Πανεπιστημιο Πελοποννησου

Κώδικες Γραμμής, PAM και PPM

Ψηφιακες Επικοινωνιες

Χειμερινό Εξάμηνο

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνίων

Νικόλαος Χ. Σαγιάς

Καθηγητής

Webpage: http://eclass.uop.gr/courses/TST215

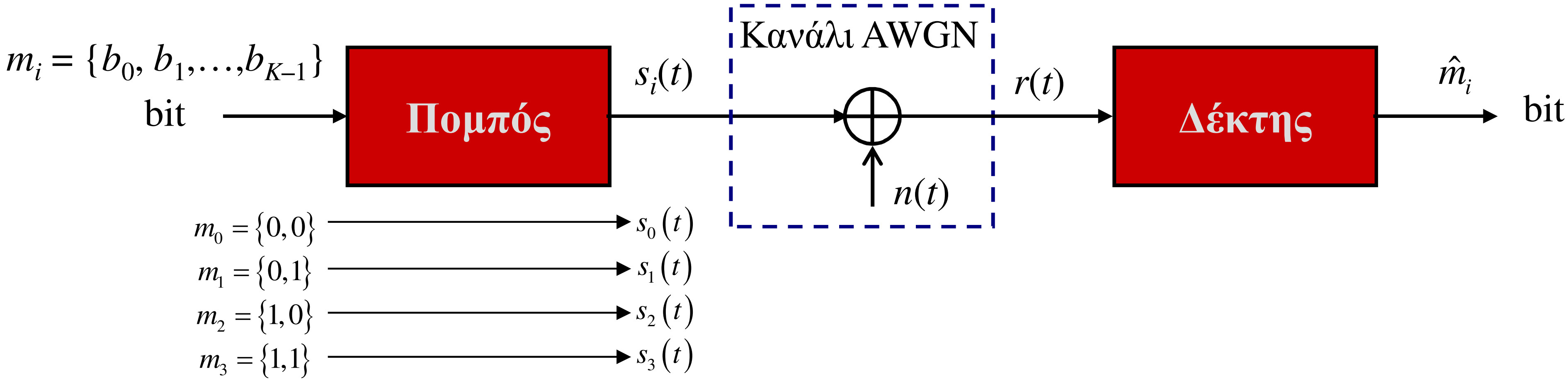
e-mail: nsagias@uop.gr

12/10/2020 1:33:44 πμ

Περιεχόμενα Μαθήματος

- Εισαγωγικά
  - Θόρυβος AWGN
  - Βασικές παράμετροι και περιορισμοί
- Διαμόρφωση Βασικής Ζώνης
  - Κώδικες γραμμής
  - Διαμόρφωση πλάτους παλμών (PAM)
  - Διαμόρφωση θέσης παλμών (PPM)
- Κανάλια Περιορισμένου Εύρους Ζώνης
  - Διασυμβολική παρεμβολή
  - Φίλτρα Nyquist
  - Διάγραμμα οφθαλμού
  - Παλμοί ελεγχόμενης ISI
- Βέλτιστοι Δέκτες
  - Προσαρμοσμένο φίλτρο
  - Δέκτες δυαδικής διαμόρφωσης
- Σχεδίαση Βέλτιστου Δέκτη
  - Άλγεβρα Σημάτων
  - Αποδιαμορφωτές
  - Ανιχνευτές
  - Επιδόσεις συστημάτων
- Διαμόρφωση Διέλευσης Ζώνης
  - Σύμφωνο: ASK, FSK, PSK, QAM
  - Ασύμφωνο: DPSK, FSK

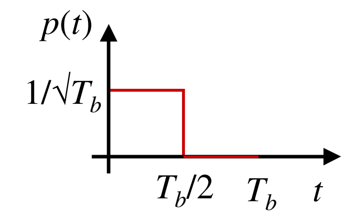
Διαμόρφωση Βασικής Ζώνης

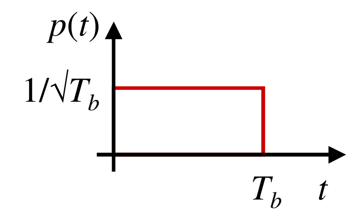


- Έστω M μηνύματα, m_i ($i = 0, 1, \ldots, M-1$), το καθένα αποτελούμενο από K bit, $K = \log_2(M)$
- Ο αριθμός M ονομάζεται τάξη της διαμόρφωσης (*modulation order*)
- Τα bit της πηγής είναι ισοπίθανα και συνεπώς τα m_i έχουν ίδια πιθανότητα εμφάνισης
- Ο πομπός αντιστοιχεί κάθε μήνυμα σε ένα M-ιαδικό σύμβολο, $s_i(t)$
- Το κανάλι αλλοιώνει τα εκπεμπόμενα σύμβολα
- Ο δέκτης πρέπει να αναγνωρίσει ποιο ανάμεσα από τα M πιθανά σύμβολα εκπέμφθηκε
- Βάσει της αντιστοίχισης των bit σε σύμβολα στον πομπό, προκύπτουν τα bit που στάλθηκαν

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Οι κώδικες γραμμής είναι η αντιστοίχηση των bit πληροφορίας σε κυματομορφές
- Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι που μπορεί να γίνει η αντιστοίχηση αυτή
- Ανάλογα το εύρος του βασικού παλμού έχουμε
  - Παλμούς με επιστροφή στο μηδέν (*return-to-zero* – RZ)
  - Παλμούς χωρίς επιστροφή στο μηδέν (*non return-to-zero* – NRZ)

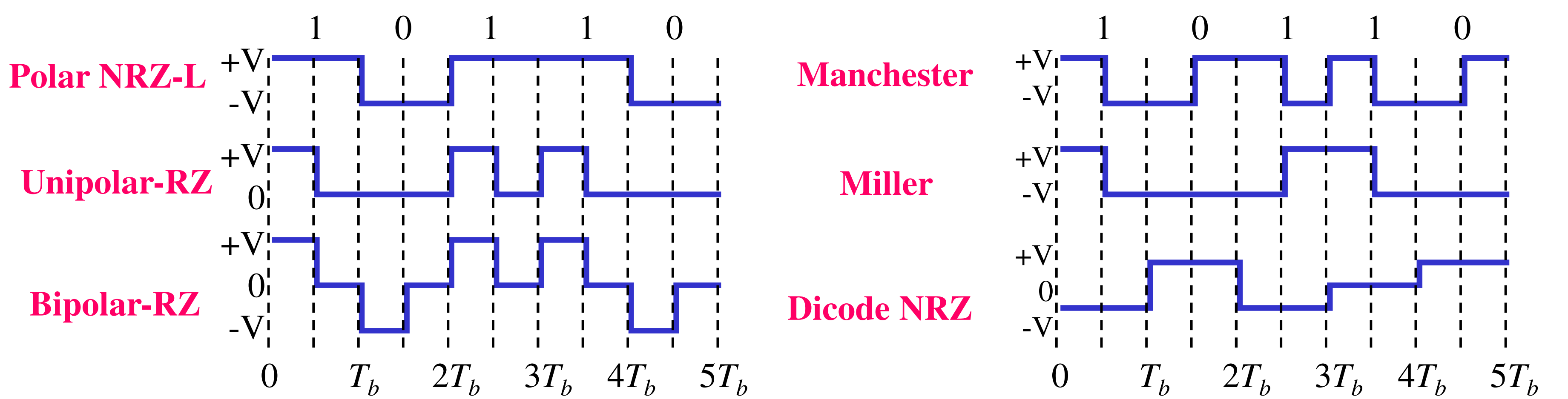




- Επιθυμητές ιδιότητες κωδίκων γραμμής
  - Απαίτηση για μικρό εύρος ζώνης
  - Απόδοση ισχύος για δεδομένη πιθανότητα σφάλματος και εύρος ζώνης
  - Ικανότητα ανίχνευσης/διόρθωσης σφαλμάτων
  - Μη ύπαρξη DC συνιστώσας, ώστε αυτή να χρησιμοποιείται για παροχή ισχύος
  - Ικανότητα χρονικού συγχρονισμού bit από την ίδια την κυματομορφή
  - Διαφάνεια (*transparency*): Ικανότητα ανίχνευσης ανεξάρτητη της ακολουθίας των bit

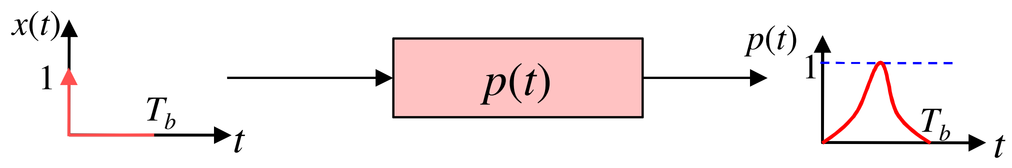
Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Γνωστότεροι κώδικες γραμμής
  - on/off: Για bit 1 μεταδίδεται παλμός $p(t)$ NRZ και για bit 0 δεν μεταδίδεται τίποτα
  - Πολικοί (*polar*): Για bit 1 μεταδίδεται παλμός $p(t)$ NRZ και για bit 0 μεταδίδεται παλμός $-p(t)$
  - Μονοπολικοί (*unipolar*): Για bit 1 μεταδίδεται παλμός $p(t)$ RZ και για bit 0 δεν μεταδίδεται τίποτα
  - Διπολικοί (*bipolar*) ή AMI: Για bit 0 δεν μεταδίδεται τίποτα, ενώ για bit 1 μεταδίδεται παλμός $p(t)$ ή $-p(t)$, με βάση αν κατά το προηγούμενο bit 1 μεταδόθηκε $-p(t)$ ή $p(t)$, αντίστοιχα
  - (Τροποποιημένοι) διπλοδυαδικοί (χρήση: HDD, ISDN, 10Gbps μητροπολιτικά οπτικά δίκτυα)



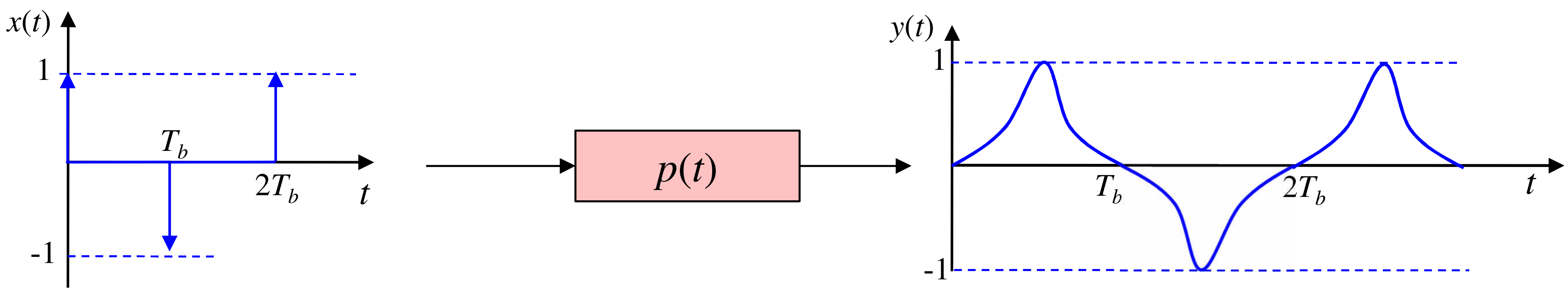
Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Αν στην είσοδο ενός φίλτρου έχουμε μια συνάρτηση Δέλτα $x(t) = \delta(t)$, στην έξοδο θα λάβουμε την κρουστική απόκριση του φίλτρου $y(t) = x(t) * p(t) = \delta(t) * p(t) = p(t)$



- Συνεπώς, αν στην είσοδο έχουμε μία ακολουθία από συναρτήσεις Δέλτα (με $a_k = \pm 1$), στην έξοδο θα λάβουμε μία ακολουθία από παλμούς σχηματισμένους βάσει της κρουστικής απόκρισης του φίλτρου

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \delta(t - n\,T_b) \qquad y(t) = x(t) * p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n\, p(t - n\,T_b)$$



- Ένα τέτοιο φίλτρο ονομάζεται φίλτρο μορφοποίησης παλμών (*pulse shaping filter*)

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Η φασματική πυκνότητα ισχύος (ΦΠΙ) ενός κώδικα γραμμής καθορίζεται από:
  - Την συσχέτιση μεταξύ της ακολουθίας των πλατών a_k, η οποία βασίζεται στη σχέση των bit που απέχουν μεταξύ τους n θέσεις, $V_n = \mathbb{E}\langle a_k \, a_{k+n} \rangle$ και $V_0 = \mathbb{E}\langle a_k^2 \rangle$
  - Τη χαρακτηριστική συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου μορφοποίησης $P(f)$
- Η φασματική πυκνότητα ισχύος ενός κώδικα γραμμής δίδεται από

$$S_y(f) = \frac{1}{T_b} |P(f)|^2 \left[V_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(2\pi \, n \, f \, T_b) \right]$$

- Για ακολουθία bit με ασυσχέτιστα bit μεταξύ διαφορετικών θέσεων (πηγή χωρίς μνήμη)

$$V_n = \mathbb{E}\langle a_k \, a_{k+n} \rangle = \mathbb{E}\langle a_k \rangle \mathbb{E}\langle a_{k+n} \rangle = \mathbb{E}^2\langle a_k \rangle$$

- Αν επιπλέον θεωρήσουμε ισοπίθανα bit 0 και 1 και παλμούς με πλάτος ±1, $\mathbb{E}\langle a_k \rangle = 0$, δηλαδή $V_n = 0$ και άρα

$$S_y(f) = \frac{1}{T_b} |P(f)|^2$$

- Η ΦΠΙ ενός κώδικα γραμμής είναι ίδια με την ΦΠΙ του μορφοποιημένου παλμού

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

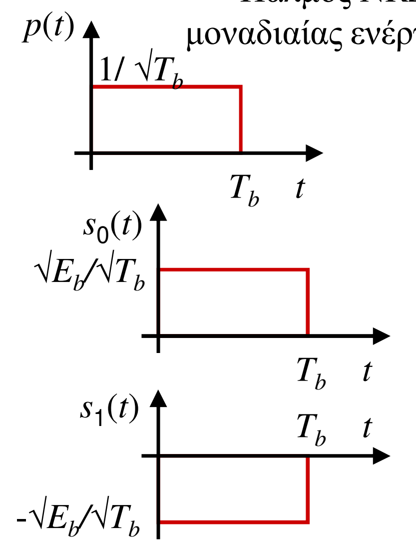
- Δυαδικό PAM (*pulse amplitude modulation*) ή NRZ-L
  - Για το bit "1", το πλάτος του παλμού είναι $+A$ και η κυματομορφή:

    $$s_0(t) = \sqrt{E_b}\, p(t), \quad 0 \le t < T_b$$

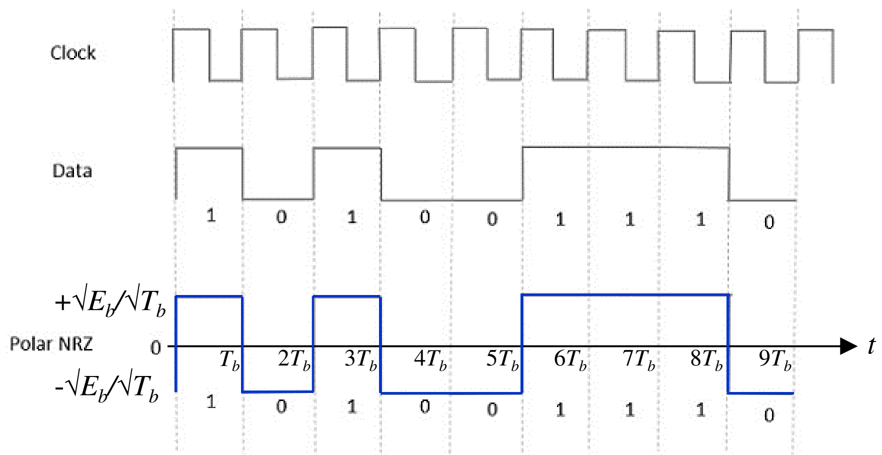
  - Για το bit "0", το πλάτος του παλμού είναι $-A$ και η κυματομορφή:

    $$s_1(t) = -\sqrt{E_b}\, p(t)\,, \quad 0 \le t < T_b$$

Παλμός NRZ μοναδιαίας ενέργειας



Σύμβολα δυαδικού PAM ($M = 2$)



Κυματομορφή δυαδικού PAM ($M = 2$) με παλμούς NRZ

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

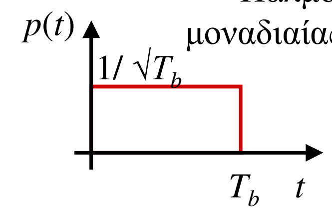
- Διαφορετική έκδοση του δυαδικού PAM είναι η on/off
  - Για το bit "1", η κυματομορφή είναι

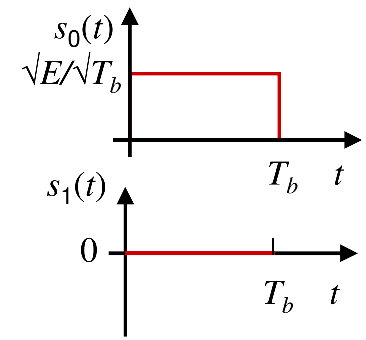
$$s_0(t) = \sqrt{E}\, p(t), \quad 0 \le t < T_b$$

  - Για το bit "0", η κυματομορφή είναι

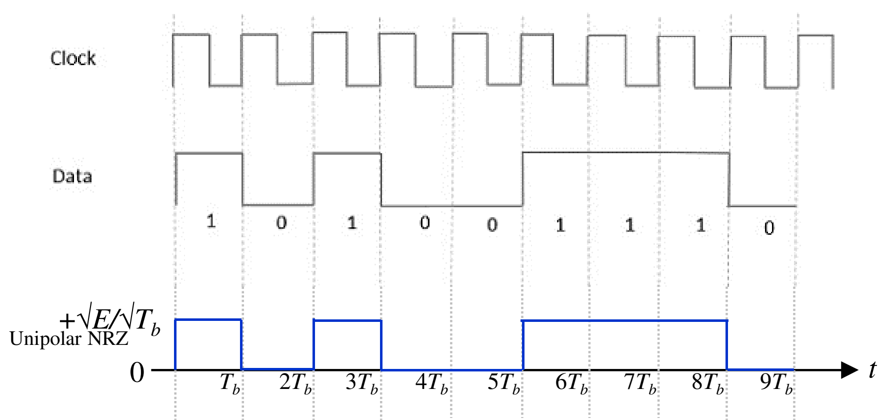
$$s_1(t) = 0\,, \quad 0 \le t < T_b$$

Παλμός NRZ μοναδιαίας ενέργειας





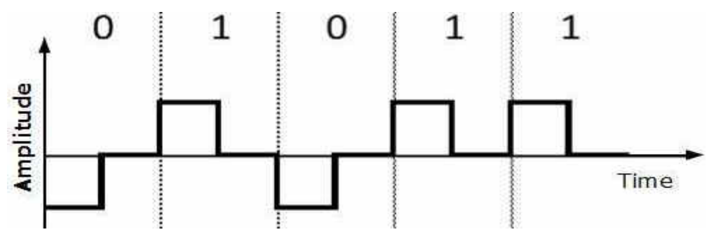
Σύμβολα on/off ($M = 2$)



Κυματομορφή on/off ($M = 2$) με παλμούς NRZ

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Στο PAM, αν αντί παλμών NRZ χρησιμοποιήσουμε RZ καθίσταται απλή η εξαγωγή του χρονισμού

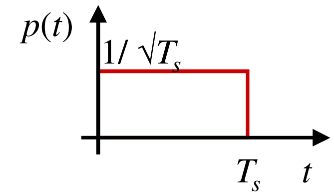


- Ο χρονισμός (*clock*) προκύπτει αν λάβουμε την απόλυτη τιμή της παραπάνω κυματομορφής

- Στην περίπτωση μετάδοσης με παλμούς NRZ είναι πιθανή η απώλεια συγχρονισμού κατά τη μετάδοση πολλών διαδοχικών 0 ή 1

- Η τεχνική του γεμίσματος με bit (*bit stuffing*) χρησιμοποιείται για την αποφυγή της απώλειας συγχρονισμού εισάγοντας ένα 1 ή 0 μετά από 6 διαδοχικά 0 ή 1, όπως πχ στο USB

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης



- Στο M-ιαδικό PAM κάθε σύμβολο αναπαριστάται με έναν παλμό $p(t)$ διάρκειας T_s και πλάτους $A_m = (2m + 1 - M)\sqrt{E}$, $m = 0, 1, \ldots, M-1$, δηλ.

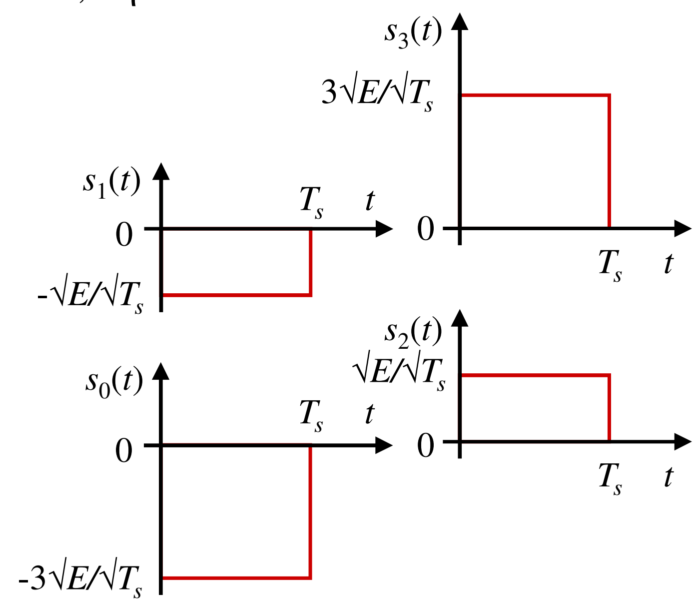
$$A_m = \pm\sqrt{E}, \pm 3\sqrt{E}, \pm 5\sqrt{E}, \ldots, \pm(M-1)\sqrt{E}$$

- Η αντίστοιχη κυματομορφή είναι

$$s_m(t) = A_m\, p(t), \quad 0 \le t < T_s$$

- Η ενέργεια του συμβόλου $s_m(t)$ είναι

$$E_m = \int_0^{T_s} s_m^2(t)\mathrm{d}t = A_m^2 \int_0^{T_s} p^2(t)\mathrm{d}t = A_m^2$$



Σύμβολα τετραδικού PAM ($M = 4$)

- Η μέση ενέργεια ανά σύμβολο M-PAM είναι

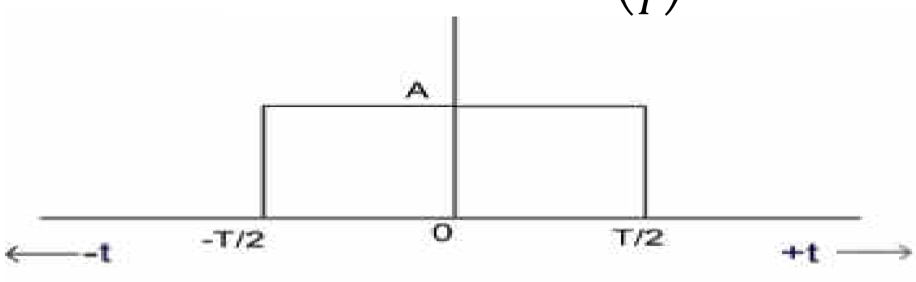
$$E_s = \frac{1}{M}\sum_{m=0}^{M-1} E_m = \frac{1}{M}\sum_{m=0}^{M-1} A_m^2 = \frac{E}{M}\sum_{m=0}^{M-1}(2m + 1 - M)^2 = \frac{M^2 - 1}{3}E$$

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Για να βρούμε τη φασματική πυκνότητα ισχύος PAM με τετραγωνικούς παλμούς (RZ ή NRZ) αρκεί να έχουμε το μετασχηματισμό Fourier ενός τετραγωνικού παλμού

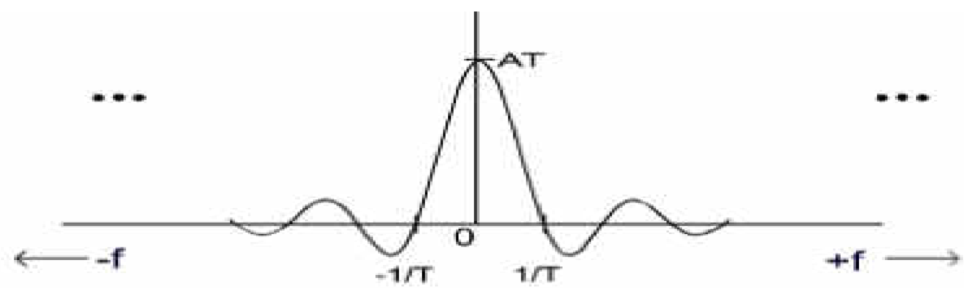
- Ο μετασχηματισμός Fourier ενός τετραγωνικού παλμού εύρους *T* δίνει μια συνάρτηση sinc στο πεδίο της συχνότητας με μηδενισμούς στα ακέραια πολλαπλάσια του 1/*T*

$$p(t) = A\,\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$$



Πεδίο Χρόνου

$$P(f) = A\,T\mathrm{sinc}(f\,T)$$



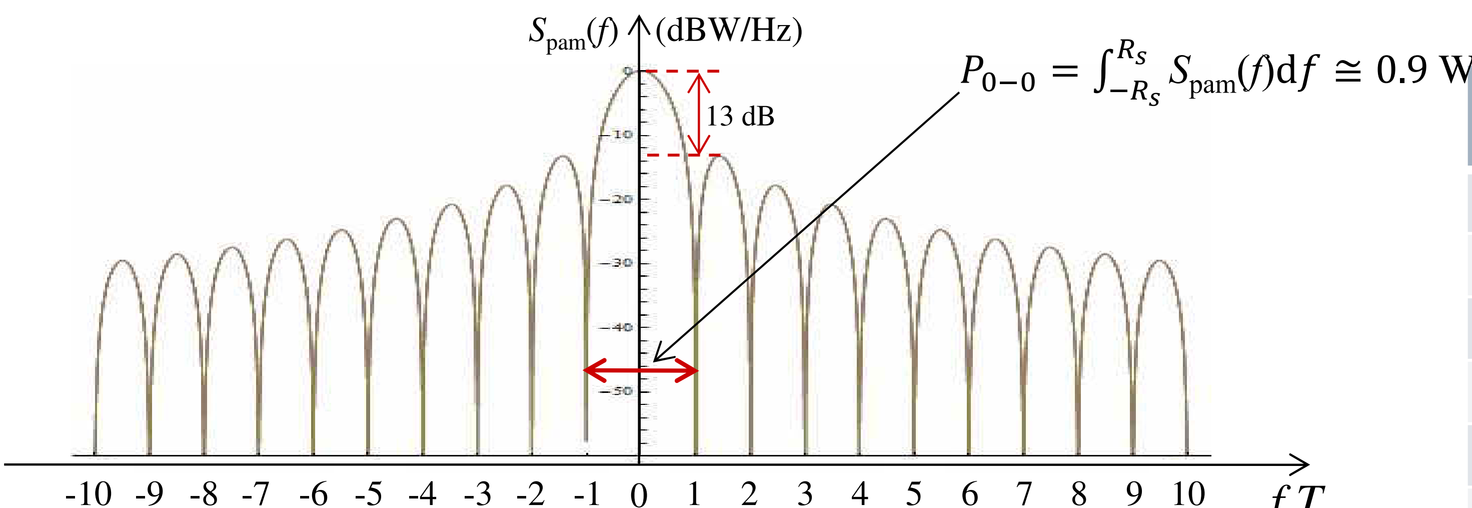
Πεδίο Συχνότητας

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Φασματική πυκνότητα ισχύος M-PAM με παλμούς NRZ

$$S_{\text{pam}}(f) = T_s \,\text{sinc}^2(f\,T_s)$$

- Η $S_{\text{pam}}(f)$ είναι κανονικοποιημένη ώστε η μέση ισχύς να είναι 1 W ανεξάρτητα του M
- Οι μηδενισμοί εμφανίζονται όταν $f = k / T_s$, με $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$
- Εύρος ζώνης πρώτου μηδενισμού $B_0 = R_s$
- Το εύρος ζώνης είναι ανεξάρτητο του M
- Όχι οικονομικό ως προς το εύρος ζώνης, αφού απαιτεί το μέγιστο εύρος ζώνης παλμών Nyquist



Φασματική Πυκνότητα Ισχύος PAM (M = 2, 4, 8)

Εύρος Φάσματος	Περιεχόμενη Ισχύς
$\pm 1 / T_s$	90%
$\pm 1.5 / T_s$	93%
$\pm 2 / T_s$	95%
$\pm 3 / T_s$	96.5%
$\pm 4 / T_s$	97.5%
$\pm 5 / T_s$	98%

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Η φασματική πυκνότητα ισχύος ενός κώδικα γραμμής δίδεται από

$$S_y(f) = \frac{1}{T_b}|P(f)|^2\left[V_0 + 2\sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(2\pi\, n\, f\, T_b)\right]$$

- Δεδομένου ότι $V_n = \mathbb{E}\langle a_k\, a_{k+n}\rangle = \mathbb{E}\langle a_k\, a_{k-n}\rangle = V_{-n}$, η $S_y(f)$ μπορεί να γραφτεί ως

$$S_y(f) = \frac{1}{T_b}|P(f)|^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n \cos(2\pi\, n\, f\, T_b) = \frac{1}{T_b}|P(f)|^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n \exp(-j2\pi\, n\, f\, T_b)$$

- Για μία ασυσχέτιστη ακολουθία

$$V_n = \begin{cases} \mathbb{E}\langle a_k^2\rangle = \sigma_a^2 + \mu_a^2, & n = 0 \\ \mathbb{E}^2\langle a_k\rangle = \mu_a^2, & n \neq 0 \end{cases}$$

- Βάσει της ταυτότητας $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi\, n\, f\, T_b) = R_b \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - n\, R_b)$, η $S_y(f)$ ξαναγράφεται

$$S_y(f) = \frac{1}{T_b}|P(f)|^2\left[\sigma_a^2 + \mu_a^2\, R_b \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - n\, R_b)\right]$$

- Το διακριτό μέρος της φασματικής πυκνότητας ισχύος μπορεί να μηδενιστεί αν για τους παλμούς μορφοποίησης ισχύει $P(f = n\, R_b) = 0$ ή/και αν $\mu_a = 0$

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Για on/off, $\mathbb{E}\langle a_k^2\rangle = \frac{1}{2}\cdot 1^2 + \frac{1}{2}\cdot 0^2 = \frac{1}{2}$ και $\mu_a^2 = \mathbb{E}^2\langle a_k\rangle = \left(\frac{1}{2}\cdot 1 + \frac{1}{2}\cdot 0\right)^2 = \frac{1}{4}$, δηλ. $\sigma_a^2 = \frac{1}{4}$

- Η φασματική πυκνότητα ισχύος ενός τετραγωνικού παλμού NRZ είναι

$$P(f) = T_b \operatorname{sinc}(fT_b)$$

- Συνεπώς, για on/off με παλμούς NRZ, η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι

$$S_y(f) = \frac{T_b}{4}\operatorname{sinc}^2(fT_b) + \frac{1}{4}\delta(f)$$

- Η φασματική πυκνότητα ισχύος ενός τετραγωνικού παλμού RZ μισού εύρους είναι

$$P(f) = \frac{T_b}{2}\operatorname{sinc}\left(\frac{fT_b}{2}\right)$$

- Συνεπώς, για on/off με παλμούς RZ, η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι

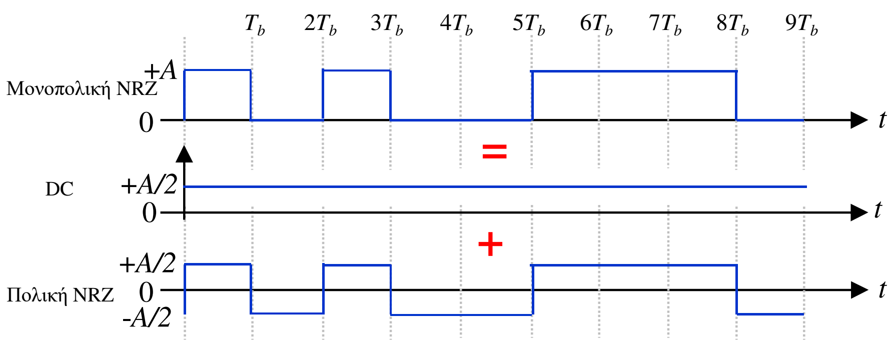
$$S_y(f) = \frac{T_b}{16}\operatorname{sinc}^2\left(\frac{fT_b}{2}\right) + \frac{1}{16}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\operatorname{sinc}^2\left(\frac{n}{2}\right)\delta(f - n\,R_b)$$

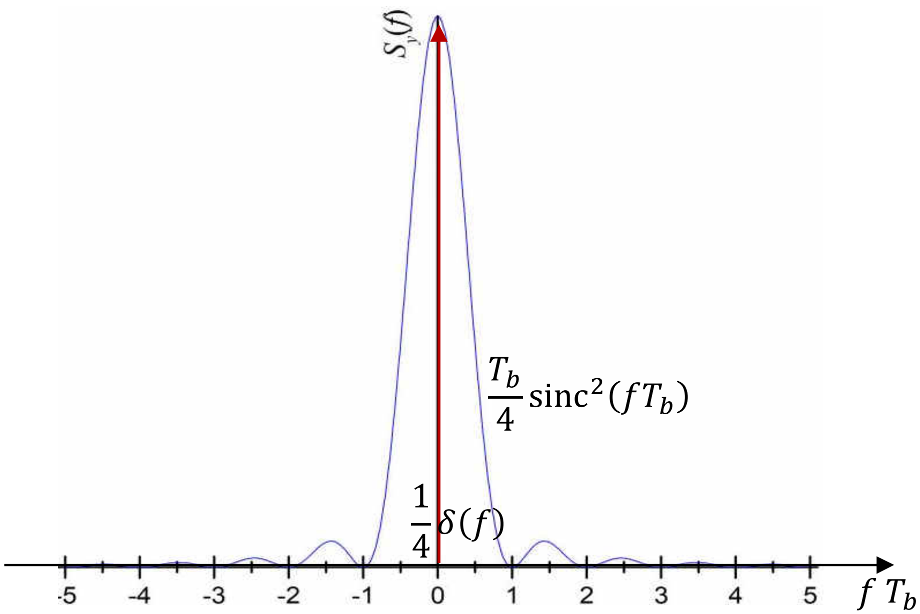
Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Για on/off με παλμούς NRZ, η $S_y(f)$ περιλαμβάνει τόσο συνεχές όσο και διακριτό φασματικό περιεχόμενο
- Όχι οικονομικό ως προς το εύρος ζώνης, αφού οι μηδενισμοί συμβαίνουν για

$$f_k = \frac{k}{T_b}, \text{ με } k = \pm 1, \pm 2, \ldots$$

- Η συχνότητα του διακριτού περιεχομένου είναι μια DC συνιστώσα, δηλ. για $f = 0$
- Το φάσμα της on/off με παλμούς NRZ $p(t)$ αναλύεται σε ένα άθροισμα μιας σταθερής τιμής και παλμών NRZ $\pm p(t)/2$





Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

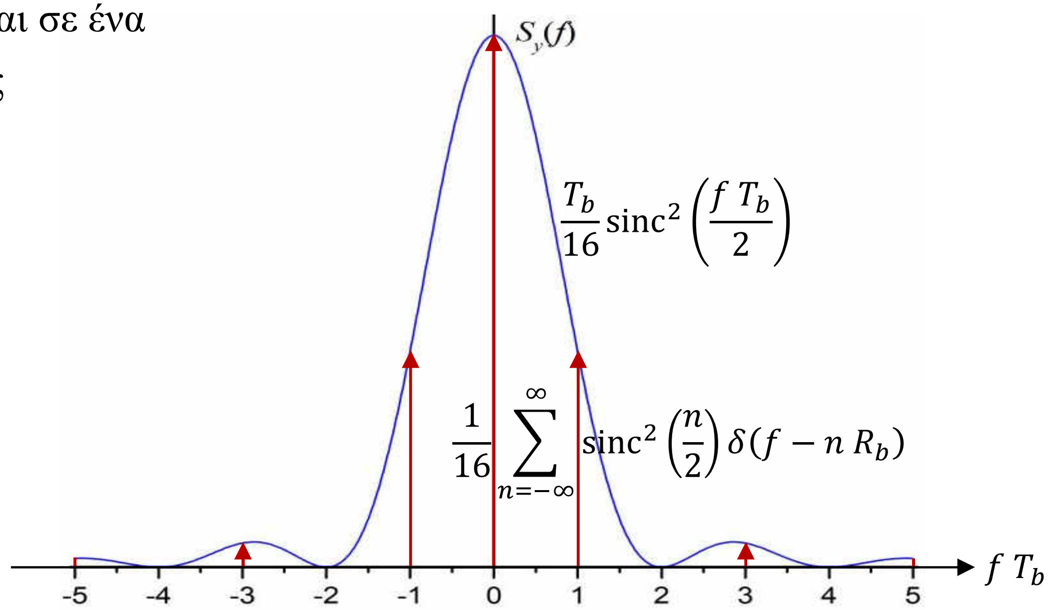
- Για on/off με παλμούς RZ, η $S_y(f)$ περιλαμβάνει τόσο συνεχές όσο και διακριτό φασματικό περιεχόμενο
- Όχι οικονομικό ως προς το εύρος ζώνης, αφού οι μηδενισμοί συμβαίνουν για

$$f_k = \frac{k}{T_b}, \text{ με } k = \pm 2, \pm 4, \ldots$$

- Οι συχνότητες του διακριτού περιεχομένου είναι

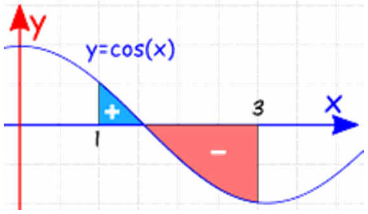
$$f_k = \frac{k}{T_b}, \text{ με } k = \pm 1, \pm 3, \ldots$$

- Το φάσμα της on/off με παλμούς RZ αναλύεται σε ένα άθροισμα πολικής και περιοδικής συνιστώσας



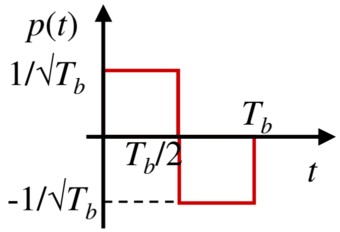
Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

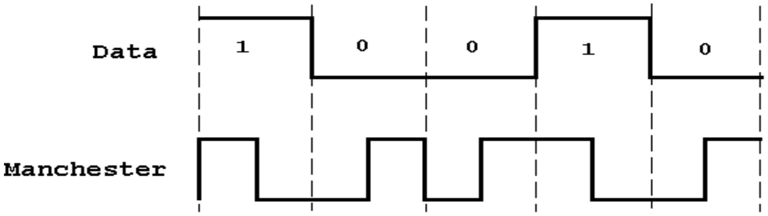
- Ερώτηση: Μπορεί να μηδενιστεί η DC βάσει του φίλτρου μορφοποίησης παλμών;
- Απάντηση: Η χαρακτηριστική συνάρτηση μεταφοράς μέσω του μετασχηματισμού Fourier γράφεται $P(f) = \mathcal{F}\{p(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \exp(-j2\pi f t)\, \mathrm{d}t$
- Αν $P(f = 0) = 0$, προκύπτει ότι



$$\int_0^{T_b} p(t)\, \mathrm{d}t = 0$$

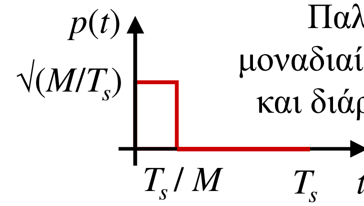
- Δηλαδή το εμβαδό κάτω από τον παλμό $p(t)$ πρέπει να είναι μηδέν
- Μια περίπτωση παλμού με την παραπάνω ιδιότητα είναι ο κώδικας Manchester
- Για bit 1 μεταδίδεται παλμός $p(t)$ και για bit 0 μεταδίδεται παλμός $-p(t)$





Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

<u>Διαμόρφωση θέσης παλμού (*pulse position modulation* – PPM)</u>



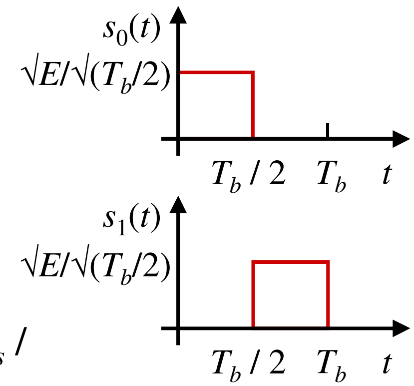
Παλμός *RZ* μοναδιαίας ενέργειας και διάρκειας T_s/M

- Δυαδικό PPM
  - Για το bit "1", η κυματομορφή του συμβόλου αναπαρίσταται ως

$$s_0(t) = \sqrt{E}\, p(t), \qquad 0 \le t < T_b / 2$$

  - Για το bit "0", η κυματομορφή του συμβόλου αναπαρίσταται ως

$$s_1(t) = \sqrt{E}\, p(t - T_b / 2)\,, \quad T_b / 2 \le t < T_b$$

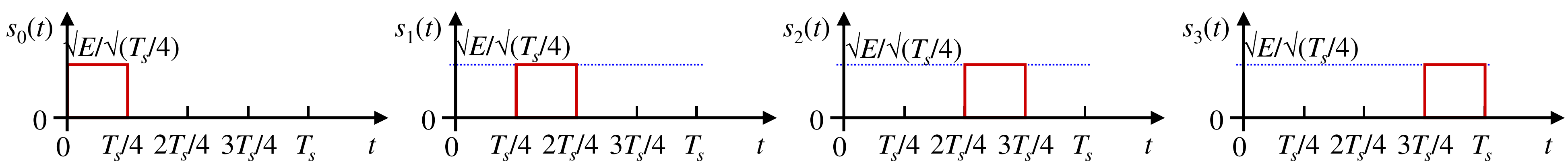


Σύμβολα δυαδικού PPM ($M = 2$)

- Στο M-ιαδικό PAM κάθε σύμβολο αναπαριστάται με έναν παλμό $p(t)$ διάρκειας T_s / M και πλάτους $\sqrt{E}$. Η κυματομορφή του συμβόλου $s_m(t)$ είναι

$$s_m(t) = \sqrt{E}\, p(t - m\, T_s / M\,), \qquad m\, T_s / M \le t < (m + 1)\, T_s / M$$

με $m = 0, 1, \ldots, M–1$



Σύμβολα τετραδικού PPM ($M = 4$)

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Η ενέργεια του συμβόλου $s_m(t)$ για το M-PPM είναι

$$E_m = \int_0^{T_s} s_m^2(t)\mathrm{d}t = E \int_{mT_s/M}^{(m+1)T_s/M} p^2\left(t - \frac{m}{M}T_s\right)\mathrm{d}t = E$$

δηλαδή δεν εξαρτάται από το m

- Συνεπώς, για ισοπίθανα bit και άρα σύμβολα, η μέση ενέργεια ανά σύμβολο είναι $E_s = E$

- Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των συμβόλων PPM είναι ότι δεν αλληλοεπικαλύπτονται χρονικά και άρα

$$\int_{-\infty}^{\infty} s_m(t)\, s_n(t)dt = 0, \qquad \forall m \neq n$$

- Σήματα για τα οποία ισχύει η παραπάνω ιδιότητα χαρακτηρίζονται ως ορθογώνια (*orthogonal*)

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Για δυαδικό PPM με παλμούς RZ η φασματική πυκνότητα ισχύος

$$S_{2ppm}(f) = \frac{T_b}{4}\operatorname{sinc}^2\left(\frac{f\,T_b}{2}\right)[1-\cos(\pi\,f\,T_b)] + \frac{1}{2}\delta(f)$$

- Το φάσμα του 2-PPM περιέχει τόσο συνεχές φάσμα όσο και διακριτό
- Στο 2-PPM μηδενισμοί στο φάσμα εμφανίζονται για

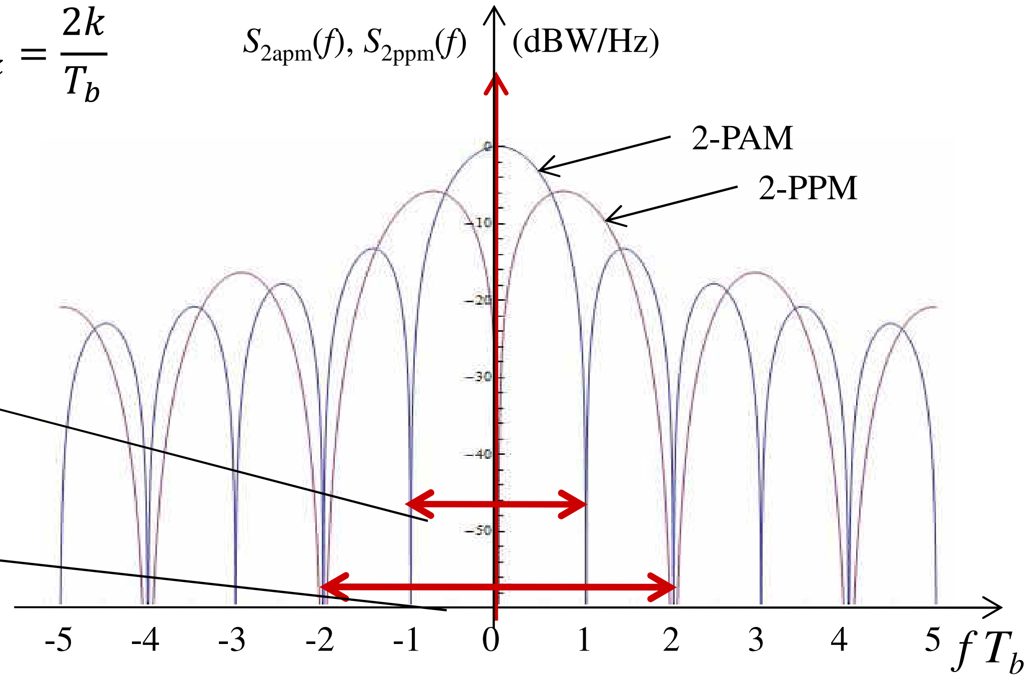
$$f_k = \frac{2k}{T_b}$$

με $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$

- Σε σύγκριση με το 2-PAM, το 2-PPM απαιτεί διπλάσιο εύρος ζώνης

2-PAM: $P_{0-0} = \int_{-R_s}^{R_s} S_{\mathrm{pam}}(f)\mathrm{d}f \cong 0.9$ W

2-PPM: $P_{0-0} = \int_{-2\,R_s}^{2\,R_s} S_{\mathrm{2ppm}}(f)\mathrm{d}f \cong 0.93$ W



Φασματική Πυκνότητα Ισχύος 2-PAM και 2-PPM

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Φασματική πυκνότητα ισχύος τετραδικού PPM

$$S_{4ppm}(f) = \frac{T_s}{4}\operatorname{sinc}^2\left(\frac{f\,T_s}{4}\right)\left[1 - \cos^2\left(\frac{\pi\,f\,T_s}{2}\right)\cos^2\left(\frac{\pi\,f\,T_s}{4}\right)\right] + \frac{1}{2}\delta(f)$$

- Γενικά, το φάσμα του *M*-PPM περιέχει τόσο συνεχές όσο και διακριτό φάσμα
- Στο *M*-PPM μηδενισμοί στο φάσμα εμφανίζονται για

$$f_k = \frac{k\,M}{T_s}$$

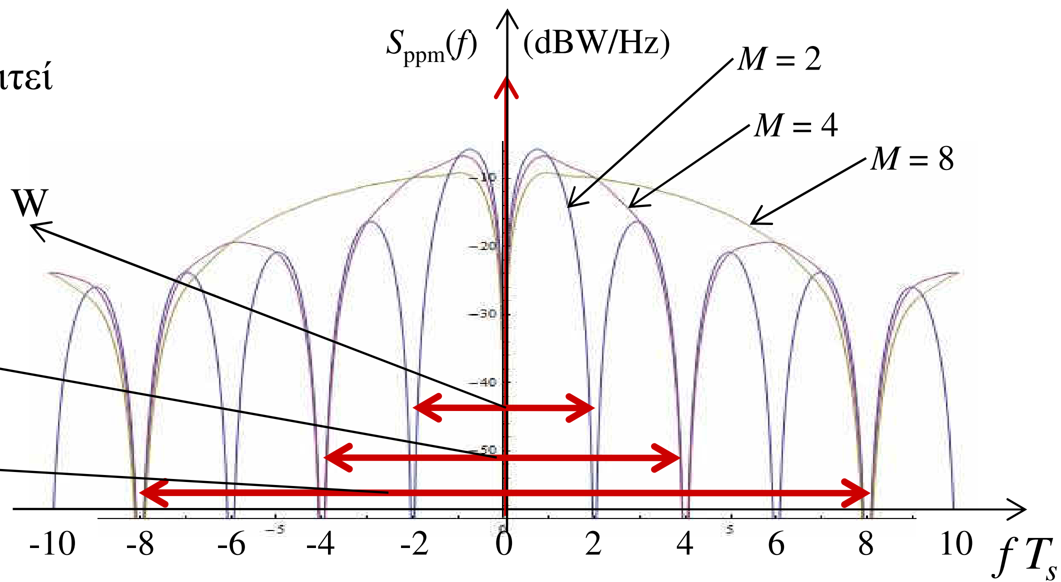
με $k = \pm1, \pm2, \pm3, \ldots$

- Σε σύγκριση με το *M* -PAM, το *M* -PPM απαιτεί *M* φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης

$$P_{0-0} = \int_{-2\,R_s}^{2\,R_s} S_{2\text{ppm}}(f)\mathrm{d}f \cong 0.93\ \text{W}$$

$$P_{0-0} = \int_{-4\,R_s}^{4\,R_s} S_{4\text{ppm}}(f)\mathrm{d}f \cong 0.91\ \text{W}$$

$$P_{0-0} = \int_{-8\,R_s}^{8\,R_s} S_{8\text{ppm}}(f)\mathrm{d}f \cong 0.90\ \text{W}$$



Φασματική Πυκνότητα Ισχύος PPM (*M* = 2, 4, 8)

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

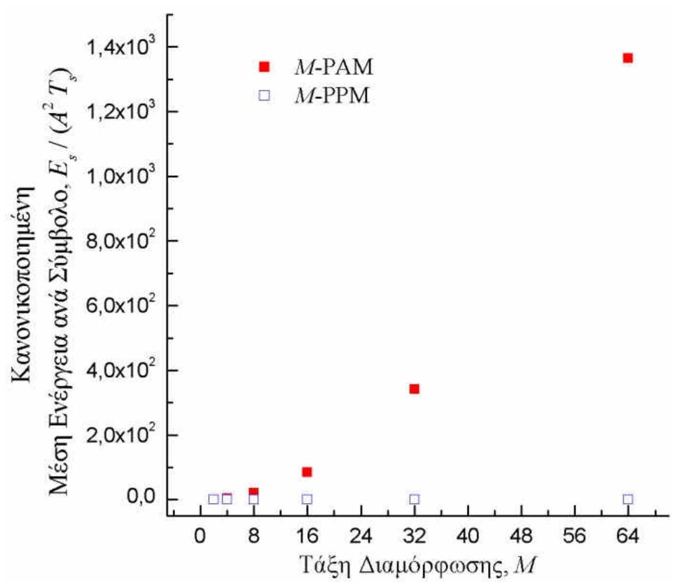
- Ενέργεια συμβόλου
  - Τα σύμβολα M-PAM έχουν μεταξύ τους διαφορετική ενέργεια
  - Τα σύμβολα M-PPM έχουν μεταξύ τους όλα ίδια ενέργεια

- Απαιτούμενη μέση ενέργεια ανά σύμβολο
  - Στο M-PAM η μέση ενέργεια ανά σύμβολο αυξάνεται με το M

$$\frac{E_s}{E} = \frac{M^2 - 1}{3}$$

  - Στο M-PPM η μέση ενέργεια ανά σύμβολο μειώνεται με το M

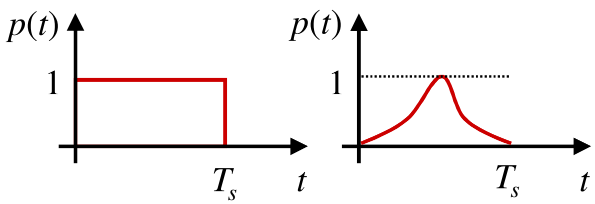
$$\frac{E_s}{E} = \frac{1}{M}$$



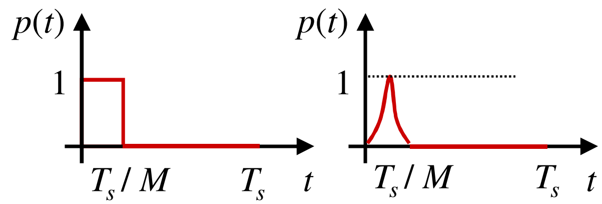
Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

- Τόσο στο *M*-PAM όσο και στο *M*-PPM μπορούν να χρησιμοποιηθούν παλμοί διάρκειας T_s και T_s / M, αντίστοιχα, διαφορετικοί από τετραγωνικούς

Παλμοί για *M*-PAM:



Παλμοί για *M*-PPM:



- Ως συνέπεια της διάρκειας των παλμών $p(t)$ προκύπτει ότι:
  - Στο *M*-PAM το απαιτούμενο εύρος ζώνης διατηρείται σταθερό καθώς αυξάνει το *M*
  - Στο *M*-PPM το απαιτούμενο εύρος ζώνης αυξάνει καθώς αυξάνει το *M*

- Το *M*-PPM απαιτεί εύρος ζώνης *M* φορές μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του *M*-PAM

Διαμόρφωση Σημάτων Βασικής Ζώνης

<u>Σύγκριση M-PPM με M-PAM ως προς εύρος ζώνης (ίδιος ρυθμός μετάδοσης bit R_b)</u>

- Για να μεταδώσουμε K bit με M-PAM χρειάζονται:
  - $M = 2^K$ σύμβολα
  - Διάρκεια κάθε παλμού $T_s = K / R_b$
  - Εύρος ζώνης παλμού περίπου $B_W = 1 / (2\, T_s) = B_{95\%}$
  - Άρα, απαιτούμενο εύρος ζώνης καναλιού $BW = R_b / [2 \log_2(M)]$

- Για να μεταδώσουμε K bit με M-PPM χρειάζονται:
  - $M = 2^K$ σύμβολα διάρκειας $T_s = K / R_b$
  - Διάρκεια κάθε παλμού $T_p = T_s / M = K / (M\, R_b)$
  - Εύρος ζώνης παλμού περίπου $B_W = M / (2\, T_s) \cong B_{95\%}$
  - Άρα, απαιτούμενο εύρος ζώνης καναλιού $BW = M\, R_b / [2 \log_2(M)]$

- Συνεπώς για να μεταδοθούν δεδομένα με ρυθμό R_b, το M-PPM απαιτεί M φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης καναλιού σε σχέση με το M-PAM