

Δορυφορικές Επικοινωνίες

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Ψηφιακές Τεχνικές Μετάδοσης

Καθηγητής

Νικόλαος Χ. Σαγιάς

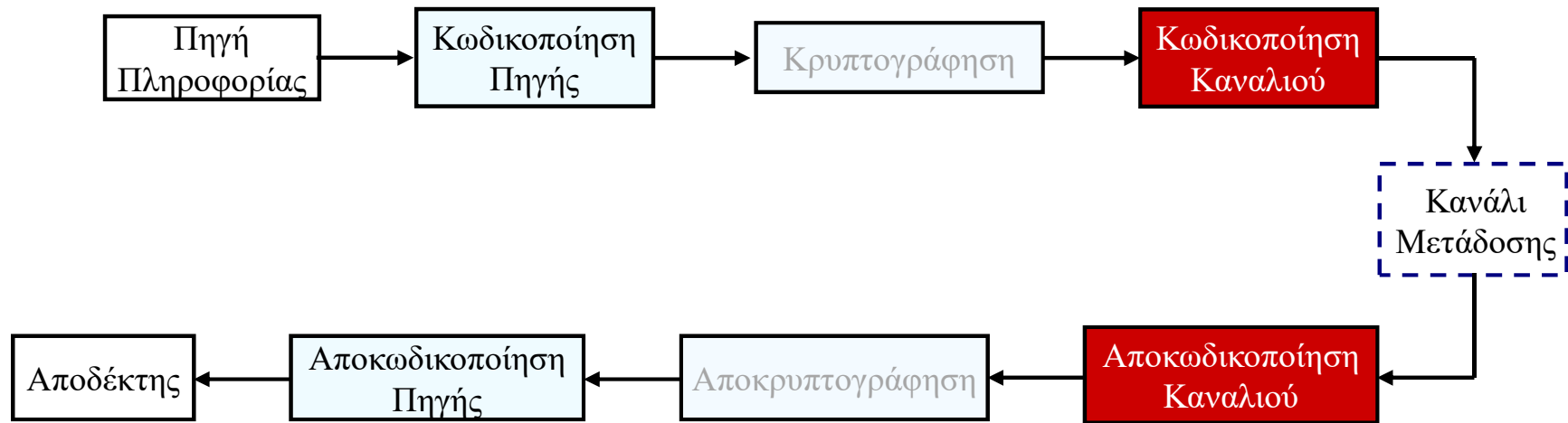
Webpage: <https://eclass.uop.gr/courses/TST207/>

e-mail: nsagias@uop.gr

Contents

- Εισαγωγικά
- Τροχιές
- Ανάλυση Ραδιοζεύξεων
- Τεχνικές Εκπομπής/Λήψης
- Πολλαπλή Πρόσβαση
- Δορυφορικά Δίκτυα
- Ειδικά Θέματα

Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης

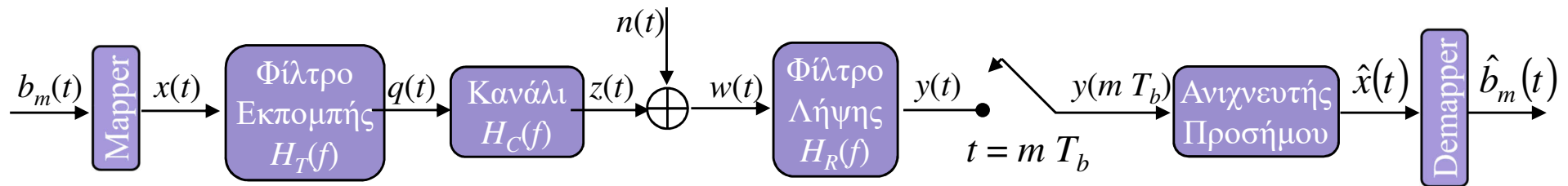


- Η κωδικοποίηση πηγής συμπιέζει, δηλαδή ελαττώνει, την πλεοναστική πληροφορία
- Η κρυπτογράφηση χρησιμεύει για προστασία της πληροφορίας
- Η κωδικοποίηση καναλιού εισάγει ελεγχόμενη πλεοναστική πληροφορία για προστασία της μεταδιδόμενης πληροφορίας από το κανάλι μετάδοσης

Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης

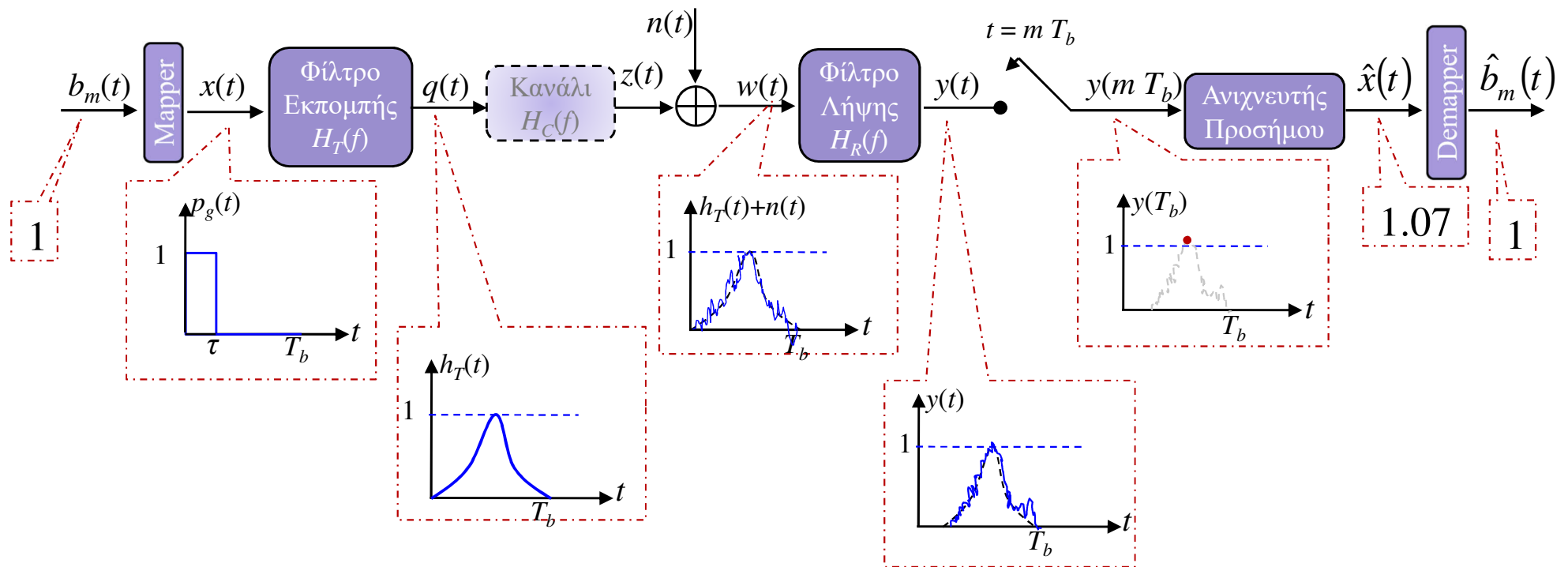
- Οι τεχνικές μετάδοσης περιλαμβάνουν τη σχεδίαση του πομπού/δέκτη υπό περιορισμούς:
 - Ζώνη συχνοτήτων
 - Ισχύς εκπομπής
 - Εύρος ζώνης σήματος
 - Ρυθμό μετάδοσης
 - Ρυθμό πληροφορίας bit
 - Πιθανότητα σφάλματος bit
- Στον πομπό χρησιμοποιούνται φίλτρα για τον περιορισμό των παρεμβολών εκτός ζώνης
- Στο δέκτη χρησιμοποιούνται φίλτρα για τον περιορισμό του θορύβου και των παρεμβολών εκτός ζώνης, καθώς και την αντιστάθμιση των παραμορφώσεων
- Συνολικά, η σχεδίαση αποσκοπεί στο να επιτευχθούν βέλτιστες επιδόσεις

Μορφοποίηση Παλμών Nyquist

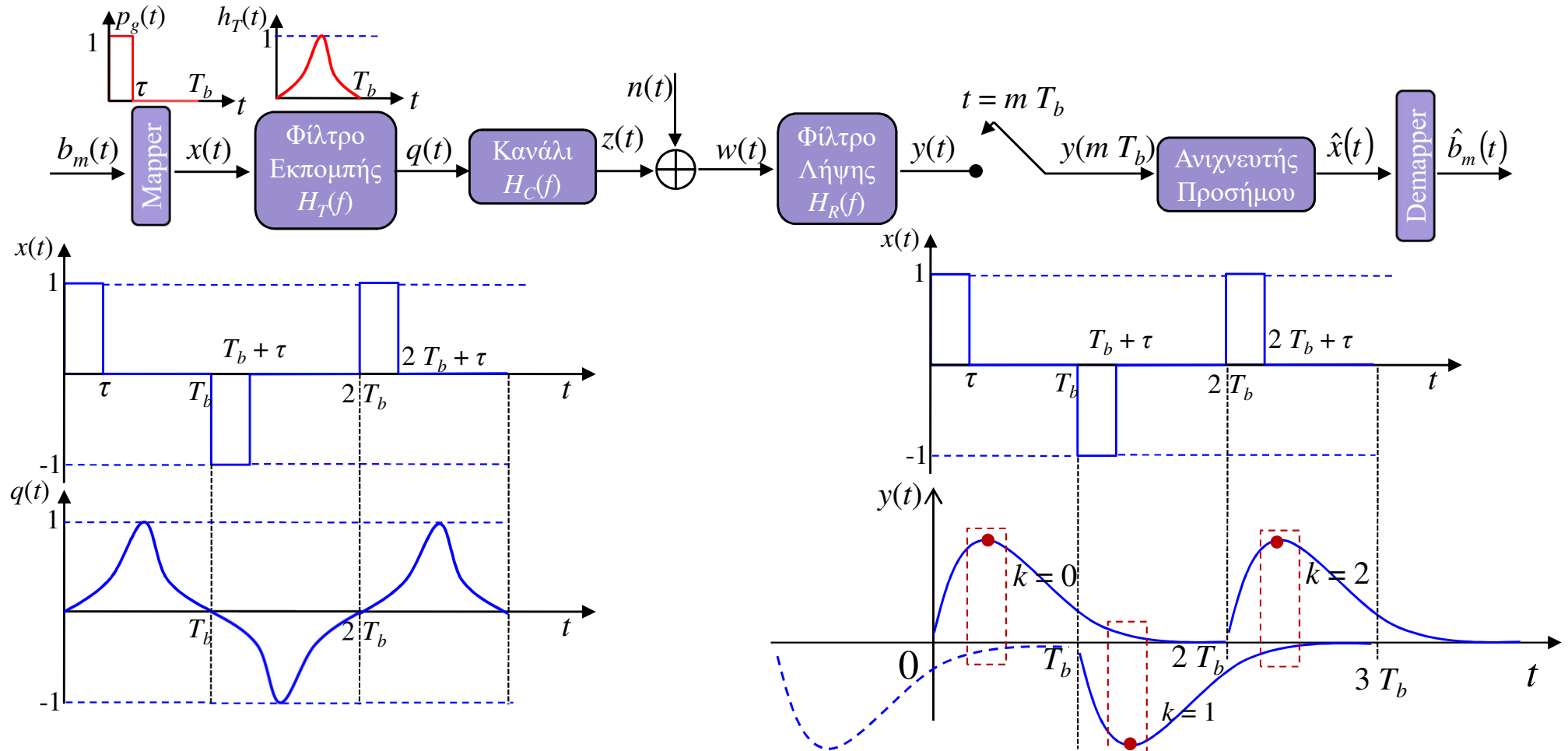


- Έστω μετάδοση δυαδικού PAM (θετικοί/αρνητικοί παλμοί) βασικής ζώνης
- Η ανάλυση που ακολουθεί αποτελεί τη βάση και για την ασύρματη μετάδοση με φέρον
- Το κωστό bit (0 ή 1) αντιστοιχίζεται σε ένα θετική η αρνητικό παλμό
- Οι παλμοί μορφοποιούνται αρχικά από το φίλτρο εκπομπής
- Το κανάλι μετάδοσης (ενδεχομένως) παραμορφώνει τους μεταδιδόμενους παλμούς
- Θερμικός θόρυβος AWGN προστίθεται στο σήμα που λαμβάνει ο δέκτης
- Το σύνθετο σήμα (συν θόρυβο) φιλτράρεται και δειγματοληπτείται
- Ο ανιχνευτής προσήμου αποφασίζει υπέρ θετικού ή αρνητικού παλμού βάσει προσήμου
- Οι θετικοί ή αρνητικοί παλμοί που λαμβάνονται αντιστοιχίζονται στα bit λήψης

Μορφοποίηση Παλμών Nyquist



Μορφοποίηση Παλμών Nyquist

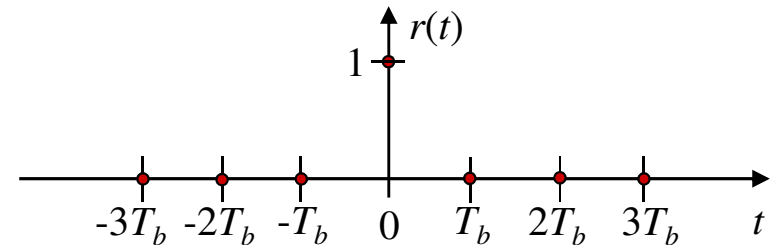


- Λόγω των φίλτρων οι παλμοί απλώνουν και εισάγεται διασυμβολική παρεμβολή (ISI)
- Μπορεί να εξαλειφθεί η ISI;

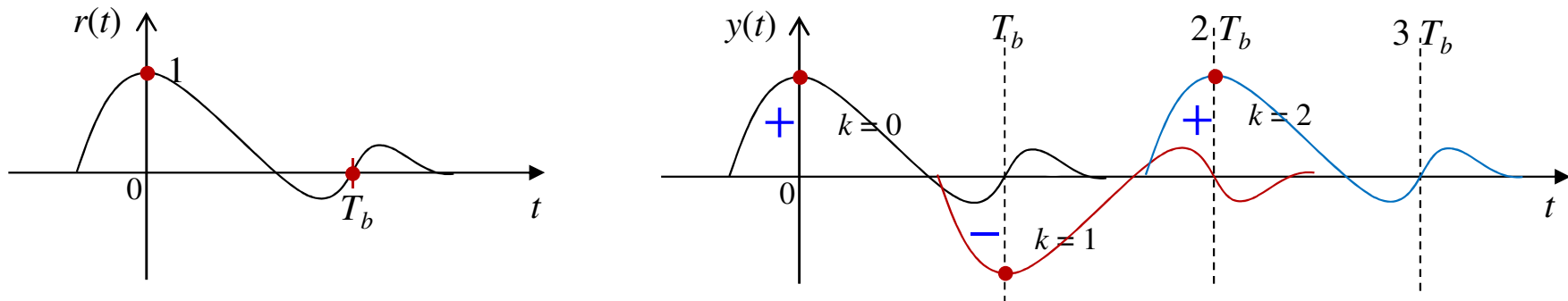
Μορφοποίηση Παλμών Nyquist

- Η ISI μπορεί να εξαλειφθεί με τη χρήση φίλτρων Nyquist
- Ένας παλμός Nyquist έχει την εξής ιδιότητα:

$$r(t = kT_b) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases}$$

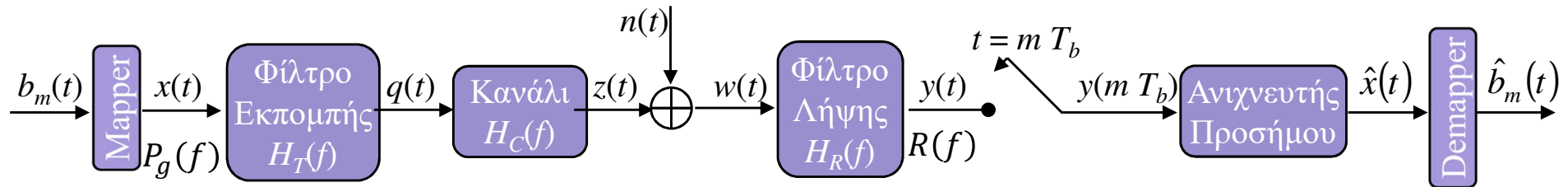


- Μπορούν να σχεδιαστούν πολλοί παλμοί που να ικανοποιούν την ιδιότητα αυτή
- Για παράδειγμα, για παλμός $r(t)$, το σήμα (παλμοί $+ - +$) θα είναι



- Δηλαδή, ο δειγματολήπτης θα εξάγει δείγματα χωρίς ISI

Μορφοποίηση Παλμών Nyquist



- Τα φίλτρα εκπομπής/λήψης σχεδιάζονται βάσει της παρακάτω ιδιότητας

$$P_g(f)H_T(f)H_C(f)H_R(f) = R(f)$$

$R(f) = \mathcal{F}\{r(t)\}$: Φάσμα πλάτους του παλμού Nyquist

- Για παλμούς διάρκειας $\tau \ll T_b$, $P_g(f) = \mathcal{F}\{p_g(t)\} \approx$ σταθερό. Παραλείποντας την επίδραση του καναλιού δηλαδή $|H_C(f)| = 1$, έχουμε $H_T(f)H_R(f) = R(f)$

- Μια επιλογή σχεδίασης είναι

$$H_T(f) = H_R(f) = \sqrt{R(f)}$$

- Με την παραπάνω επιλογή υπάρχει προσαρμογή μεταξύ των φίλτρων εκπομπής και λήψης
- Τα προσαρμοσμένα φίλτρα μεγιστοποιούν το SNR στην είσοδο του ανιχνευτή

Μορφοποίηση Παλμών Nyquist

- Μία πολύ δημοφιλής επιλογή για το $R(f)$ είναι τα φίλτρα δύναμης συνημιτόνου (RC)
- Η κρουστική απόκριση και η χαρακτηριστική συνάρτηση μεταφοράς τους είναι

$$r_{rc}(t) = \text{sinc}\left(\frac{t}{T_b}\right) \frac{\cos(\pi at/T_b)}{1 - (2at/T_b)^2}$$

$$R_{rc}(f) = \begin{cases} T_b, & 0 \leq |f| \leq \frac{1-a}{2T_b} \\ T_b \cos^2\left[\frac{\pi T_b}{2a}\left(|f| - \frac{1-a}{2T_b}\right)\right], & \frac{1-a}{2T_b} \leq |f| \leq \frac{1+a}{2T_b} \\ 0, & |f| \geq \frac{1+a}{2T_b} \end{cases}$$

- Μια σημαντική παράμετρος είναι ο συντελεστής επέκτασης α ($0 \leq \alpha \leq 1$)
- Ο συντελεστής επέκτασης καθορίζει το πλεονάζων εύρος ζώνης του παλμού

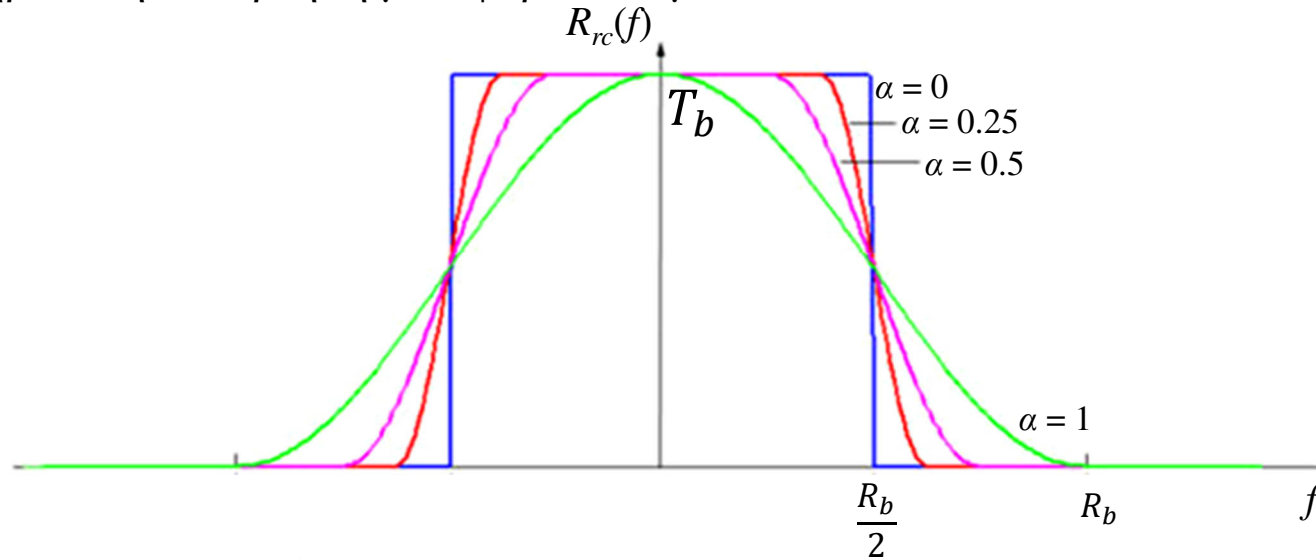
$$B_w = (\alpha + 1) \frac{R_b}{2}$$

- Το απαιτούμενο εύρος ζώνης για μετάδοση χωρίς ISI με παλμούς Nyquist είναι

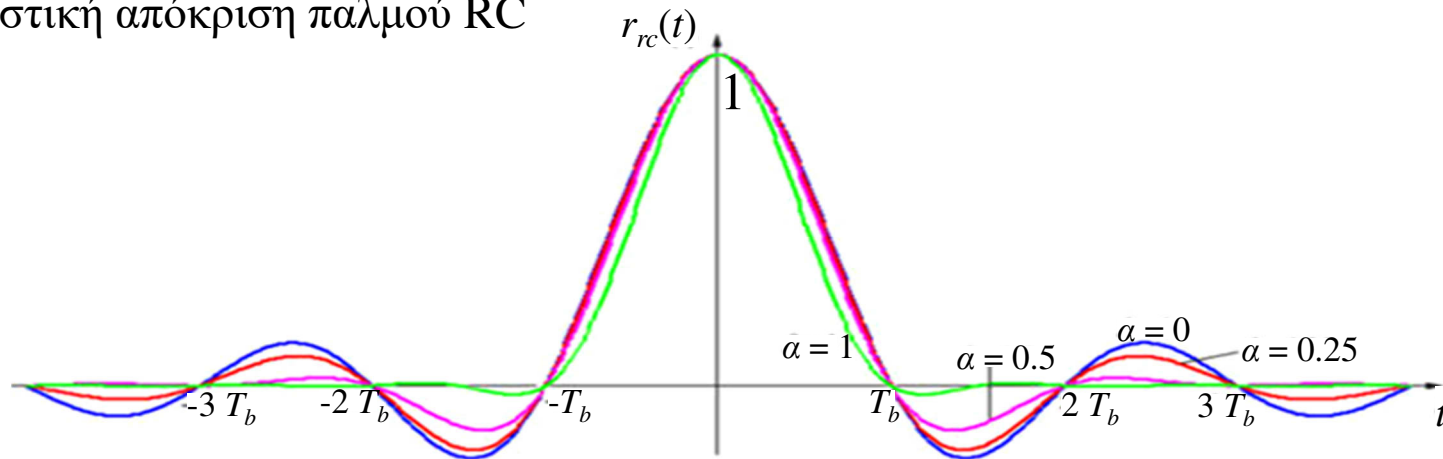
$$\frac{R_b}{2} \leq B_w \leq R_b$$

Μορφοποίηση Παλμών Nyquist

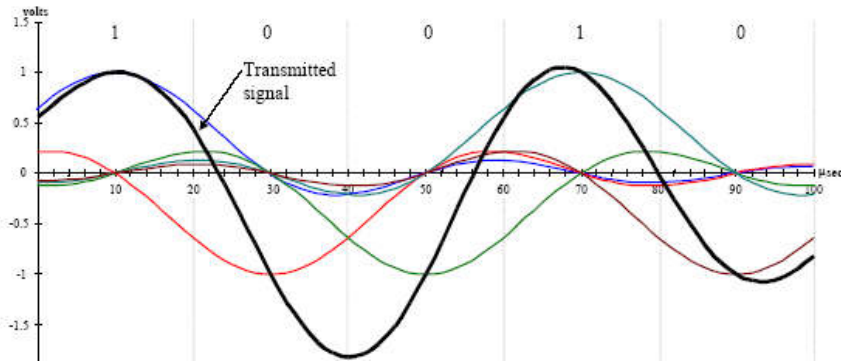
- Χαρακτηριστική συνάρτηση μεταφοράς παλμού RC



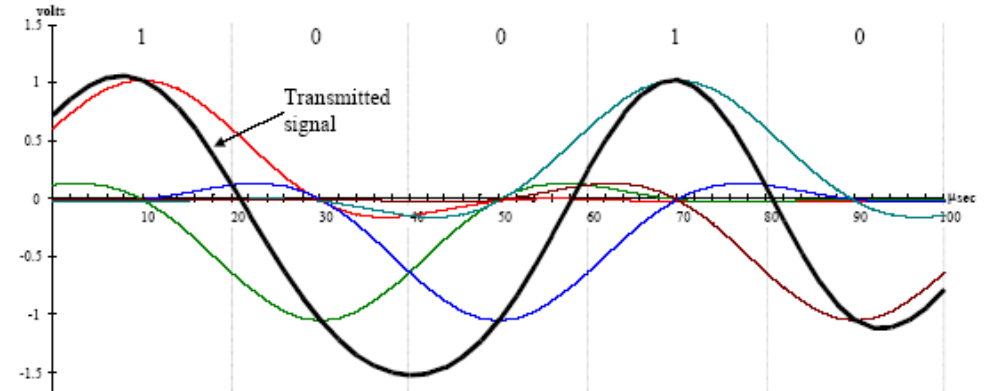
- Κρουστική απόκριση παλμού RC



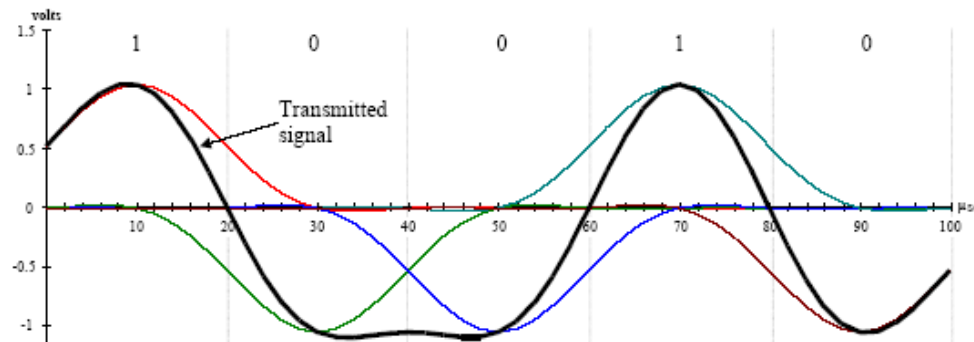
Μορφοποίηση Παλμών Nyquist



Ακολουθία 10010 bit, PAM με παλμούς RC ($\alpha = 0$)

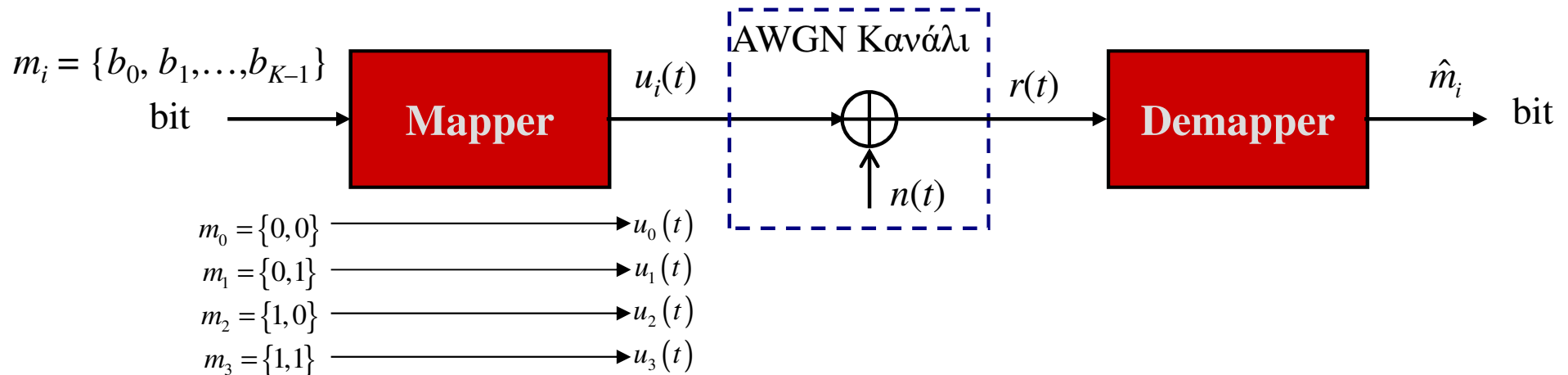


Ακολουθία 10010 bit, PAM με παλμούς RC ($\alpha = 0.5$)



Ακολουθία 10010 bit, PAM με παλμούς RC ($\alpha = 1$)

Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης



- Καθένα από τα M μηνύματα, m_i ($i = 0, 1, \dots, M-1$), αποτελείται από
$$K = \log_2(M) \text{ bit}$$
- Το πλήθος των M μηνυμάτων ονομάζεται τάξη διαμόρφωσης
- Συνήθως όλα τα m_i είναι ισοπίθανα μεταξύ τους
- Ο διαμορφωτής αντιστοιχίζει κάθε μήνυμα σε μία Μιαδική κυματομορφή ή σύμβολο, $u_i(t)$
- Το κανάλι AWGN εισάγει θόρυβο
- Ο ρόλος του δέκτη είναι να αναγνωρίσει ποιο σύμβολο εστάλη και συνεπώς ποιο μήνυμα

Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης

- Κατά τη μετάδοση με φέρον υπάρχει απαίτηση για φέρουσα συχνότητα $F_c \gg B_w$
 - Η ατμόσφαιρα δρα ως φίλτρο
 - Οι διαστάσεις της κεραίας πρέπει να είναι της τάξης του μήκους κύματος, δηλαδή $\lambda = c/F_c$
- Οι ψηφιακές τεχνικές διαμόρφωσης βασίζονται στην μεταβολή:
 - Του πλάτους, γνωστή ως [amplitude-shift keying](#) (ASK)
 - Της φάσης, γνωστή ως [phase-shift keying](#) (PSK)
 - Της συχνότητας, γνωστή ως [frequency-shift keying](#) (FSK)
- Επιπλέον υπάρχουν και συνδυασμοί των παραπάνω
- Με βάση το αν η φάση και η συχνότητα κλειδώνουν στο σήμα λήψης, οι τεχνικές διαμόρφωσης χαρακτηρίζονται ως
 - Σύμφωνες (βέλτιστες επιδόσεις)
 - Ασύμφωνες (υποβέλτιστες επιδόσεις)

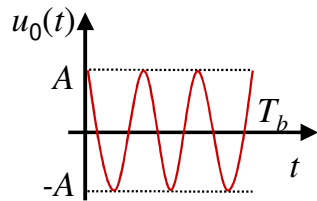
Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: ASK

- Το δυαδικό ASK παράγεται με πολλαπλασιασμό ενός NRZ σήματος με φέρον

$$\begin{array}{ccc}
 & \cos(2\pi F_c t) & \\
 & \downarrow & \\
 s_m(t) & \rightarrow \otimes \rightarrow & u_m(t) = s_m(t) \cos(2\pi F_c t) \\
 \text{Σήμα NRZ} & & \text{Σήμα ASK}
 \end{array}$$

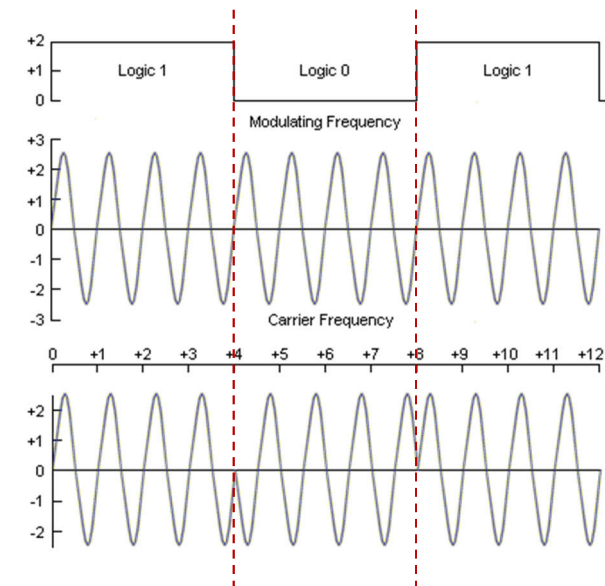
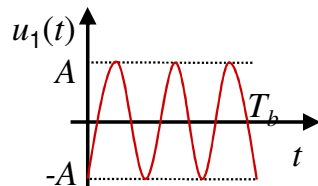
- Για το bit “1” παράγεται το σύμβολο

$$u_0(t) = A \cos(2\pi F_c t)$$



- Για το bit “0” παράγεται το σύμβολο

$$u_1(t) = -A \cos(2\pi F_c t)$$

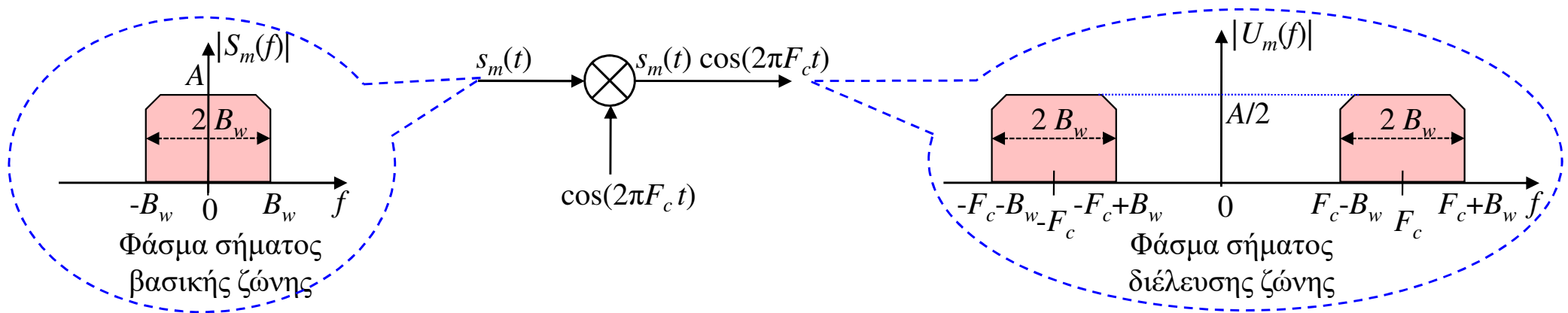


Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: ASK

- Ο μετασχηματισμός Fourier του $s_m(t)$ δίνει $S_m(f) = \mathcal{F}\{s_m(t)\}$
- Μια σημαντική ιδιότητα του μετασχηματισμού Fourier είναι η διαμόρφωση
- Ο μετασχηματισμός Fourier του $u_m(t)$ είναι

$$U_m(f) = \mathcal{F}\{u_m(t)\} = \mathcal{F}\{s_m(t) \cos(2\pi F_c t)\} = \mathcal{F}\left\{s_m(t) \frac{\exp(j2\pi F_c t) + \exp(-j2\pi F_c t)}{2}\right\}$$

$$U_m(f) = \frac{1}{2}S_m(f - F_c) + \frac{1}{2}S_m(f + F_c)$$



Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: ASK

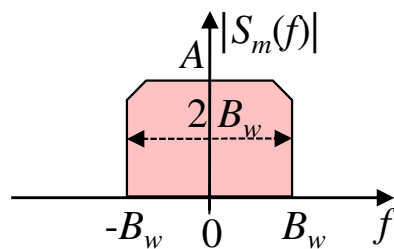
- Τα φίλτρα πάντα υλοποιούνται στην ενδιάμεση συχνότητα IF
- Μια προφανής διαφορά μεταξύ μετάδοσης στη βασική ζώνη και στη ζώνη διέλευσης RF είναι ότι για τη 2^η απαιτείται διπλάσιο εύρος ζώνης
- Συνεπώς, το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τη μετάδοση είναι

$$B_w = R_s(1 + a)$$

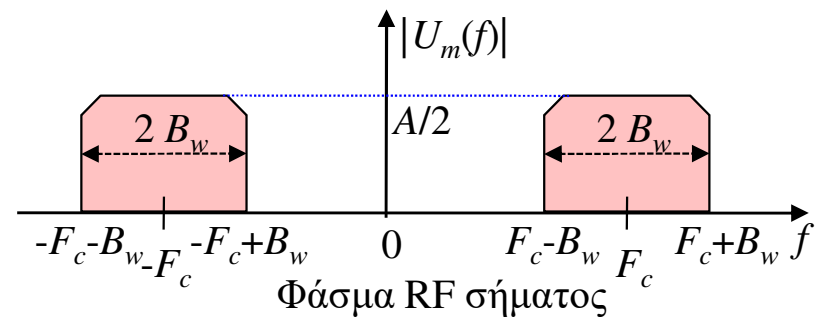
με $0 \leq a \leq 1$ τον συντελεστή επέκτασης και R_s τον ρυθμό συμβόλων $R_s = \frac{R_b}{\log_2(M)}$

- Ειδικότερα, το απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι μεταξύ R_s και $2 R_s$
- Παρόλο που $B_w \geq R_s$, το εύρος ζώνης θορύβου του φίλτρου λήψης είναι πάντα

$$B_n = R_s$$



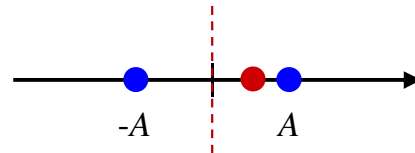
Φάσμα σήματος βασικής ζώνης



Φάσμα RF σήματος

Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: ASK

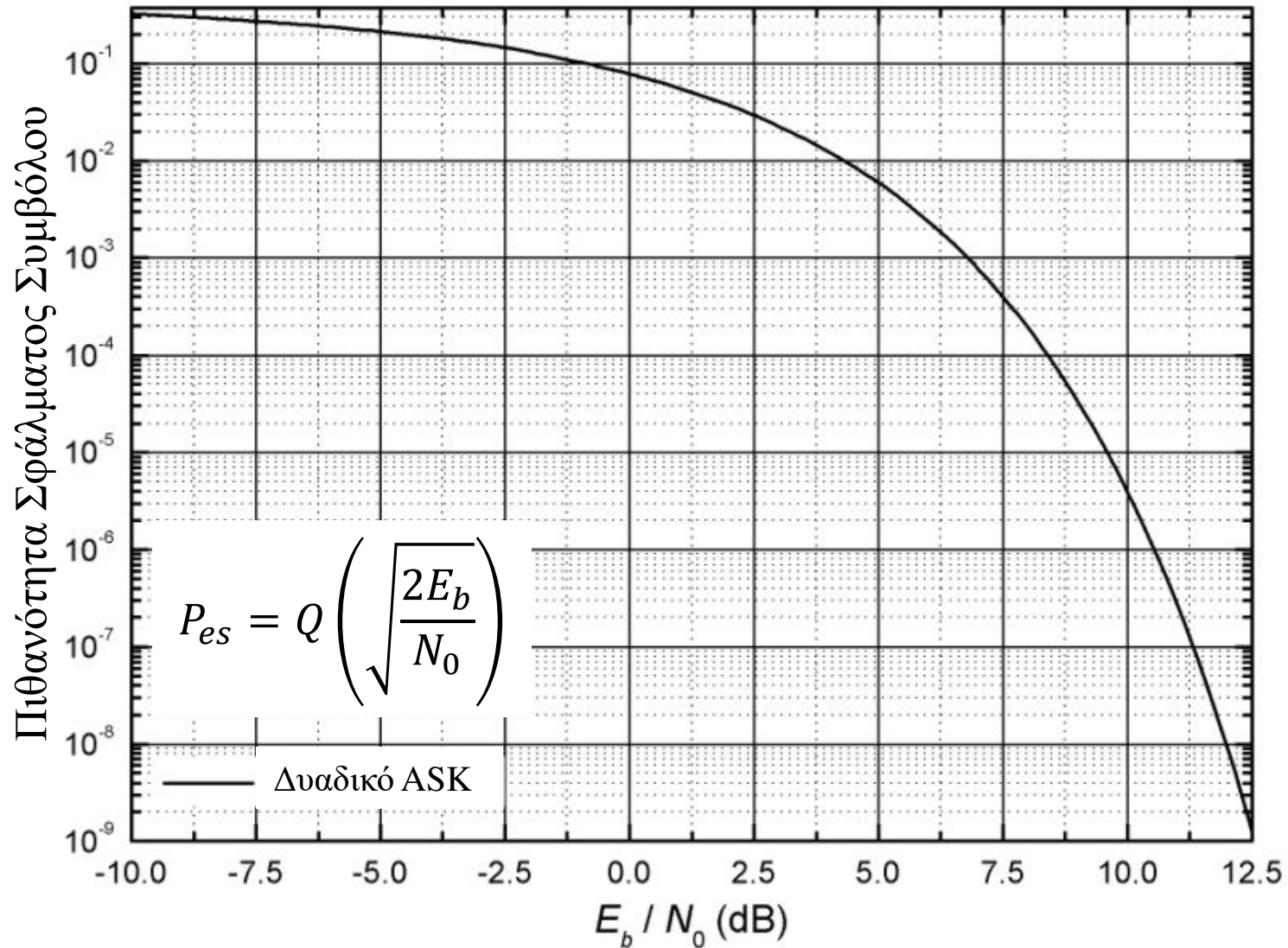
- Το διάγραμμα αστερισμού του δυαδικού ASK είναι



- Με βάση το πρόσημο του αριθμού που εξάγεται από τον δειγματολήπτη, ο ανιχνευτής προσήμου αποφαινεται αν εστάλη το $u_0(t)$ ή το $u_1(t)$
- Η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου του του δυαδικού ASK είναι

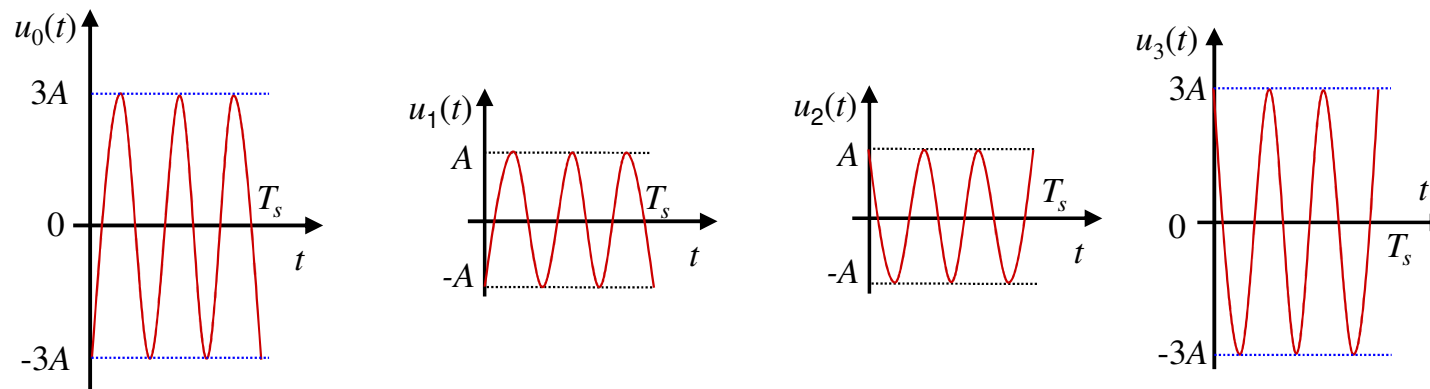
$$P_{es} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: ASK

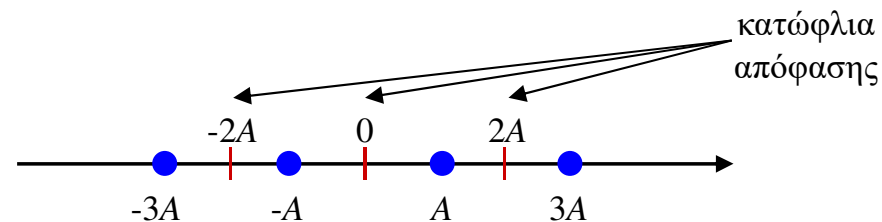


Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: ASK

- Προκειμένου να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης, χρησιμοποιούνται περισσότερα σύμβολα
- Για το Μιαδικό ASK απαιτούνται M συνημίτονα διαφορετικού πλάτους
- Για παράδειγμα, το τετραδικό ASK είναι ως εξής



- Τα κατώφλια απόφασης του ανιχνευτή βρίσκονται στα μεσοδιαστήματα των σημείων του αστερισμού



Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: ASK

- Δυαδικό ASK: Η πιθανότητα σφάλματος bit είναι

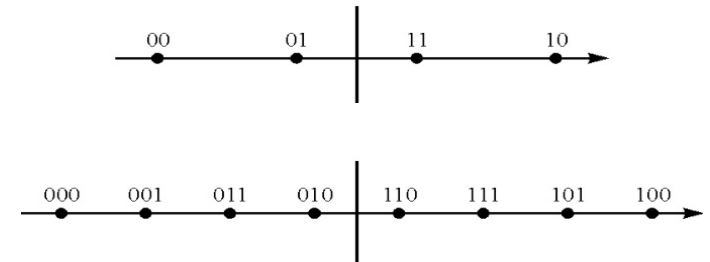
$$P_{be} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

- Μιαδικό ASK: Η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου είναι

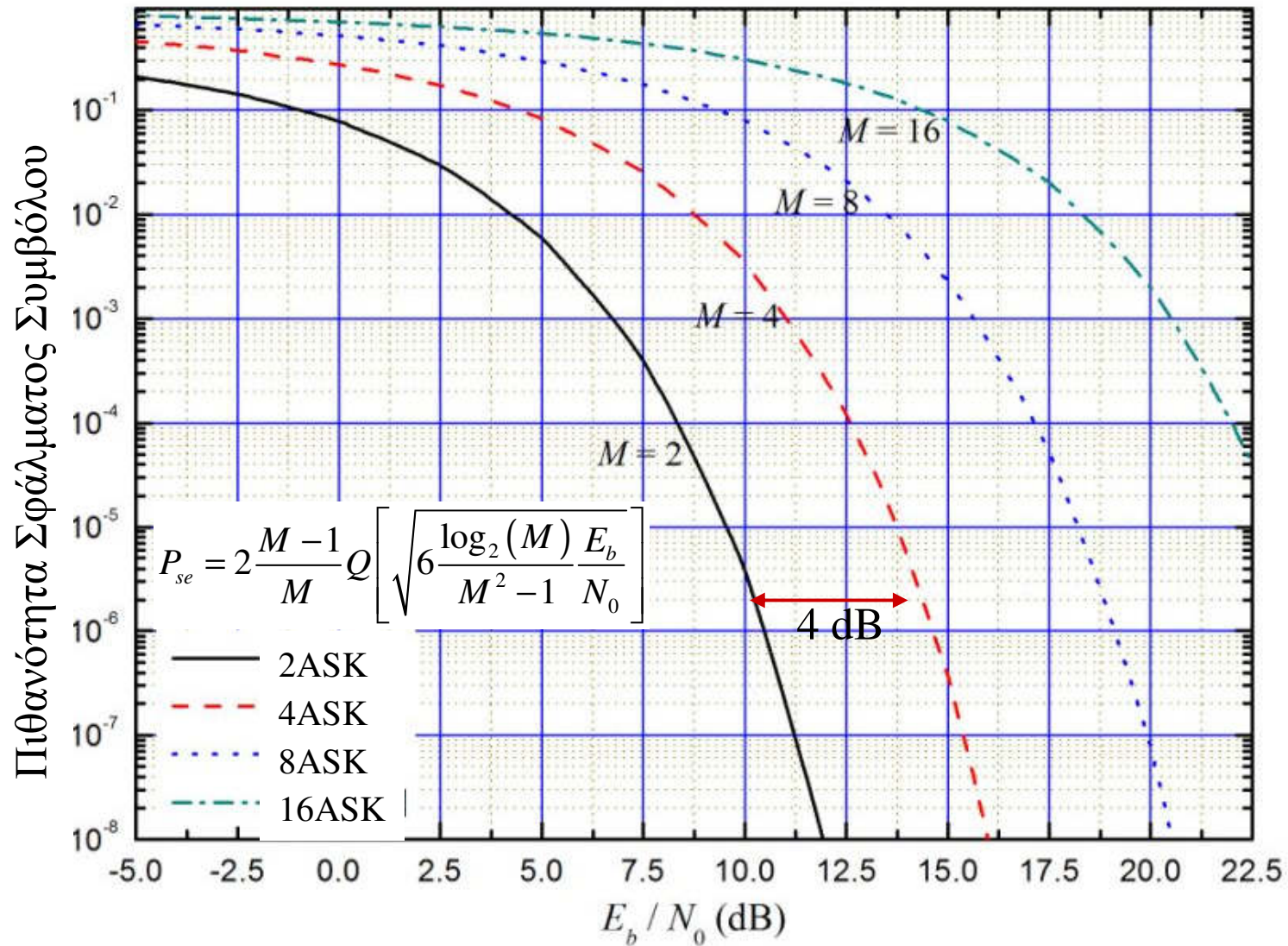
$$P_{se} = 2 \frac{M-1}{M} Q\left[\sqrt{6 \frac{\log_2(M) E_b}{M^2-1 N_0}}\right]$$

- Στην κωδικοποίηση Gray τα σημεία του αστερισμού διαφέρουν μόνο κατά 1 bit
- Με κωδικοποίηση Gray και υψηλό E_b/N_0 , 1 λάθος σύμβολο αντιστοιχεί σε 1 λάθος bit και τότε

$$P_{be} \approx \frac{P_{se}}{\log_2(M)}$$



Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: ASK

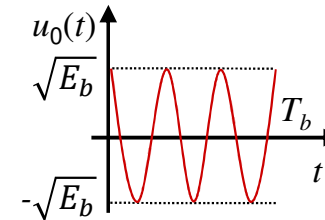


Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: PSK

- Για το δυαδικό PSK (BPSK) χρησιμοποιούνται 2 σήματα (φάση 0 και π rad)

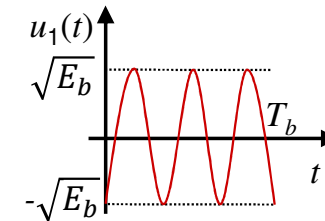
- Για το bit “1”, η κυματομορφή του BPSK είναι

$$u_0(t) = \sqrt{E_b} \cos(2\pi F_c t), \quad 0 \leq t < T_b$$



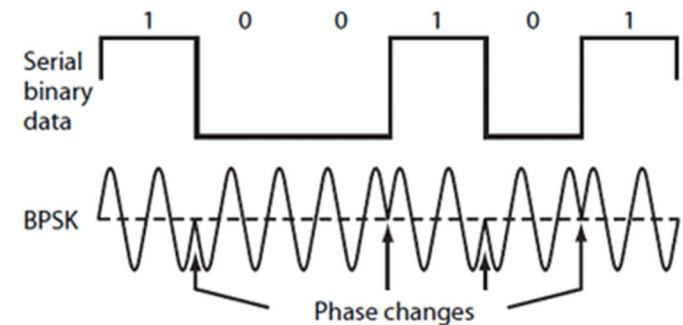
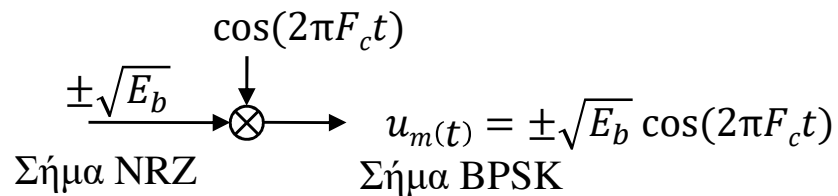
- Για το bit “0”, η κυματομορφή του BPSK είναι

$$u_1(t) = \sqrt{E_b} \cos(2\pi F_c t + \pi), \quad 0 \leq t < T_b$$



- Σημειώνουμε ότι το BPSK είναι πανομοιότυπο με το δυαδικό ASK

- Συνθήκη: $T_b F_c = k \gg 1$, με k ακέραιο

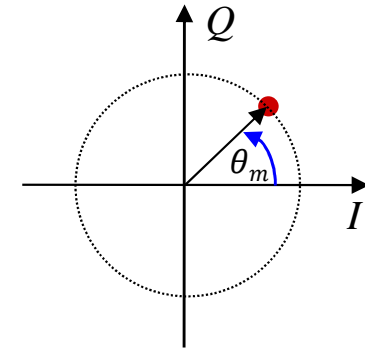


Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: PSK

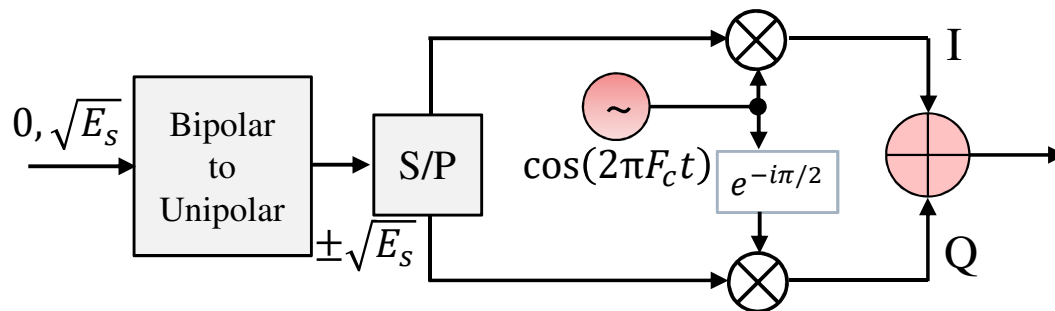
- Για το Μιαδικό PSK έχουμε M φάσεις $\theta_m = 2\pi \frac{m+1/2}{M}$, με $m = 0, 1, \dots, M-1$
- Για παράδειγμα για το τετραδικό PSK (QPSK), $\theta_m = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}$
- Τα σύμβολα M -PSK γράφονται

$$u_m(t) = \sqrt{E_s} \cos(2\pi F_c t + \theta_m), \quad 0 \leq t < T_s$$

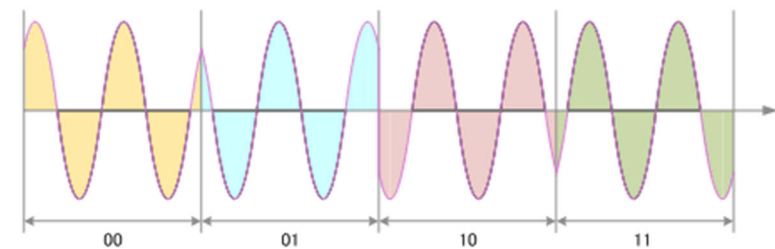
με $T_s F_c = k \gg 1$, με k ακέραιο



Διαμορφωτής QPSK



Σήμα QPSK



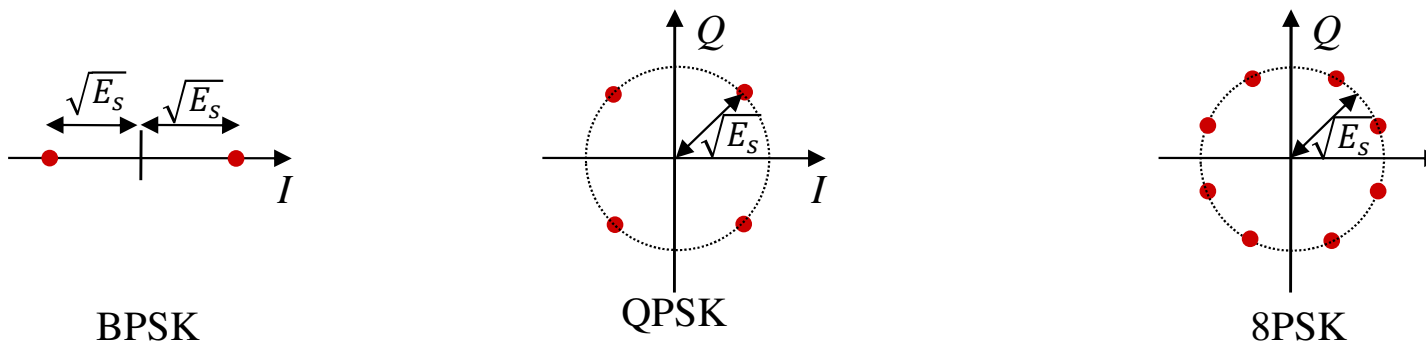
Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: PSK

- Τα σύμβολα M -PSK μπορούν να γραφούν ως ένα άθροισμα από 2 κάθετα σήματα I/Q

$$\begin{aligned}u_m(t) &= \sqrt{E_s} \cos(2\pi F_c t + \theta_m) = \\ &= \sqrt{E_s} \cos(\theta_m) \cos(2\pi F_c t) - \sqrt{E_s} \sin(\theta_m) \sin(2\pi F_c t)\end{aligned}$$

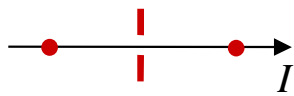
- Η ισοδύναμη I/Q αναπαράσταση στη βασική ζώνη του M -PSK είναι

$$s_m(t) = \sqrt{E_s} \cos(\theta_m) + j\sqrt{E_s} \sin(\theta_m) = \sqrt{E_s} \exp(j\theta_m)$$

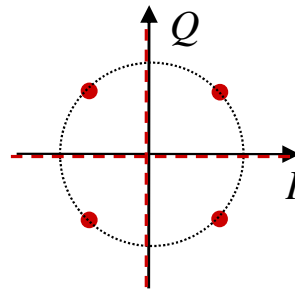


Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: PSK

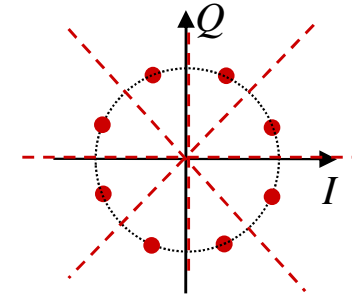
- Στο Μιαδικό PSK τα κατώφλια απόφασης τοποθετούνται ως εξής



Κατώφλι απόφασης BPSK

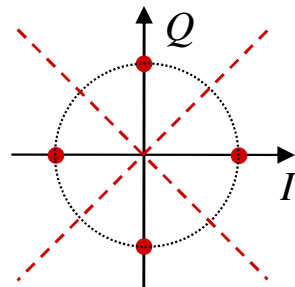


Κατώφλια απόφασης QPSK

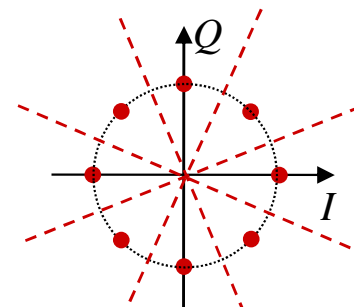


Κατώφλια απόφασης 8PSK

- Μια περιστραμμένη έκδοση του αστερισμού δεν αλλάζει τις επιδόσεις του M -PSK



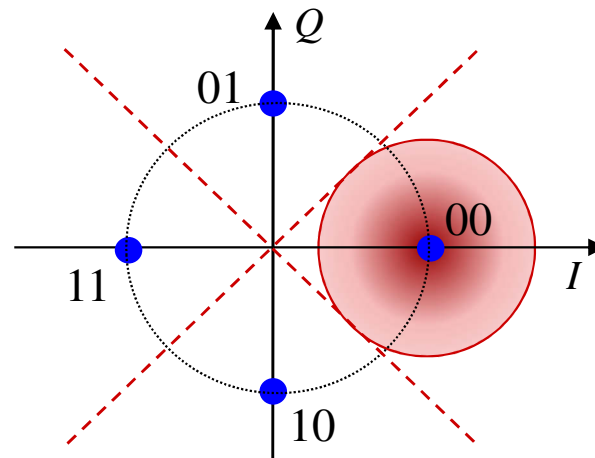
Κατώφλια απόφασης QPSK



Κατώφλια απόφασης 8PSK

Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: PSK

- Ερώτημα: Πώς συνδέεται η πιθανότητα σφάλματος bit P_{be} με την πιθανότητα σφάλματος συμβόλου P_{se} ;
- Απάντηση: Εξαρτάται από την αντιστοίχιση των K bits στα M σύμβολα
- Η βέλτιστη αντιστοίχιση είναι η κωδικοποίηση Gray, όπου 2 γειτονικά σύμβολα διαφέρουν μόνο 1 bit
- Για υψηλό SNR σπάνια ένα σύμβολο θα μετακινηθεί πιο μακριά από το γειτονικό του

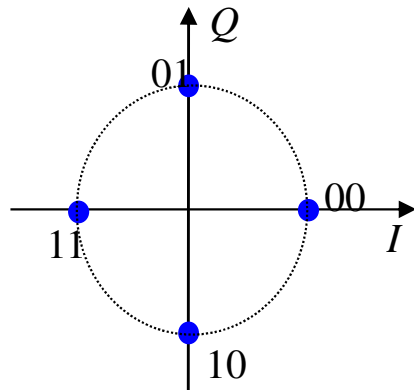


QPSK με κωδικοποίηση Gray

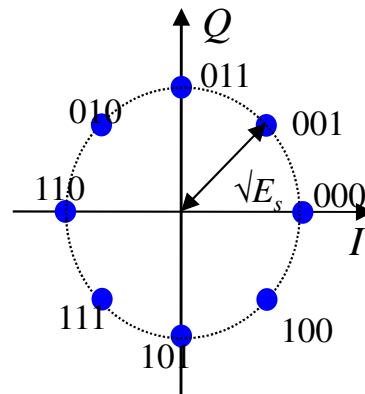
Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: PSK

- Με κωδικοποίηση Gray και υψηλό SNR, 1 λάθος σύμβολο θα αντιστοιχεί σε 1 λάθος bit και άρα

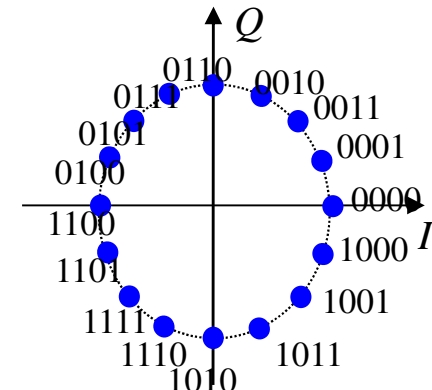
$$P_{be} \approx \frac{P_{se}}{\log_2(M)}$$



QPSK με κωδικοποίηση Gray



8PSK με κωδικοποίηση Gray



16PSK με κωδικοποίηση Gray

Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: PSK

- Για το BPSK, η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου είναι

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

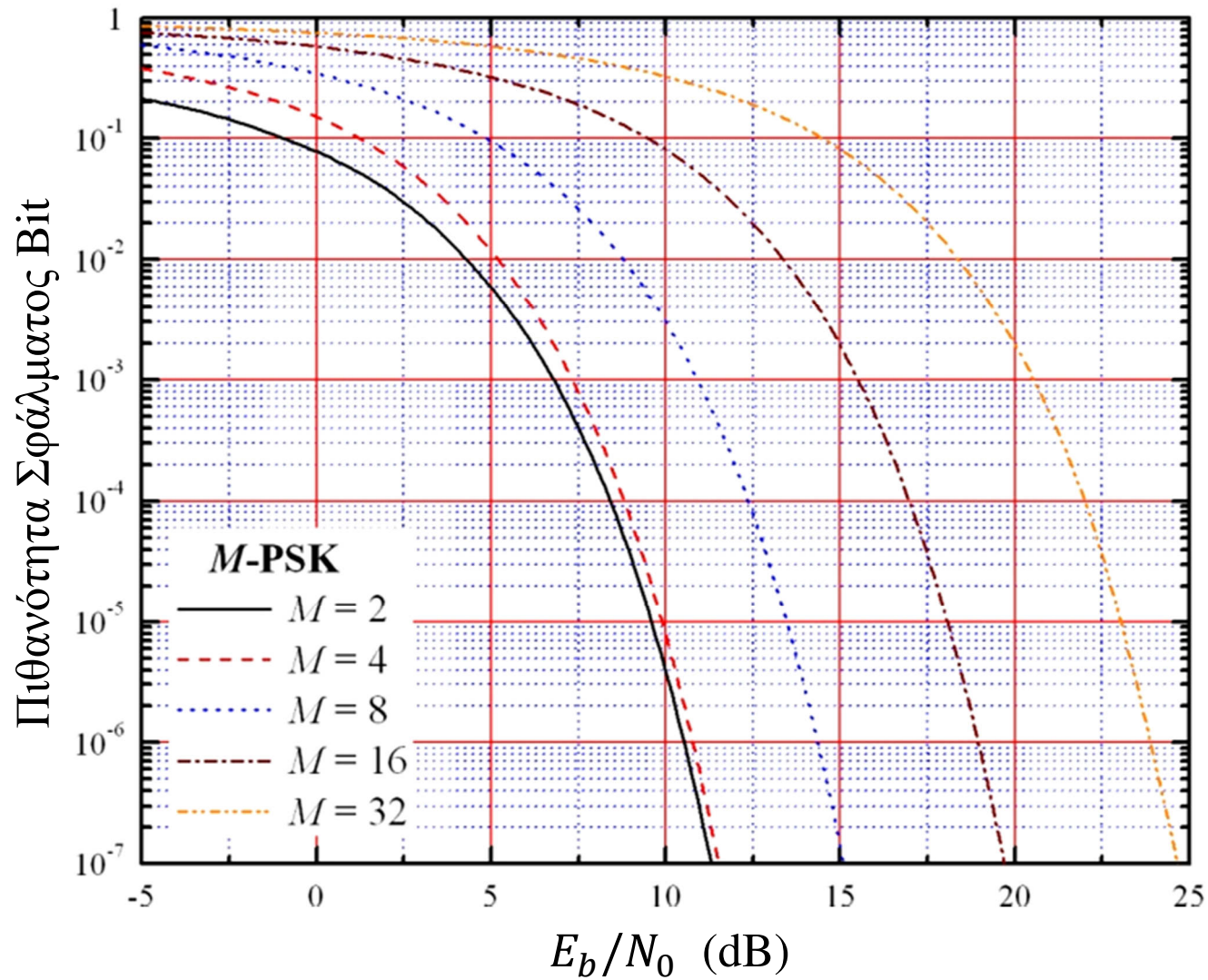
- Για το QPSK, η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου είναι

$$P_{se} = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) - \frac{1}{2}Q^2\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

- Για υψηλό E_b/N_0 και κωδικοποίηση Gray, τα BPSK και QPSK έχουν περίπου ίσες πιθανότητες σφάλματος bit
- Για M -PSK με $M \geq 4$, μία προσέγγιση της πιθανότητας σφάλματος συμβόλου είναι

$$P_{se} \approx 2Q\left[\sqrt{2\frac{E_s}{N_0}} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)\right]$$

Ψηφιακές Τεχνικές Διαμόρφωσης: PSK



Κωδικοποίηση Καναλιού



- Ο λόγος μεταξύ των k και n ονομάζεται ρυθμός του κώδικα

$$\mathcal{R} = \frac{k}{n} < 1$$

- Με δεδομένο τον περιορισμό του ρυθμού μετάδοσης bit από την χωρητικότητα καναλιού $R_c \leq C_c$, ο ρυθμός πληροφορίας των ακωδικοποίητων bit $R_b \leq R_c$ θα είναι

$$R_b = \frac{k}{n} R_c$$

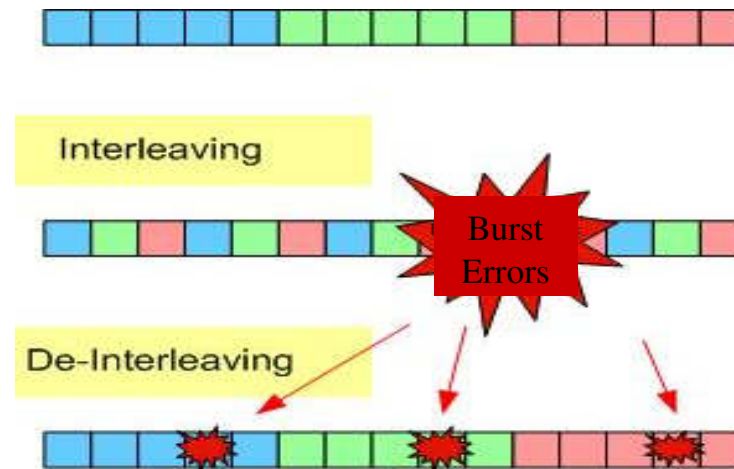
- Δηλαδή, ελαττώνεται ο ρυθμός πληροφορίας για τη βελτίωση της πιθανότητας σφάλματος bit

Κωδικοποίηση Καναλιού

- Η κωδικοποίηση καναλιού περιλαμβάνει:
 - Ανίχνευση σφάλματος: Ανίχνευση ενός ή περισσότερων λάθος bit
 - Διόρθωση σφάλματος: Διόρθωση ενός ή περισσότερων λάθος bit
- Η πρόσθια διόρθωση λάθους (FEC) εφαρμόζεται στα συστήματα ευρυεκπομπής, ενώ η αυτόματη αίτηση επανάληψης (ARQ) χρησιμοποιείται όταν υπάρχει κανάλι επιστροφής
- Στα συστήματα VSAT με χαμηλό SNR, μία προτιμητέα επιλογή για βελτίωση κατά 3 dB είναι η χρήση FEC ρυθμού 1/2, αντί της αύξησης της διαμέτρου της κεραίας κατά 41%
- Η κωδικοποίηση καναλιού δεν πρέπει να συγχέεται με την κρυπτογράφηση
- Η κρυπτογράφηση είναι η διαδικασία προστασία των bit πληροφορίας από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση

Κωδικοποίηση Καναλιού

- Η διεμπλοκή κάνει την κωδικοποίηση FEC πιο αποτελεσματική σε καταιγιστικά σφάλματα
- Πριν τη διαμόρφωση τα κωδικοποιημένα bit «ανακατεύονται» με συγκεκριμένο τρόπο
- Τα καταιγιστικά σφάλματα επηρεάζουν πολλά διαδοχικά bit και δεν μπορούν να διορθωθούν
- Ωστόσο, στη λήψη, πριν την αποκωδικοποίηση τα bit επαναφέρονται στην σωστή σειρά
- Με τον τρόπο αυτό τα συνεχόμενα bit διασπείρονται και γίνονται τυχαία, ώστε να μπορούν να διορθωθούν αποτελεσματικά κατά την αποκωδικοποίηση
- Για τη διαδικασία αυτή απαιτούνται buffer υψηλής χωρητικότητας στο δέκτη



Κωδικοποίηση Καναλιού

- Ένα απλό παράδειγμα ανίχνευσης σφάλματος είναι η χρήση των bit ισοτιμίας
- Στον κώδικα ASCII κάθε 7 bit προστίθεται ένα ακόμη ώστε να έχουμε:
 - Άρτια ισοτιμία: Το σύνολο των bit 1 πρέπει να είναι άρτιος, πχ 00001111
 - Περιττή ισοτιμία: Το σύνολο των bit 1 πρέπει να είναι περιττός, πχ 00001110
- Αν στα παραπάνω bit συμβεί ένα απλό σφάλμα χαλάει ο κανόνας της άρτιας ή περιττής ισοτιμίας και ο δέκτης ανιχνεύει το σφάλμα
- Ωστόσο, αν συμβούν 2 ταυτόχρονα σφάλματα, δε θα γίνουν αντιληπτά από το δέκτη

Κωδικοποίηση Καναλιού

- Οι επαναληπτικοί κώδικες επαναλαμβάνουν τα bit κατά περίττο αριθμό πχ 3 φορές
- Η αποκωδικοποίηση γίνεται βάσει πλειοψηφικής λογικής
 - Για παράδειγμα, το 1100, θα γίνει 111 111 000 000
 - Αν ληφθεί 101 110 001 100, εύκολα θα αποκωδικοποιηθεί ως 111 111 000 000
- Ποιο αποδοτικοί κώδικες διόρθωσης σφάλματος είναι οι:
 - Γραμμικοί κώδικες μπλοκ και CRC
 - Συνελκτικοί, BCH
 - Turbo
 - LDPC
- Οι κώδικες Turbo και LDPC είναι ιδιαίτερα ισχυροί

Κωδικοποίηση Καναλιού

- Η απολαβή κωδικοποίησης G_c ορίζεται ως τη διαφορά στο SNR μεταξύ κωδικοποιημένης και ακωδικοποίητης μετάδοσης για την επίτευξη της ίδια πιθανότητας σφάλματος bit P_{be}
- Για παράδειγμα η απολαβή κωδικοποίησης κώδικα Turbo ρυθμού 1/2 με BPSK είναι περίπου 8 dB για $P_{be} = 10^{-5}$

- Μετάδοση χωρίς Κωδικοποίηση

$$\frac{C}{N_0} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_u R_b$$

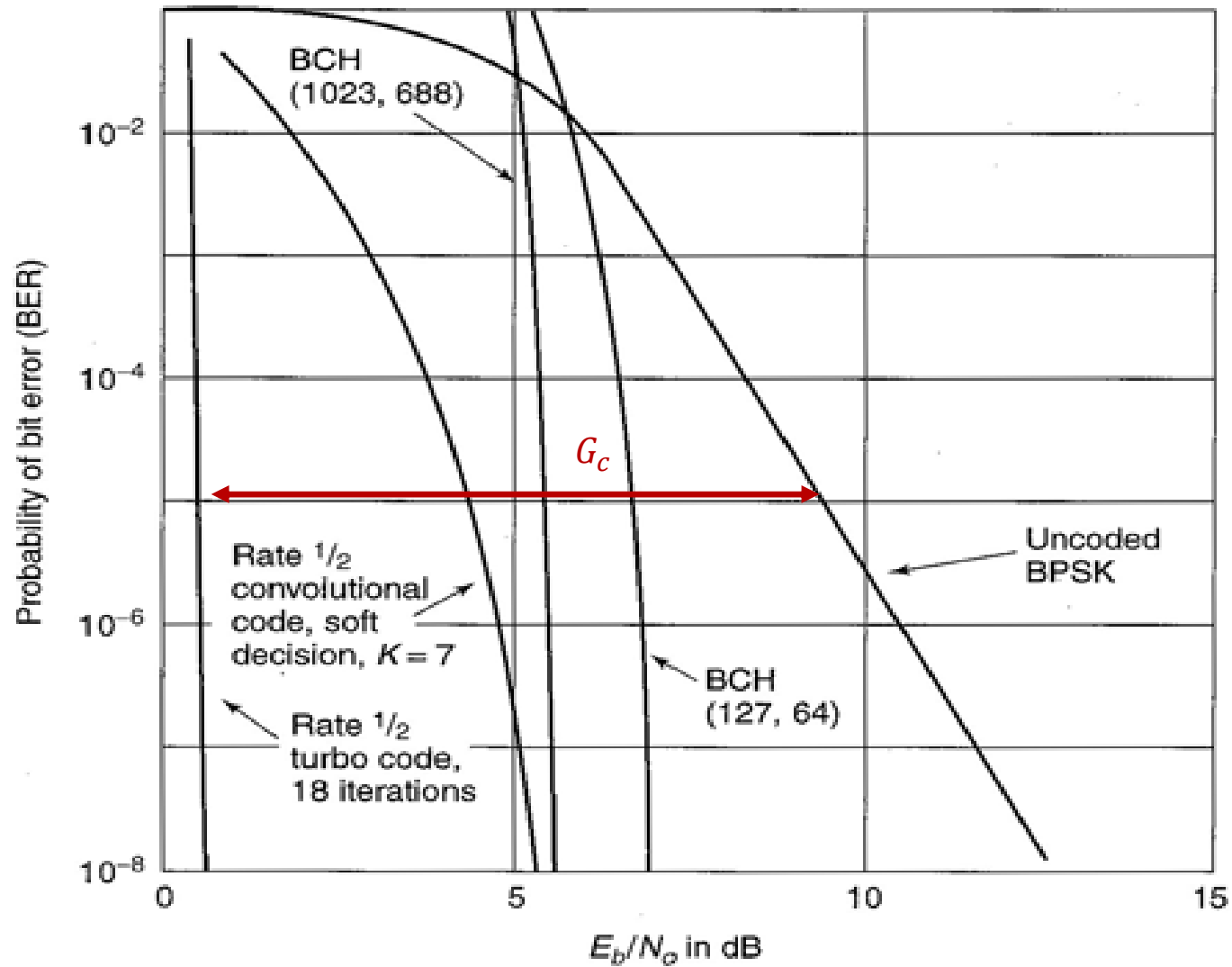
- Μετάδοση με Κωδικοποίηση

$$\frac{C}{N_0} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_c \frac{R_b}{\eta}$$

- Η απολαβή κωδικοποίησης είναι

$$G_c = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{u,dB} - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{c,dB} = -10 \log_{10}(\eta) \text{ (dB)}$$

Κωδικοποίηση Καναλιού



Πρωτόκολλα Μετάδοσης

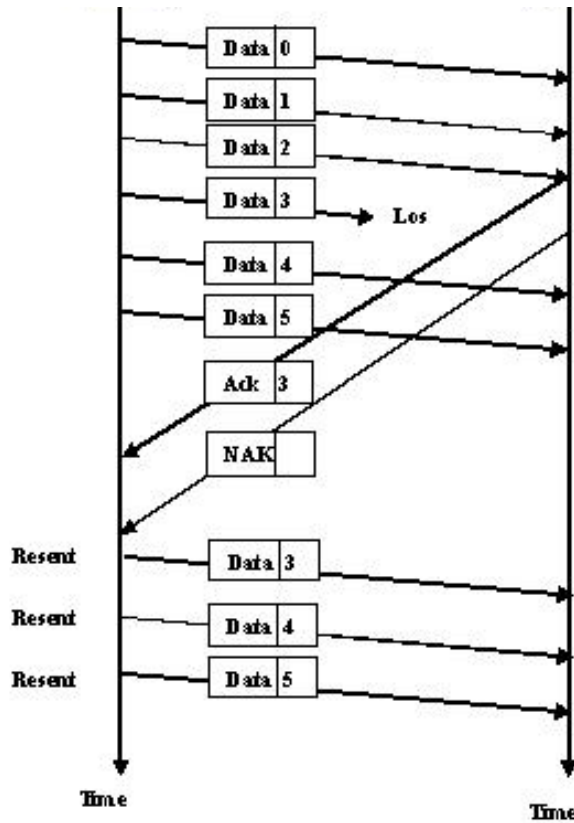
- Όταν υπάρχει κανάλι επιστροφής (RC), το BER μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω
- Όταν ανιχνευτεί σφάλμα, αποστέλλεται μήνυμα μη επιβεβαίωσης (NAK) προς το δορυφόρο
- Δεν είναι αποδοτική η αποστολή μηνύματος επιβεβαίωσης (ACK) προς το δορυφόρο για κάθε πακέτο που λαμβάνεται σωστά
- Συνήθως το κανάλι επιστροφής υλοποιείται βάσει της επίγειας υποδομής για την αποφυγή μεγάλων καθυστερήσεων

Πρωτόκολλα Μετάδοσης

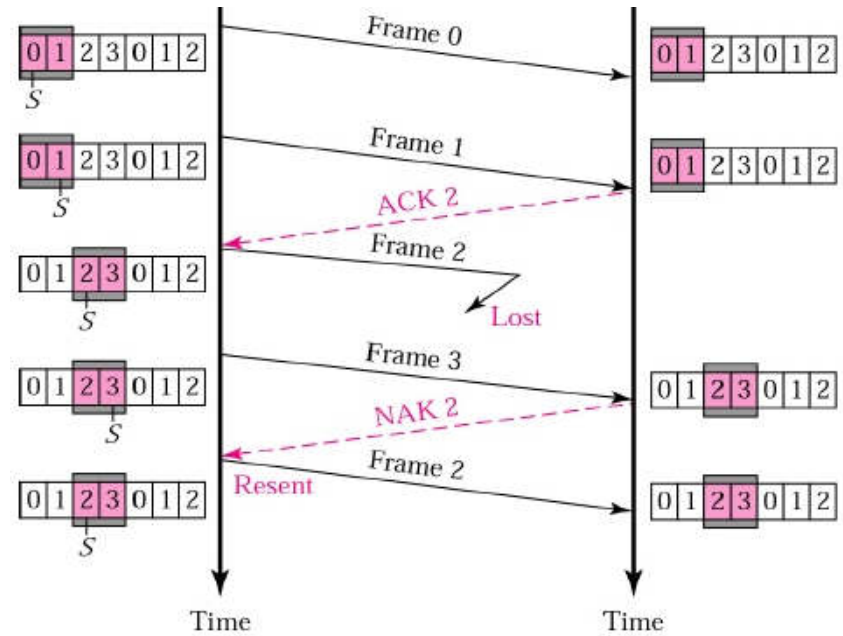
Κύρια Πρωτόκολλα Μετάδοσης

- Stop-and-wait: Ο πομπός αποστέλλει δεδομένα και αναμένει σήμα ACK για να αποστείλει το επόμενο
- Go-back-N: Ο πομπός αποστέλλει πακέτα δεδομένα συνεχόμενα και όταν λάβει σήμα NAK(N) ξαναξεκινάει την αποστολή από το N ωστό πακέτο όπου σημειώθηκε πρόβλημα
 - Απαιτείται τουλάχιστον 0.5s buffer στον πομπό
 - Είναι αποδοτικότερο από το πρωτόκολλο stop-and-wait
- Selective repeat ARQ: Ο πομπός αποστέλλει πακέτα δεδομένα συνεχόμενα και όταν λάβει σήμα NAK(N), αποστέλλει επιλεκτικά μόνο το N ωστό πακέτο όπου σημειώθηκε το πρόβλημα
 - Απαιτούνται μεγάλοι buffer τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη

Πρωτόκολλα Μετάδοσης



Πρωτόκολλο Go-back-N



Πρωτόκολλο Επιλεκτικής Επανάληψης

Πρωτόκολλα Μετάδοσης

- Στο πρωτόκολλο TCP, ο αποστολέας δεν στέλνει επόμενο πακέτο αν δεν λάβει σήμα ACK
- Αν το σήμα επιβεβαίωσης καθυστερήσει το πρωτόκολλο δέχεται ότι το πακέτο χάθηκε και γίνεται η επαναποστολή του
- Στην περίπτωση αυτή το πρωτόκολλο TCP ελαττώνει το ρυθμό μετάδοσης για να μειώσει την συμφόρηση του δικτύου και να ελαχιστοποιήσει των ανάγκη των επανεκπομπών
- Στα δορυφορικά δίκτυα γίνεται χρήση της επιτάχυνσης του TCP ή πλαστογράφησης της IP για την αντιστάθμιση του μεγάλου χρόνου μετάδοσης από το διαστημικό τμήμα
- Όταν η διάταξη πλαστογράφησης (μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού) λάβει κίνηση που προορίζεται για δορυφόρο, αμέσως επιστρέφει σήμα ACK προς τον αποστολέα