

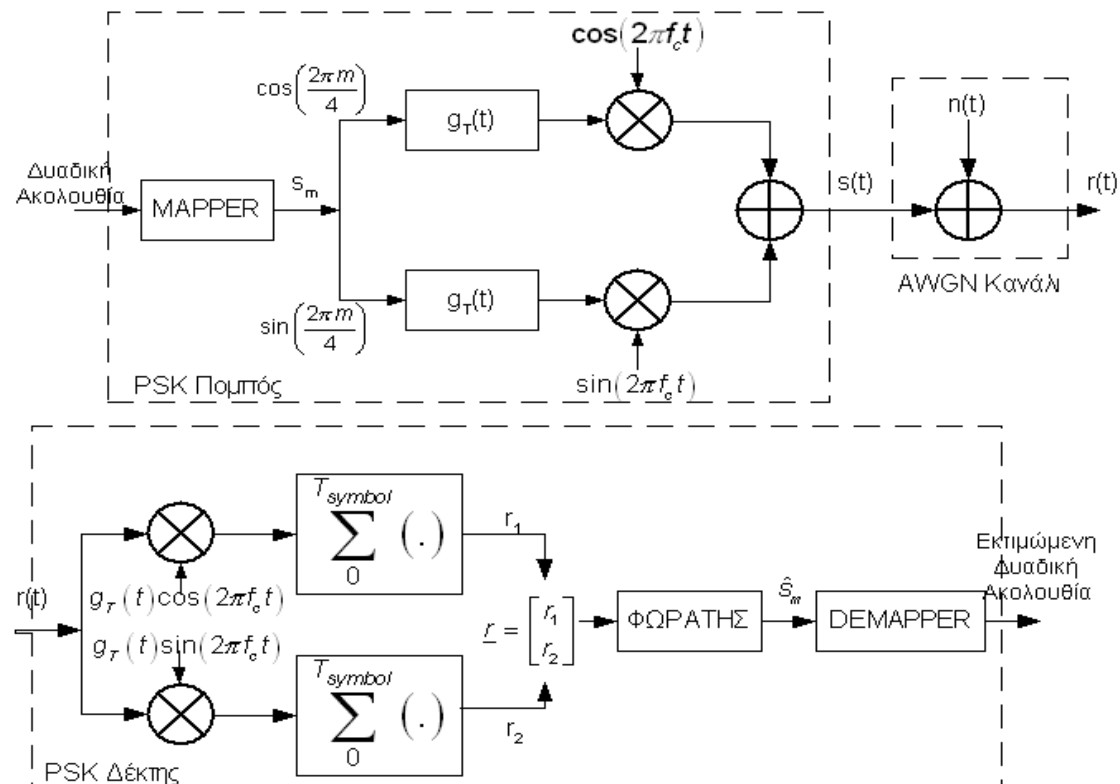
## ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

### 2<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση

#### **Σύγκριση Ομόδονων Ζωνοπερατών Συστημάτων 2-PSK, 4-PSK 2-FSK και 4-FSK**

Στην άσκηση αυτή καλείστε να συγκρίνετε τις διαμορφώσεις M-PSK και M-FSK ως προς την απόδοσή τους, για M=2 και M=4. Η σύγκριση αυτή θα βασιστεί σε μετρήσεις πιθανότητας σφάλματος bit (Bit Error Rate, BER), που θα πραγματοποιηθούν σε ομόδονα ζωνοπερατά συστήματα με ορθογώνιο παλμό.

#### **A. Ομόδονο PSK**



Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο πομπός του συστήματος PSK δέχεται ως είσοδο μια δυαδική ακολουθία, τη μετατρέπει σε σύμβολα, την

πολλαπλασιάζει με τον ορθογώνιο παλμό, και κατόπιν το σήμα μεταφέρεται στη ζώνη μετάδοσης μέσω του διαμορφωτή. Το σήμα διέρχεται μέσα από κανάλι AWGN και φθάνει στο δέκτη του συστήματος. Εκεί αποδιαμορφώνεται και προκύπτει ένα δισδιάστατο διάνυσμα, το οποίο εισάγεται στο φωρατή όπου και αποφασίζεται ποιο σύμβολο στάλθηκε. Τέλος, ο demapper κάνει την αντίστροφη αντιστοίχιση από σύμβολα σε bits. Τα συστήματα αυτά περιγράφονται στη συνέχεια.

### ***Διαδική Ακολουθία Εισόδου***

Η είσοδος των δύο συστημάτων είναι μια ακολουθία bits, όπου οι τιμές 0 και 1 εμφανίζονται ισοπίθانا. Μια τέτοια ακολουθία μπορεί να παραχθεί αν χρησιμοποιήσετε κατάλληλα κάποια από τις συναρτήσεις `randsrc`, `rand`, `randn`. Το πλήθος των bits που πρέπει να στείλετε θα πρέπει να είναι της τάξης των  $L_b=10000-100000$  bits.

### ***Αντιστοιχία Bits - Συμβόλων***

Ο mapper είναι στην ουσία ένας μετατροπέας από bits σε σύμβολα. Ο mapper αντιστοιχίζει κάθε τμήμα πλήθους  $\log_2(M)$  bits σε ένα σύμβολο του M-αδικού αλφαβήτου. Αντίστοιχα, ο demapper δέχεται ως είσοδο το σύμβολο που έχει ανιχνεύσει ο φωρατής (decision device) του δέκτη, και βγάζει το αντιστοιχο μπλοκ από bits (Κάθε σύμβολο δίνει  $\log_2(M)$  bits).

Επίσης, στην περίπτωση των διαμορφώσεων PSK, ένα σημαντικό στοιχείο κατά την αντιστοίχιση αυτή είναι η κωδικοποίηση Gray. Σύμφωνα με αυτήν αν δύο σύμβολα είναι γειτονικά στο δισδιάστατο χώρο σημάτων, τότε σε αυτά ανατίθενται διατάξεις bits που διαφέρουν μόνο κατά ένα bit μεταξύ τους.

### ***Ορθογώνιος Παλμός***

Τα συστήματα που καλείστε να προσομοιώσετε χρησιμοποιούν ορθογώνιο παλμό για τη μετάδοση των συμβόλων. Ο ορθογώνιος παλμός ορίζεται ως:

$$g_T(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E_s}{T_{symbol}}} = \sqrt{\frac{2}{T_{symbol}}}, & 0 \leq t \leq T_{symbol} \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

όπου  $E_s$  είναι η ενέργεια ανά σύμβολο, την οποία κανονικοποιούμε ως  $E_s=1$ , και  $T_{symbol}$  είναι η περίοδος συμβόλου.

### Διαμόρφωση PSK

Κάθε σύμβολο της διαμόρφωσης M-PSK ορίζεται από δύο συνιστώσες

$$s_m = \begin{bmatrix} \sqrt{E_s} \cos\left(\frac{2\pi m}{M}\right) \\ \sqrt{E_s} \sin\left(\frac{2\pi m}{M}\right) \end{bmatrix}, m = 0, \dots, M-1$$

όπου  $E_s=1$  στην περίπτωση μας και για αυτό δε σημειώνεται η ενέργεια στο σχήμα. Κάθε συνιστώσα, αφού πολλαπλασιαστεί με τον ορθογώνιο παλμό, διαμορφώνεται από τη φέρουσα συχνότητα και προκύπτει το ζωνοπερατό σήμα:

$$s_m(t) = \cos\left(\frac{2\pi m}{M}\right) g_T(t) \cos(2\pi f_c t) + \sin\left(\frac{2\pi m}{M}\right) g_T(t) \sin(2\pi f_c t), 0 \leq t \leq T_{symbol}$$

### Χρονικές Μονάδες Προσομοίωσης

Τα συστήματα που θέλουμε να προσομοιώσουμε μεταδίδουν σύμβολα με ρυθμό  $R_{symbol}=250$  Kbps, οπότε η περίοδος συμβόλου είναι  $T_{symbol}=4$  msec. Στη ζώνη μετάδοσης, χρησιμοποιείται η φέρουσα συχνότητα  $f_c=2,5$  MHz, οπότε η περίοδος της φέρουσας είναι  $T_c=0,4$  msec. Στα πλαίσια της προσομοίωσης, για να έχουμε μια ικανοποιητική αναπαράσταση των ζωνοπερατών σημάτων, πραγματοποιείται δειγματοληψία 2 φορές μεγαλύτερη του ορίου του Nyquist, δηλαδή παίρνουμε 4 δείγματα ανά περίοδο φέρουσας, και άρα η περίοδος δειγματοληψίας είναι  $T_{sample}=T_c/4=0,1$  msec.

Εφόσον τα δύο συστήματα προσομοιώνονται σε ρυθμό δειγματοληψίας, κάθε τιμή των διανυσμάτων αντιστοιχεί σε χρόνο  $T_{sample}=0,1$  msec, τον οποίο μπορούμε να κανονικοποιήσουμε στο  $T_{sample}=1$ , οπότε αντίστοιχα προκύπτει:

$$T_{sample}=1, \quad T_c=4, \quad T_{symbol}=40$$

δηλαδή σε κάθε περίοδο φέρουσας κρατάμε 4 δείγματα, και κάθε περίοδος συμβόλου περιλαμβάνει 10 κύκλους φέρουσας ή 40 δείγματα.

### **AWGN Κανάλι**

Τα ζωνοπετατό σήμα που εκπέμπει ο πομπός των συστημάτων διέρχεται μέσα από ένα ιδανικό κανάλι προσθετικού θορύβου. Ο θόρυβος είναι λευκός και ακολουθεί Gaussian κατανομή μηδενικής μέσης τιμής και διασποράς  $\sigma^2 = N_0/2$ . Ο θόρυβος μπορεί να παραχθεί με χρήση της συνάρτησης randn ως

```
>> noise = sqrt( $\sigma^2$ )*randn(Lb/40,1) (Για M=2);
```

```
>> noise = sqrt( $\sigma^2$ )*randn(Lb/2*40,1) (Για M=4);
```

Η διασπορά του θορύβου καθορίζεται κάθε φορά από το SNR/bit που θέλουμε να έχουμε στο δέκτη του συστήματος. Υπενθυμίζεται ότι λόγω των κανονικοποιήσεων που έχουμε κάνει η ενέργεια ανά σύμβολο στα δύο συστήματα είναι  $E_s=1$ , οπότε η ενέργεια ανά bit για  $M=2$  θα είναι 1 και για  $M=4$  θα είναι  $E_b=1/2$ . Έτσι, αν θέλουμε να έχουμε  $\text{SNR}=10 \cdot \log_{10}(E_b/N_0)=10$ , θα πρέπει  $N_0=0,05$  και  $\sigma^2=0,025$ .

### **Αποδιαμορφωτής PSK**

Ο αποδιαμορφωτής του συστήματος PSK συσχετίζει (δηλαδή πολλαπλασιάζει και ολοκληρώνει-αθροίζει) το ληφθέν σήμα με τη φέρουσα και τον ορθογώνιο παλμό. Η συσχέτιση γίνεται στα χρονικά πλαίσια μιας περιόδου συμβόλου. Κατά την προσομοίωση υποθέτουμε ότι τόσο το PSK, όσο και το FSK είναι ομόδυνα (coherent). Αυτό σημαίνει ότι ο δέκτης γνωρίζει τη φάση της φέρουσας και τα χρονικά πλαίσια κάθε συμβόλου, δηλαδή είναι πλήρως συγχρονισμένος με τον πομπό.

Ο αποδιαμορφωτής συσχετίζει το ληφθέν σήμα με τις δύο συνιστώσες της φέρουσας, οπότε προκύπτουν δύο τιμές, δηλαδή ένα διάνυσμα  $\underline{r}$  που είναι η εκτιμηθείσα τιμή του τρέχοντος συμβόλου πάνω στον αστερισμό του PSK.

### **Φωρατής PSK**

Ο φωρατής δέχεται ως είσοδο το διάνυσμα  $\underline{r}$ , και αποφασίζει σε ποιο σύμβολο (όπως αυτά ορίστηκαν διανυσματικά παραπάνω) βρίσκεται εγγύτερα. Το διάνυσμα  $\underline{s}_m$  που θα έχει τη μικρότερη απόσταση από το  $\underline{r}$ , αντιστοιχεί και στο σύμβολο που στάλθηκε.

### ***Γ. Ομόδονο FSK***

Ο πομπός και ο δέκτης ενός ομόδονου τετραδικού FSK συστήματος φαίνονται στο επόμενο σχήμα. Στην περίπτωση του δυαδικού FSK έχουμε δύο κλάδους αντί για τέσσερις. Τα περισσότερα σημεία της προσομοίωσής του έχουν διευκρινιστεί παραπάνω στα πλαίσια του PSK. Οι μόνες διαφορές σχετίζονται με τη διαμόρφωση-αποδιαμόρφωση και το φωρατή. Να σημειωθεί ότι δεν έχει νόημα η κωδικοποίηση Gray, οπότε μπορείτε να κάνετε οποιαδήποτε αντιστοιχία bits-συμβόλων.

#### ***Διαμόρφωση - Αποδιαμόρφωση FSK***

Το σύστημα M-FSK που καλείστε να προσομοιώσετε, χρησιμοποιεί τα εξής M σήματα για καθένα σύμβολο:

$$\begin{aligned} s_m(t) &= g_T(t) \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi \frac{m}{T_{symbol}} t\right) \\ &= g_T(t) \cos\left(2\pi \left(f_c + \frac{m}{T_{symbol}}\right) t\right), m = 0, \dots, M-1 \end{aligned}$$

οπότε οι M φέρουσες διαφέρουν κατά  $1/T_{symbol}$  μεταξύ τους.

#### ***Φωρατής M-FSK (για M=2 και M=4)***

Καθένας από τους δύο ή τέσσερις κλάδους συσχέτισης του δέκτη παράγει μια τιμή  $r_i$ . Αυτές δίνονται στο φωρατή, και όποια έχει τη μεγαλύτερη τιμή, επιλέγεται το αντίστοιχο σύμβολο ως εκτιμηθέν.

### ***Γ. Μετρήσεις BER***

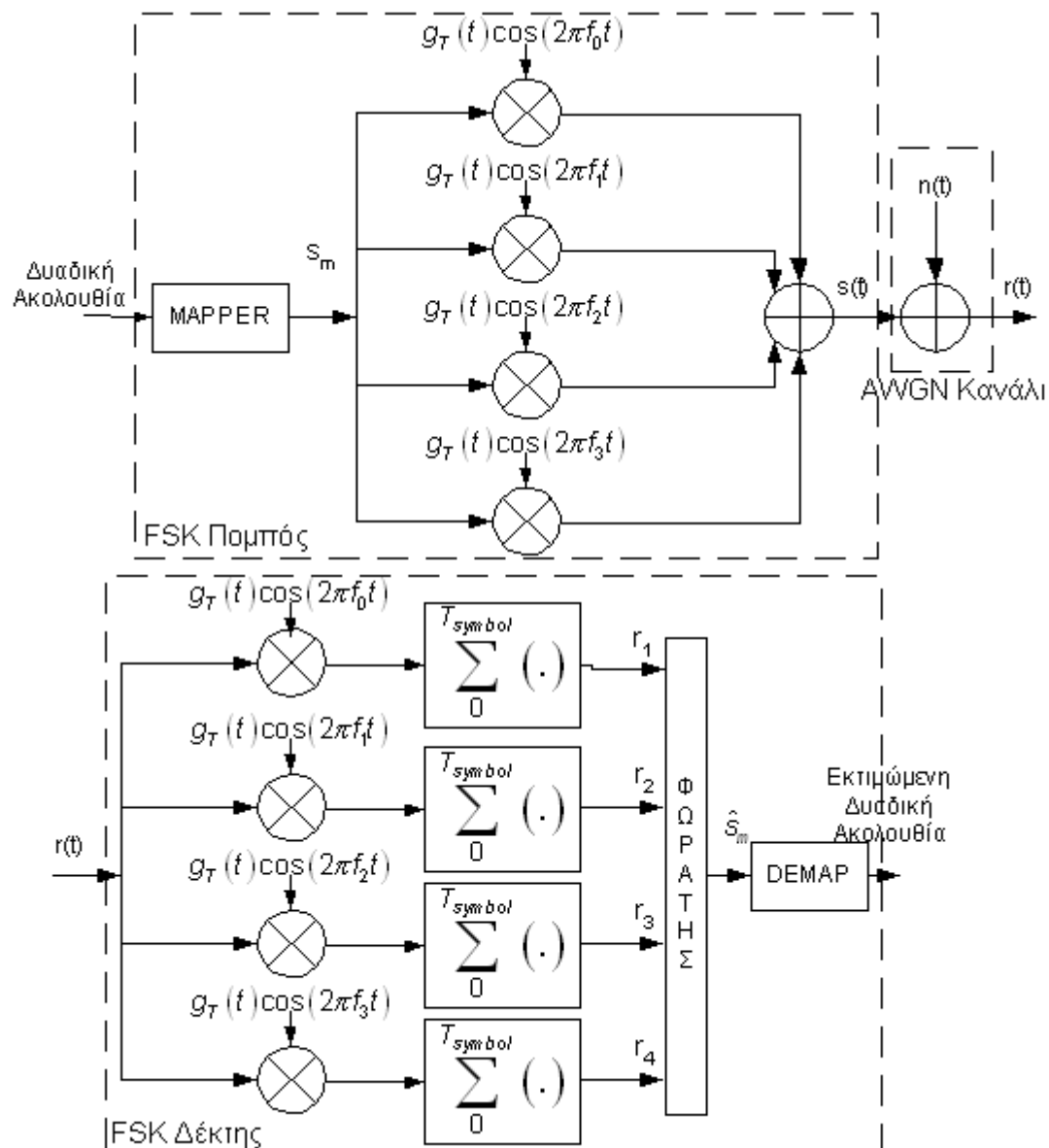
Για να μετρήσετε το BER (Bit Error Rate), δηλαδή την πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος bit, θα πρέπει να συγκρίνετε την τιμή bit που λάβατε με αυτήν που στείλατε. Για να πραγματοποιήσετε αξιόπιστες μετρήσεις BER, θα πρέπει αυτές να προέρχονται από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό δεδομένων. Ένας χοντρικός κανόνας είναι ότι για να μετρήσετε μια τιμή BER της τάξης του  $10^{-2}$  χρειάζεστε  $10^4$  bits δεδομένων, για BER της τάξης του  $10^{-3}$  χρειάζεστε  $10^5$  bits δεδομένων, κ.ο.κ. Ο παραπάνω κανόνας δεν σημαίνει ότι θα πρέπει να προσομοιώσετε παραπάνω από 100000 bits!

Οι καμπύλες BER συνήθως σχεδιάζονται σε λογαριθμική κλίμακα ως προς τον άξονα y, δηλαδή ως προς την πιθανότητα σφάλματος (βλέπε π.χ.

Σχ.7.57, όπου εκεί φαίνονται κάποιες καμπύλες SER (πιθανότητα σφάλματος συμβόλου)). Η θεωρητική πιθανότητα σφάλματος για το 2-PSK και το 4-PSK δίνεται από τη σχέση 7.6.51:

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

Για να δείτε ενδεικτικές θεωρητικές τιμές BER για το M-FSK, μπορείτε να ανατρέξετε στο Σχήμα 7.63.



### *Ερωτήσεις - Ζητούμενα*

1. Με βάση τις παραπάνω υποδείξεις, υλοποιήστε τα συστήματα 2-PSK και 4-PSK αναφερθείτε στα βασικά τους σημεία.
2. Με βάση τις παραπάνω υποδείξεις, υλοποιήστε τα συστήματα 2-FSK και 4-FSK και αναφερθείτε στα βασικά τους σημεία.
3. Για καθένα από τα δύο ζεύγη συστημάτων, μετρήστε την πιθανότητα σφάλματος και σχεδιάστε τις καμπύλες BER για τιμές του  $SNR=[0:2:16]dB$ . Οι καμπύλες BER θα πρέπει να σχεδιαστούν στο ίδιο γράφημα. Σχολιάστε τα αποτελέσματα. Ποιο σύστημα είναι καλύτερο ως προς την πιθανότητα σφάλματος για το ίδιο SNR; Πόσο παραπάνω SNR απαιτείται για να έχει το χειρότερο την ίδια πιθανότητα σφάλματος με το καλύτερο;
4. Πώς επηρεάζει η αύξηση του M τη συμπεριφορά των δύο συστημάτων;
5. Σχεδιάστε σε ξεχωριστό διάγραμμα την καμπύλη BER που προέκυψε για το 4-PSK από τις εξομοιώσεις. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάστε τη καμπύλη που προκύπτει για το 4-PSK αν δεν χρησιμοποιηθεί η κωδικοποίηση Gray. Επίσης σχεδιάστε και τη καμπύλη BER που προκύπτει από τον θεωρητικό υπολογισμό της πιθανότητας σφάλματος για το 4-PSK. Σχολιάστε τα αποτελέσματα.

### *Παρατηρήσεις*

- Η αναφορά παραδίδεται ηλεκτρονικά μέσω e-class. Στο τέλος της αναφοράς, παραθέστε τον κώδικα που υλοποιήσατε. Το αρχείο της αναφοράς θα πρέπει να είναι σε μορφή pdf και να έχει ως όνομα τον αριθμό μητρώο σας. Για παράδειγμα αν η άσκηση έχει γίνει από τους 2710 και 2711, θα πρέπει το αρχείο να έχει όνομα 2710-2711.pdf. Το αρχείο θα το ανεβάσετε στην ενότητα εργασίες του μαθήματος στο e-class.
- Οι ασκήσεις είναι ατομικές.
- Η παράδοση της άσκησης μπορεί να γίνει μέχρι τις **28/02/2011**, Δευτέρα.
- Απορίες σχετικές με την άσκηση θα λύνονται μόνο στα φροντιστήρια ή μέσω του forum του μαθήματος.