

Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα II

Διάλεξη 2: Μετάδοση Ψηφιακών Δεδομένων στη Βασική Ζώνη

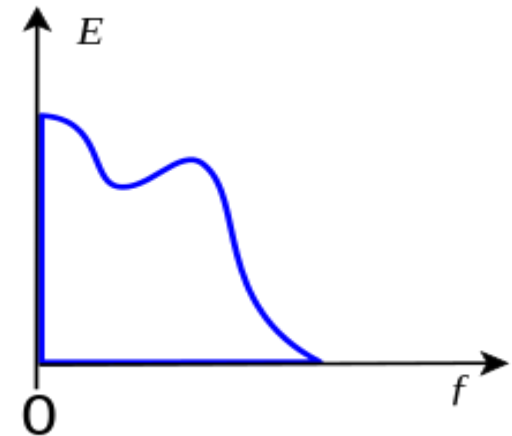
Δρ. Μιχάλης Παρασκευάς
Επίκουρος Καθηγητής

Ατζέντα

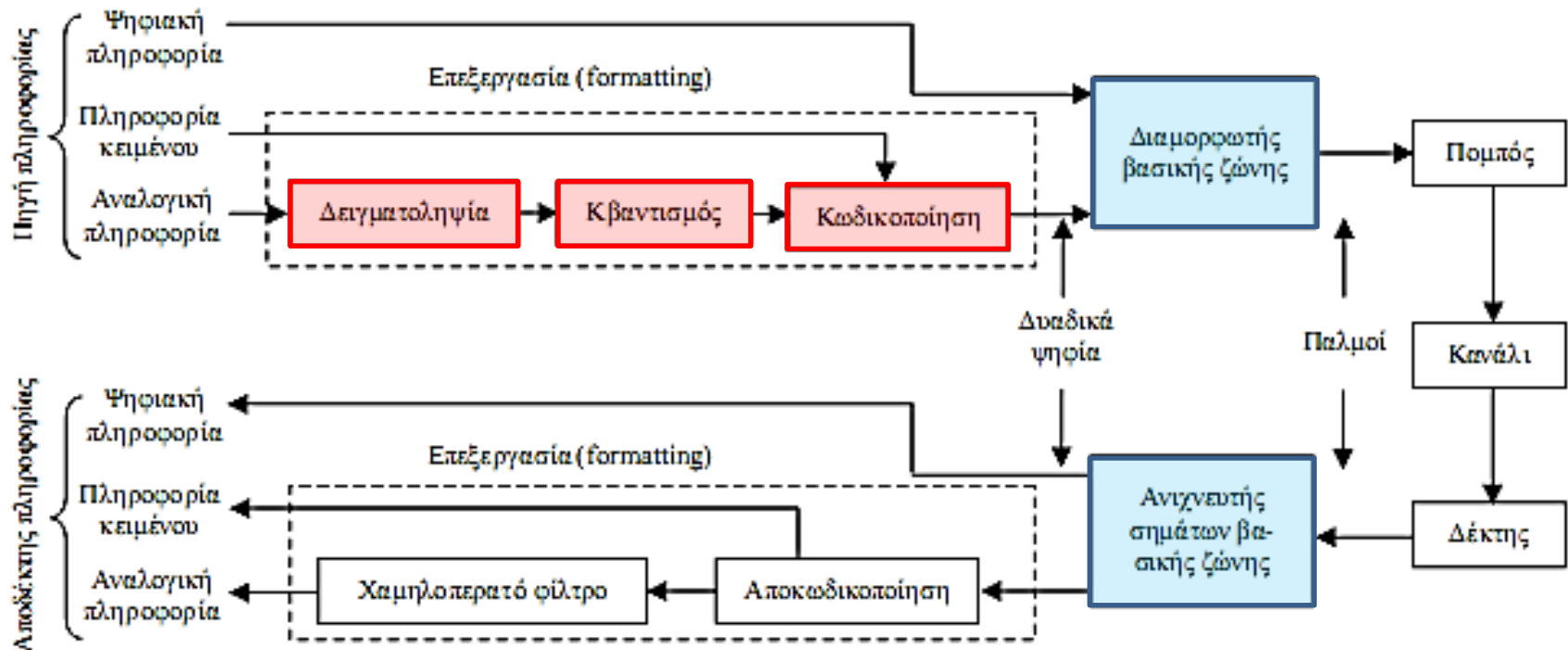
1. Σήματα Βασικής Ζώνης
2. Μετάδοση στη Βασική Ζώνη
3. Κωδικοποίηση γραμμής
4. Κατηγορίες κωδικοποίησης γραμμής
5. Είδη σηματοδοσίας
6. Διασυμβολική παρεμβολή
7. Αντιμετώπιση διασυμβολικής παρεμβολής με φίλτρα Nyquist
8. Φίλτρα υψωμένου συνημιτόνου

Σήμα Βασικής Ζώνης

- **Σήμα Βασικής Ζώνης** ([baseband signal](#)): Ένα σήμα του οποίου το φάσμα συχνοτήτων εκτείνεται από (ή σχεδόν από) το DC (δηλ. 0 Hz) μέχρι κάποια πεπερασμένη **συχνότητα αποκοπής** ([cut-off frequency](#)), π.χ. μερικά MHz.
- Συνήθως ο όρος «βασικής ζώνης» (baseband) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει μία περιοχή συχνοτήτων που ξεκινά πλησίον του μηδενός.
- Επίσης, συχνά θεωρείται ως συνώνυμο των όρων «χαμηλοδιαβατό» ([lowpass](#)) ή «χωρίς διαμόρφωση» (non-modulated), και αντιδιαστέλλεται με τον όρο «διαμορφωμένο σήμα» ([carrier-modulated](#))



Συστήματα Βασικής Ζώνης

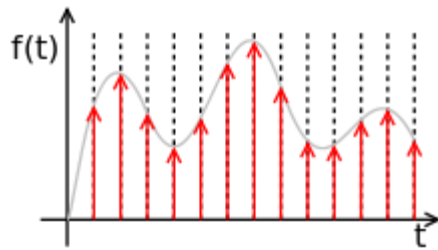


- Η ακολουθία δυαδικών ψηφίων (PCM) μεταδίδεται μέσω του καναλιού βασικής ζώνης (συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων ή ομοαξονικό καλώδιο), αφού μετατραπεί σε παλμοσειρά, που είναι η συμβατή μορφή κυματομορφής για κανάλια βασικής ζώνης.
- Η **κωδικοποίηση γραμμής** (line coding) λαμβάνει χώρα στον κωδικοποιητή (waveform encoder) ή διαμορφωτή βασικής ζώνης (baseband modulator).

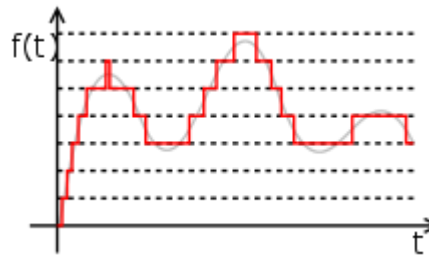
Μετάδοση στη Βασική Ζώνη

Για τη **μετάδοση** ενός σήματος βασικής ζώνης μέσω τηλεπικοινωνιακού συστήματος:

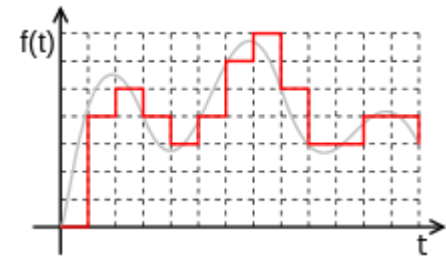
1. Το αναλογικό σήμα υφίσταται **επεξεργασία** ώστε να παρασταθεί με **ψηφιακά σύμβολα** (δυαδικά ψηφία), η οποία αποτελείται από τα στάδια: (α) της δειγματοληψίας, (β) του κβαντισμού και (γ) της κωδικοποίησης.



Δειγματοσιμένο σήμα (PAM)
(διακριτού χρόνου, συνεχούς πλάτους)



Κβαντισμένο σήμα
(συνεχούς χρόνου, διακριτού πλάτους)

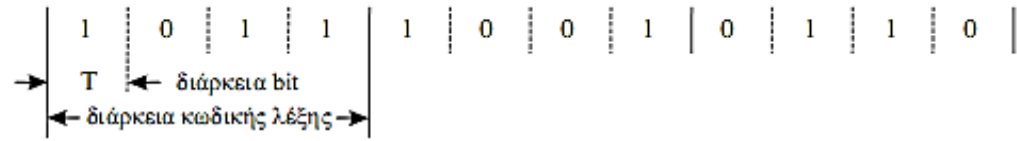


Ψηφιακό σήμα (PCM)
(διακριτού χρόνου, διακριτού πλάτους)

2. Κάθε ψηφιακό σύμβολο αντιστοιχίζεται σε μια συγκεκριμένη μορφή παλμού (pulse waveform). Η διαδικασία αυτή καλείται **διαμόρφωση παλμών** (pulse modulation) ή **διαμόρφωση βασικής ζώνης** (baseband modulation).

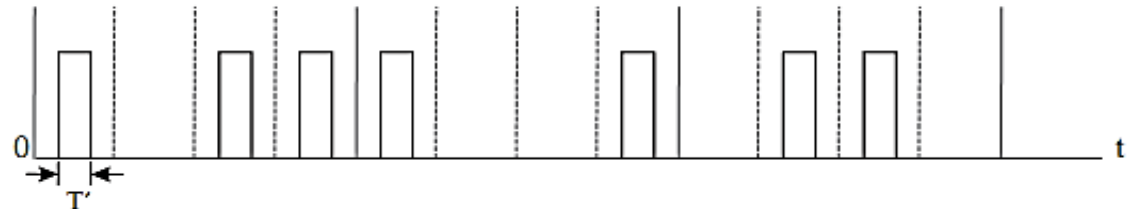
Αναπαράσταση δυαδικών ψηφίων με παλμούς

(α) Ακολουθία δυαδικών ψηφίων PCM.



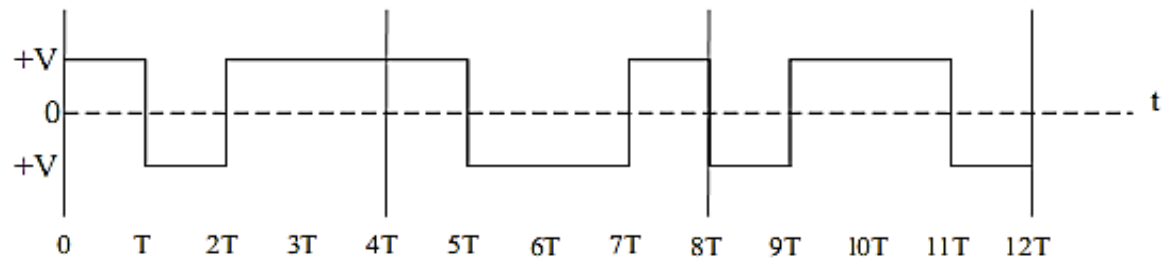
(α)

(β) Αντιστοίχιση PCM ψηφίων σε παλμούς.



(β)

(γ) Παράδειγμα κυματομορφής παλμού (μετάβαση μεταξύ δύο επιπέδων τάσης).



(γ)

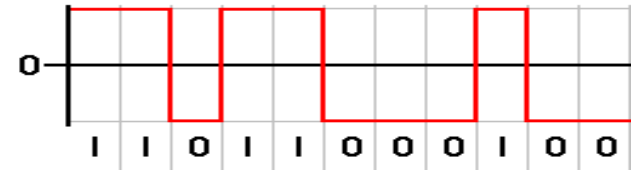
- Ο δέκτης πρέπει να **ανιχνεύσει** σωστά την παρουσία ή την απουσία παλμού.
- Η **πιθανότητα σωστής ανίχνευσης** εξαρτάται από την **ενέργεια** του παλμού και μεγιστοποιείται για διάρκεια του παλμού ίση με τη διάρκεια T του bit.

Κατηγορίες Κωδικοποίησης Γραμμής

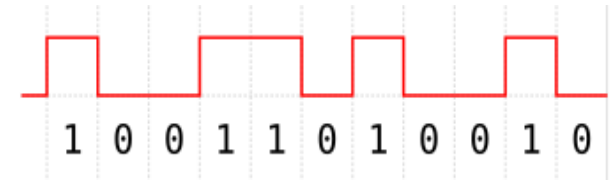
Η κωδικοποίηση γραμμής ([line coding](#)) αναπαριστά το προς μετάδοση ψηφιακό σήμα, σαν ένα σήμα διακριτού χρόνου και διακριτού πλάτους, το οποίο είναι βέλτιστα ρυθμισμένο ως προς τις ιδιότητες του καναλιού επικοινωνίας και του δέκτη.

Βασικότερες κατηγορίες κωδικοποίησης γραμμής:

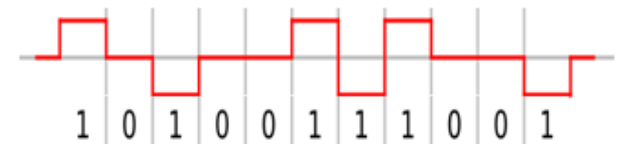
- **Πολική** ([polar](#)): στη διάρκεια ενός bit αποστέλλεται ένας παλμός ή το αρνητικό ενός παλμού.



- **Μονοπολική** ([Unipolar](#)): στη διάρκεια ενός bit αποστέλλεται ένας παλμός ή το μηδέν (απουσία παλμού).



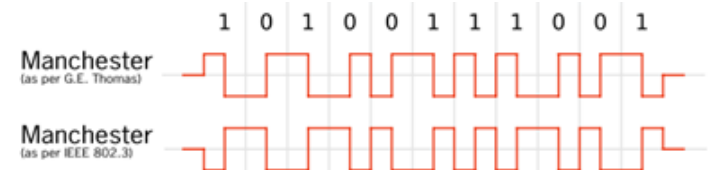
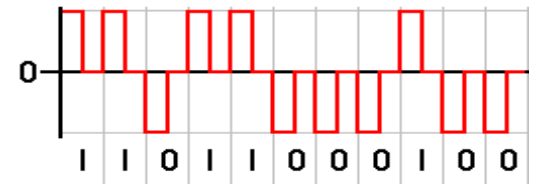
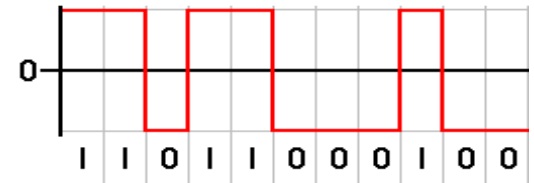
- **Διπολική** ([Bipolar](#)): χρησιμοποιούνται τρεις στάθμες πλάτους, η μηδενική για το δυαδικό "0", ενώ το δυαδικό "1" απεικονίζεται με δύο στάθμες ίσου πλάτους, εναλλάξ μία θετική και μία αρνητική.



Είδη Σηματοδοσίας

Βασικότερα είδη παλμών σηματοδοσίας:

- **Nonreturn-to-zero (NRZ)**: ο παλμός διαρκεί καθ' όλη την περίοδο του bit
- **Return-to-zero (RZ)**: ο παλμός έχει διάρκεια ίση με τη μισή περίοδο του bit
- **Διαχωρισμένης φάσης (Phase encoded ή Manchester coding)**: αποστέλλεται ένας 2-φ παλμός
- **Multilevel binary**

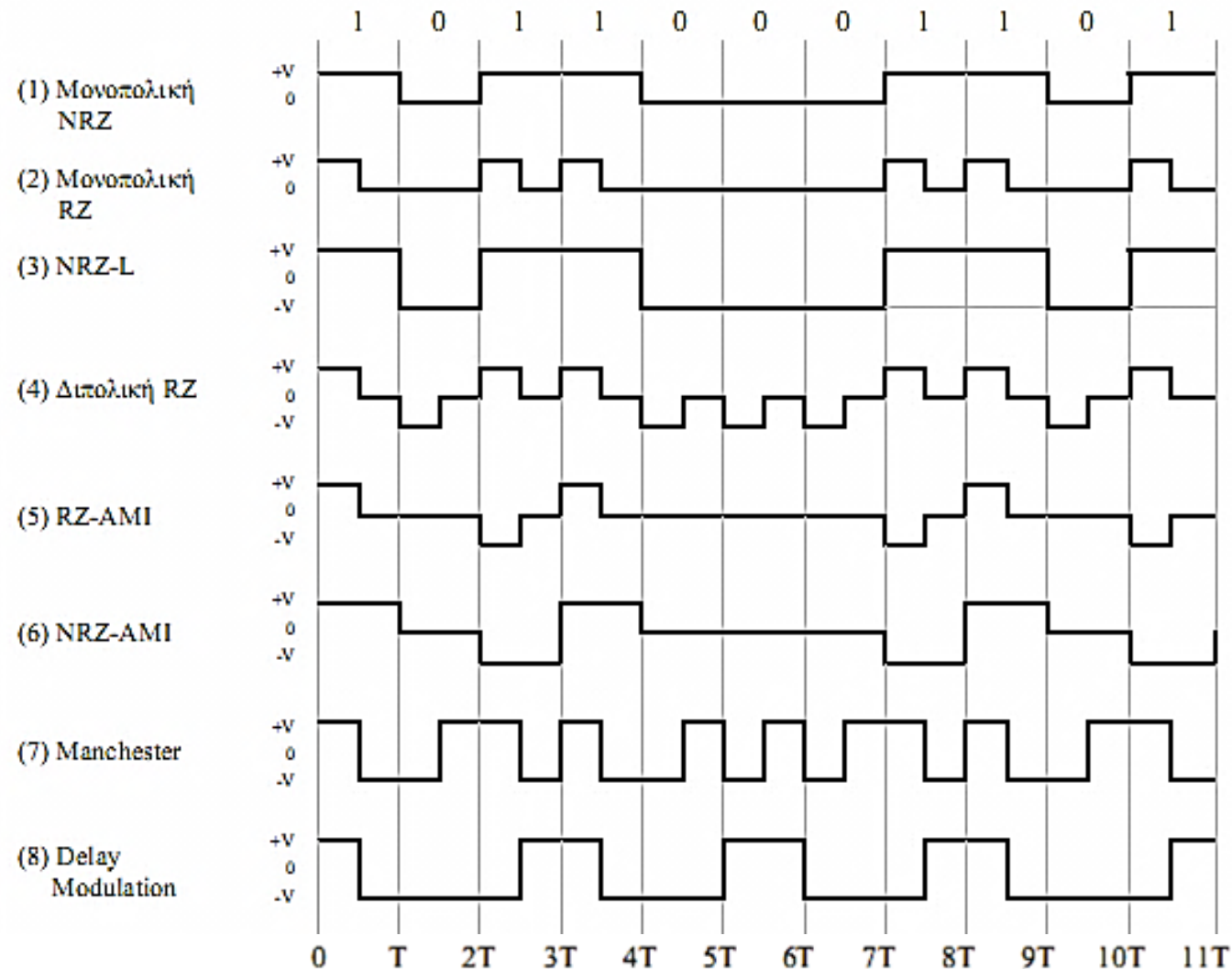


Κριτήρια Επιλογής Κατηγορίας Κωδικοποίησης

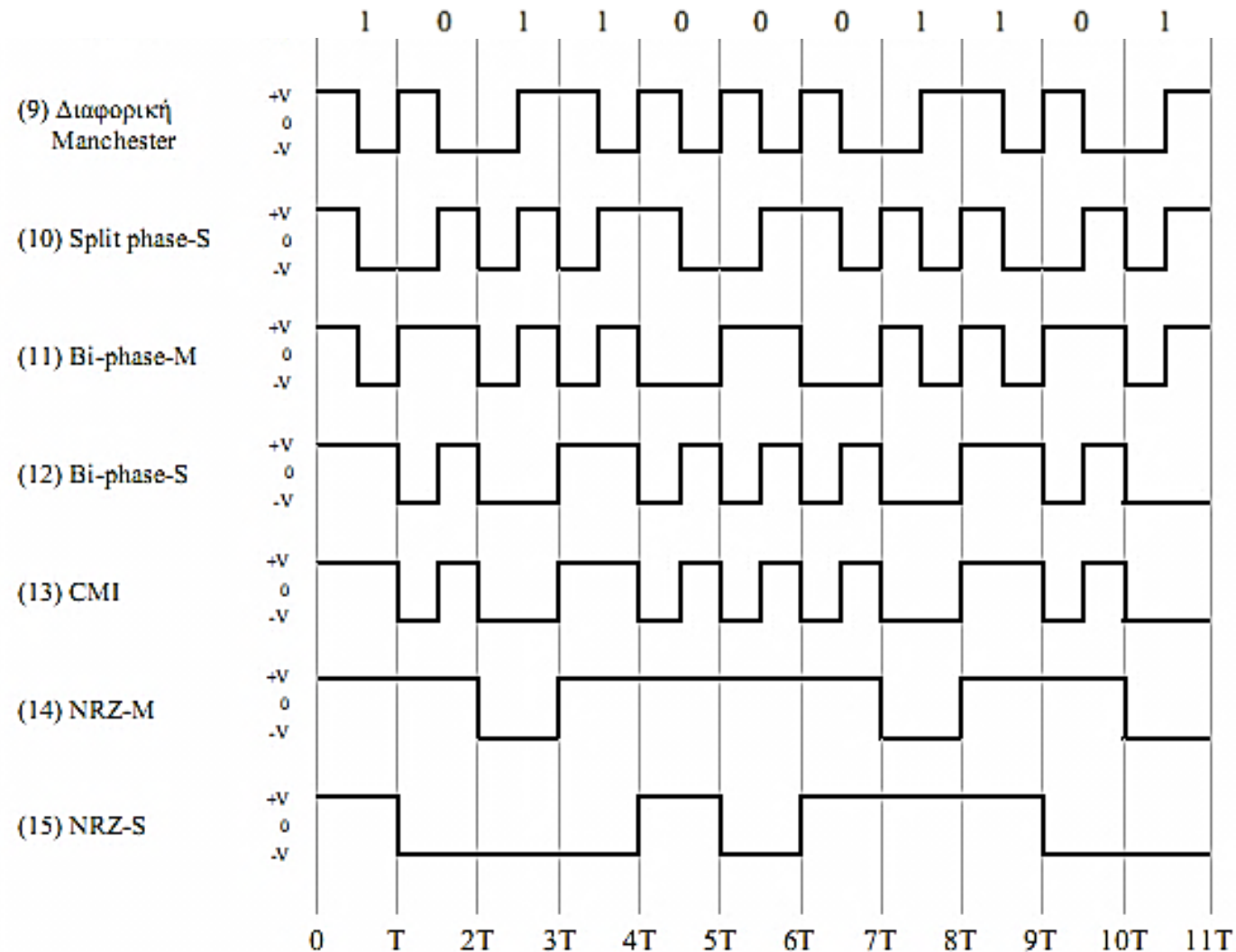
Κατηγορίες κωδικοποίησης + είδη παλμών σηματοδοσίας = κωδικοποιήσεις γραμμής

1. **DC συνιστώσα:** Για κανάλια με χαμηλή απόκριση στις χαμηλές συχνότητες (π.χ. τηλεφωνικό κανάλι) είναι επιθυμητή η απουσία της DC συνιστώσας.
2. **Συγχρονισμός:** Ο συγχρονισμός bit ή συμβόλου είναι πολύ σημαντικός για οποιοδήποτε ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Η ανάκτηση του συγχρονισμού από τη σηματοδοσία είναι πολύ χρήσιμη ιδιότητα.
3. **Ανίχνευση σφαλμάτων:** Ορισμένες κωδικοποιήσεις παρέχουν τρόπους ανίχνευσης σφαλμάτων χωρίς την εισαγωγή επιπλέον bits στην ακολουθία δεδομένων.
4. **Εύρος ζώνης:** Συγκεκριμένες κωδικοποιήσεις (π.χ. κωδικοποιήσεις πολλαπλών επιπέδων), αυξάνουν την φασματική απόδοση και επιτρέπουν τη μείωση του απαιτούμενου εύρους ζώνης για ένα δεδομένο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων.
5. **Διαφορική κωδικοποίηση:** Οποιαδήποτε αντιστροφή της πολικότητας της κυματομορφής δεν επηρεάζει την ανίχνευση των δεδομένων.
6. **Ανοσία στο θόρυβο:** Ένα βασικό κριτήριο επιλογής μιας PCM κυματομορφής είναι και η ανοσία της στο θόρυβο, που εκφράζεται μέσω της πιθανότητας σφάλματος.

Παραδείγματα Κωδικοποιήσεων Γραμμής (1/2)



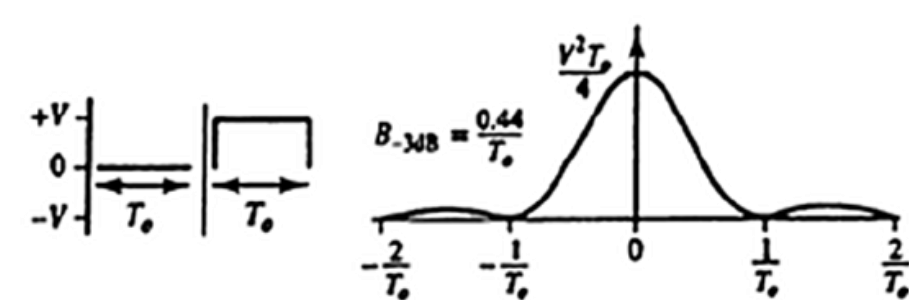
Παραδείγματα Κωδικοποιήσεων Γραμμής (2/2)



Δυναδικοί Κώδικες Γραμμής

- Μονοπολική με μη-επαναφορά στο μηδέν (NRZ)
- Μονοπολική με επαναφορά στο μηδέν (RZ)
- Διπολική με επαναφορά στο μηδέν (RZ)
- Διπολική με μη-επαναφορά στο μηδέν (NRZ) ή NRZ-AMI (Alternate Mark Inversing)
- Manchester (ή Split Phase ή Digital Biphas)
- Miller ή Delay Modulation (DM)
- Διπολική με μη-επαναφορά στο μηδέν
- Αντίστροφη εναλλασσόμενου σημείου με επαναφορά στο μηδέν

Μονοπολική με μη-επαναφορά στο μηδέν (NRZ)

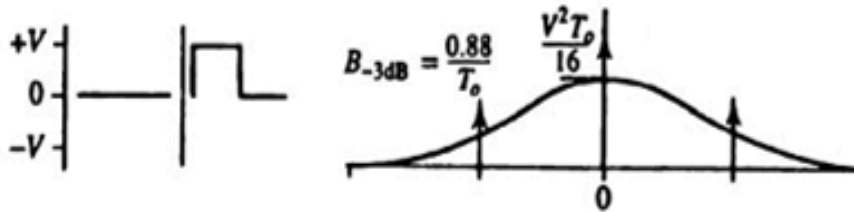


- 0 = δεν αποστέλλεται παλμός
- 1 = παλμός σταθερής τάσης

Χαρακτηριστικά:

- Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μορφής κωδικοποίησης είναι η εύκολη δημιουργία της και το σχετικά μικρό εύρος ζώνης.
- Όμως, η έλλειψη συγχρονισμού και πιθανές αστάθειες χρονισμού (timing jitter) μπορούν να προκαλέσουν μακριές αλυσίδες από 0 και 1, επειδή δεν υπάρχουν μεταβάσεις του παλμού.
- Η κωδικοποίηση δεν έχει τη δυνατότητα ανίχνευσης σφαλμάτων.
- Υπάρχει μια σημαντική DC συνιστώσα όπως επίσης και σημαντικό φασματικό περιεχόμενο κοντά στο DC.

Μονοπολική με επαναφορά στο μηδέν (RZ)

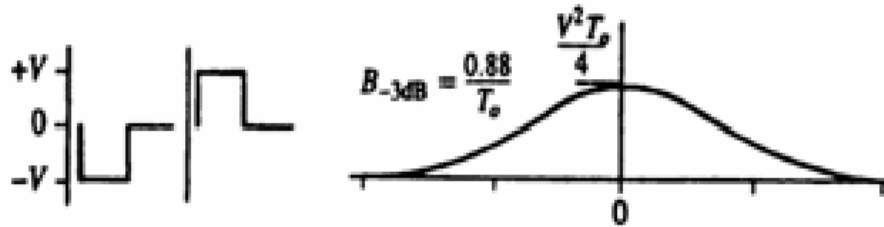


- 0 = δεν αποστέλλεται παλμός
- 1 = παλμός που επιστρέφει το μηδέν πριν το τέλος της διάρκειας του ψηφίου

Χαρακτηριστικά:

- Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι η εύκολη υλοποίηση και η παρουσία μιας διακριτής φασματικής συνιστώσας στη συχνότητα με τιμή ίση με το ρυθμό συμβόλων R (Hz), που παρέχει έναν απλό τρόπο ανάκτησης χρονισμού.
- Σημαντικό μειονέκτημα η ύπαρξη μιας DC συνιστώσα, όπως επίσης και φασματικού περιεχομένου στο DC.
- Επιπλέον, μια μακριά αλυσίδα από 0 θα έχει ως αποτέλεσμα απουσία διελεύσεων από το μηδέν για μεγάλο χρονικό διάστημα και συνεπώς απώλεια συγχρονισμού.
- Η κωδικοποίηση δεν διαθέτει την ικανότητα ανίχνευσης σφαλμάτων.

Διπολική με επαναφορά στο μηδέν (NRZ)

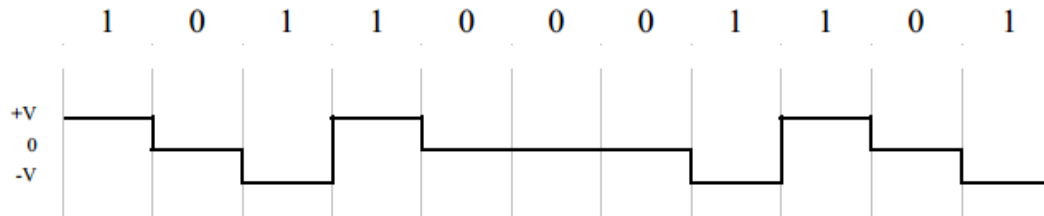


- Παλμοί με εναλλακτικά θετική και αρνητική πολικότητα

Χαρακτηριστικά:

- Η ανάκτηση χρονισμού είναι σχετικά εύκολη.
- Μειονεκτήματα είναι το μη μηδενικό φασματικό περιεχόμενο στο DC, και η έλλειψη ικανότητας ανίχνευσης σφαλμάτων.

Διπολική NRZ ή NRZ-AMI (Alternate Mark Inversion)



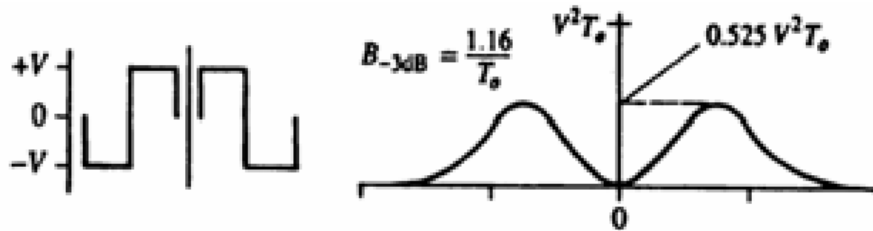
1 = εναλλασσόμενες θετικές και αρνητικές στάθμες τάσης, καθ' όλη τη διάρκεια του bit.

0 = μηδενική στάθμη τάσης καθ' όλη τη διάρκεια του bit.

Χαρακτηριστικά:

- Έχει μηδενική DC συνιστώσα και μηδενικό φασματικό περιεχόμενο στο DC.
- Η ανάκτηση χρονισμού δεν είναι εύκολη.
- Λόγω της εναλλασσόμενης πολικότητας που χρησιμοποιείται, διαθέτει ικανότητα ανίχνευσης σφαλμάτων

Κωδικοποίηση Manchester (ή Split Phase ή Digital Biphas)

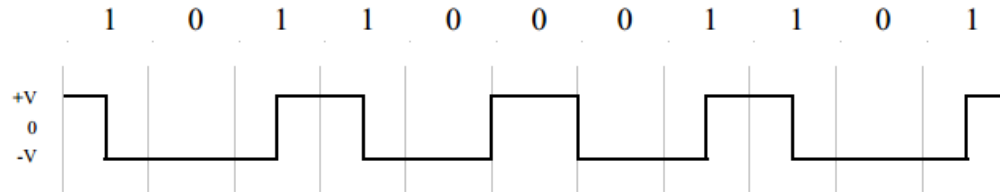


- 1 = θετικός παλμός στο πρώτο μισό, αρνητικός στο δεύτερο μισό
- 0 = διαμετρικά αντίθετος

Χαρακτηριστικά:

- Πλεονεκτήματα είναι η μηδενική DC συνιστώσα και η καλή απόδοση σφάλματος.
- Η ανάκτηση χρονισμού είναι εύκολη, καθώς υπάρχουν διελεύσεις από το μηδέν σε κάθε διάστημα ενός bit.
- Το μεγάλο της μειονέκτημα είναι ότι απαιτεί ένα εύρος ζώνης μεγαλύτερο από τις άλλες κωδικοποιήσεις που έχουν εξεταστεί μέχρι τώρα.
- Επίσης, δεν διαθέτει ικανότητα ανίχνευσης σφαλμάτων.

Miller ή Delay Modulation (DM)



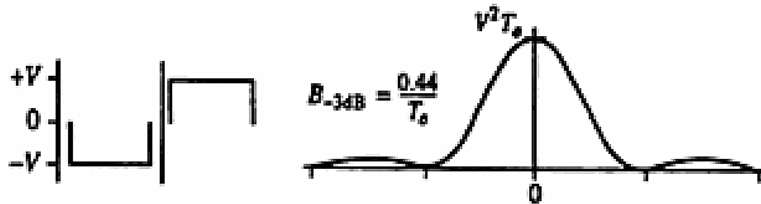
1 = μετάβαση στο μέσο της διάρκειας του bit

0 = απουσία μετάβασης στη διάρκεια του bit. Αν όμως ένα 0 ακολουθείται από ένα άλλο 0, υπάρχει μετάβαση στο τέλος του διαστήματος του bit, δηλαδή ανάμεσα σε δύο 0.

Χαρακτηριστικά:

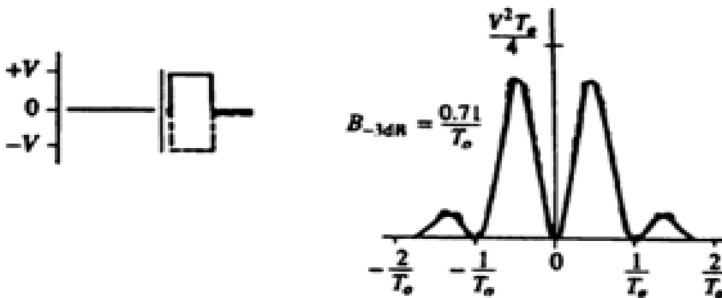
- Πρόκειται για κωδικοποίηση με μνήμη.
- Απαιτεί πολύ μικρότερο εύρος ζώνης, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας περικλείεται σε λιγότερο από $R/2$ (Hz), όσο είναι δηλαδή και το ελάχιστο εύρος ζώνης κατά Nyquist.
- Παρέχει πληροφορία χρονισμού στο δέκτη, χωρίς να θυσιάζει επιπλέον εύρος ζώνης.
- Έχει χαμηλό φασματικό περιεχόμενο στο DC και μηδενική DCσυνιστώσα.
- Δεν διαθέτει ικανότητα ανίχνευσης σφαλμάτων.

Άλλες Κωδικοποιήσεις Βασικής Ζώνης



Διπολική με μη-επαναφορά στο μηδέν

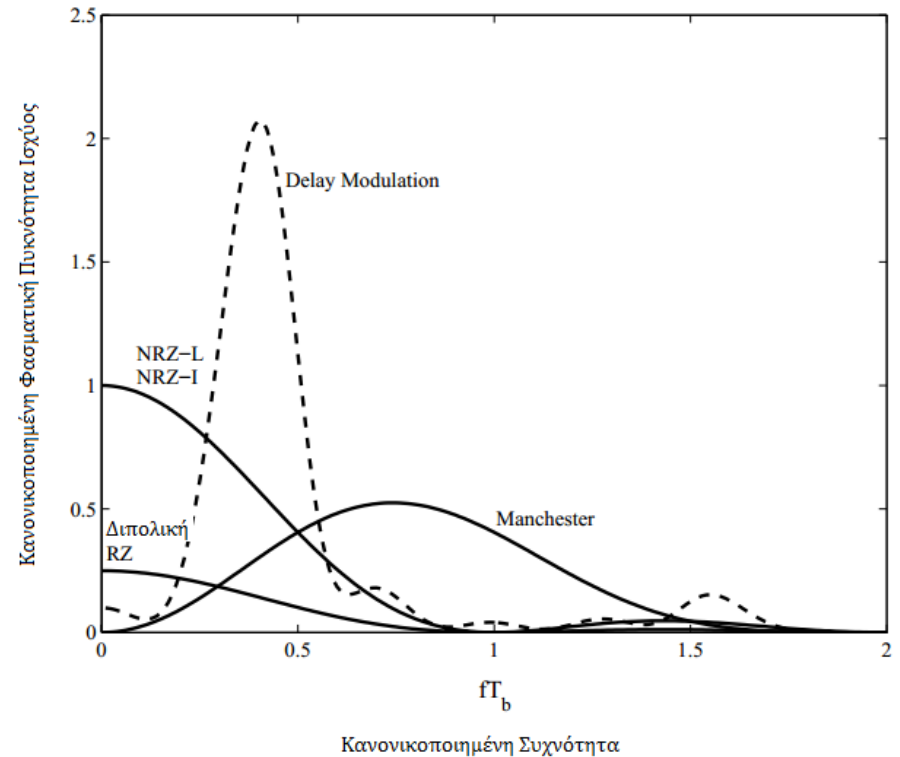
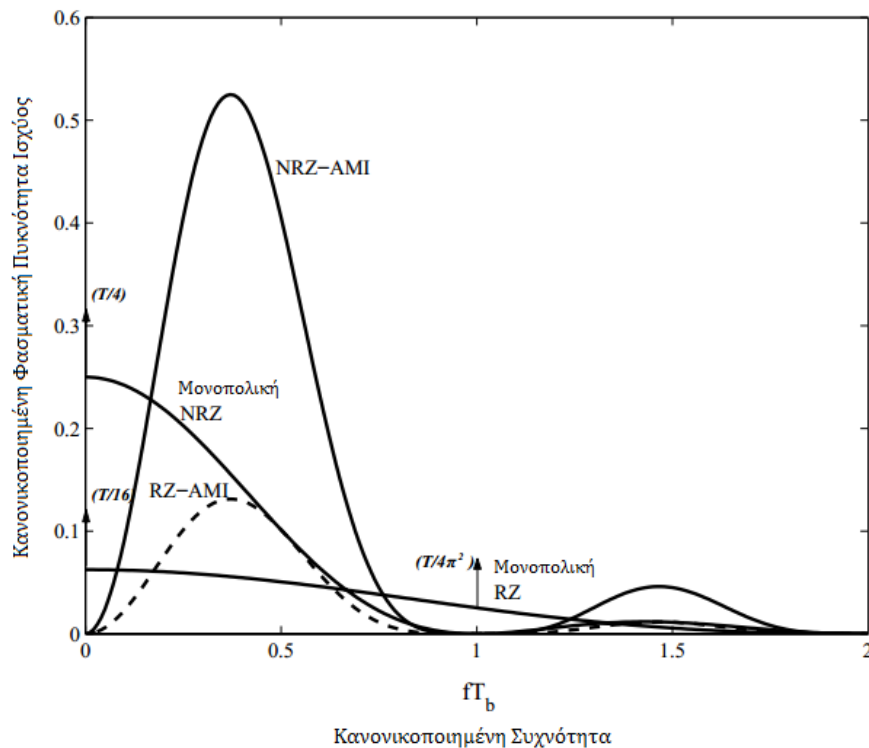
- 1 = παλμός θετικής σταθερής τάσης
- 0 = παλμός αρνητικής σταθερής τάσης



Αντίστροφη εναλλασσόμενου σημείου με επαναφορά στο μηδέν

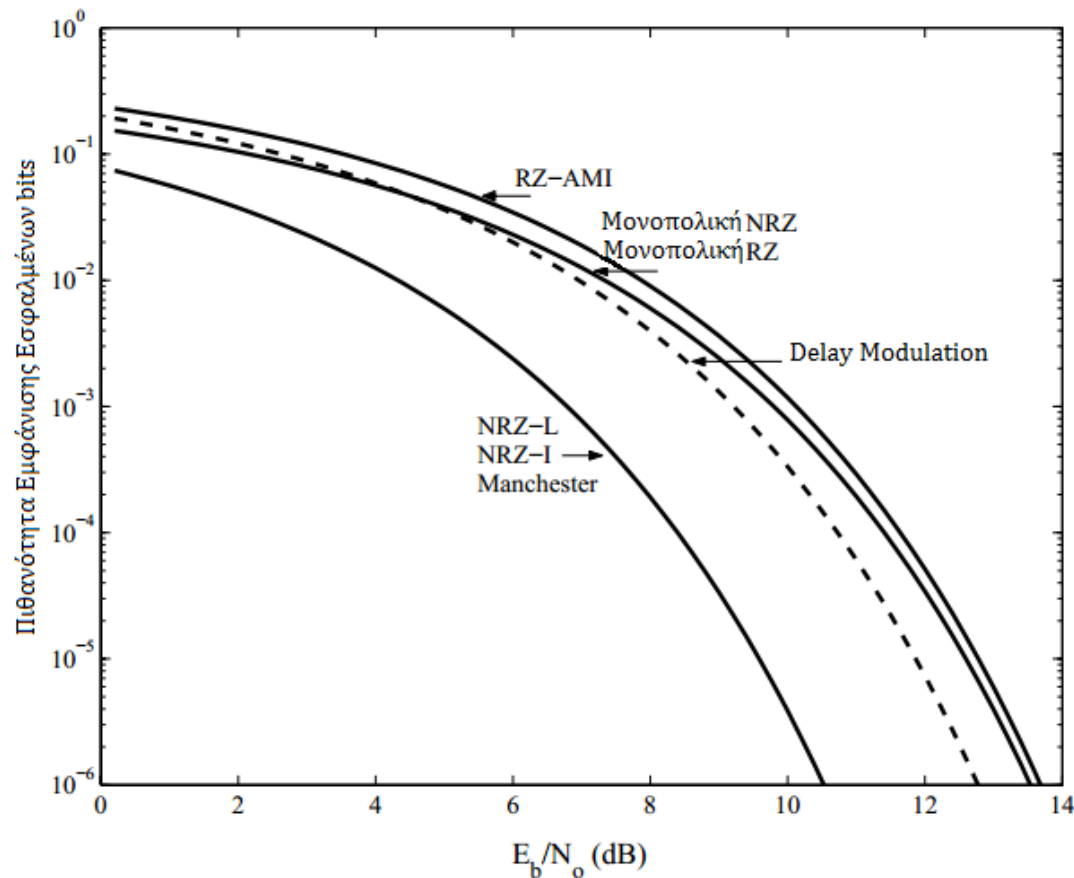
- 0 = θετικοί και αρνητικοί παλμοί σε εναλλαγή
- 1 = παλμός που επιστρέφει το μηδέν πριν το τέλος της διάρκειας του ψηφίου

Κανονικοποιημένη Φασματική Πυκνότητα Ισχύος



Διαγράμματα της κανονικοποιημένης φασματικής πυκνότητας ισχύος ως προς την κανονικοποιημένη συχνότητα fT_b , για τις κωδικοποιήσεις γραμμής: Μονοπολική RZ, Μονοπολική NRZ, RZ-AMI, NRZ-AMI, Διπολική RZ, Manchester, Delay Modulation (Miller), NRZ-L και NRZ-I.

Πιθανότητα Εμφάνισης Εσφαλμένων Bits



Διαγράμματα της πιθανότητας εμφάνισης εσφαλμένων bits ως συνάρτηση του λόγου E_b/N_0 , για τις κωδικοποιήσεις γραμμής: Μονοπολική RZ, Μονοπολική NRZ, RZ-AMI, Manchester, Delay Modulation (Miller), NRZ-L και NRZ-I.

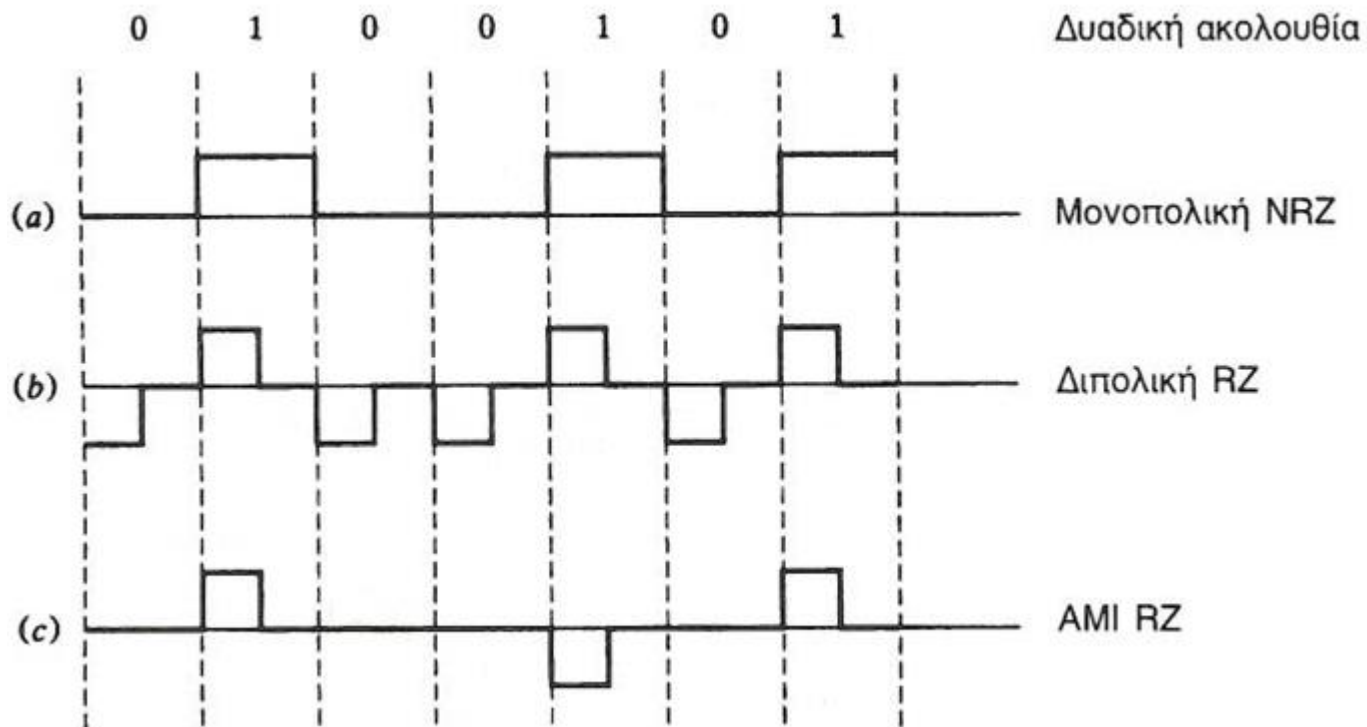
Συνήθεις Κωδικοποιήσεις Γραμμής

- [AMI](#)
 - [Modified AMI codes](#): B8ZS, B6ZS, B3ZS, HDB3
 - [2B1Q](#)
 - [4B5B](#)
 - [4B3T](#)
 - [6b/8b encoding](#)
 - [Hamming Code](#)
 - [8b/10b encoding](#)
 - [64b/66b encoding](#)
 - [128b/130b encoding](#)
 - [Coded mark inversion](#) (CMI)
 - [Conditioned Diphase](#)
 - [Eight-to-Fourteen Modulation](#) (EFM) used in [Compact Disc](#)
 - [EFMPlus](#) used in [DVD](#)
 - RZ — [Return-to-zero](#)
 - NRZ — [Non-return-to-zero](#)
 - NRZI — [Non-return-to-zero, inverted](#)
 - [Manchester code](#) (also variants [Differential Manchester](#) & [Biphase mark code](#))
 - [pulse-position modulation](#) (a generalization of Manchester code)
 - [Miller encoding](#) (also known as Delay encoding or [Modified Frequency Modulation](#), and has variant Modified Miller encoding)
 - [MLT-3 Encoding](#)
 - [Hybrid Ternary Codes](#)
 - [Surround by complement](#) (SBC)
 - [TC-PAM](#)
- Optical line codes:
- [Carrier-Suppressed Return-to-Zero](#)
 - [Alternate-Phase Return-to-Zero](#)

Άσκηση 1

Για την δυαδική ακολουθία **0100101** να σχεδιαστούν οι κυματομορφές για τις εξής μορφοποιήσεις σηματοδοσίας: (α) Μονοπολική NRZ, (β) Διπολική RZ, και (γ) Εναλλακτική αντιστροφής σημείου (AMI-RZ)

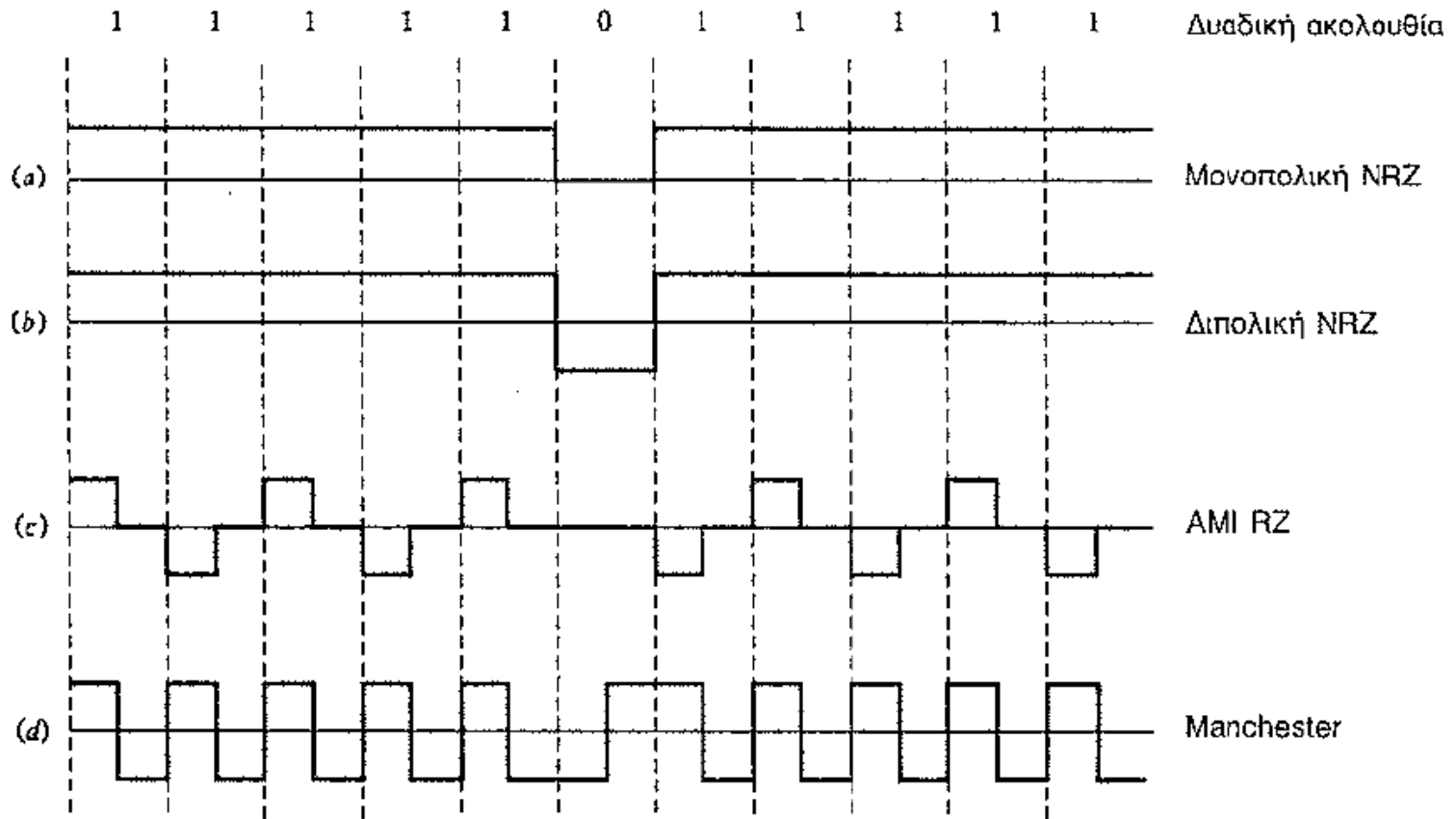
Απάντηση:



Άσκηση 2

Έστω δυαδική ακολουθία με μακρά ακολουθία 1 που ακολουθούνται από ένα 0 και ύστερα μακρά ακολουθία 1. Να σχεδιαστούν οι κυματομορφές για σηματοδοσίες: (α) Μονοπολική NRZ, (β) Διπολική NRZ, (γ) Σηματοδοσία AMI, (δ) Διαχωρισμένης φάσης (Manchester)

Απάντηση:



Άσκηση 3

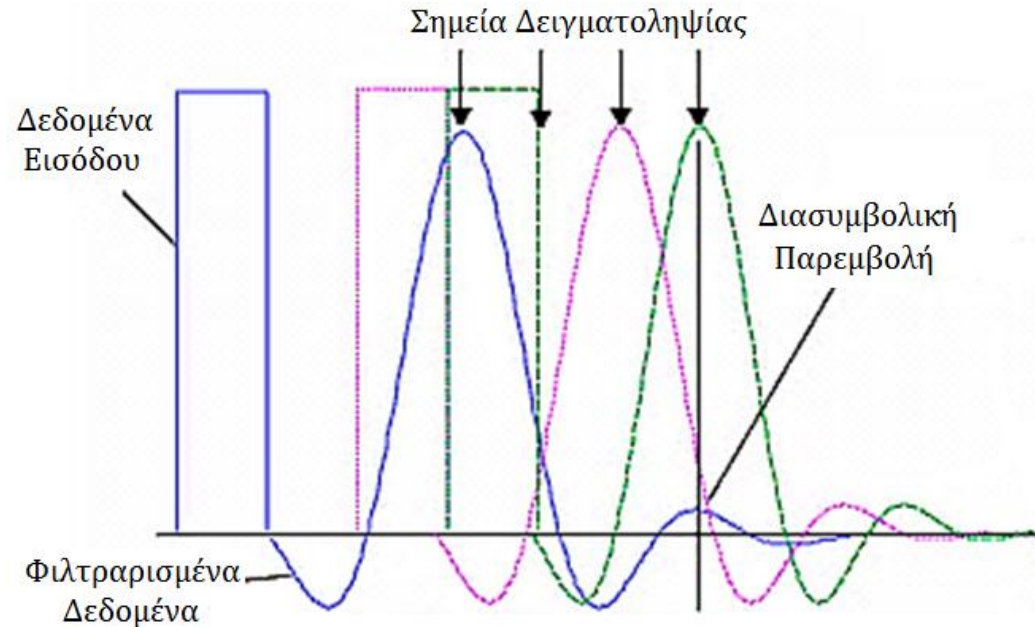
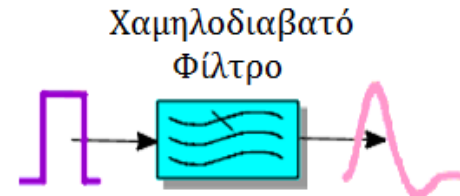
Η κυματομορφή σηματοδοσίας AMI που παριστάνει την δυαδική ακολουθία 0100101011 μεταδίδεται σε κανάλι με θόρυβο. Ο δέκτης λαμβάνει την ακόλουθη κυματομορφή η οποία περιέχει ένα μόνο σφάλμα. Να εντοπιστεί η θέση του σφάλματος.

Απάντηση: Το σφάλμα βρίσκεται στη θέση του 7^{ου} bit, όπου έχουμε αρνητικό παλμό. Το bit αυτό έχει σφάλμα επειδή με την μορφοποίηση σηματοδοσίας AMI για το σύμβολο 1 χρησιμοποιούνται εναλλασσόμενοι θετικοί και αρνητικοί παλμοί, ενώ για το σύμβολο 0 δεν χρησιμοποιείται παλμός. Ο παλμός στη θέση 7 που παριστάνει το τρίτο ψηφίο 1 θα έπρεπε να έχει θετική πολικότητα.



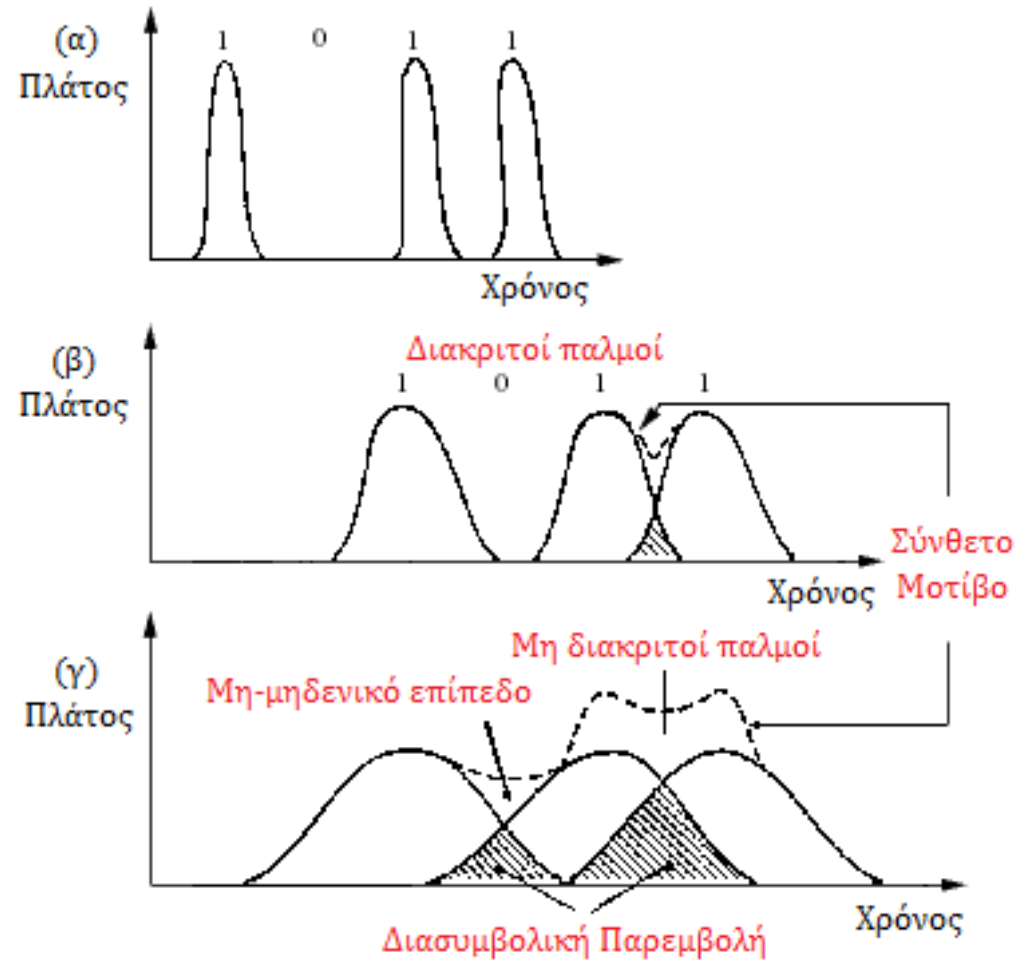
Διασυμβολική Παρεμβολή

- **Διασυμβολική παρεμβολή** (Intersymbol Interference - ISI) είναι μια μορφή παραμόρφωσης ενός σήματος, στην οποία μέρος της ενέργειας ενός συμβόλου επικαλύπτεται με τα γειτονικά του.
- Προκαλείται είτε από την **πολυδιάδρομη μετάδοση** ([multipath propagation](#)) είτε από την **μη-γραμμική απόκριση συχνότητας** του καναλιού.
- Υποβαθμίζει σοβαρά την ικανότητα του ανιχνευτή δεδομένων στο δέκτη να **διαχωρίσει** το τρέχον σύμβολο από τα γειτονικά του.



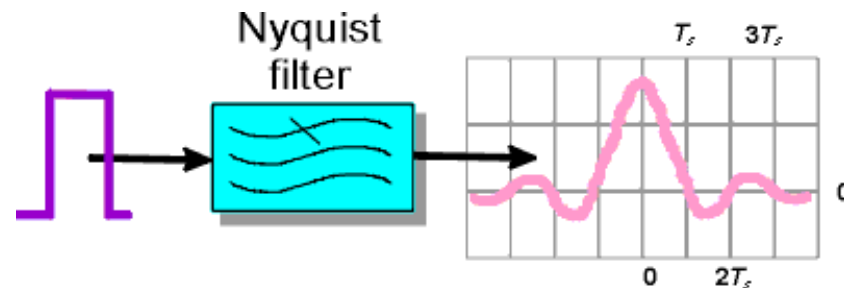
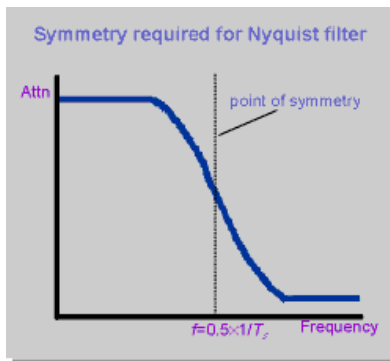
Διασυμβολική Παρεμβολή

- Ακόμη και σε κανάλι δίχως θόρυβο, η διασυμβολική παρεμβολή οδηγεί σε λανθασμένη ανίχνευση συμβόλων, αυξάνοντας τον **αναπόφευκτο ρυθμό σφαλμάτων** (irreducible error rate) και μειώνοντας την **απόδοση ρυθμού σφαλμάτων** ([Bit Error Rate – BER](#)).
- Για την καταπολέμηση της διασυμβολικής παρεμβολής χρησιμοποιούνται: (α) τεχνικές που εξασφαλίζουν ότι η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού έχει την **επονομαζόμενη απόκριση Nyquist** (Nyquist frequency response) καθώς και (β) κώδικες διόρθωσης λαθών.



Φίλτρα Nyquist

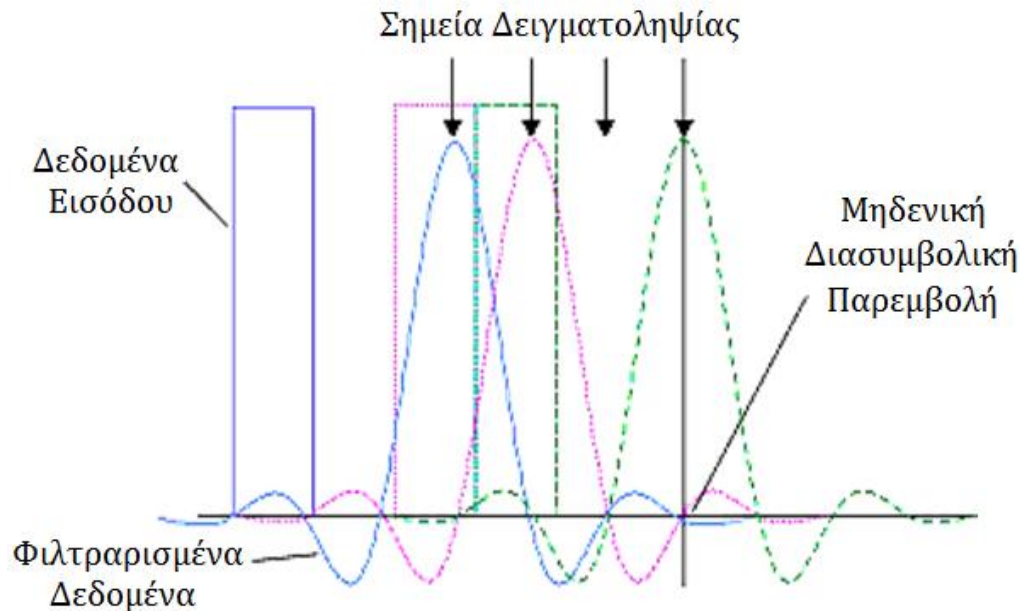
- Το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής μπορεί να περιοριστεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην υποβαθμίζει την ποιότητα της ζεύξης ως προς τον ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων.
- Αν η **συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού επικοινωνίας** (συμπεριλαμβανομένου του πομπού, μέσου μετάδοσης και δέκτη) είναι σύμφωνη κατά το [κριτήριο Nyquist](#), τότε η διασυμβολική παρεμβολή **μηδενίζεται**.
- Τα σύμβολα εξακολουθούν να διαχέονται, αλλά η κυματομορφή περνά από την **τιμή μηδέν** σε χρονικές στιγμές που είναι **πολλαπλάσια της περιόδου** των συμβόλων.



- Η χαρακτηριστική ιδιότητα της συνάρτησης μεταφοράς κατά Nyquist είναι ότι η **ζώνη μετάβασης** μεταξύ των ζωνών διέλευσης και αποκοπής είναι **συμμετρική** περί τη συχνότητα $f_s = 1/2T_s$

Αντιμετώπιση της Διασυμβολικής Παρεμβολής

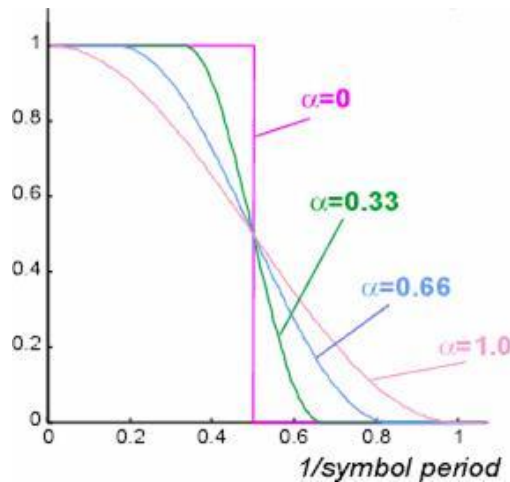
- Διενεργώντας τη διαδικασία της δειγματοληψίας των δεδομένων τις χρονικές εκείνες στιγμές που η διασυμβολική παρεμβολή **διέρχεται δια του μηδενός**, η ενέργεια διασποράς των γειτονικών συμβόλων δεν επηρεάζει την τιμή του τρέχοντος συμβόλου τη στιγμή της δειγματοληψίας.
- Αυτό απαιτεί **εξαιρετικά ακριβή χρονισμό δειγματοληψίας** στο δέκτη.



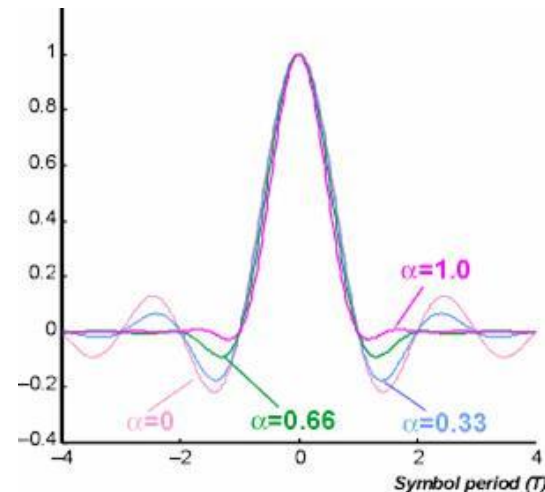
Επίτευξη μηδενικής διασυμβολικής παρεμβολής με φίλτρο Nyquist.

Φίλτρα υψωμένου συνημιτόνου

- Τα φίλτρα υψωμένου συνημιτόνου ([raised cosine filters](#)) αποτελούν μια δημοφιλή υλοποίηση των φίλτρων Nyquist.
- Ονομάζονται έτσι επειδή το σχήμα της ζώνης μετάβασης μοιάζει με τμήμα της κυματομορφής ενός συνημιτόνου.
- Η οξύτητα του φίλτρου ελέγχεται από τον παράγοντα κλίσης (α) ([roll-off factor](#)).



Απόκριση συχνότητας

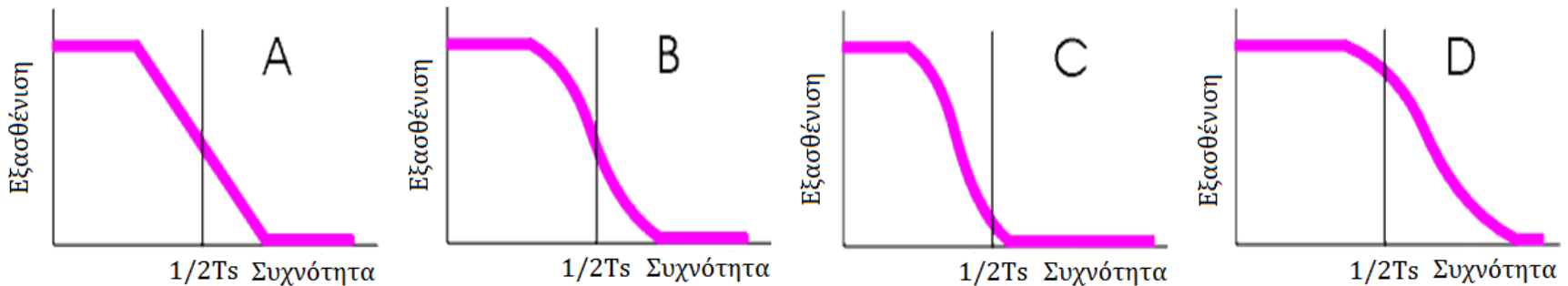


Κρουστική απόκριση

- Το εύρος ζώνης **B** που καταλαμβάνεται από ένα σήμα δεδομένων που έχει φιλτραριστεί από φίλτρο υψωμένου συνημιτόνου, είναι αυξημένο από την ελάχιστη τιμή $B_{\text{MIN}} = \frac{1}{2T_s}$ και ισούται με $B = \frac{1}{2T_s} (1 + \alpha)$

Άσκηση 4

Ποιες από τις παρακάτω αποκρίσεις φίλτρων εμφανίζουν τις σωστές ιδιότητες για την επίτευξη μηδενικής διασυμβολικής παρεμβολής;



Απάντηση:

Το κριτήριο Nyquist για την επίτευξη μηδενικής διασυμβολικής παρεμβολής ορίζει η **ζώνη μετάβασης** μεταξύ των ζωνών διέλευσης και αποκοπής είναι **συμμετρική** περί τη συχνότητα $f_s = 1/2T_s$.

Με άλλα λόγια ότι η απόκριση πλάτους πρέπει να είναι συμμετρική ως προς μία συχνότητα ίση με το μισό της περιόδου των συμβόλων.

Παρατηρούμε ότι αυτό ισχύει μόνο για το σχήμα (B).

Άσκηση 5

Μία ακολουθία δεδομένων 4 επιπέδων βασικής ζώνης έχει περίοδο συμβόλων $100 \mu s$. (α) Ποιο είναι το ελάχιστο εύρος ζώνης που απαιτείται για εκπομπή, θεωρώντας ότι χρησιμοποιείται φίλτρο υψωμένου συνημιτόνου με $\alpha = 0,3$; (β) Πόσος χρόνος χρειάζεται για τη μετάδοση $1.000.000 \text{ bits}$; (γ) Αν απαιτείται η μετάδοση της πληροφορίας στο μισό χρόνο, πόσες καταστάσεις συμβόλων θα απαιτούνταν ώστε να διατηρηθεί ταυτόχρονα το ίδιο εύρος ζώνης μετάδοσης;

Απάντηση:

(α) Το ελάχιστο εύρος ζώνης που απαιτείται για την εκπομπή είναι το ήμισυ του ρυθμού της εκπομπής των συμβόλων σε βασική ζώνη για ιδανικό ορθογώνιο φίλτρο ($\alpha = 0$). Για $\alpha = 0,3$ το εύρος ζώνης πρέπει να αυξηθεί κατά ένα παράγοντα $(1 + \alpha)$. Άρα για περίοδο συμβόλων $100 \mu s$ ο ρυθμός εκπομπής συμβόλων είναι 10.000 symbols/s και επομένως το απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι $5.000 \times (1 + \alpha) = 6.500 \text{ Hz}$.

(β) Με σηματοδοσία 4 επιπέδων κωδικοποιούνται 2 bit ανά σύμβολο, οπότε ο ρυθμός των bits είναι διπλάσιος του ρυθμού εκπομπής συμβόλων, δηλ. 20 kbps . Ο χρόνος που απαιτείται για να αποσταλούν $1.000.000 \text{ bits}$ είναι $1.000.000 \text{ (bits)} / 20.000 \text{ (bits/s)} = 50 \text{ s}$.

(γ) Για να μειώσουμε το χρόνο εκπομπής στο ήμισυ θα πρέπει να κωδικοποιούμε διπλάσια bit ανά εκπεμπόμενο σύμβολο. Επομένως, για 4 bit ανά σύμβολο απαιτούν 16 καταστάσεις συμβόλων.

Άσκηση 6

Μία ψηφιακή ζεύξη δεδομένων βασικής ζώνης υποστηρίζει ρυθμό bit ίσο με 4.800 *bps* όταν χρησιμοποιεί φίλτρο υψωμένου συνημιτόνου με $\alpha = 0,6$. Πόσο γρηγορότερα θα μπορούσε να εκπέμπεται η πληροφορία αν η τιμή του α μειωνόταν σε 0,2;

Απάντηση:

Η χωρητικότητα του καναλιού μετάδοσης βασικής ζώνης δίνεται από:

$$C = 2B \log_2 M = (2B_{MIN} \log_2 M) / (1 + \alpha)$$

Όπου B είναι το εύρος ζώνης του σήματος μετά τη διέλευση από το φίλτρο υψωμένου συνημιτόνου και B_{MIN} είναι το εύρος ζώνης του καναλιού.

Για δυαδική σηματοδότηση ($M = 2$), η χωρητικότητα είναι $C = 4.800 \text{ bps}$, και $\alpha = 0,6$. Άρα:

$$4.800 = (2B_{MIN} \log_2 2) / (1 + 0,6)$$

Από την οποία προκύπτει ότι η χωρητικότητα του καναλιού είναι $B_{MIN} = 3.840 \text{ Hz}$.

Αν το α γίνει ίσο με 0,2 η χωρητικότητα του καναλιού:

$$C = 2 \times 3.840 \times 1 / (1 + 0,2) = 6.400 \text{ bps}$$

Άσκηση 7

Μία τεχνική διαμόρφωσης βασικής ζώνης και 16 καταστάσεων συμβόλων απαιτεί $\alpha = 1$ για αξιόπιστη μετάδοση. Ποιος είναι ο μέγιστος ρυθμός εκπομπής δεδομένων που μπορεί να υποστηριχθεί από τη ζεύξη αν το κανάλι θεωρηθεί αθόρυβο και το εύρος ζώνης είναι 3.200 Hz;

Απάντηση:

Η χωρητικότητα του καναλιού βασικής ζώνης δίνεται από τη σχέση:

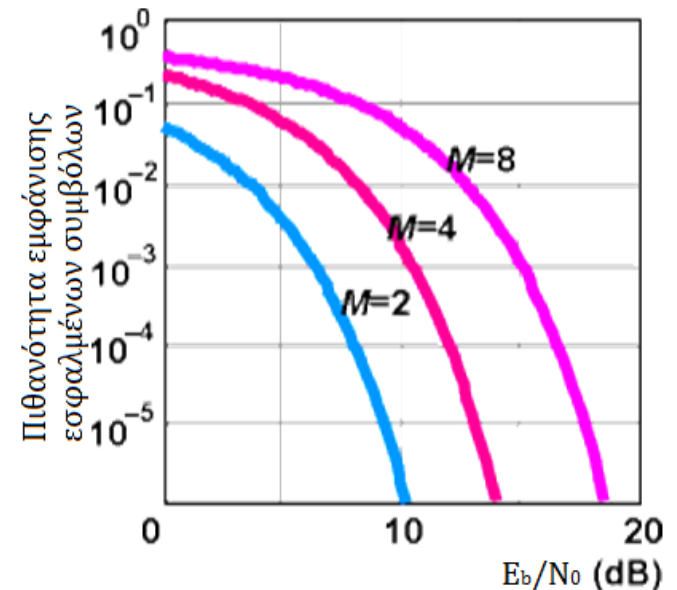
$$\begin{aligned} C &= 2B \log_2 M = (2B_{MIN} \log_2 M) / (1 + \alpha) \\ &= 2 \times 3.200 \times 4 / (1 + 1) = 3.200 \text{ bps} \end{aligned}$$

Άσκηση 8

Ένα καλωδιακό modem βασικής ζώνης για δυαδική σηματοδότηση ($M=2$) εμφανίζει ρυθμό ασφαμένων συμβόλων ίσο με 1 προς 10^6 . Να προσδιοριστεί η τιμή του πηλίκου E_b/N_0 για σηματοδότηση 4 επιπέδων ($M=4$).

Απάντηση:

Από το διάγραμμα εμφάνισης ασφαμένων συμβόλων για ένα ρυθμό λαθών ίσο με 1 προς 10^6 και δυαδική σηματοδότηση ($M=2$), παρατηρούμε ότι αντιστοιχεί σε μία τιμή του πηλίκου E_b/N_0 περίπου ίση με 10 dB. Ο ρυθμός εμφάνισης ασφαμένων συμβόλων αν εφαρμοστεί σηματοδότηση 4 καταστάσεων ($M=4$) είναι περίπου ίσος με 1 προς 10^3 .



Παρατηρούμε ότι η αύξηση των καταστάσεων σηματοδότησης από 2 σε 4 μείωσε κατά 1.000 περίπου φορές τον ρυθμό εμφάνισης ασφαμένων συμβόλων.

Άσκηση 9

Μια εταιρεία επιθυμεί να αυξήσει την παροχή ενός modem αλλάζοντας τη σηματοδοσία βασικής ζώνης από δυαδική σε οκταδική, ενώ παράλληλα επιθυμεί να κρατηθεί η αξιοπιστία σε ρυθμό όχι χειρότερο από 10^{-4} .

(α) Να προσδιορίσετε τη μείωση που επιφέρει η αλλαγή αυτή στην ανοχή στο θόρυβο.

(β) Ποια είναι η θεωρητικά ελάχιστη τιμή που απαιτείται για να υποστηριχθεί φασματική απόδοση που επιτυγχάνεται για modem οκταδικής σηματοδοσίας;

Απάντηση:

(α) Από το διάγραμμα της προηγούμενης άσκησης παρατηρούμε ότι στην πιθανότητα 10^{-4} απαιτείται αύξηση ενέργειας του σήματος κατά 8 dB ώστε να διατηρηθεί σταθερός ο ρυθμός εσφαλμένων συμβόλων. Δηλ. το νέο modem θα εμφανίζει μικρότερη ανοχή στο θόρυβο κατά 8 dB. Στο επίπεδο σφάλματος 10^{-4} το οκταδικό modem απαιτεί σχεδόν $E_b/N_0 = 12,5 \text{ dB}$

(β) Ένα οκταδικό modem βασικής ζώνης έχει μέγιστη φασματική απόδοση 6 bit/s/Hz . Εφαρμόζοντας τα δεδομένα, στον τύπο Shannon – Hartley, έχουμε:

$$\begin{aligned}\frac{C}{B} &= \log_2 \left(1 + \frac{E_b C}{N_0 B} \right) \Rightarrow 6 = \log_2 \left(1 + 6 \frac{E_b}{N_0} \right) \\ \Rightarrow \frac{E_b}{N_0(\min)} &= (2^6 - 1)/6 = 10,5 \text{ dB}\end{aligned}$$