

Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα Ι

Διάλεξη 12: Βασικές Αρχές και Έννοιες Ψηφιακών Επικοινωνιών

Δρ. Μιχάλης Παρασκευάς
Επίκουρος Καθηγητής

Ατζέντα

1. Παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδίαση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων
2. Αναπαράσταση ψηφιακών σημάτων
3. Φάσμα παλμού δεδομένων
4. Φάσμα μίας σειράς δεδομένων Βασικής Ζώνης
5. Διαδικασία διαμόρφωσης (μίξη)
6. Διανυσματικός διαμορφωτής
7. Βασικές αρχές εκπομπής δεδομένων

Παράγοντες Σχεδιασμού Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων

- **Διαθεσιμότητα Υλικού και Λογισμικού**

Ύπαρξη τεχνολογικών μέσω ή υπολογιστική ισχύς για να υλοποιηθεί μία τεχνική, π.χ. στο GSM επιλέχθηκε η διαμόρφωση GMSK αντί της τεχνικά ανώτερης QPSK, λόγω χαμηλότερης υπολογιστικής πολυπλοκότητας.

- **Κατανάλωση Ισχύος**

Ειδικά σε κινητές επικοινωνίες, π.χ. κινητή τηλεφωνία η κατανάλωση ισχύος είναι σημαντική. Σχεδόν το 50% της ισχύος που προσφέρει η μπαταρία καταναλώνεται ως θερμότητα στην ενισχυτή RF.

- **Μέγεθος Συσκευών**

Η διαρκής τάση σμίκρυνσης των συσκευών, προκαλεί δυσκολίες τόσο για τον επεξεργαστή DSP όσο και για την κεραία.

- **Κρατικές Προδιαγραφές και Πρότυπα**

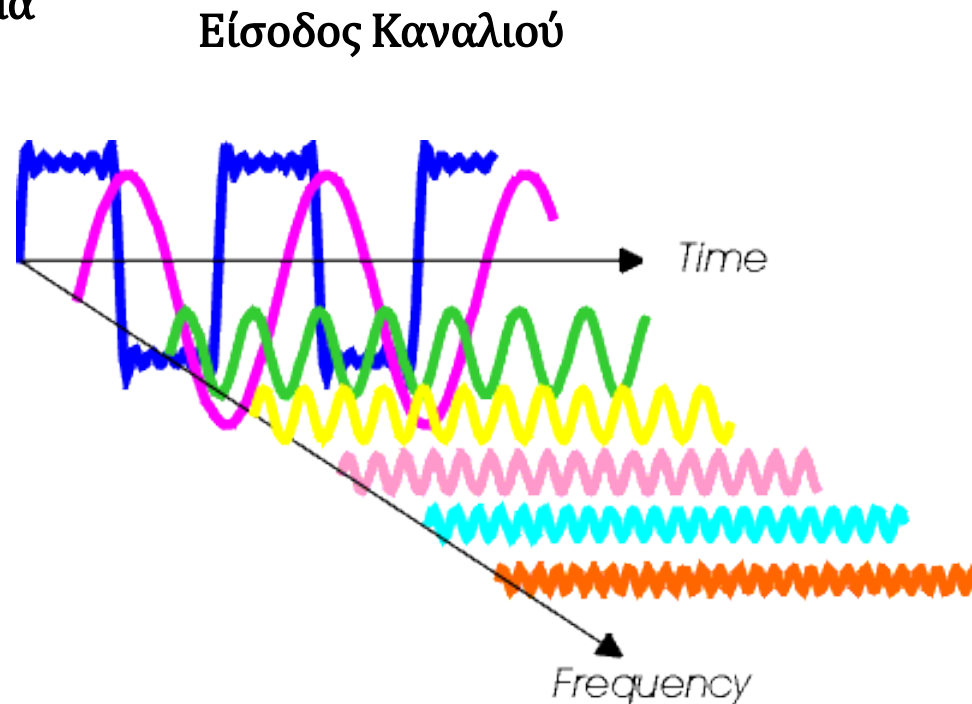
Σημαντικότερος παράγοντας τόσο για τη διαλειτουργικότητα των συστημάτων όσο και για την ασφάλεια των χρηστών. Φορείς προτυποποίησης: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), International Telecommunications Union (ITU), κλπ.

- **Εμπορική Πραγματικότητα**

Απλότητα, ευχρηστία, ελκυστικότητα συσκευής, marketing

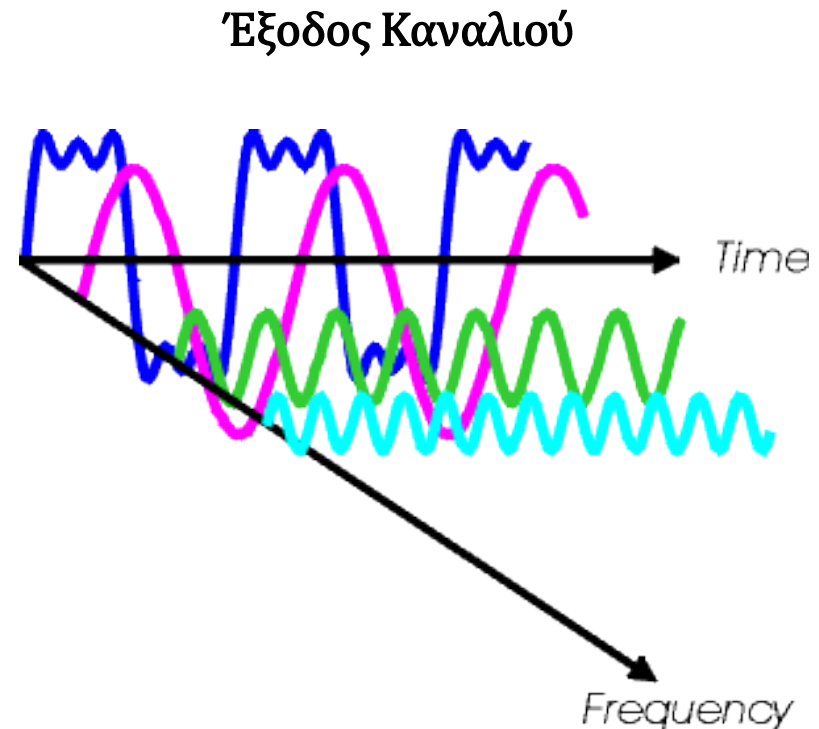
Αναπαράσταση Ψηφιακών Σημάτων (1/3)

- Κάθε περιοδικό σήμα μπορεί να αναλυθεί μέσω της **ανάλυσης Fourier** (ανάπτυγμα σειρών και μετασχηματισμός Fourier) σε άθροισμα αρμονικών ημιτονοειδών σημάτων.
- Μία ψηφιακή ακολουθία **10101** (μπλε χρώμα) μπορεί να αναλυθεί μέσω Fourier σε ένα **άπειρο άθροισμα ημιτόνων**, με όλο και μικρότερο πλάτος και συχνότητες πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας της τετραγωνικής παλμοσειράς.
- Για την **άριστη ανακατασκευή** της παλμοσειράς απαιτούνται **όλες** (άπειρες) οι ημιτονικές συνιστώσες.



Αναπαράσταση Ψηφιακών Σημάτων (2/3)

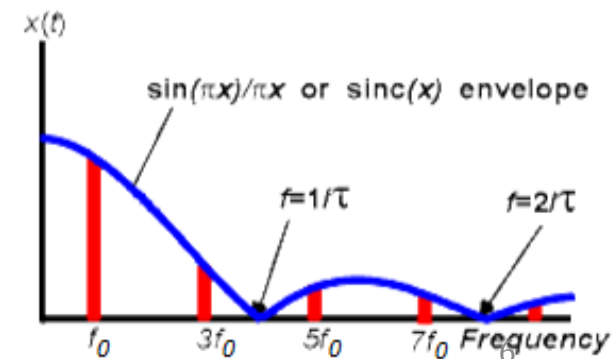
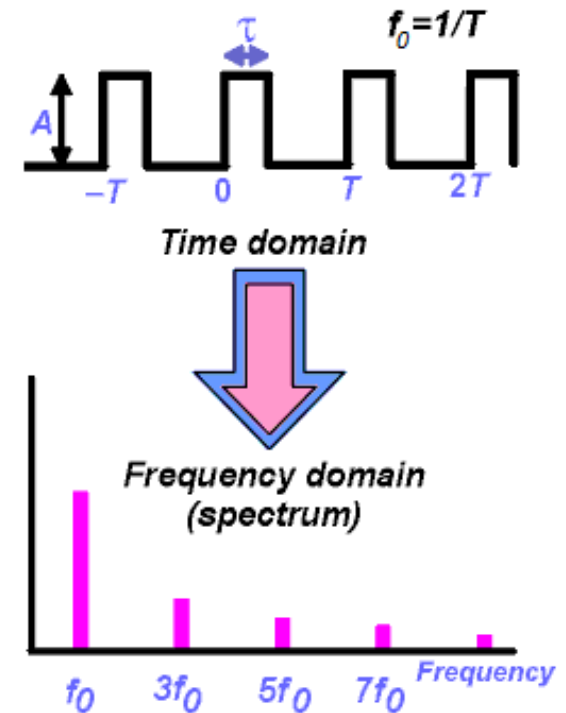
- Ένα κανάλι με πεπερασμένο εύρος ζώνης λειτουργεί ως χαμηλοπερατό φίλτρο (LPF) και αφήνει να διέλθουν μόνο κάποιες (οι πλέον χαμηλόσυχνες) συνιστώσες (ροζ, πράσινη, γαλάζια).
- Αυτό προκαλεί παραμόρφωση στην ανακατασκευή της παλμοσειράς στην έξοδο του καναλιού.
- Παρ' όλα αυτά η ακολουθία 10101 μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι διήλθε η θεμελιώδης συνιστώσα (ροζ).



Αναπαράσταση Ψηφιακών Σημάτων (3/3)

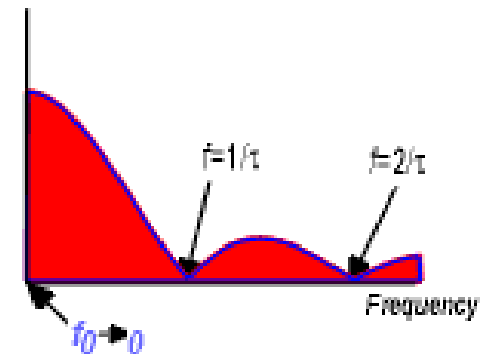
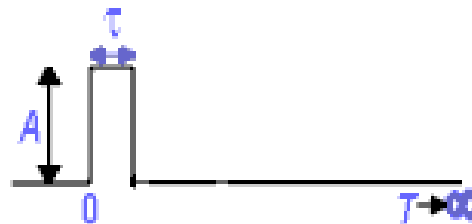
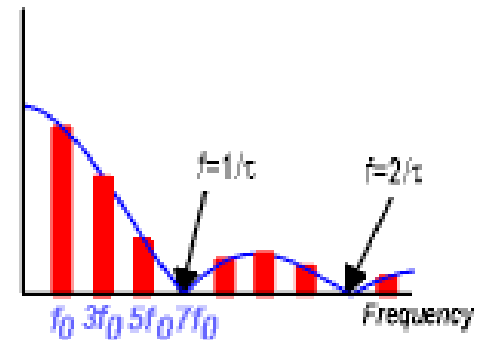
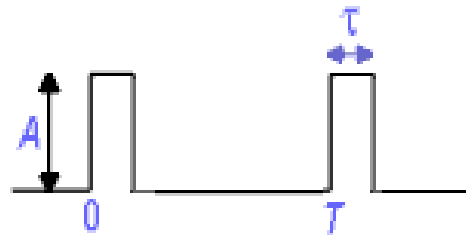
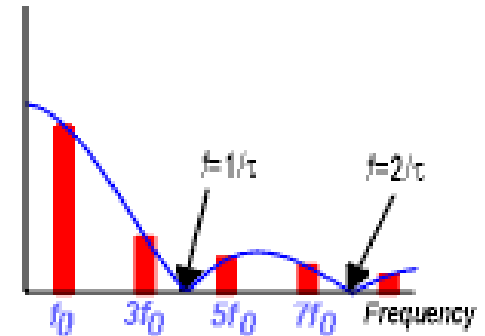
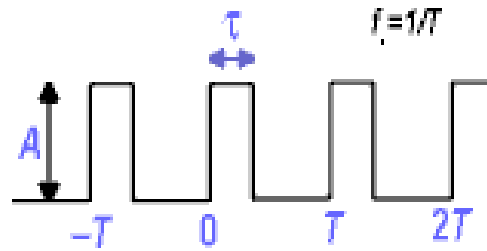
- Φάσμα ([spectrum](#)) είναι η αναπαράσταση ενός σήματος από το πεδίο του χρόνου ([time domain](#)) στο πεδίο της συχνότητας ([frequency domain](#)).
- Το φάσμα προκύπτει με **ανάλυση Fourier**, είναι **μιγαδική ποσότητα** και εκφράζεται είτε σε πραγματικό-φανταστικό μέρος είτε (συνηθέστερα) σε **μέτρο-φάση**.
- Οι θέσεις των γραμμών στο διπλανό σχήμα προσδιορίζουν το συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος και τα ύψη των γραμμών την ισχύ κάθε συχνότητας.
- Τα πλάτη των συχνοτικών συνιστωσών περιβάλλονται από μία **φασματική περιβάλλουσα** (envelope), η οποία μηδενίζεται για συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας που αντιστοιχεί στο εύρος παλμού (τ).
- Η φασματική περιβάλλουσα δίνεται από τη σχέση:

$$\text{sinc} = \frac{2A\tau}{T} \cdot \frac{\sin(\pi n/T)}{(\pi n/T)}$$



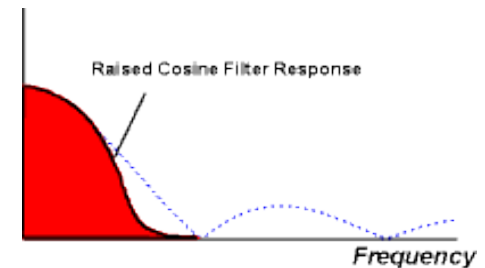
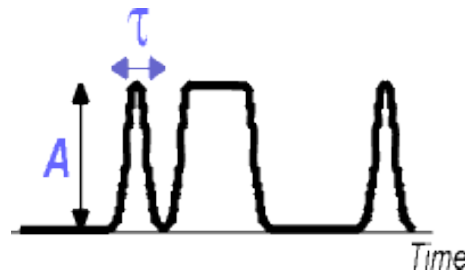
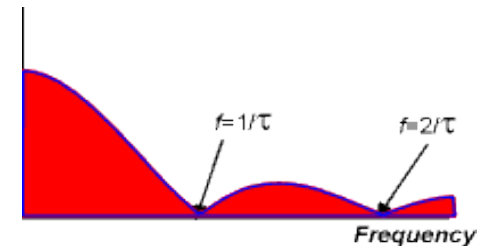
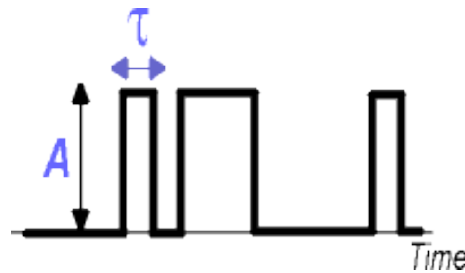
Φάσμα ενός Παλμού Δεδομένων

- Καθώς αυξάνεται η θεμελιώδης περίοδος μίας κυματομορφής, μειώνεται η θεμελιώδης συχνότητα των συνιστωσών της σειράς Fourier και έτσι οι αρμονικές πλησιάζουν συχνοτικά η μία την άλλη.
- Όταν ο χρόνος μεταξύ των παλμών τείνει στο άπειρο, το φάσμα γίνεται συνεχές.



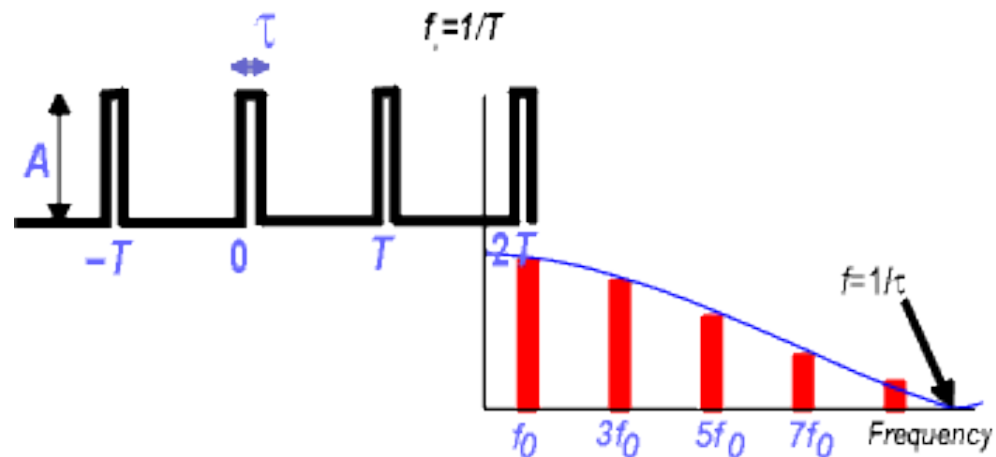
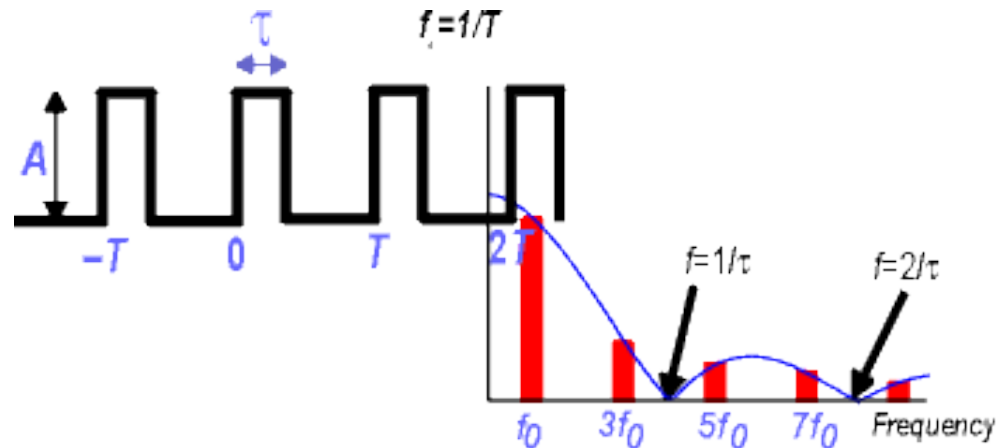
Φάσμα μίας Σειράς Δεδομένων Δεδομένων Βασικής Ζώνης (1/2)

- Αν οι παλμοί αποκτήσουν ομαλές ακμές, τότε **μειώνεται** το υψηλό φασματικό περιεχόμενο.
- Για τη μορφοποίηση των παλμών, η παλμοσειρά διαβιβάζεται μέσα από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο με απόκριση **υψωμένου συνημιτόνου** (raised cosine).
- Αυτά τα φίλτρα ανήκουν στην κατηγορία φίλτρων **Nyquist**.



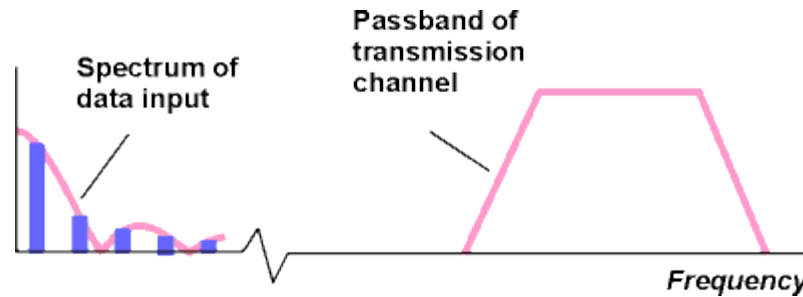
Φάσμα μίας Σειράς Δεδομένων Δεδομένων Βασικής Ζώνης (2/2)

- Η μείωση του εύρους των παλμών με ταυτόχρονη διατήρηση της περιόδου τους, προκαλεί αύξηση στη στάθμη των υψηλότερων αρμονικών σε βάρος των χαμηλότερων, δηλ. το σήμα αποκτά περισσότερες υψηλές συχνότητες.

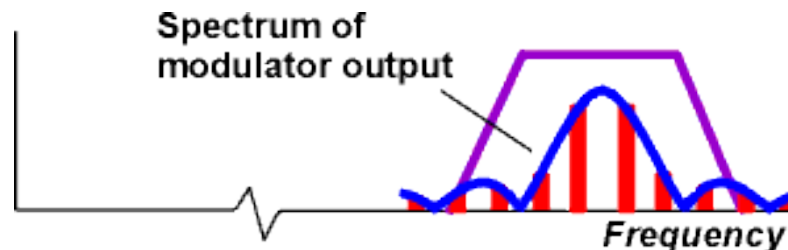


Διαδικασία Διαμόρφωσης (Μίξης)

- Αν ένα κανάλι επικοινωνίας έχει ζωνοπερατή απόκριση, ενώ το φάσμα της παλμοσειράς είναι στις χαμηλές συχνότητες, τότε χρειάζεται να μεταφέρουμε το φάσμα της παλμοσειράς στο φάσμα του καναλιού.

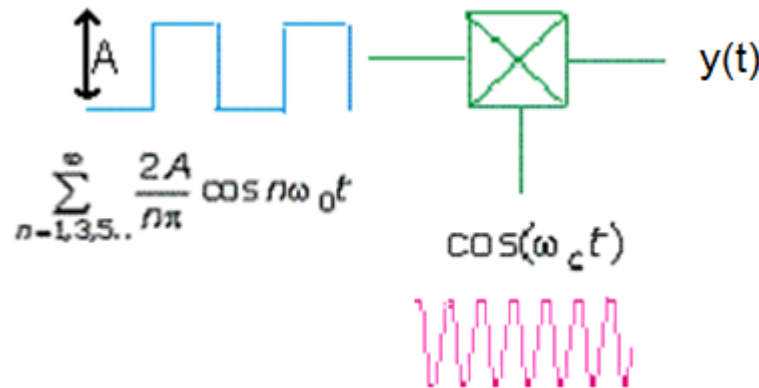


- Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **διαμόρφωση** (μίξη) και υλοποιείται με τον πολλαπλασιασμό της παλμοσειράς με ένα ημιτονικό σήμα υψηλότερης συχνότητας, που ονομάζεται **φέρον** (carrier) ή φορέας.



Διαδικασία Διαμόρφωσης (Μίξης)

- Η διαδικασία της διαμόρφωσης προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του φέροντος με κάθε φασματική συνιστώσα του αναπτύγματος κατά Fourier.



$$y(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2A}{n\pi} \cos(n\omega_0 t) \cdot \cos(\omega_c t)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{2A}{n\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \cos(\omega_c - n\omega_0)t + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \cos(\omega_c + n\omega_0)t$$

Διανυσματικός Διαμορφωτής

- Ο διανυσματικός διαμορφωτής (vector modulator) χρησιμοποιεί συνδυασμούς ημιτονικών και συνημιτονικών συνιστωσών του σήματος εισόδου, οι οποίοι εισέρχονται σε μίκτες μαζί με τους αντίστοιχους συνδυασμούς ημιτόνων και συνημιτόνων του φέροντος.

- Οι διανυσματικοί διαμορφωτές επιτυγχάνουν πιο αποτελεσματικό έλεγχο του συχνοτικού περιεχομένου του διαμορφωμένου σήματος.

- Η έξοδος κάθε μίκτη είναι:

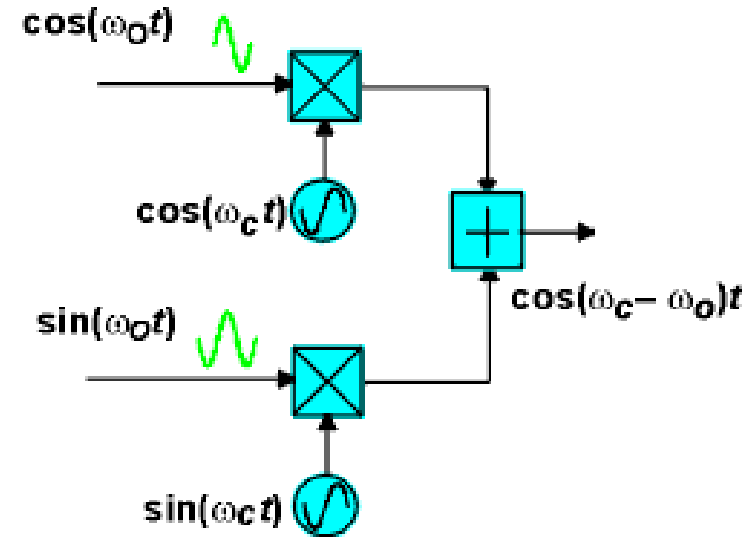
$$\cos(\omega_0 t) \cos(\omega_c t) = \frac{1}{2} \cos(\omega_c + \omega_0)t + \frac{1}{2} \cos(\omega_c - \omega_0)t$$

$$\sin(\omega_0 t) \sin(\omega_c t) = -\frac{1}{2} \cos(\omega_c + \omega_0)t + \frac{1}{2} \cos(\omega_c - \omega_0)t$$

- Η τελική έξοδος του διαμορφωτή είναι:

- Με άθροιση $\cos(\omega_c - \omega_0)t$

- Με αφαίρεση $\cos(\omega_c + \omega_0)t$



Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων στο Κανάλι

Παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε ένα κανάλι:

- Ο μέγιστος δυνατός ρυθμός ανίχνευσης αλλαγής της κυματομορφής ή της κατάστασης συμβόλων.
 - Το εύρος ζώνης του καναλιού καθορίζει πόσο γρήγορα μπορούν να μεταβάλλονται οι καταστάσεις συμβόλων στο κανάλι.
- Η δυνατότητα διάκρισης/διαχωρισμού των διαφορετικών καταστάσεων συμβόλων στον δέκτη.
 - Η στάθμη του θορύβου στο κανάλι θέτει άνω όριο στον αριθμό των διαφορετικών καταστάσεων συμβόλων που μπορούν να ανιχνευθούν σωστά στο δέκτη.
 - Ο βαθμός παραμόρφωσης που εισάγει το κανάλι περιορίζει τον αριθμό και τον ρυθμό αλλαγής των καταστάσεων συμβόλων που μπορεί να υπάρξει στο κανάλι με ταυτόχρονη αποδεκτή απόδοση.

Βασικά Μεγέθη Μέτρησης Καναλιών

- Ρυθμός μεταφοράς πληροφορίας ([information transfer rate](#))
- Ρυθμός μεταφοράς συμβόλων ([symbol transfer rate](#) ή [baud rate](#))
- Φασματική απόδοση ([bandwidth efficiency](#))

Ρυθμός μεταφοράς πληροφορίας

Ρυθμός μεταφοράς πληροφορίας ([information transfer rate](#)) ενός καναλιού δεδομένων ορίζεται ως η ταχύτητα με την οποία μπορεί να αποσταλεί δυαδική πληροφορία από την πηγή στον προορισμό.

Μετριέται σε **bits/s**

Παράδειγμα: Αν αποστέλλονται 6 bits κάθε 6 ms, ο ρυθμός μεταφοράς πληροφορίας είναι:

$$6 \text{ bits} / 6 \text{ ms} = 1.000 \text{ bits/s}$$

Bit rates		
Δεκαδικά Προθέματα (SI)		
Όνομα	Συμβολισμός	Πολλαπλάσιο
kilobit per second	kbit/s	10³
megabit per second	Mbit/s	10⁶
gigabit per second	Gbit/s	10⁹
terabit per second	Tbit/s	10¹²

Ρυθμός μεταφοράς συμβόλων

Ρυθμός μεταφοράς συμβόλων ([symbol transfer rate ή baud rate](#)) ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο οι καταστάσεις συμβόλων αλλάζουν όπως αυτές παρατηρούνται στο επικοινωνιακό κανάλι. Δεν ταυτίζεται απαραίτητα με το ρυθμό μεταφοράς δεδομένων.

Μετριέται σε **symbols / s** (baud)

Παράδειγμα:

Αν ένα σύστημα χρησιμοποιεί 4 συχνότητες για να μεταφέρει ζεύγη από bits και η συχνότητα αλλάζει κάθε 0,5 ms, τότε ο ρυθμός μεταφοράς συμβόλων είναι:

$$1 \text{ symbol} / 0,5 \text{ ms} = 2.000 \text{ symbols /s} = 2.000 \text{ baud}$$

Φασματική απόδοση

Φασματική απόδοση ([bandwidth efficiency](#)) μιας επικοινωνιακής ζεύξης αποτελεί το μέτρο του πόσο καλά μία συγκεκριμένη τεχνική διαμόρφωσης εκμεταλλεύεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Μετριέται σε **bits / s / Hz**

Παράδειγμα: Αν ένα σύστημα απαιτεί εύρος ζώνης 4 KHz για να στέλνει συνεχώς 8.000 bps πληροφορίας, τότε η φασματική απόδοση είναι :

$$8.000 \text{ bps} / 4 \text{ KHz} = 2 \text{ bits/s/Hz}$$

Άσκηση 1

Μία ψηφιακή ζεύξη στέλνει πληροφορία σε πακέτα με ρυθμός 100 bit ανά 2.2 ms.

A) Ποιος είναι ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας που υποστηρίζεται από το κανάλι;

B) Εάν τα πακέτα μπορούν να αποστέλλονται κάθε 5 ms, ποιος είναι ο συνολικός ρυθμός πληροφορίας στο κανάλι;

Απάντηση:

A) Ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας κατά τη διάρκεια κάθε πακέτου δίνεται από τη σχέση:

$$100 \text{ bits} / 2.2 \text{ ms} = 45.454 \text{ kbps}$$

B) Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας δίνεται από την καθυστέρηση μεταξύ των πακέτων και είναι:

$$45.454 \text{ kbps} \times 2.2 \text{ ms} / 5 \text{ ms} = 20 \text{ kbps}$$

Άσκηση 2

Εάν η χωρητικότητα πληροφορίας ενός καναλιού είναι 2400 bps, πόσος χρόνος απαιτείται για τη μεταφορά 1 Mbyte πληροφορίας μεταξύ δύο υπολογιστών;

Απάντηση:

1 Mbyte πληροφορίας ισούται με $1.000.000 \times 8 \text{ bits} = 8 \text{ Mbits}$

Για την αποστολή των 8 Mbits με ρυθμό πληροφορίας 2400 bps, θα χρειαστεί χρόνος αποστολής με $8.000.000 \text{ bits} / 2.400 \text{ (bits/s)} = 3.333 \text{ s}$

Άσκηση 3

Ένα σύστημα επικοινωνιών αναπαριστά 4 bits με κάθε εκπεμπόμενο σύμβολο. Αν το σύστημα απαιτείται να έχει μία χωρητικότητα καναλιού 9.600 bps, τι ρυθμό αποστολής συμβόλων θα πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει το κανάλι;

Απάντηση:

Χρησιμοποιώντας 4 bits για την κωδικοποίηση κάθε συμβόλου, ο ρυθμός μεταφοράς συμβόλων (baud rate) θα είναι το 1/4 του ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας (bit/rate), δηλ. $9.600/4 = 2.400 \text{ symbols/second} = 2.400 \text{ baud}$

Άσκηση 4

Αν η περίοδος κάθε συμβόλου, όπως μετριέται στο κανάλι επικοινωνίας είναι 2,5 ms και οι προδιαγραφές του συστήματος προβλέπουν ότι το κάθε σύμβολο αντιπροσωπεύει 6 bits πληροφορίας, ποια είναι η χωρητικότητα του καναλιού;

Απάντηση:

Αν κάθε σύμβολο έχει περίοδο $T_s = 2,5 \text{ ms}$, ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων είναι 400 baud.

Με κωδικοποίηση 6 bits ανά σύμβολο, ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας (bit rate) για το κανάλι είναι:

$$6 \text{ (bits/symbol)} \times 400 \text{ (symbols/s)} = 2,4 \text{ kbps}$$

Άσκηση 5

Μια κινητή ραδιο-ζεύξη μπορεί να υποστηρίξει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 28.000 bps σε ένα εύρος ζώνης 25 kHz κωδικοποιώντας 2 bit σε κάθε σύμβολο. Ποια είναι η φασματική απόδοση της ραδιο-ζεύξης και ποιος ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (baud rate) στο κανάλι;

Απάντηση:

Η φασματική απόδοση είναι μία μέτρηση του αριθμού των bits που μεταφέρονται ανά Hz του διατιθέμενου εύρους ζώνης. Έτσι, η φασματική απόδοση στο παράδειγμα αυτό είναι:

$$28.000 \text{ (bits/s)} / 25.000 \text{ (Hz)} = 1,12 \text{ (bits/s/Hz)}$$

Ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (baud rate) στο κανάλι για κωδικοποίηση κάθε συμβόλου με 2 bits είναι:

$$28.000 \text{ (bits/s)} / 2 \text{ (bits/symbol)} = 14.000 \text{ (symbols/s)} = 14.000 \text{ baud}$$