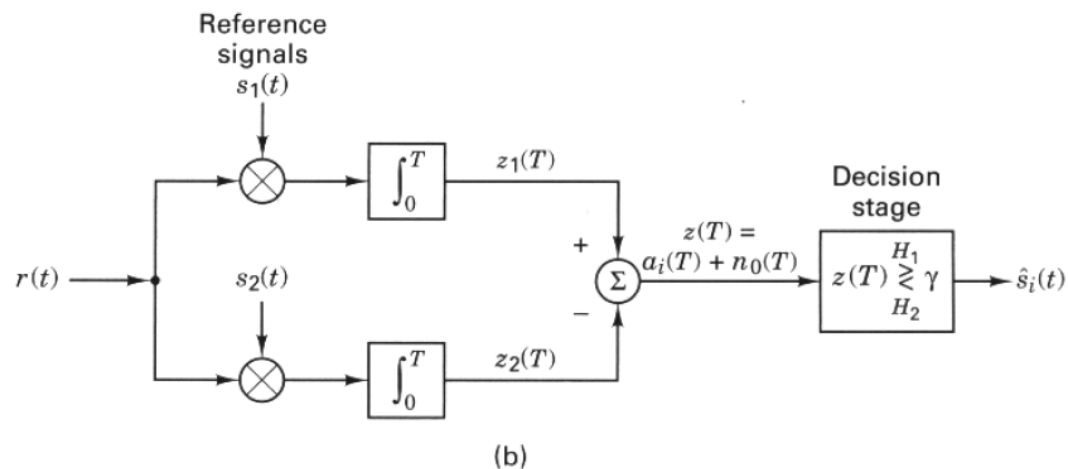
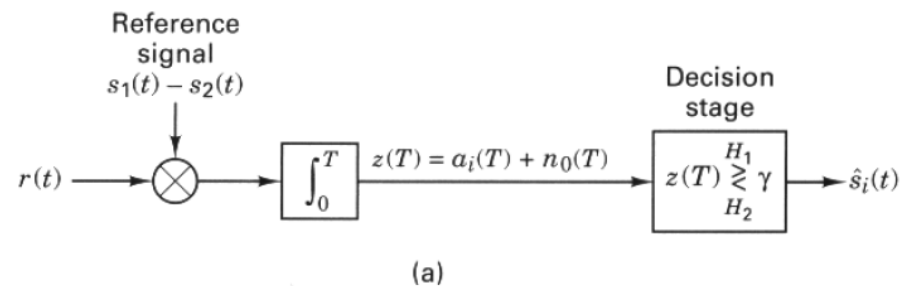
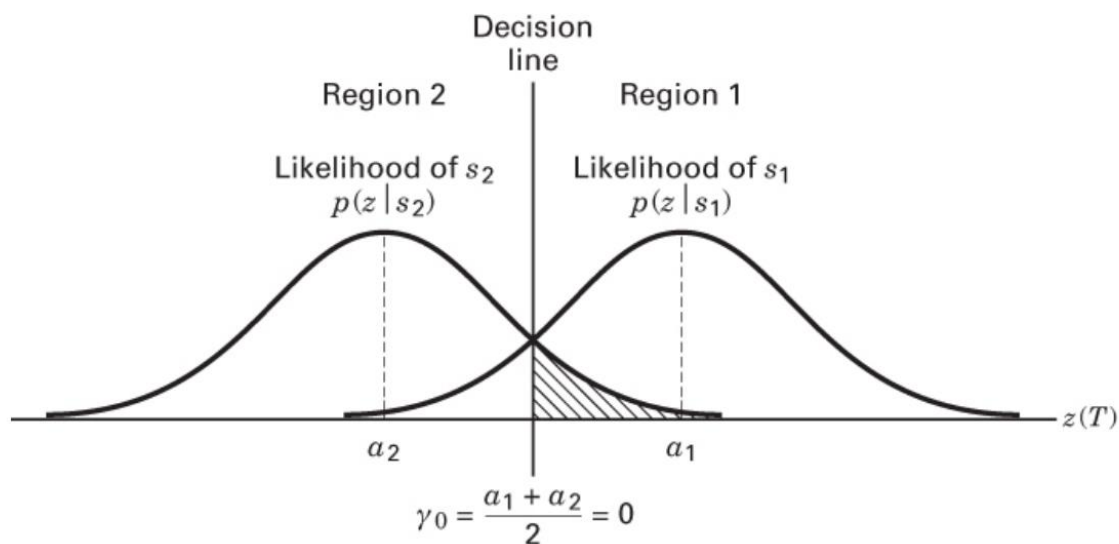
Αποδιαμόρφωση και Ανίχνευση

Συσχετιστές



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

Απόφαση σε Δυαδική Φώραση (BPSK)



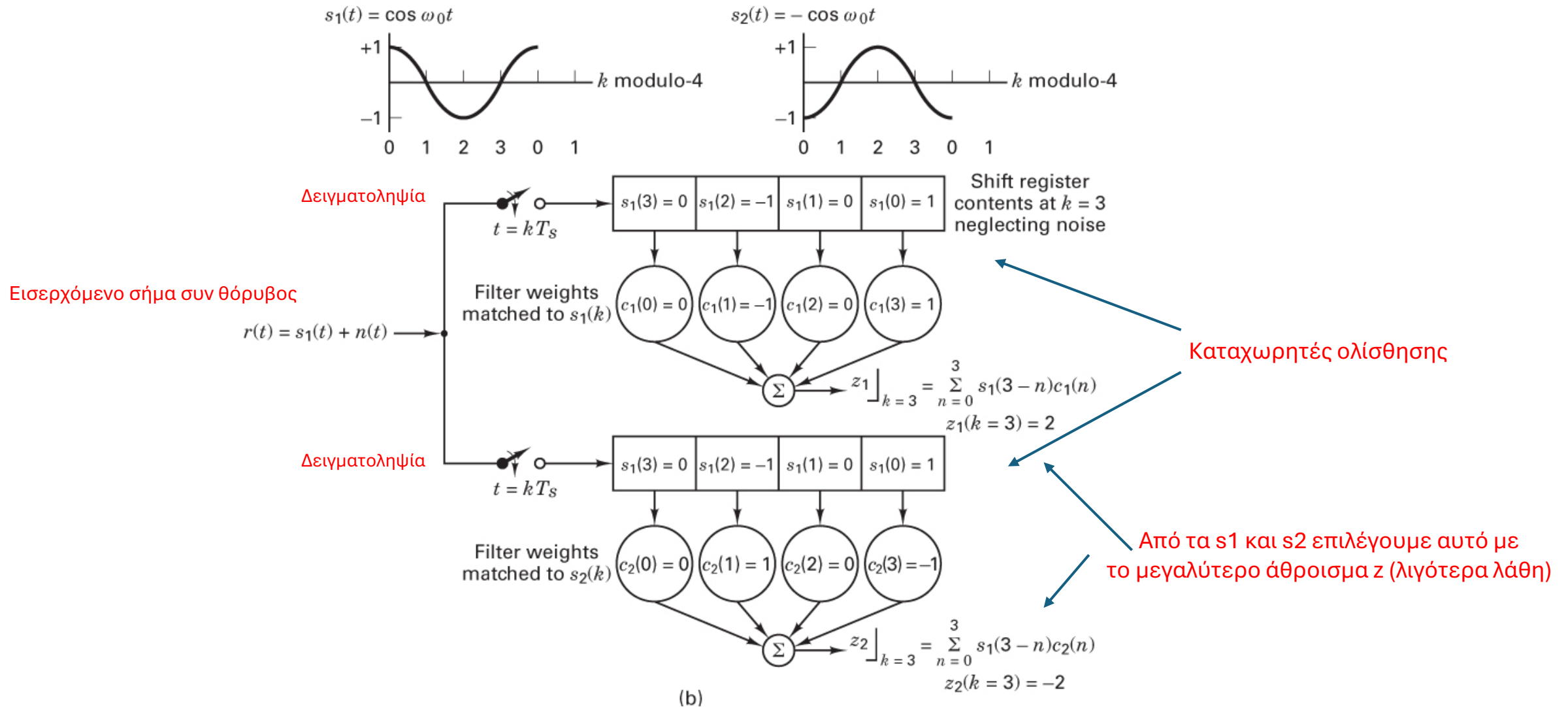
Δύο εναλλακτικές αποδιαμόρφωσης

α) συσχέτιση με σήμα διαφοράς

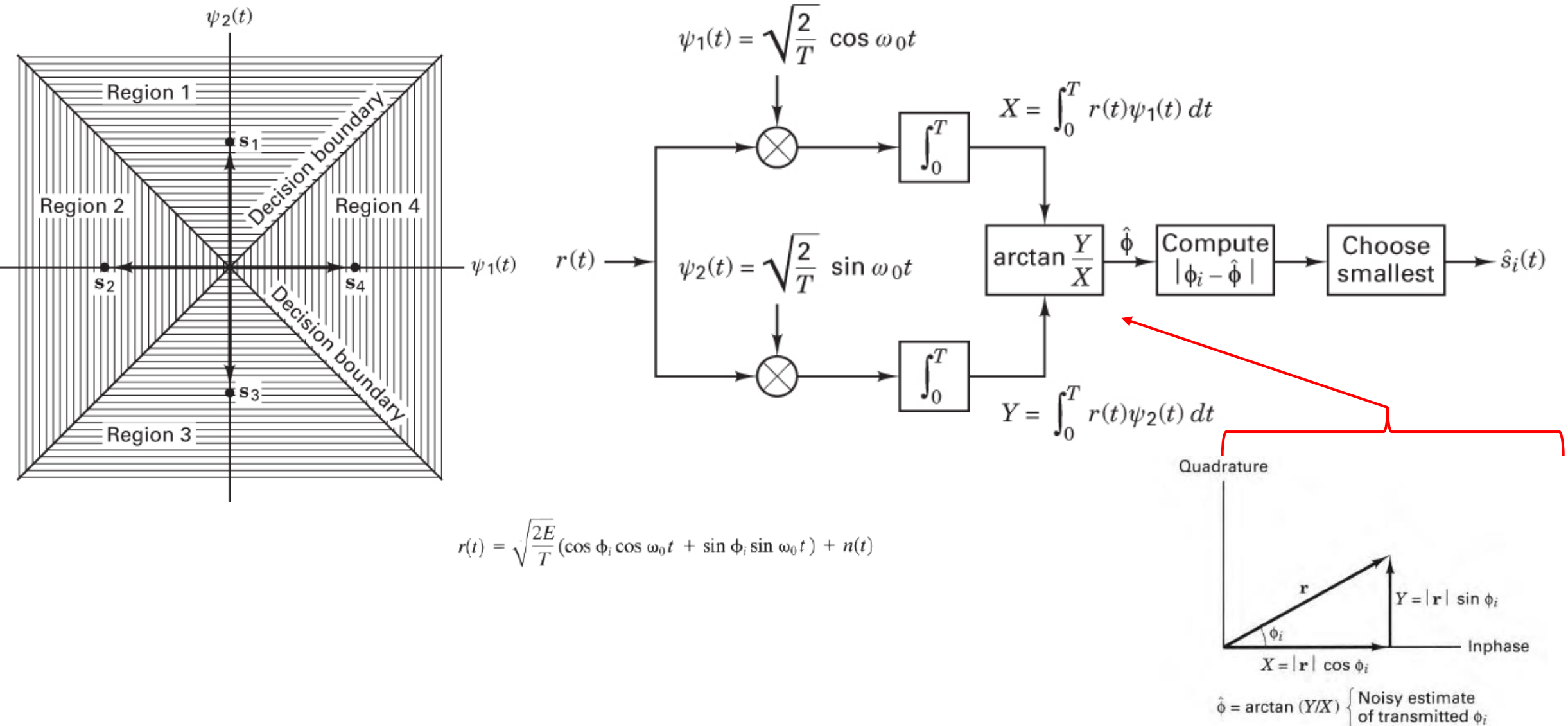
β) 2 συγκρίσεις και υπολογισμός διαφοράς

Σύμφωνη Φώραση

PSK με Προσαρμοσμένο Φίλτρο

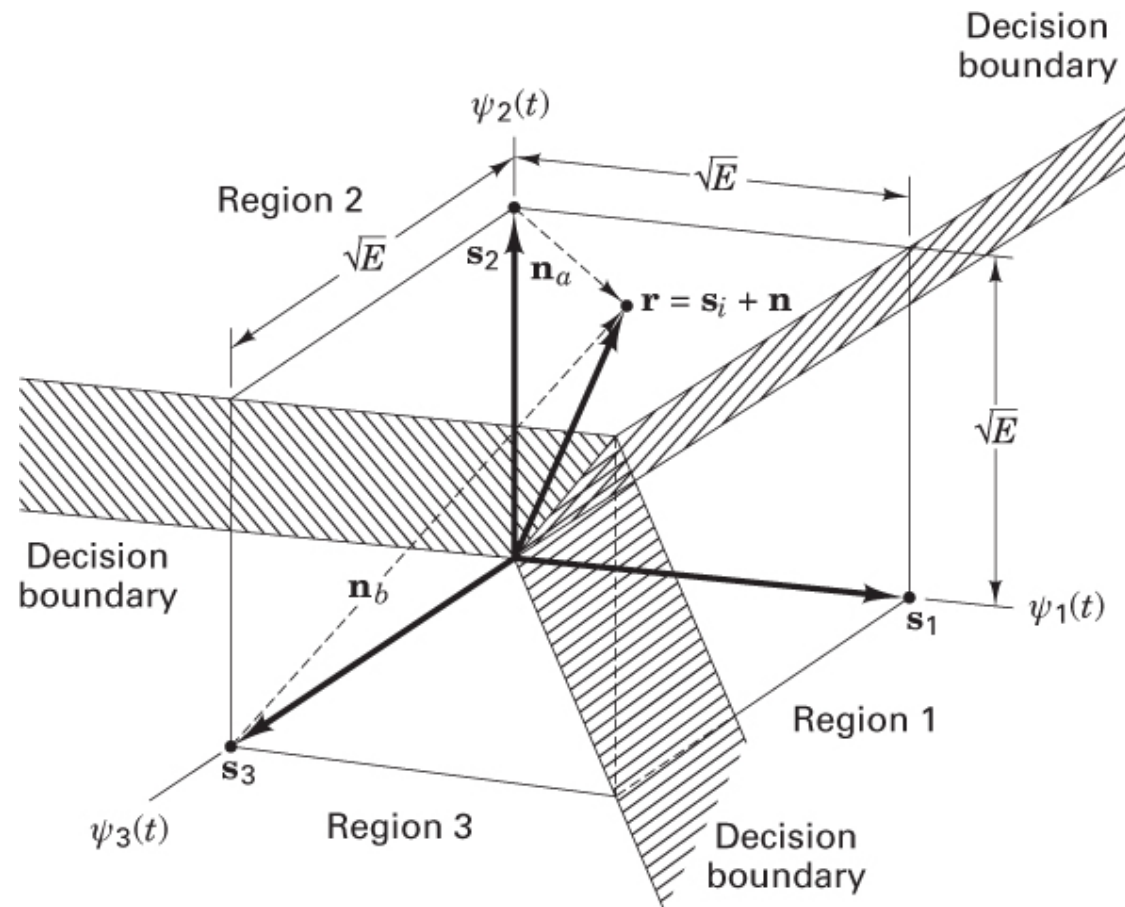


Περιοχές Απόφασης και αποδιαμορφωτής QPSK



Σύμφωνη Φώραση M-ary FSK

$M = 3$



Ασύμφωνη Φώραση

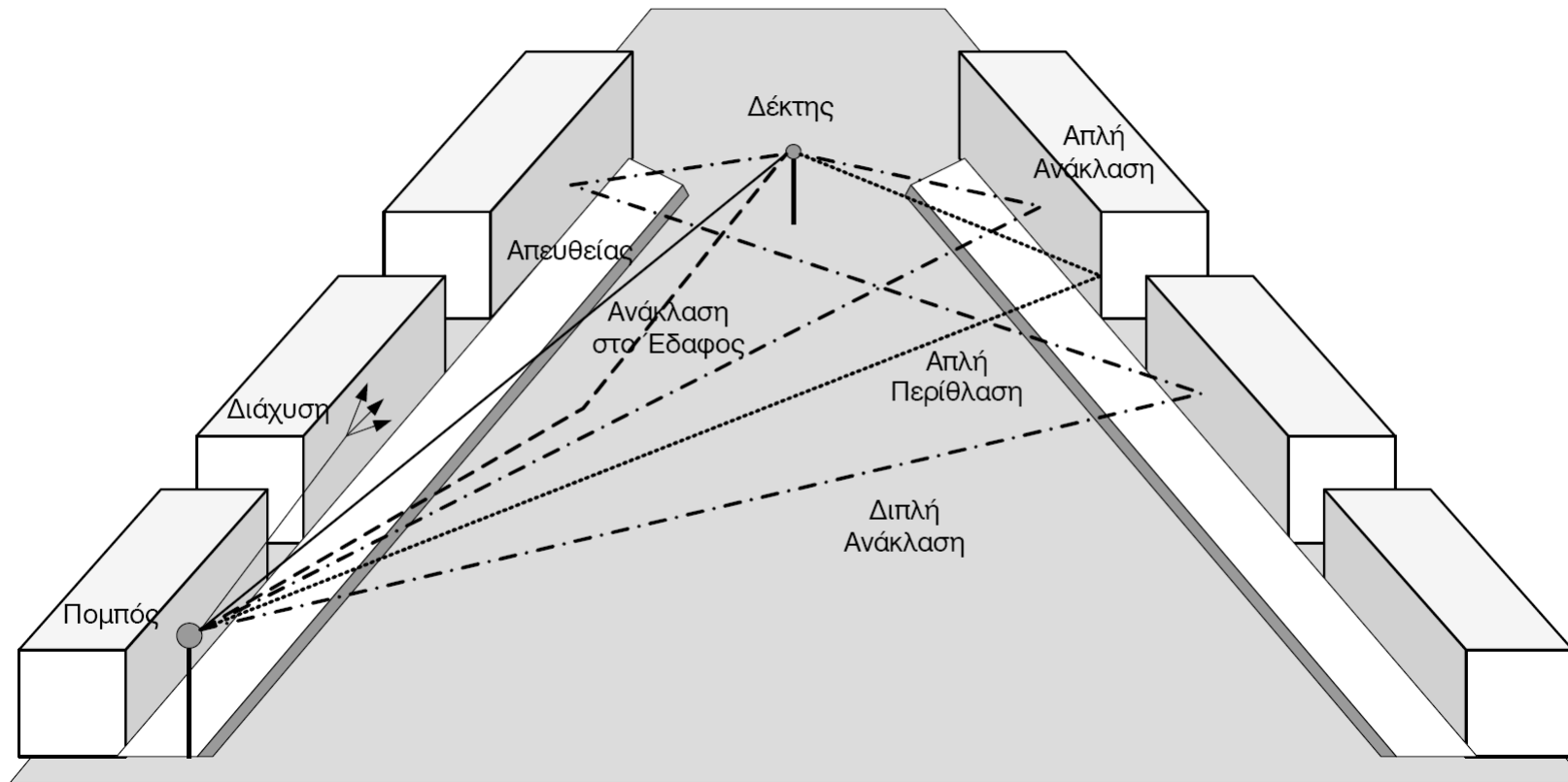
Διαμόρφωση διαφορικής ολίσθησης φάσης (Differential PSK-DPSK)

- Όταν χρησιμοποιείται σε δέκτες PSK σύμφωνα 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**.



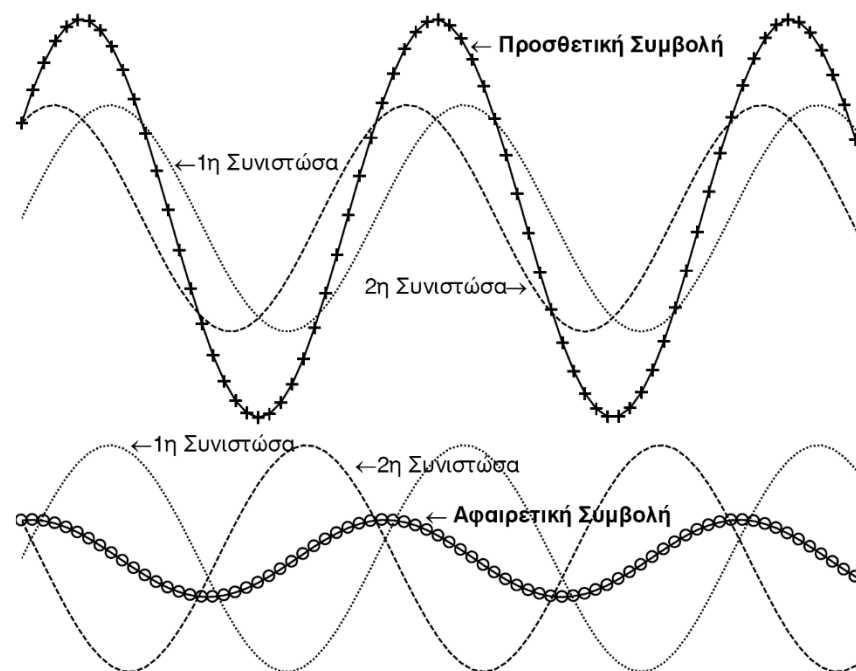
- Διαφορική κωδικοποίηση (differential encoding) των δεδομένων στον πομπό και διαφορική αποκωδικοποίηση (differential decoding) στο δέκτη.
- Η τεχνική διαμόρφωσης που υλοποιεί αυτές τις διαδικασίες, ονομάζεται Διαφορικό (Differential) PSK-DPSK.

Περιβάλλον Διάδοσης=Διαλείψεις



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

Συμβολή Κυμάτων

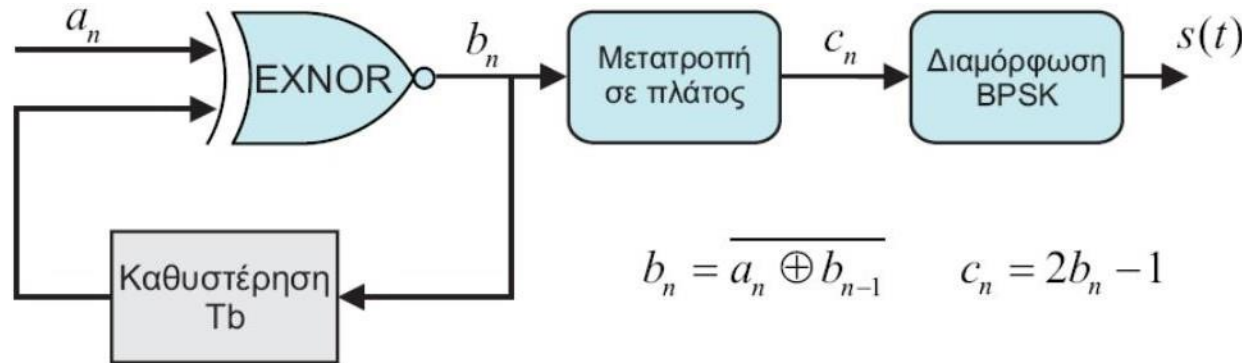


- Διαφορετικό μονοπάτι = Ολίσθηση φάσης = Αφαιρετική ή Προσθετική συμβολή
- Κινούμενο δέκτης ή/και κινούμενα αντικείμενα = Πλήρως δυναμικό περιβάλλον

DBPSK

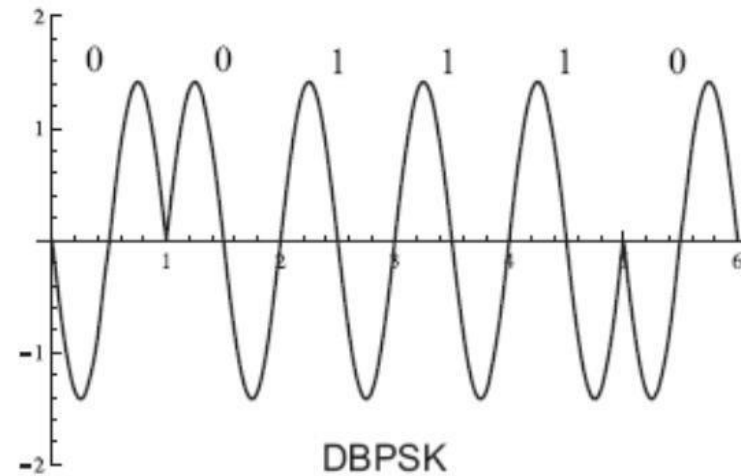
- Με τη διαφορική κωδικοποίηση του BPSK ένα bit 0 ή 1 διαμορφώνεται κατά DBPSK λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του προηγούμενου bit.
- Με τον τρόπο αυτό και με την υπόθεση ότι το λάθος, ε στην εκτίμηση της φάσης είναι το ίδιο σε δύο διαδοχικά διαστήματα συμβόλου, η διαφορά φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών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

DBPSK – Πομπός (1)

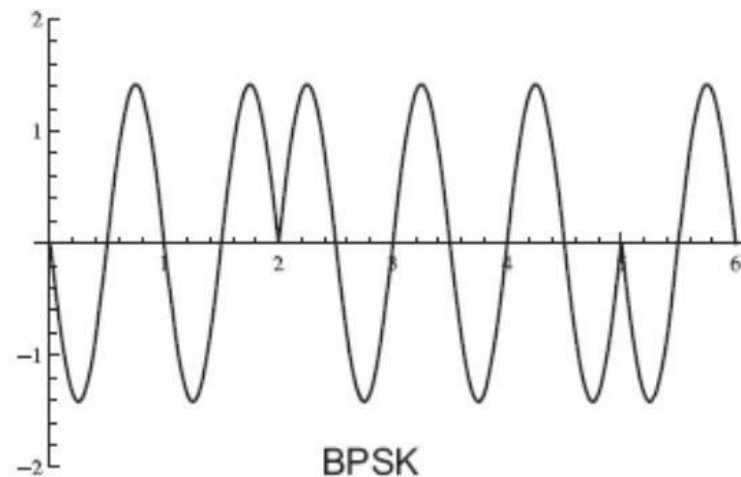


- Η διαφορική κωδικοποίηση υλοποιείται μέσω μιας πύλης EXNOR και ενός καθυστερητή που προκαλεί καθυστέρηση, T_b .
- Η έξοδος της πύλης EXNOR, b_n , είναι 1 αν το bit πληροφορίας, a_n , και το προηγούμενο κωδικοποιημένο bit, b_{n-1} , είναι τα ίδια. Διαφορετικά, το b_n , είναι 0.
- Κατόπιν τα κωδικοποιημένα 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)



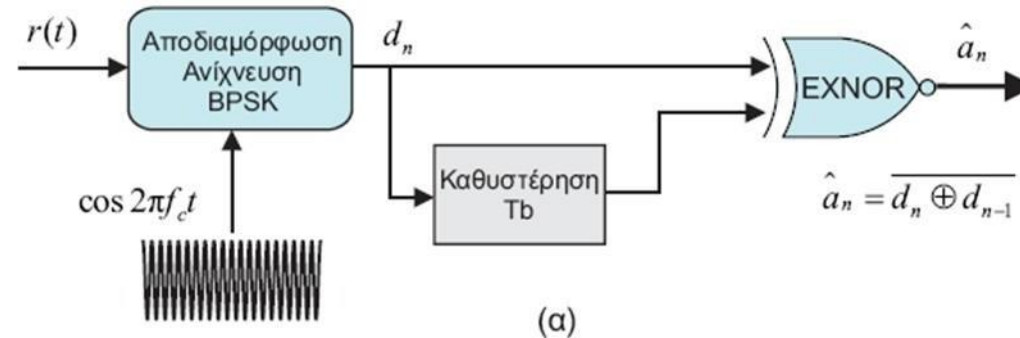
a_n		0	0	1	1	1	0
b_n	1	0	1	1	1	1	0
c_n	1	-1	1	1	1	1	-1
Θ_n	0	π	0	0	0	0	π



DBPSK – Δέκτης

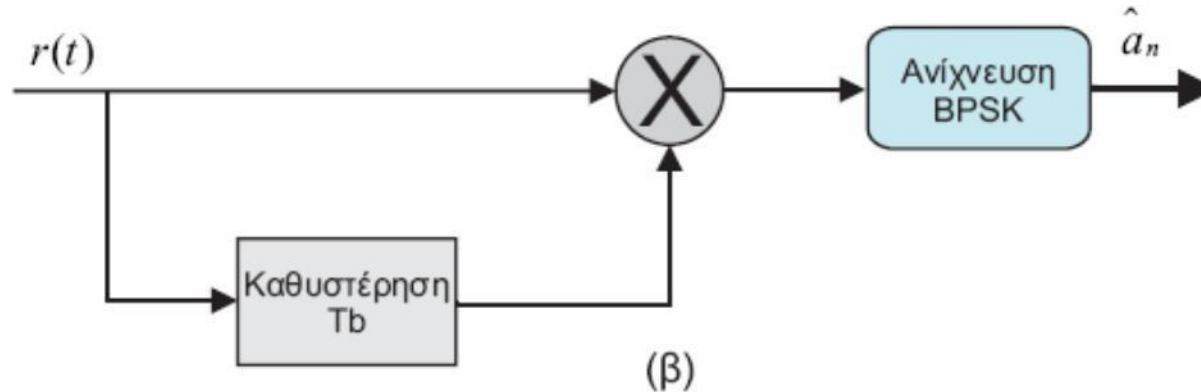
- Η ονομασία DBPSK αναφέρεται τόσο στο τρόπο κωδικοποίησης της πληροφορίας (differential encoding), όσο και στη διαδικασία της αποδιαμόρφωσης-ανίχνευσης.
- Ανάλογα με την μέθοδο που ακολουθείται το DBPSK διακρίνεται σε **σύμφωνο** και **ασύμφωνο**.
- Το **σύμφωνο** DBPSK απαιτεί την εκτίμηση της απόλυτης 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

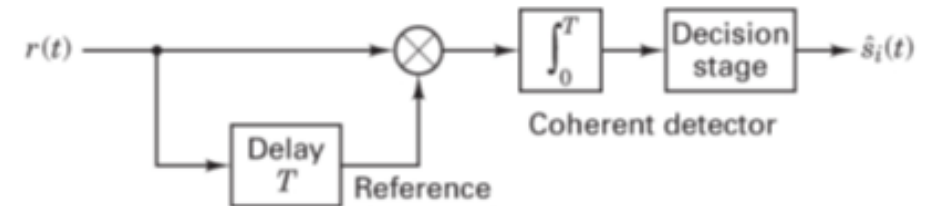
Διαφορική PSK - DPSK

- **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, $\theta(k)$	π	π	π	0	0	π	π	π	0	π	π

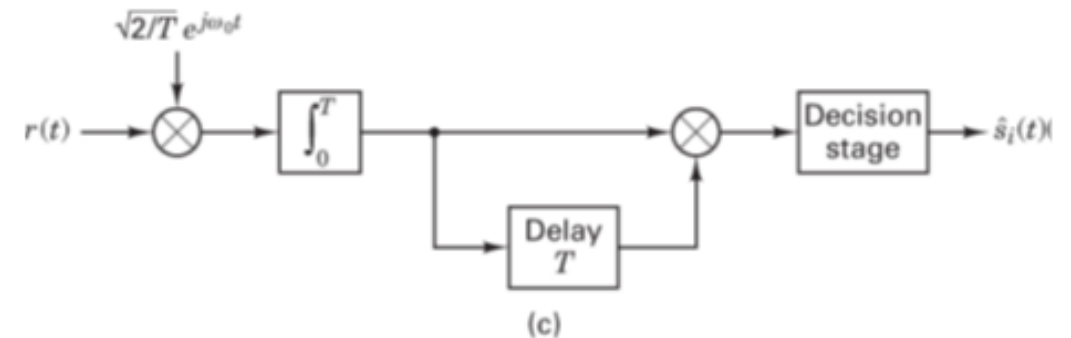
(a)

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

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

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

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
Θ_n	0	π	0	0	0	0	π
$\hat{\Theta}_n$		π	π	0	0	0	π
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;

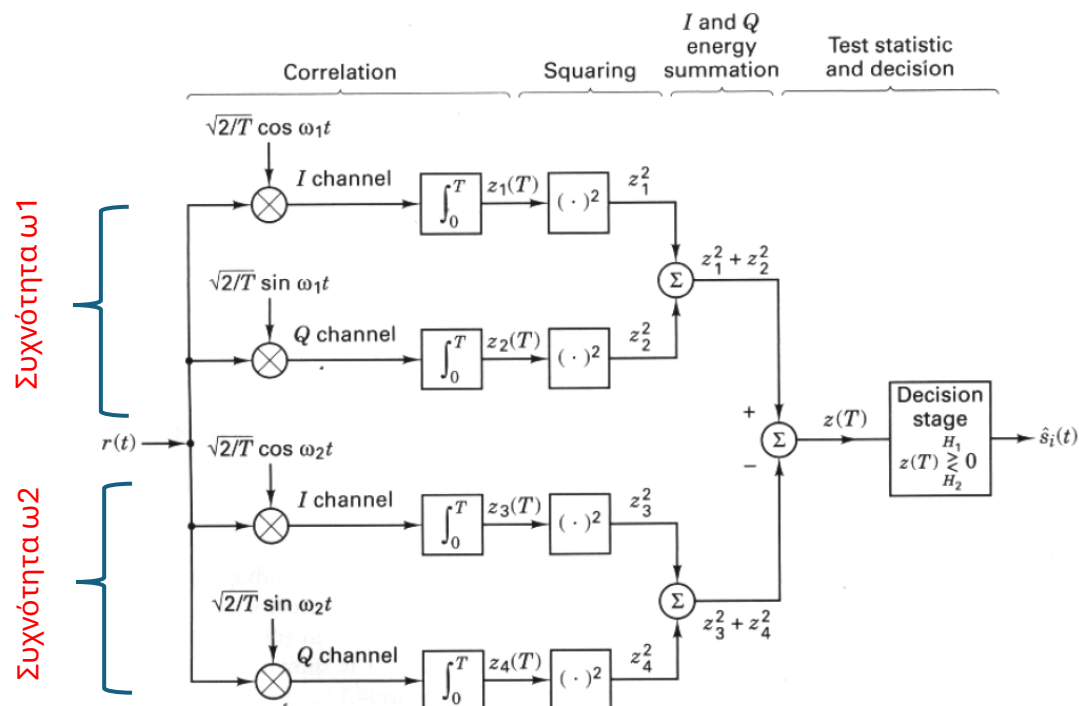
PSK – Εφαρμογές (1)

- 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)

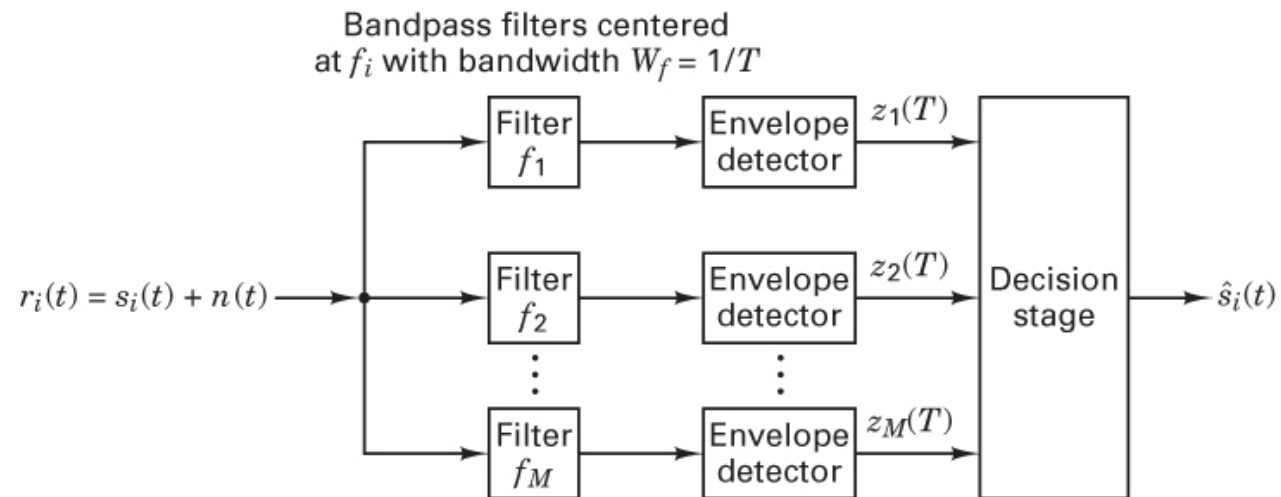
- Σε βιομετρικά διαβατήρια, πιστωτικές κάρτες και γενικά σε περιπτώσεις αναγνώρισης με χρήση ραδιοσυχνοτήτων (Radio-frequency identification- RFID).
- Στο σύστημα ασύρματης επικοινωνίας Bluetooth 2.
- Στα συστήματα επίγειας και δορυφορικής ψηφιακής τηλεόρασης (DVB-T, DVB-RCS).
- Στα συστήματα ασύρματης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

Ασύμφωνη Φώραση FSK



BFSK με ανίχνευση ενέργειας

Προτιμώμενο λόγω ψηφιακής υλοποίησης

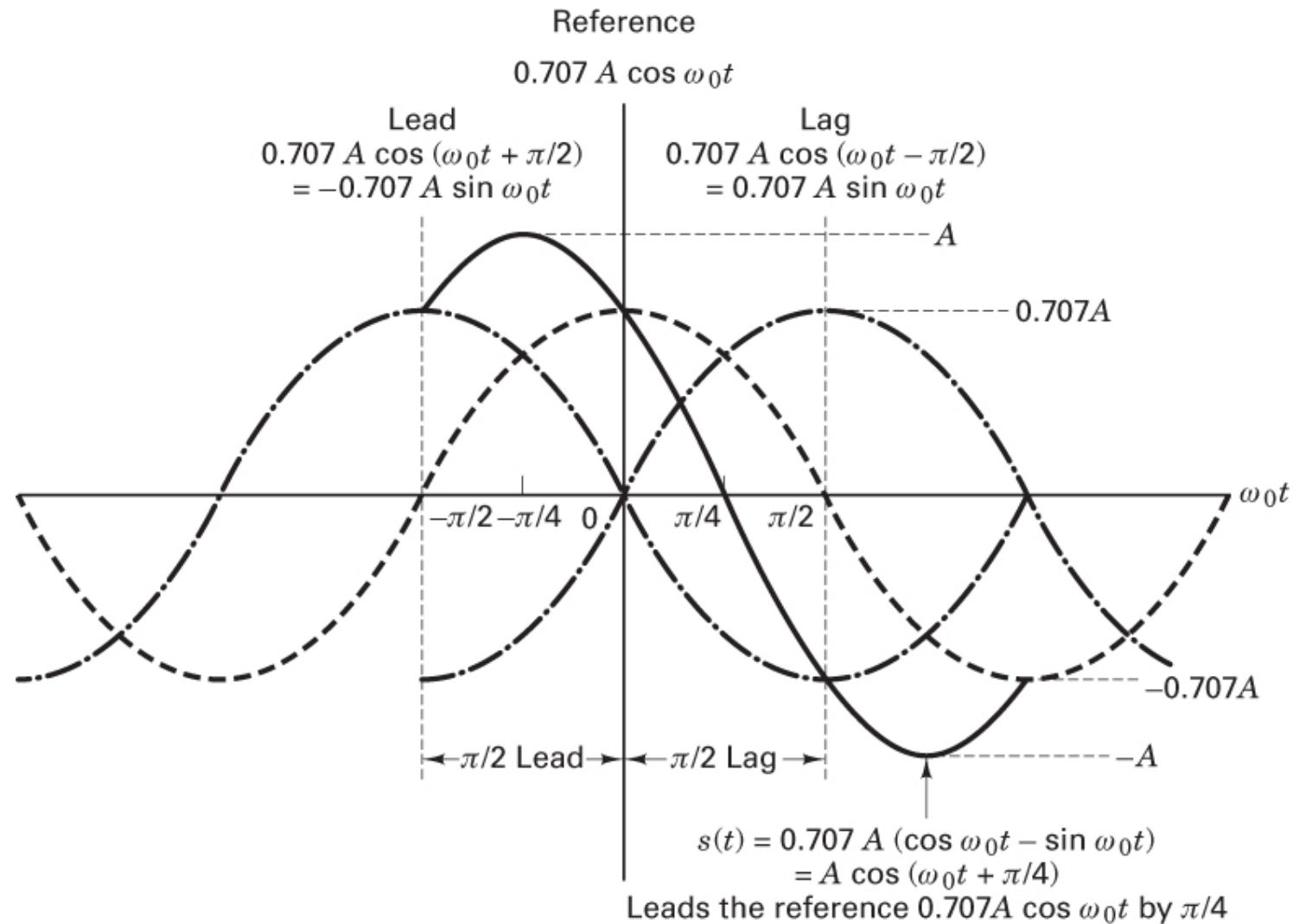


(M)-FSK με φωρατή περιβάλλουσας

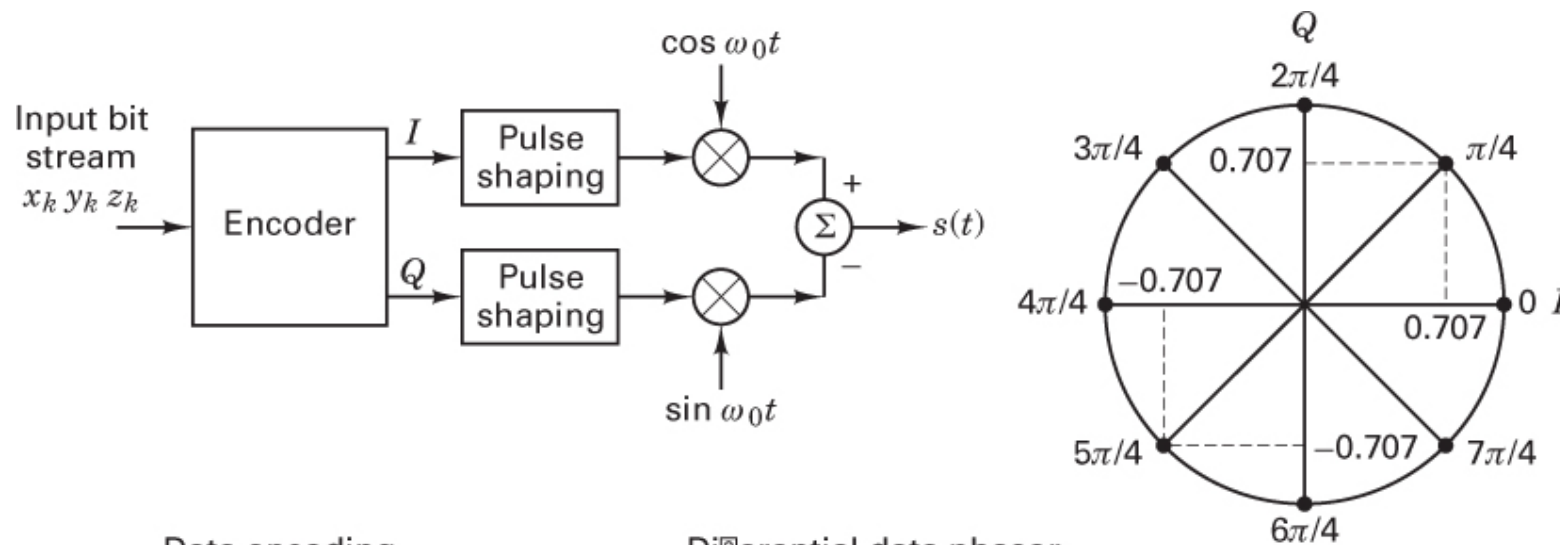
Μεγαλύτερο βάρος και κόστος

Μιγαδική Περιβάλλουσα

Προπορεία / Υστέρηση σε Ημιτονοειδή



Εγκάρσια Υλοποίηση Διαμορφωτή D8PSK



Data encoding

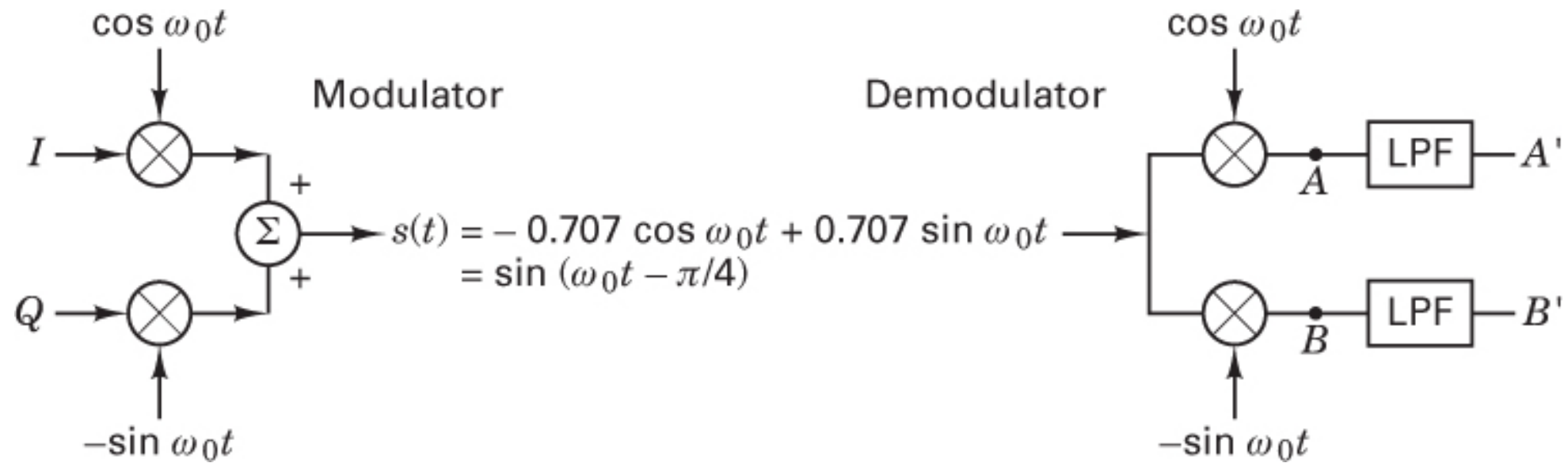
x_k	y_k	z_k	$\Delta\phi_k$
0	0	0	0
0	0	1	$\pi/4$
0	1	1	$2\pi/4$
0	1	0	$3\pi/4$
1	1	0	$4\pi/4$
1	1	1	$5\pi/4$
1	0	1	$6\pi/4$
1	0	0	$7\pi/4$

Differential data phasor

$$\phi_k = \phi_{k-1} + \Delta\phi_k$$

Let $\phi_0 = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
$x_k y_k z_k$	110	001	110	010
$\Delta\phi_k$:	π	$\pi/4$	π	$3\pi/4$
ϕ_k :	π	$5\pi/4$	$\pi/4$	π
I :	-1	-0.707	0.707	-1
Q :	0	-0.707	0.707	0

Παράδειγμα Διαμορφωτή / Αποδιαμορφωτή



Επίδοση Δυναδικών Συστημάτων ως προς τα Σφάλματα

Μέτρα Επίδοσης

- Λόγος σήματος-προς-θόρυβο – SNR
- Λόγος σήματος-προς-παρεμβολή και θόρυβο – SINR
- Ρυθμός σφάλματος bit ή συμβόλου – BER ή SER
- Αποδοτικότητα ισχύος – Power efficiency
- Φασματική αποδοτικότητα – Spectral efficiency
- Ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας – Bit rate
 - Χωρητικότητα καναλιού – Channel capacity
- Πιθανότητα διακοπής επικοινωνίας – Outage probability

SNR

Ορισμός: Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio (SNR)) είναι ο λόγος της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος προς την ισχύ του θορύβου που εισάγει ο δέκτης, δηλαδή

$$SNR = \frac{P_r}{P_N}$$

Σε ασύρματες εφαρμογές, ο θόρυβος είναι τυχαία μεταβλητή, οπότε χρησιμοποιείται η μέση τιμή του SNR.

SINR

Ορισμός: Ο λόγος σήματος προς παρεμβολές και (signal to interference plus noise ratio (SINR)) είναι ο λόγος της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος προς το άθροισμα της ισχύος του θορύβου και των παρεμβολών , δηλαδή

$$SINR = \frac{P_r}{P_N + P_I}$$

Σε ασύρματες εφαρμογές, ο θόρυβος και οι παρεμβολές είναι τυχαίες μεταβλητές, οπότε χρησιμοποιείται η μέση τιμή του SINR.

BER ή SER

Ορισμός: Ο ρυθμός σφάλματος δυαδικών ψηφίων (bit error rate (BER)) είναι το παρατηρούμενο ή το εκτιμώμενο μέσο ποσοστό σφαλμάτων σε bits. Συχνά ονομάζεται και πιθανότητα σφάλματος bit και συμβολίζεται ως P_B .

Ορισμός: Ο ρυθμός σφάλματος συμβόλων (symbol error rate (SER)) είναι το παρατηρούμενο ή το εκτιμώμενο μέσο ποσοστό σφαλμάτων σε σύμβολα.

Ποια η διαφορά των δύο παραπάνω μετρικών;

Power Efficiency

Ορισμός: Η αποδοτικότητα ισχύος (power efficiency) είναι το απαιτούμενο SNR για την επίτευξη συγκεκριμένου BER ή SER.

Spectral Efficiency

Ορισμός: Η φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency) είναι ο λόγος του ρυθμού μετάδοσης σε bits προς το διαθέσιμο εύρος ζώνης, δηλαδή

$$N_{BW} = \frac{R}{W}$$

Άνω όριο: Προκύπτει από το Θεώρημα Shannon-Hartley και είναι

$$\frac{E_b}{N_0} \geq \frac{2^{N_{BW}} - 1}{N_{BW}}$$

Bit Rate – Channel Capacity

Ορισμός: Ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας (bit rate) ή η χωρητικότητα του καναλιού (channel capacity) είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας που μπορεί να επιτευχθεί χωρίς σφάλματα για δεδομένο SNR.

Θεώρημα (Shannon-Hartley)

$$C = W \log_2(1 + SNR)$$

Συνέπειες του Θεωρήματος S-H

- Μας δίνει ένα ανώτατο όριο αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων μέσα από AWGN κανάλι.
- Προσφέρει τη δυνατότητα για ανταλλαγή (trade-off) σήματος-προς-θόρυβο (SNR) με εύρος ζώνης
- «Συμπίεση» εύρους ζώνης μεταδιδόμενου σήματος

Outage Probability

Ορισμός: Η πιθανότητα διακοπής της επικοινωνίας (outage probability) είναι η πιθανότητα ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας να γίνει μικρότερος από ένα ελάχιστο κατώφλι που απαιτείται για την αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη, δηλαδή

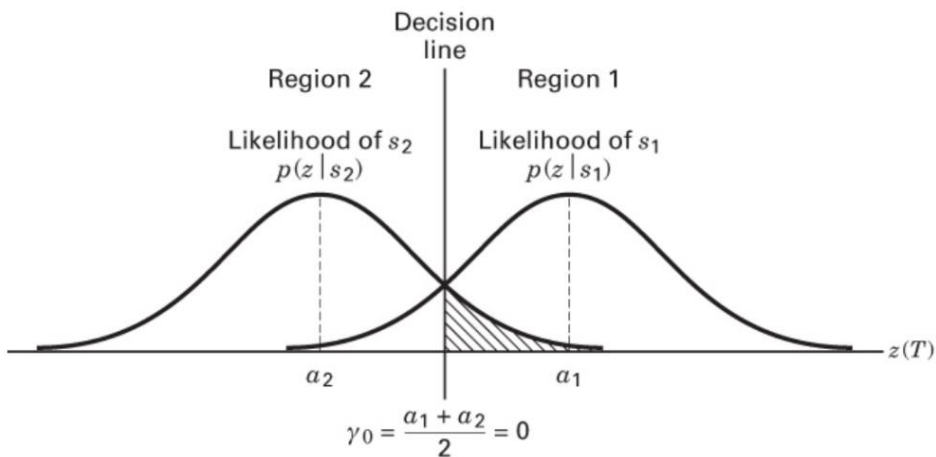
$$P_{out} = (C < R_t)$$

ή

$$P_{out} = (SNR < \gamma_t)$$

Πιθανότητα Σφάλματος Bit

BPSK με Σύμφωνη Φώραση (Πιθανότητα Bit = Πιθανότητα συμβόλου)



όπου

$$P_B = \int_{\sqrt{2E_b/N_0}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} du = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

$$Q(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_X^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

Πιθανότητα Σφάλματος Bit - Παράδειγμα

Παράδειγμα 4.4 Πιθανότητα Σφάλματος Bit για Σηματοδοσία BPSK

Βρείτε την πιθανότητα σφάλματος bit για ένα σύστημα BPSK με ρυθμό bit 1 Mbit/s. Οι λαμβανόμενες κυματομορφές $s_1(t) = A \cos \omega_0 t$ και $s_2(t) = -A \cos \omega_0 t$, περνούν από σύμφωνη φώραση, με χρήση ενός προσαρμοσμένου φίλτρου. Η τιμή του A είναι 10 mV. Υποθέστε ότι η μονόπλευρη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου είναι $N_0 = 10^{-11}$ W/Hz, καθώς και ότι τα μεγέθη ισχύος σήματος και ενέργειας ανά bit είναι κανονικοποιημένα σε σχέση μ' ένα φορτίο 1 Ω.

Λύση

$$A = \sqrt{\frac{2E_b}{T}} = 10^{-2} \text{ V} \quad T = \frac{1}{R} = 10^{-6} \text{ s}$$

Συνεπώς,

$$E_b = \frac{A^2}{2} T = 5 \times 10^{-11} \text{ J} \quad \text{και} \quad \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} = 3.16$$

Επίσης,

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) = Q(3.16)$$

Χρησιμοποιώντας τον Πίνακα Β.1 ή την Εξίσωση (3.44), παίρνουμε

$$P_B = 8 \times 10^{-4}$$

Συνάρτηση Σφάλματος $Q(X)$

Όσο μεγαλύτερη η ενέργεια σήματος
ως προς το θόρυβο, τόσο μικρότερη
η πιθανότητα λάθους

x	$Q(x)$	x	$Q(x)$	x	$Q(x)$	x	$Q(x)$
0.00	0.5	2.30	0.010724	4.55	2.6823×10^{-6}	6.80	5.231×10^{-12}
0.05	0.48006	2.35	0.0093867	4.60	2.1125×10^{-6}	6.85	3.6925×10^{-12}
0.10	0.46017	2.40	0.0081975	4.65	1.6597×10^{-6}	6.90	2.6001×10^{-12}
0.15	0.44038	2.45	0.0071428	4.70	1.3008×10^{-6}	6.95	1.8264×10^{-12}
0.20	0.42074	2.50	0.0062097	4.75	1.0171×10^{-6}	7.00	1.2798×10^{-12}
0.25	0.40129	2.55	0.0053861	4.80	7.9333×10^{-7}	7.05	8.9459×10^{-13}
0.30	0.38209	2.60	0.0046612	4.85	6.1731×10^{-7}	7.10	6.2378×10^{-13}
0.35	0.36317	2.65	0.0040246	4.90	4.7918×10^{-7}	7.15	4.3389×10^{-13}
0.40	0.34458	2.70	0.003467	4.95	3.7107×10^{-7}	7.20	3.0106×10^{-13}
0.45	0.32636	2.75	0.0029798	5.00	2.8665×10^{-7}	7.25	2.0839×10^{-13}
0.50	0.30854	2.80	0.0025551	5.05	2.2091×10^{-7}	7.30	1.4388×10^{-13}
0.55	0.29116	2.85	0.002186	5.10	1.6983×10^{-7}	7.35	9.9103×10^{-14}
0.60	0.27425	2.90	0.0018658	5.15	1.3024×10^{-7}	7.40	6.8092×10^{-14}
0.65	0.25785	2.95	0.0015889	5.20	9.9644×10^{-8}	7.45	4.667×10^{-14}
0.70	0.24196	3.00	0.0013499	5.25	7.605×10^{-8}	7.50	3.1909×10^{-14}
0.75	0.22663	3.05	0.0011442	5.30	5.7901×10^{-8}	7.55	2.1763×10^{-14}
0.80	0.21186	3.10	0.0009676	5.35	4.3977×10^{-8}	7.60	1.4807×10^{-14}
0.85	0.19766	3.15	0.00081635	5.40	3.332×10^{-8}	7.65	1.0049×10^{-14}
0.90	0.18406	3.20	0.00068714	5.45	2.5185×10^{-8}	7.70	6.8033×10^{-15}
0.95	0.17106	3.25	0.00057703	5.50	1.899×10^{-8}	7.75	4.5946×10^{-15}
1.00	0.15866	3.30	0.00048342	5.55	1.4283×10^{-8}	7.80	3.0954×10^{-15}
1.05	0.14686	3.35	0.00040406	5.60	1.0718×10^{-8}	7.85	2.0802×10^{-15}
1.10	0.13567	3.40	0.00033693	5.65	8.0224×10^{-9}	7.90	1.3945×10^{-15}
1.15	0.12507	3.45	0.00028029	5.70	5.9904×10^{-9}	7.95	9.3256×10^{-16}
1.20	0.11507	3.50	0.00023263	5.75	4.4622×10^{-9}	8.00	6.221×10^{-16}
1.25	0.10565	3.55	0.00019262	5.80	3.3157×10^{-9}	8.05	4.1397×10^{-16}
1.30	0.0968	3.60	0.00015911	5.85	2.4579×10^{-9}	8.10	2.748×10^{-16}
1.35	0.088508	3.65	0.00013112	5.90	1.8175×10^{-9}	8.15	1.8196×10^{-16}
1.40	0.080757	3.70	0.0001078	5.95	1.3407×10^{-9}	8.20	1.2019×10^{-16}
1.45	0.073529	3.75	8.8417×10^{-5}	6.00	9.8659×10^{-10}	8.25	7.9197×10^{-17}
1.50	0.066807	3.80	7.2348×10^{-5}	6.05	7.2423×10^{-10}	8.30	5.2056×10^{-17}
1.55	0.060571	3.85	5.9059×10^{-5}	6.10	5.3034×10^{-10}	8.35	3.4131×10^{-17}
1.60	0.054799	3.90	4.8096×10^{-5}	6.15	3.8741×10^{-10}	8.40	2.2324×10^{-17}
1.65	0.049471	3.95	3.9076×10^{-5}	6.20	2.8232×10^{-10}	8.45	1.4565×10^{-17}
1.70	0.044565	4.00	3.1671×10^{-5}	6.25	2.0523×10^{-10}	8.50	9.4795×10^{-18}
1.75	0.040059	4.05	2.5609×10^{-5}	6.30	1.4882×10^{-10}	8.55	6.1544×10^{-18}
1.80	0.03593	4.10	2.0658×10^{-5}	6.35	1.0766×10^{-10}	8.60	3.9858×10^{-18}
1.85	0.032157	4.15	1.6624×10^{-5}	6.40	7.7688×10^{-11}	8.65	2.575×10^{-18}
1.90	0.028717	4.20	1.3346×10^{-5}	6.45	5.5925×10^{-11}	8.70	1.6594×10^{-18}
1.95	0.025588	4.25	1.0689×10^{-5}	6.50	4.016×10^{-11}	8.75	1.0668×10^{-18}
2.00	0.02275	4.30	8.5399×10^{-6}	6.55	2.8769×10^{-11}	8.80	6.8408×10^{-19}
2.05	0.020182	4.35	6.8069×10^{-6}	6.60	2.0558×10^{-11}	8.85	4.376×10^{-19}
2.10	0.017864	4.40	5.4125×10^{-6}	6.65	1.4655×10^{-11}	8.90	2.7923×10^{-19}
2.15	0.015778	4.45	4.2935×10^{-6}	6.70	1.0421×10^{-11}	8.95	1.7774×10^{-19}
2.20	0.013903	4.50	3.3977×10^{-6}	6.75	7.3923×10^{-12}	9.00	1.1286×10^{-19}
2.25	0.012224						

Πιθανότητα Σφάλματος Bit

Διαφορική PSK (DPSK) με Σύμφωνη Φώραση

$$P_B = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \left[1 - Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \right]$$

Πιθανότητα σφάλματος σε bit, συν πιθανότητα σφάλματος σε bit και το επόμενο σωστό

Πιθανότητα Σφάλματος Bit

Ορθογώνια FSK με Σύμφωνη Φώραση

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

Πιθανότητα Σφάλματος Bit

Ορθογώνια FSK με Ασύμφωνη Φώραση

$$P_B = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{2N_0}}$$

Συγκρίνοντας με το προηγούμενο, προκύπτει εδώ η απαίτηση για 1dB επιπλέον στην τιμή του E_b/N_0 για να πετύχουμε το ίδιο P_b (αλλά έχουμε πιο απλό σύστημα λήψης)

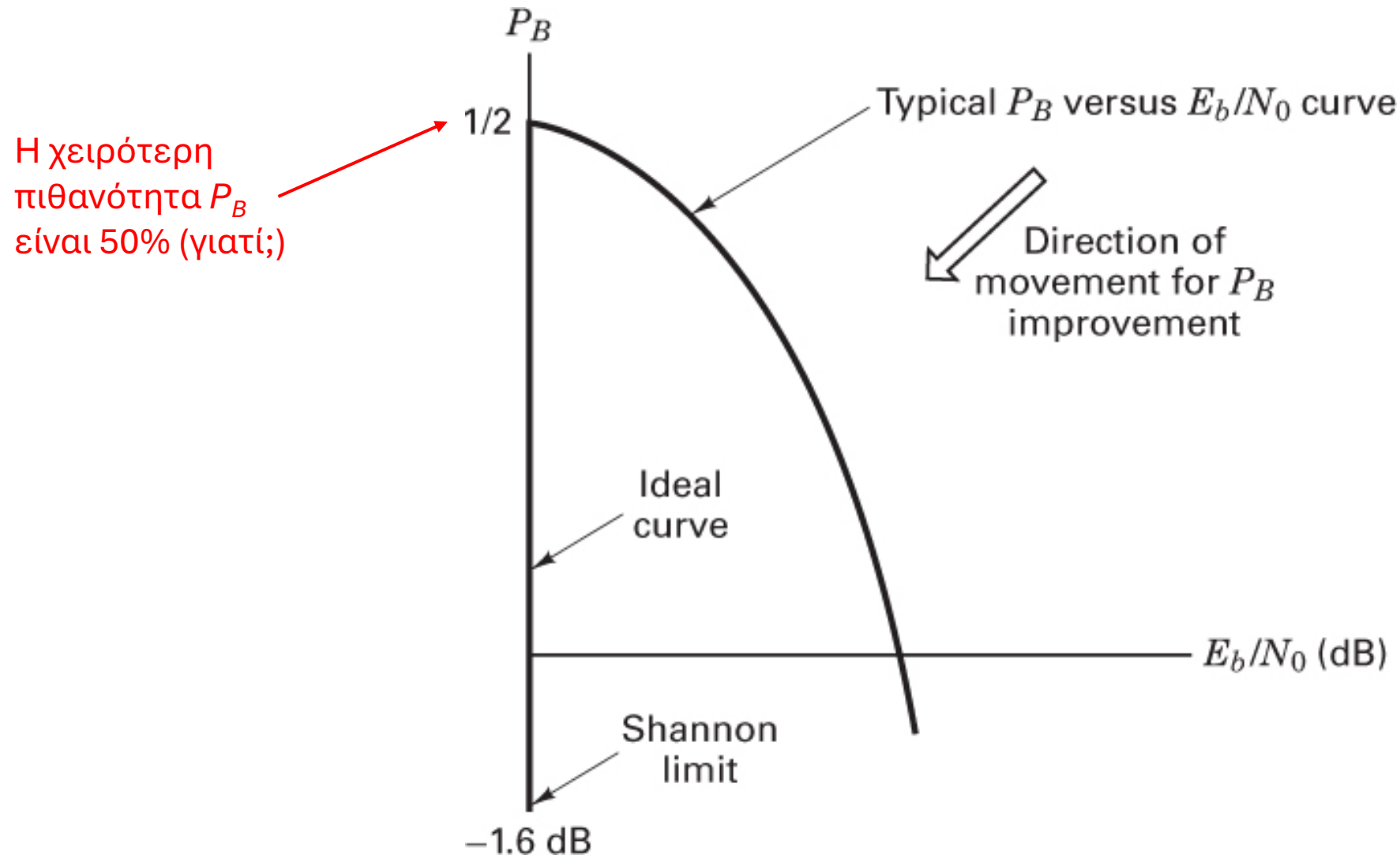
Πιθανότητα Σφάλματος Bit

Δυαδική DPSK

$$P_B = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{N_0}}$$

Μ-αδίκη Σηματοδοσία και Επίδοση

Ιδανική Επίδοση ως προς P_B



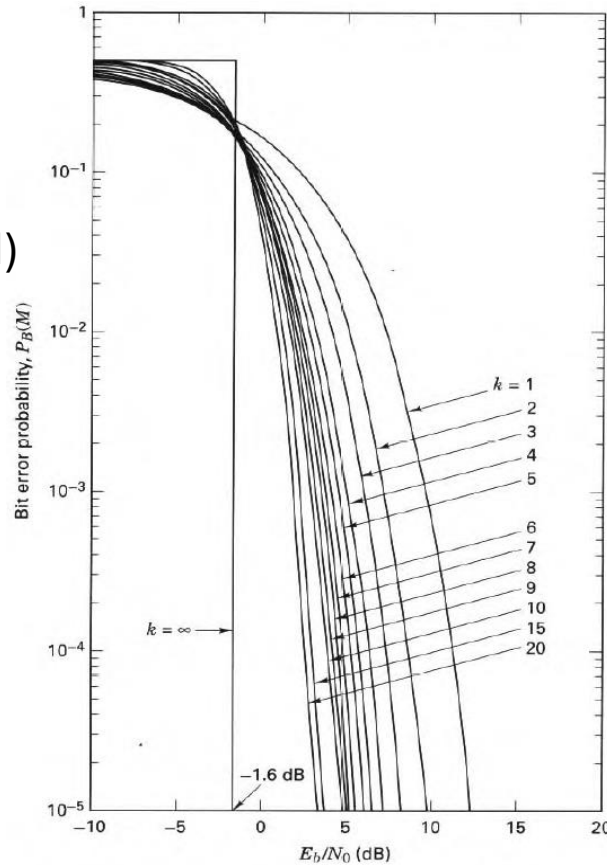
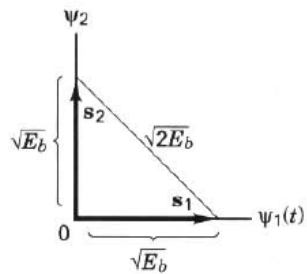
Σχήμα Καταρράκτη
Waterfall shape

P_B σε M-αδικη Σηματοδοσία για k bits per symbol ($M=2^k$)

M-αδική **ορθογώνια**
σηματοδοσία (πχ OFDM)

$k \uparrow \quad P_B \downarrow$

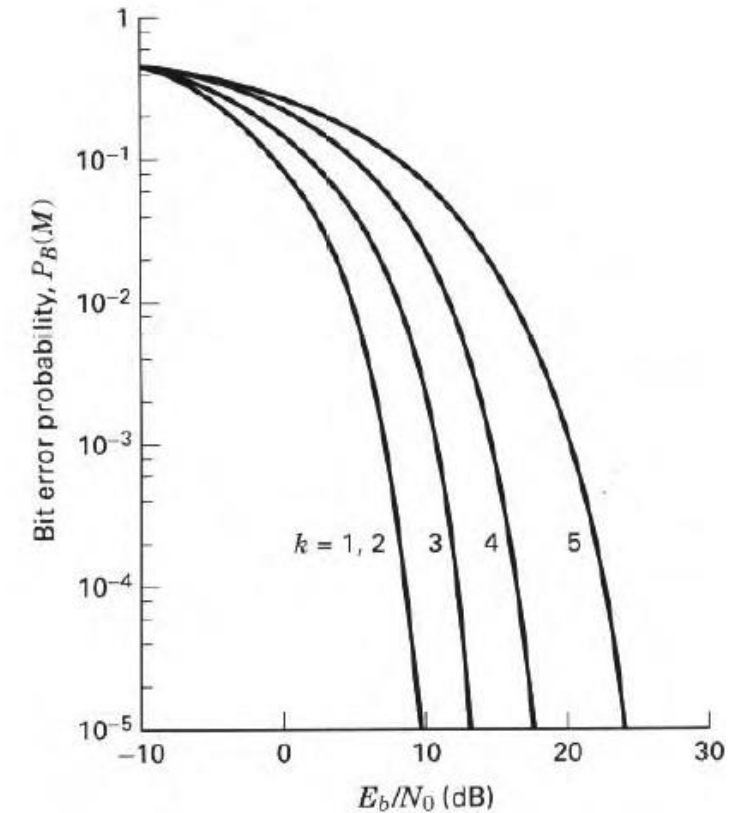
$$\int_0^T s_1(t) s_2(t) dt = 0$$



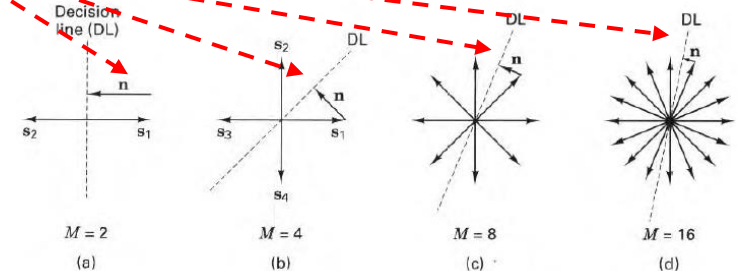
Μειονέκτημα: Περισσότερο φάσμα για $k > 1$

M-αδική
σηματοδοσία
πολλαπλών φάσεων

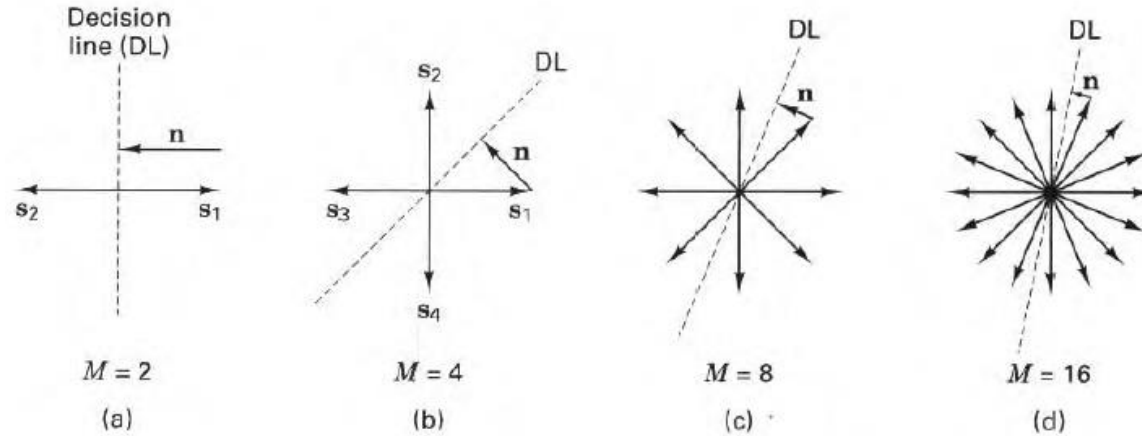
$K \uparrow \quad P_B \uparrow$



Μικραίνει η περιοχή
απόφασης άρα
αυξάνονται τα λάθη

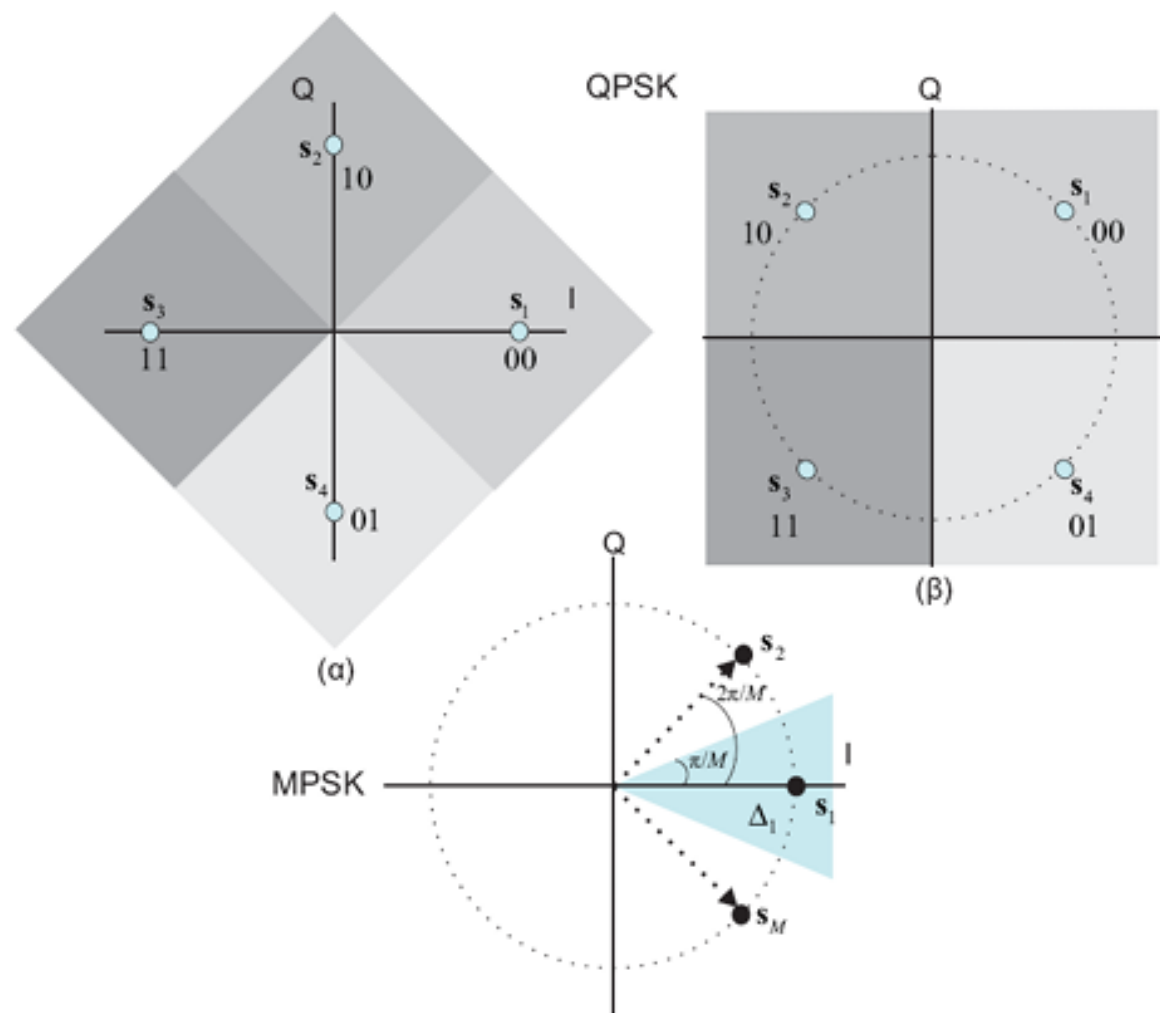


Βελτίωση πιθανότητας σηματοδοσία MPSK



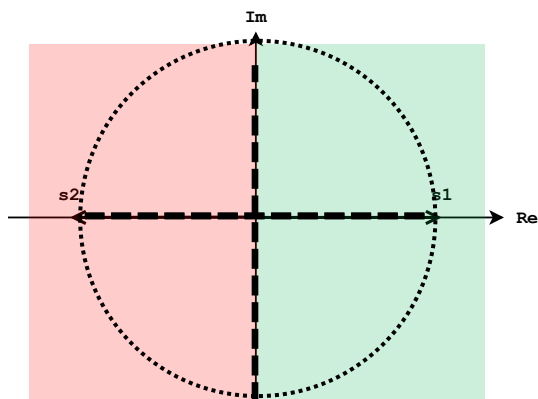
Το θα γίνει αν αυξήσουμε την ένταση των μεταδιδόμενων σημάτων (αύξηση ισχύος μετάδοσης);

Περιοχές απόφασης



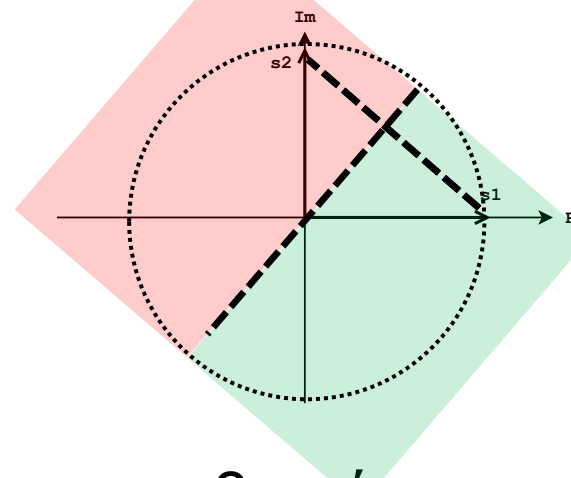
Σύγκριση BPSK vs. FSK

PSK



αντίποδα

FSK

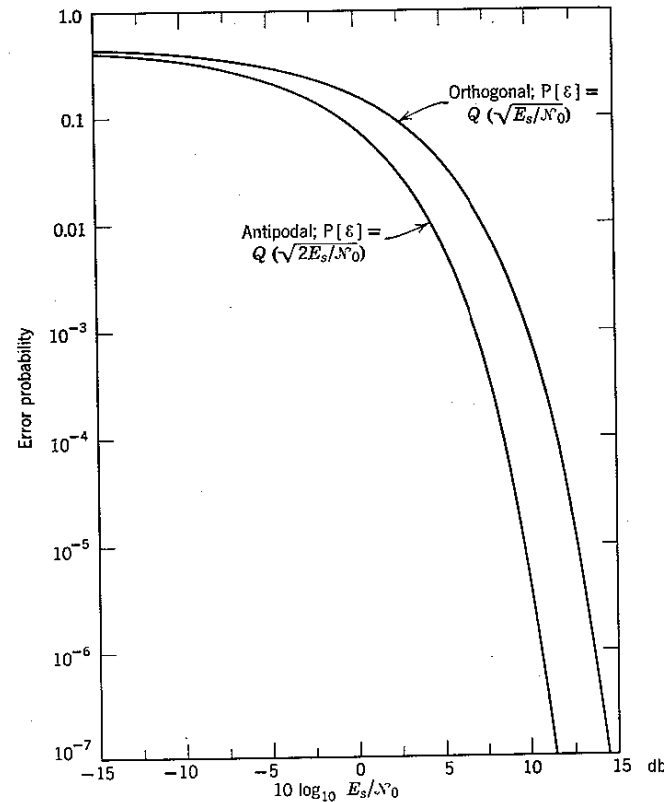


ορθογώνια

Πιθανότητα σφάλματος σε BPSK και FSK (k=1)

Ποσοτικά

Η αντίποδη σηματοδοσία είναι πιο αποδοτική ως προς την πιθανότητα σφάλματος κατά 3dB



Ποιοτικά

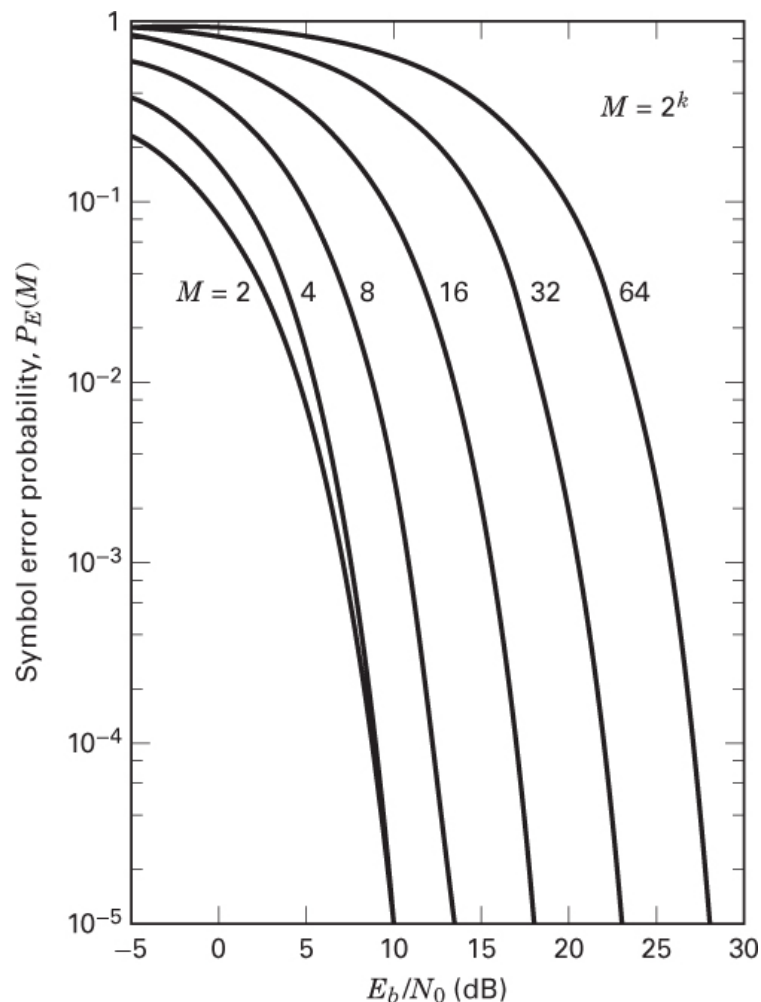
Στην αντίποδη σηματοδοσία, οι αστερισμοί είναι αντιδιαμετρικοί $\Rightarrow$ απέχουν τη μέγιστη απόσταση στον κύκλο

Για k=1 BPSK καλύτερο

Για k>1 η συμπεριφορά αλλάζει καθώς για M-PSK η πιθανότητα αυξάνεται ενώ για M-FSK μειώνεται

Πιθανότητα Σφάλματος
Συμβόλου για M -αδικα
Συστήματα ($M > 2$)

Πιθανότητα Σφάλματος Συμβόλου σε MPSK



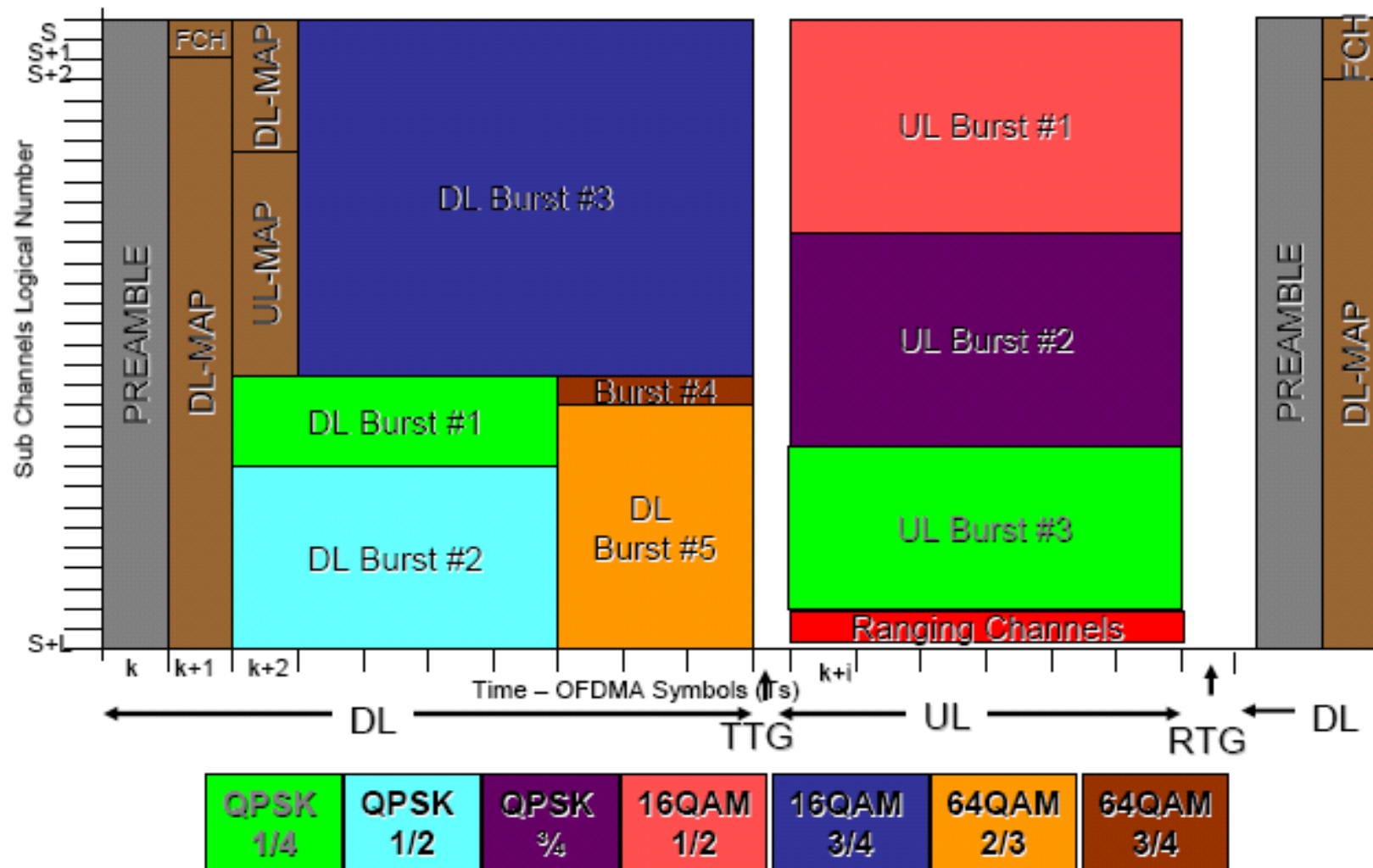
$$P_{b,BPSK} = P_{b,BPAM} = Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{N_0}}\right)$$

$$\begin{aligned} P_{s,QPSK} &= 1 - (1 - P_{b,I})(1 - P_{b,Q}) \\ &= 1 - \left[1 - Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{N_0}}\right)\right] \left[1 - Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{N_0}}\right)\right] \\ &= 2Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{N_0}}\right) - Q^2\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{N_0}}\right) \end{aligned}$$

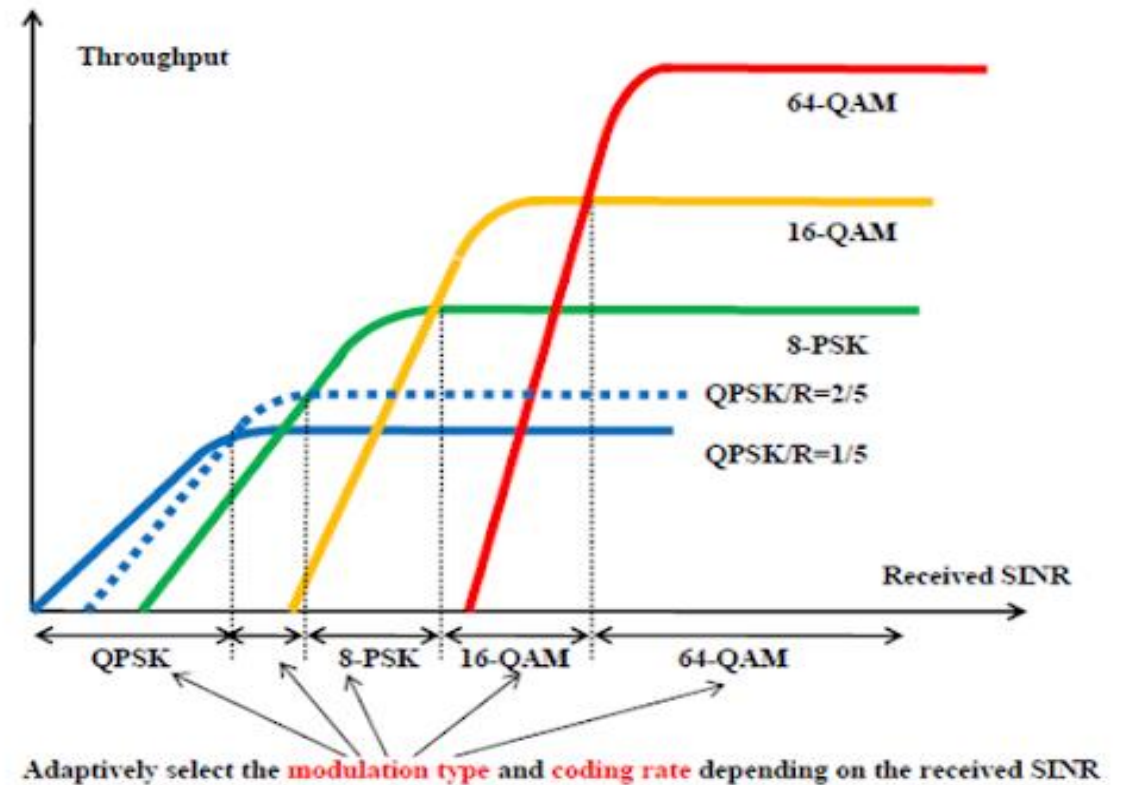
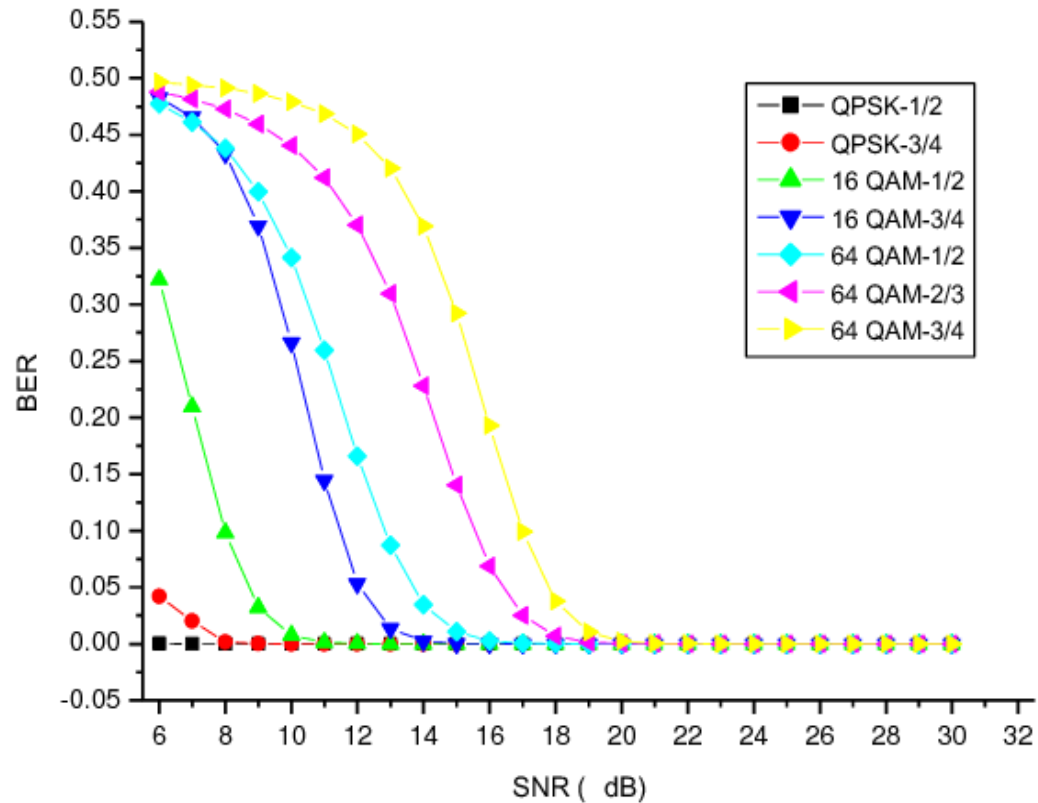
$$P_{s,M-PSK} \approx 2Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_s}{N_0}} \sin \frac{\pi}{M}\right) \quad M > 4$$

Διαμόρφωση σε πραγματικά συστήματα

Δομή χρονοπλαισίου 4G



Προσαρμοσμένη διαμόρφωση



WiFi 4 (802.11n) – WiFi 5 (802.11ac)

802.11n and 802.11ac

MCS, SNR and RSSI

wirelessLAN
PROFESSIONALS

HT MCS	VHT MCS	Modulation	Coding	20MHz				40MHz				80MHz				160MHz			
				Data Rate		Min. SNR	RSSI	Data Rate		Min. SNR	RSSI	Data Rate		Min. SNR	RSSI	Data Rate		Min. SNR	RSSI
				800ns	400ns			800ns	400ns			800ns	400ns			800ns	400ns		
1 Spatial Stream																			
0	0	BPSK	1/2	6.5	7.2	2	-82	13.5	15	5	-79	29.3	32.5	8	-76	58.5	65	11	-73
1	1	QPSK	1/2	13	14.4	5	-79	27	30	8	-76	58.5	65	11	-73	117	130	14	-70
2	2	QPSK	3/4	19.5	21.7	9	-77	40.5	45	12	-74	87.8	97.5	15	-71	175.5	195	18	-68
3	3	16-QAM	1/2	26	28.9	11	-74	54	60	14	-71	117	130	17	-68	234	260	20	-65
4	4	16-QAM	3/4	39	43.3	15	-70	81	90	18	-67	175.5	195	21	-64	351	390	24	-61
5	5	64-QAM	2/3	52	57.8	18	-66	108	120	21	-63	234	260	24	-60	468	520	27	-57
6	6	64-QAM	3/4	58.5	65	20	-65	121.5	135	23	-62	263.3	292.5	26	-59	526.5	585	29	-56
7	7	64-QAM	5/6	65	72.2	25	-64	135	150	28	-61	292.5	325	31	-58	585	650	34	-55
	8	256-QAM	3/4	78	86.7	29	-59	162	180	32	-56	351	390	35	-53	702	780	38	-50
	9	256-QAM	5/6			31	-57	180	200	34	-54	390	433.3	37	-51	780	866.7	40	-48
2 Spatial Streams																			
8	0	BPSK	1/2	13	14.4	2	-82	27	30	5	-79	58.5	65	8	-76	117	130	11	-73
9	1	QPSK	1/2	26	28.9	5	-79	54	60	8	-76	117	130	11	-73	234	260	14	-70
10	2	QPSK	3/4	39	43.3	9	-77	81	90	12	-74	175.5	195	15	-71	351	390	18	-68
11	3	16-QAM	1/2	52	57.8	11	-74	108	120	14	-71	234	260	17	-68	468	520	20	-65
12	4	16-QAM	3/4	78	86.7	15	-70	162	180	18	-67	351	390	21	-64	702	780	24	-61
13	5	64-QAM	2/3	104	115.6	18	-66	216	240	21	-63	468	520	24	-60	936	1040	27	-57
14	6	64-QAM	3/4	117	130.3	20	-65	243	270	23	-62	526.5	585	26	-59	1053	1170	29	-56
15	7	64-QAM	5/6	130	144.4	25	-64	270	300	28	-61	585	650	31	-58	1170	1300	34	-55
	8	256-QAM	3/4	156	173.3	29	-59	324	360	32	-56	702	780	35	-53	1404	1560	38	-50
	9	256-QAM	5/6			31	-57	360	400	34	-54	780	866.7	37	-51	1560	1733	40	-48
3 Spatial Streams																			
16	0	BPSK	1/2	19.5	21.7	2	-82	40.5	45	5	-79	87.8	97.5	8	-76	175.5	195	11	-73
17	1	QPSK	1/2	39	43.3	5	-79	81	90	8	-76	175.5	195	11	-73	351	390	14	-70
18	2	QPSK	3/4	58.5	65	9	-77	121.5	135	12	-74	263.3	292.5	15	-71	526.5	585	18	-68
19	3	16-QAM	1/2	78	86.7	11	-74	162	180	14	-71	351	390	17	-68	702	780	20	-65
20	4	16-QAM	3/4	117	130	15	-70	243	270	18	-67	526.5	585	21	-64	1053	1170	24	-61
21	5	64-QAM	2/3	156	173.3	18	-66	324	360	21	-63	702	780	24	-60	1404	1560	27	-57
22	6	64-QAM	3/4	175.5	195	20	-65	364.5	405	23	-62			26	-59	1580	1755	29	-56
23	7	64-QAM	5/6	195	216.7	25	-64	405	450	28	-61	877.5	975	31	-58	1755	1950	34	-55
	8	256-QAM	3/4	234	260	29	-59	486	540	32	-56	1053	1170	35	-53	2106	2340	38	-50
	9	256-QAM	5/6	260	288.9	31	-57	540	600	34	-54	1170	1300	37	-51			40	-48

WiFi 5

SONICWALL Network Security Appliance

General Radio 0 Basic Radio 0 Advanced Radio 1 Basic Radio 1 Advanced Sensor 3G/4G/LTE WWA

Radio 0 Settings

☒ Enable Radio Always on

Mode: 5GHz 802.11ac/n/a Mixed

SSID: sonicwall-1180

Radio Band: Auto

Channel: Auto

☒ Enable Short Guard Interval ☒ Enable Aggregation

Πρόσθετο Ερευνητικό Υλικό

1. Nyquist H., “Certain Factors Affecting Telegraph Speed”, The Bell System Technical Journal, 1924
2. Nyquist H., “Certain Topics in Telegraph Transmission Theory”, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1928
3. Nyquist H., “Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors”, American Physical Society, 1928
4. Hartley R. V. L., “Transmission of Information”, The Bell System Technical Journal, 1928
5. Shannon C. E., “A Mathematical Theory of Communication ”, The Bell System Technical Journal, 1948
6. Shannon C. E., “Communication in the Presence of Noise”, Proceedings of the IRE, 1949
7. Hamming R. W., “Error Detecting and Error Correcting Codes”, The Bell System Technical Journal, 1950