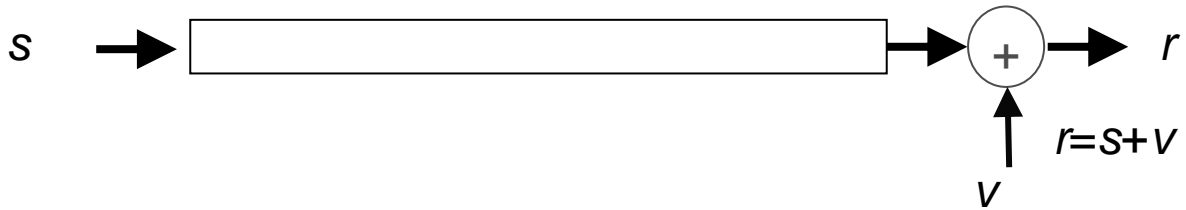


**Πρόβλημα 1**

**ΚΑΝΑΛΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΩΝ**



Ο πομπός στέλνει στο δέκτη μέσω του καναλιού του σχήματος την ακολουθία συμβόλων  $\{s_t\}$   $t=1,2,\dots,10$  που ανήκουν στο αλφάβητο

$$\{-3,-1,1,3\}$$

Στον δέκτη λαμβάνεται η ακολουθία  $\{r_i\}$   $i=1,2,\dots,10$  του πιο κάτω πίνακα.

$\{r_i\}$ $t=1,2,\dots,10$	-3.6	1.2	2.8	1.3	3.7	0.9	-0.5	2.4	-1.1	3.2
$\{s_t\}$ $t=1,2,\dots,10$										
$\{v_t\}$ $t=1,2,\dots,10$										

- A. Με βάση την αρχή της ελάχιστης απόστασης να υπολογίσετε τα πιο πιθανές τιμές της ακολουθίας  $\{s_t\}$   $t=1,2,\dots,10$ .
- B. Στη συνέχεια να υπολογίσετε τις τιμές της τυχαίας ακολουθίας  $\{v_t\}$   $t=1,2,\dots,10$  και τη διακύμανση  $\sigma^2$  της ακολουθίας αυτής .
- Γ. Τέλος να υπολογίσετε την τιμή της πιθανότητας σφάλματος να συμβεί λάθος κατά την απόφαση των στοιχείων της ακολουθίας  $\{s_t\}$

**Απάντηση**

$\{r_i\}$ $t=1,2,\dots,10$	-3.6	1.2	2.8	1.3	3.7	0.9	-0.5	2.4	-1.1	3.2
$\{s_t\}$ $t=1,2,\dots,10$	-3	1	3	1	3	1	-1	3	-1	3
$\{v_t\}$ $t=1,2,\dots,10$	-0.6	0.2	-0.2	0.3	0.7	-0.1	0.5	-0.6	-0.1	0.2

$\sigma=0.41, P_e=0.011$

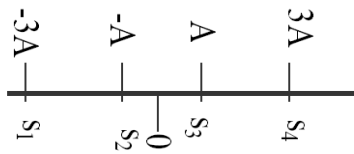
**Πρόβλημα 2**

Σε ένα οκταδικό κανάλι ο δέκτης περιμένει τα σύμβολα

$$\{-7,-5,-3,-1,1,3,5,7\}$$

Γράψτε την ακολουθία κατωφλίων  $\{T_i\} i=1,2,\dots,7$  που πρέπει να χρησιμοποιήσει ο δέκτης για τη φώραση και σχεδιάστε την χαρακτηριστική μεταφοράς (σχέση εισόδου εξόδου) του αναλογοποιητικού μετατροπέα (ADC) που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη φώραση.

**Πρόβλημα 3**



Σε ένα τετραδικό σύστημα μιας διάστασης ο αστερισμός συμβόλων είναι αυτός του σχήματος. Να υπολογίσετε τον Πίνακα των Υποσυνθήκη Πιθανοτήτων  $P_{ij}=\Pr[Y=j|X=i]$ ,  $i,j=1,2,3,4$ . Δίνεται  $A=2$  και  $\sigma=1$ .

Απάντηση

$P_{ij} P\{j i\}$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
$i=1$	$1-Q(A/\sigma)$	$Q(A/\sigma)-Q(3A/\sigma)$	$Q(3A/\sigma)-Q(5A/\sigma)$	$Q(5A/\sigma)$
$i=2$	$Q(A/\sigma)$	$1-2Q(A/\sigma)$	$Q(A/\sigma)-Q(3A/\sigma)$	$Q(3A/\sigma)$
$i=3$	$Q(3A/\sigma)$	$Q(A/\sigma)-Q(3A/\sigma)$	$1-2Q(A/\sigma)$	$Q(A/\sigma)$
$i=4$	$Q(5A/\sigma)$	$Q(3A/\sigma)-Q(5A/\sigma)$	$Q(A/\sigma)-Q(3A/\sigma)$	$1-Q(A/\sigma)$

**Πρόβλημα 4**

Να αποδείξετε ότι σε ένα σύστημα PSK το κριτήριο της ελάχιστης απόστασης απλοποιείται στο κριτήριο της ελάχιστης γωνίας, δηλαδή για λήψη ίση με το μιγαδικό  $r$  και τα μιγαδικά σύμβολα  $s_1, s_2, \dots, s_M$  ισχύει:

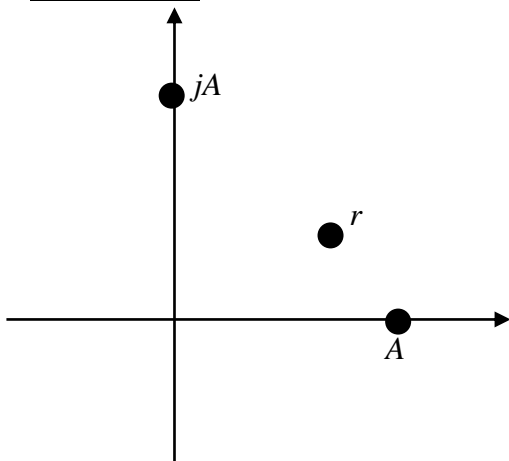
$$s=s_i \iff \text{angle}(r-s_i) < \text{angle}(r-s_j) \text{ για κάθε } j=1,2,\dots,M, j \text{ διάφορο του } i.$$

**Πρόβλημα 5**

Σε 8-αδικο μονοδιάστατο σύστημα η διακύμανση της τυχαίας ακολουθίας  $\{v_n\}$  είναι  $\sigma^2=0.5$  Watt. Πόση πρέπει να είναι η απόσταση  $2A$  μεταξύ των γειτονικών συμβόλων ώστε η πιθανότητα σφάλματος να περιοριστεί σε  $10^{-7}$ ; Ποια θα είναι τότε τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται;

Απάντηση:  $A=3.75$

**Πρόβλημα 6**



A) Σε ένα σύστημα δύο διαστάσεων με δύο σύμβολα, το  $A$  και το  $jA$  να αποδείξετε ότι το κριτήριο ελάχιστης απόστασης απλοποιείται σε

$$s=A \iff \text{Re}(r) > \text{Im}(r)$$

B) Να αποδείξετε ότι στο σύστημα αυτό η πιθανότητα σφάλματος είναι:

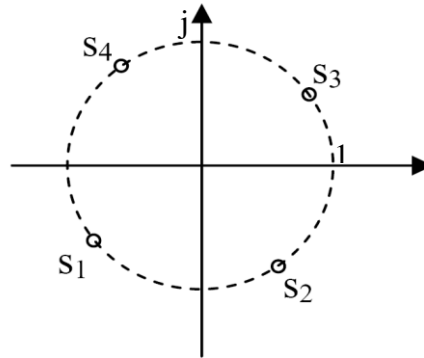
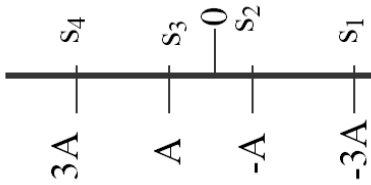
$$P_e = Q\left(\frac{A}{\sigma\sqrt{2}}\right)$$

**Πρόβλημα 7**

Δίνεται η δυαδική ακολουθία

1010011010011101010110

Ποια σύμβολα θα διαβιβαστούν για κάθε έναν από τους πιο κάτω αστερισμούς αν δεν χρησιμοποιηθεί κώδικας Gray;



**Πρόβλημα 8**

Σε κάποιο Τηλεπ. Σύστημα με  $\sigma$  σταθερό και δύο σύμβολα έχει επιβληθεί να ισχύει:

$$s_1^2 + s_2^2 = 2E = \text{σταθερά}$$

Να βρείτε για ποιες τιμές των  $s_1$  και  $s_2$  η αντίστοιχη τιμή της πιθανότητας γίνεται ελάχιστη.

Απάντηση

Πρέπει  $s_1 = -s_2, |s_1| = \sqrt{E}$

**Πρόβλημα 9**

- 9.1 Θεωρείστε γνωστό τον τύπο της πιθανότητας για δύο σύμβολα στη μια διάσταση και υπολογίστε την πιθανότητα σφάλματος για ένα σύστημα ON OFF, δηλαδή ένα σύστημα με σύμβολα  $s_1=0$  και  $s_2=A$ . Δεχθείτε AWGN  $\mu=0$  και τυπική απόκλιση  $\sigma$ .
- 9.2 Είναι γνωστό ότι για ένα σύμβολο  $s$  ισχύει,  $\|s\|^2=E$ , όπου  $E$  η ενέργεια του συμβόλου. Να υπολογίσετε τη μέση ενέργεια ανά σύμβολο,  $\bar{E} = E_b$  στα δυαδικά συστήματα ON OFF, με αντίποδα σύμβολα, και δυαδικό ορθογώνιο ( $s_1=A$  &  $s_2=jA$ ).
- 9.3 Να υπολογίσετε την πιθανότητα σφάλματος  $P_2$  των δυαδικών συστημάτων του Ερωτήματος 9.2 συνατήσει της Ενέργειας ανά bit,  $E_b$

Απάντηση

$$P_{2\text{-antipode}} = Q\left(\frac{\sqrt{E_b}}{\sigma}\right), \quad P_{2\text{-orthog}} = Q\left(\frac{\sqrt{E_b}}{\sqrt{2}\sigma}\right), \quad P_{2\text{-ON-OFF}} = Q\left(\frac{\sqrt{E_b}}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$

**Πρόβλημα 10**

Θεωρήστε ότι  $h(t)$ ,  $H(f)$  είναι η κρουστική απόκριση και η απόκριση συχνότητας του βέλτιστου φίλτρου και  $\psi(t)$ ,  $\Psi(f)$  η βασική κυματομορφή επικοινωνίας και ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Fourier.

**10.1** Θεωρείστε γνωστό ότι  $h(t)=\psi(T-t)$  και αποδείξτε με τη βοήθεια των ιδιοτήτων του Μετασχηματισμού Fourier, ότι ισχύει:

$$H(f)=\Psi^*(f)\exp(-j2\pi fT)$$

με  $\Psi^*(f)$  συμβολίζουμε τη συζυγή μιγαδική συνάρτηση της  $\Psi(f)$ .

**10.2** Χρησιμοποιείστε τον μαθηματικό τύπο των Cauchy-Schwartz σε μιγαδική μορφή και αποδείξτε εξ αρχής ότι το βέλτιστο φίλτρο έχει απόκριση συχνότητας

$$H(f)=\Psi^*(f)\exp(-j2\pi fT)$$

Στη συνέχεια χρησιμοποιείστε τις ιδιότητες του Μετασχηματισμού Fourier και αποδείξτε ότι ισχύει

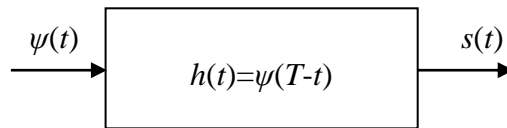
$$h(t)=\psi(T-t)$$

**Πρόβλημα 11**

Για ένα ενεργειακό σήμα  $x(t)$  μπορούμε να ορίσουμε τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης,  $R_x(z)$  ως:

$$R_x(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t)\psi(t-z) dt$$

Να αποδείξετε, ότι όταν στην είσοδο του βέλτιστου φίλτρου τεθεί η βασική κυματομορφή  $\psi(t)$  το σήμα της εξόδου,  $s(t) = R_\psi(T-t)$ .

**Λύση**

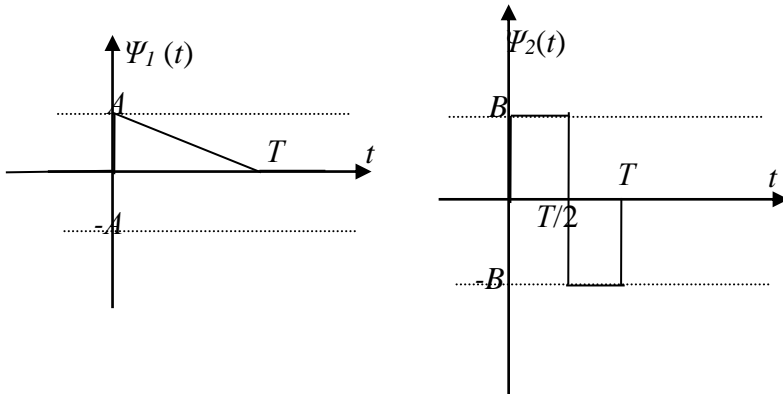
$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\tau)h(t-\tau) d\tau$$

Ισχύει όμως  $h(t)=\psi(T-t) \rightarrow h(t-\tau)=\psi(T-t+\tau)$  οπότε

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\tau)\psi(\tau+T-t) d\tau = R_\psi(T-t)$$



**Πρόβλημα 12**



Στο Σχήμα δίδονται δύο βασικές κυματομορφές επικοινωνίας  $\psi_1(t)$  και  $\psi_2(t)$  με μοναδιαία ενέργεια η κάθε μία.

**12α)** Να υπολογίσετε τις τιμές των  $A$  και  $B$  συναρτήσει του  $T$  και να σχεδιάσετε την κρουστική απόκριση για τα αντίστοιχα προσαρμοσμένα φίλτρα. Απ.  $A = \sqrt{3/T}$ ,  $B = \sqrt{1/T}$ .

**12β)** Το φίλτρο λήψης του αποδιαμορφωτή ενός συστήματος έχει υλοποιηθεί προσαρμοσμένο στην κυματομορφή  $\psi_2(t)$ . Το κανάλι όμως παραμορφώνει την κυματομορφή και τελικά στον δέκτη φθάνει η  $\psi_1(t)$ . Έτσι στην είσοδο του δέκτη φθάνει το σήμα

$$r(t) = a\psi_1(t) + n(t)$$

όπου  $n(t)$  AWG θόρυβος του καναλιού. Στην έξοδο του φίλτρου λήψης λαμβάνεται τη χρονική στιγμή  $T$  το δείγμα

$$r = \beta_0 + v_0$$

όπου  $\beta_0$  οφείλεται στο σήμα  $a\psi_1(t)$  και το  $v_0$  οφείλεται στο θόρυβο του καναλιού. Αν συμβολίσουμε με  $\sigma_v^2$  τη διακύμανση του  $v_0$ , να υπολογίσετε τον λόγο  $\beta_0^2 / \sigma_v^2$ . Απ.  $\beta_0^2 / \sigma_v^2 = 3a^2 / (8N_0)$

**12.γ)** Να υπολογίσετε πόσα dB πρέπει να αυξηθεί η ενέργεια ανά σύμβολο στο σύστημα αυτό ώστε η πιθανότητα σφάλματος  $P_M$  να παραμείνει στην τιμή που είχε υπολογιστεί αρχικά. (Δηλαδή όταν έγινε η υπόθεση ότι στον δέκτη η βασική κυματομορφή θα είναι η  $\psi_1(t)$ ). Απ. 7.25 dB.

**Πρόβλημα 13**

Αν χρησιμοποιήσουμε ως βασική κυματομορφή επικοινωνίας την

$$\psi(t) = \psi_0 \sin(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t < T$$

Να αποδείξετε ότι για να έχει αυτή μοναδιαία ενέργεια πρέπει να ισχύει:

$$\psi_0 = \sqrt{\frac{2}{T}}$$

όταν  $4Tf_c \gg 1$  ή όταν  $4Tf_c =$  ακέραιος.

**Πρόβλημα 14**

Να αποδείξετε ότι, όταν  $2Tf_c \gg 1$  ή όταν  $4Tf_c =$  ακέραιος, οι δύο κυματομορφές  $\psi_1(t)$  και  $\psi_2(t)$

$$\psi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t), \quad \psi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t < T$$

είναι ορθοκανονικές.

**Πρόβλημα 15**

Να αποδείξετε ότι, όταν  $2Tf_c \gg 1$  ή όταν  $4Tf_c =$  ακέραιος, οι δύο κυματομορφές  $\psi_1(t)$  και  $\psi_2(t)$

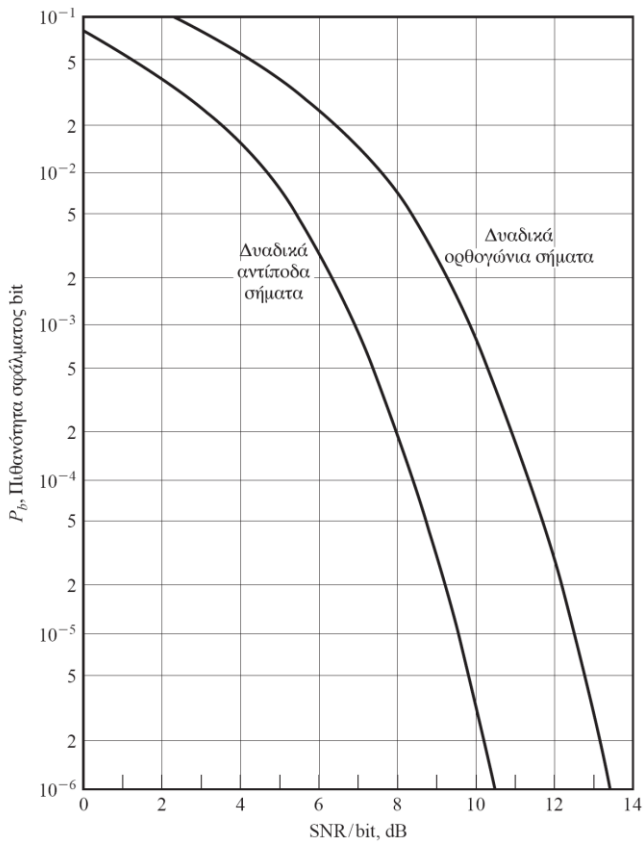
ΦΡΟΝ ΑΣΚΗΣΕΙΣ –ΕΙΣ. ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

$$\psi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t), \quad \psi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin \left[ 2\pi \left( f_c + \frac{1}{2T} \right) t \right], \quad 0 \leq t < T$$

είναι ορθοκανονικές.

**Πρόβλημα 16**

Με βάση το παραπλεύρως διάγραμμα:



**α)** Να υπολογίσετε την αριθμητική τιμή του λόγου  $E_b/N_0$  για σύστημα με αντίποδα σήματα και για πιθανότητα σφάλματος  $P_b=10^{-5}$ . Απ.  $(E_b/N_0)=8.9$

**β)** Να υπολογίσετε την αριθμητική τιμή του λόγου  $E_{bant}/E_{bort}$  για πιθανότητα σφάλματος  $P_b=2 \times 10^{-4}$ .

$E_{bant}$ : Ενέργεια ανά bit για σύστημα με δύο αντίποδα σύμβολα.

$E_{bort}$ : Ενέργεια ανά bit για σύστημα με δύο ορθογώνια σύμβολα.

Απ.  $(E_{bant}/E_{bort})=0.5$

**Πρόβλημα 17**

Ένα AWGN κανάλι παρουσιάζει απόσβεση  $L=30$  dB και φασματική πυκνότητα θορύβου  $N_0/2=10^{-7}$  Watt/Hz. Η ισχύς που μπορεί να εκπέμψει ο πομπός είναι  $P_T=10$  Watt και σχεδιάζουμε να χρησιμοποιήσουμε το κανάλι αυτό για να διαβιβάσουμε δυαδικά δεδομένα με ρυθμό  $R_2=10^4$  bits/sec. α) Να υπολογίσετε τη μικρότερη τιμή της πιθανότητας σφάλματος  $P_2$  που μπορεί να επιτευχθεί αν η διαβίβαση των δεδομένων γίνει με B-PSK. Απ.  $P_2=8 \cdot 10^{-4}$ . β) Αν επιθυμούμε  $P_2=10^{-6}$ , αλλά δεν είναι δυνατό να αυξήσουμε την  $P_T$ , πόσο πρέπει να γίνει ο ρυθμός διαβίβασης  $R_2$ ; Απ.  $R_2=4430$  bits/sec.

**Πρόβλημα 18**

Να επαναλάβετε τη λύση του προβλήματος 17 χρησιμοποιώντας τις καμπύλες λειτουργίας των συστημάτων με αντίποδα σήματα.

**Πρόβλημα 19**

Ένα AWGN κανάλι παρουσιάζει απόσβεση  $L=30$  dB και φασματική πυκνότητα θορύβου  $N_0/2=10^{-7}$  Watt/Hz. Η ισχύς που μπορεί να εκπέμψει ο πομπός είναι  $P_T=10$  Watt και σχεδιάζουμε να χρησιμοποιήσουμε το κανάλι αυτό για να διαβιβάσουμε δυαδικά δεδομένα με ρυθμό  $R_2=10^4$  bits/sec. α) Να υπολογίσετε τη μικρότερη τιμή της πιθανότητας σφάλματος  $P_2$  που μπορεί να επιτευχθεί αν η διαβίβαση των δεδομένων γίνει με 8-PAM. β) Αν επιθυμούμε  $P_2=10^{-6}$ , αλλά δεν είναι δυνατό να αυξήσουμε την  $P_T$ , πόσο πρέπει να γίνει ο ρυθμός διαβίβασης  $R_2$ ;

Απ. α)  $P_2=1.7 \cdot 10^{-4}$ , β)  $R_{2\max}=5700$  bits/sec

**Πρόβλημα 20**

Σχεδιάζουμε διακριτό κανάλι  $M$ -PSK μέσα από το οποίο διαβιβάζονται σύμβολα με σταθερό ρυθμό  $R$

$M$	2	4	8	16
$(E_{bM}/E_{b2})_{dB}$	0			
$(E_{bM}/E_{b2})$	1			
$(R_{bM}/R_{b2})$	1			
$P_{RM}/P_{R2}$	1			

(Δηλαδή διαθέτουμε κανάλι καθορισμένου εύρους-ζώνης  $B_C$ ) . Επιθυμούμε να διερευνήσουμε το κόστος σε ισχύ σε σχέση με το μέγεθος του ρυθμού διαβίβασης δυαδικών δεδομένων  $R_b$ . Για το σκοπό αυτό σας ζητάμε να συμπληρώσετε τον πίνακα με τους πιο κάτω λόγους.

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού να

χρησιμοποιήσετε τις καμπύλες επίδοσης του συστήματος  $M$ -PSK. Με τα  $E_{b2}$  και  $E_{bM}$ , συμβολίζουμε την ενέργεια ανά bit για το 2-PSK και το  $M$ -PSK αντίστοιχα. Με  $R_{b2}$ , και  $R_{bM}$ , συμβολίζουμε τον ρυθμό δυαδικών δεδομένων που επιτυγχάνεται στο 2-PSK και  $M$ -PSK όταν ο ρυθμός διαβίβασης συμβόλων ισούται με  $R$ . Τέλος με  $P_{R2}$ , και  $P_{RM}$ , παριστάνουμε την ισχύ λήψης που απαιτείται για ένα σύστημα 2-PSK και  $M$ -PSK αντίστοιχα, τα οποία λειτουργούν με ρυθμό διαβίβασης συμβόλων ίσον με  $R$  και διαβιβάζουν τα δυαδικά δεδομένα με πιθανότητα σφάλματος ίση με την τιμή της  $P_b$ .

Απάντηση.

$M$	2	4	8	16
$(E_{bM}/E_{b2})_{dB}$	0	-0.5	3.5	7.5
$(E_{bM}/E_{b2})$	1	0.89	2.24	5.62
$(R_{bM}/R_{b2})$	1	2	3	4
$P_{RM}/P_{R2}$	1	1.78	6.72	22.48

**Πρόβλημα 21**

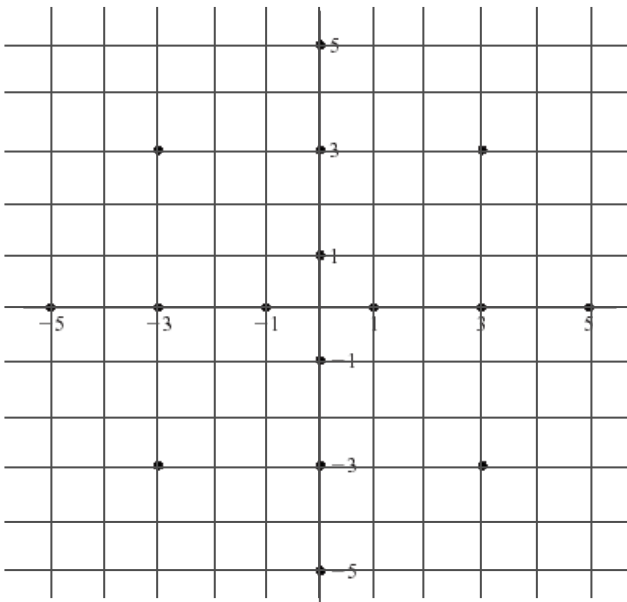
<i>System</i>	8-PAM	8-PSK	Coherent 8-FSK	Non-Coherent 8-FSK
$(E_{b8S}/E_{b2ant})_{dB}$				
$(E_{b8S}/E_{b2ant})$				
$(P_{8S}/P_{b2ant})$				

Επιθυμούμε να σχεδιάσουμε διακριτό κανάλι για να διαβιβάσουμε δυαδικά δεδομένα με καθορισμένο ρυθμό δυαδικών δεδομένων  $R_b$  και πιθανότητα σφάλματος  $P_b=10^{-5}$ . Για να διερευνήσουμε την

αποτελεσματικότητα των διαφόρων συστημάτων σκεφθήκαμε να υπολογίσουμε τους λόγους που αναγράφονται στον πίνακα. Με το δείκτη  $2ant$  συμβολίζουμε τα δυαδικά αντίποδα σήματα.

$E_{b8S}$ : Ενέργεια ανά bit για το 8-δικό Σύστημα με ρυθμό διαβίβασης δυαδικών δεδομένων τον  $R_b$  και πιθανότητα σφάλματος την  $P_b$ .  $P_{8S}$ : Ισχύς λήψης για το 8-δικό Σύστημα με ρυθμό διαβίβασης δυαδικών δεδομένων  $R_b$  και πιθανότητα σφάλματος την  $P_b$ . Τέλος ο δείκτης  $2ant$  υποδεικνύει τα πιο πάνω μεγέθη για ένα δυαδικό σύστημα με αντίποδα σύμβολα

**Πρόβλημα 22**



Στο Δέκτη ενός Συστήματος Διαβίβασης Διακριτών Δεδομένων με τον αστερισμό του Σχήματος ελήφθη η ακολουθία διανυσμάτων  $\{r_i\}$  του πίνακα. Για κάθε στοιχείο  $r_i$  της ακολουθίας αυτής να προσδιορίσετε το πιο πιθανό σύμβολο,  $s_i$ , που έχει αποσταλεί, και το αντίστοιχο διάνυσμα-σφάλμα  $n_i=[n_{i1},n_{i2}]$ . Επιπλέον να υπολογίσετε τη διακύμανση της ακολουθίας των σφαλμάτων  $\{n_{i1}\}$  και  $\{n_{i2}\}$  καθώς και το PSD του θορύβου του καναλιού,  $N_0/2$ . Δεχθείτε ότι τα σύμβολα του αστερισμού είναι ισοπίθανα, και ότι ο θόρυβος του καναλιού είναι AWG με μέση τιμή μηδέν.

Απάντηση

Ελήφθη $r_i=(r_{i1}, r_{i2})$	Η πιο Πιθανή Αποστολή $s_i$	Σφάλματα στη Λήψη $(n_{i1}, n_{i2})$	Πυκνότητα Θορύβου Καναλιού
(0.4,3.1)	(0,3)	(0.4,0.1)	$N_0/2=$ <b>0.22 W/Hz</b>
(3.4,2.5)	(3,3)	(0.4,-0.5)	
(-0.4,-1.1)	(0,-1)	(-0.4,-0.1)	
(-2.7,-3.0)	(-3,-3)	(0.3,-0.0)	
(-4.4,-0.5)	(-5,0)	(0.6,-0.5)	
(-0.6,-2.7)	(0,-3)	(-0.6,+0.3)	
(3.0,-2.7)	(3,-3)	(-0.0,+0.3)	
(4.9,0.8)	(5,0)	(-0.1,+0.8)	
(0.2,0.3)	(0,1)	(0.2,-0.7)	
(-0.9,-0.3)	(-1,0)	(0.1,-0.3)	
(2.5,0.2)	(3,0)	(-0.5,0.2)	
(-4.3,-0.5)	(-5,0)	(0.7,-0.5)	
(2.6,-3.0)	(3,-3)	(-0.4,0.0)	
(-2.7,-3.0)	(-3,-3)	(0.3,0.0)	

**Πρόβλημα 23**

Θεωρείστε ένα Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα, το οποίο μεταδίδει πληροφορία χρησιμοποιώντας QAM μέσα από ένα τηλεφωνικό AWGN κανάλι (voice band) σε ρυθμό 2400 σύμβολα/sec. Το κανάλι παρουσιάζει απόσβεση  $L_{dB}=30$  dB και η πυκνότητα θορύβου είναι  $N_0/2=10^{-7}$  W/Hz. Επιθυμούμε να διαβιβάσουμε δυαδικά δεδομένα με πιθανότητα σφάλματος  $P_b=10^{-5}$ . Υπολογίστε τη μικρότερη τιμή του πλήθους  $M$  συμβόλων του QAM και την απαιτούμενη αντίστοιχη ισχύ εκπομπής  $P_T$  για κάθε μια από τις τιμές δυαδικού ρυθμού  $R_b=4800$  και 9600 bits/sec. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείστε ένα διάγραμμα επιδόσεων  $P_M=f(\mathcal{E}_b/N_0)$ ,  $M=4,8$  του QAM. Απ.  $M=4$   $P_T=9$  Watt,  $M=16$   $P_T=48.4$  Watt,