

William Stallings

Data and Computer

Communications

Κεφάλαιο 3

Μετάδοση Δεδομένων



Το Τμήμα

Προσωπικό

Σπουδές

Έρευνα

Ενημέρωση

Φοιτητικά

Αναζήτηση...

Βρίσκεστε εδώ: [Αρχική](#) > [Ενημέρωση](#) > [Ανακοινώσεις](#) > Ημερίδα καριέρας VODAFONE

15 Φεβ 2018

Ημερίδα καριέρας VODAFONE

Το Τμήμα Πληροφορικής του Α.Π.Θ. καλωσορίζει τη VODAFONE σε μια ΗΜΕΡΙΔΑ ΚΑΡΙΕΡΑΣ, με σκοπό τη γνωριμία φοιτητών και αποφοίτων του, με έναν από τους μεγαλύτερους ομίλους τηλεπικοινωνιών στον κόσμο.

Η εκδήλωση, η οποία αποτελεί την τρίτη κατά σειρά ημερίδα καριέρας, που διοργανώνει το Τμήμα, θα λάβει χώρα στο Αμφιθέατρο II του Κέντρου Διάδοσης Ερευνητικών Αποτελεσμάτων (Κ.Ε.Δ.Ε.Α.) του ΑΠΘ, την Τετάρτη 28 Φεβρουαρίου 2018 από τις 10:00 μέχρι τις 15:00. Απευθύνεται σε φοιτητές Πληροφορικής όλων των προγραμμάτων σπουδών - προπτυχιακούς, μεταπτυχιακούς και υποψήφιους διδάκτορες - καθώς επίσης και σε αποφοίτους Πληροφορικής, και είναι στα πλαίσια ενημέρωσής τους για τις προοπτικές επαγγελματικής αποκατάστασης του κλάδου.

Περιλαμβάνει παρουσίαση της εταιρίας από εξειδικευμένα στελέχη στους αντίστοιχους τομείς δράσης της και όσον αφορά στην επαγγελματική αποκατάσταση και όσον αφορά στη δυνατότητα προπτυχιακών φοιτητών για πρακτική άσκηση.

Με το πέρας της εκδήλωσης θα πραγματοποιηθούν παράλληλες ανοιχτές συνεντεύξεις, με την προσκόμιση βιογραφικού (15:00-18:00)

Δηλώστε [εδώ](#) συμμετοχή.

Το κτίριο ΚΕ.Δ.Ε.Α. είναι το κόκκινο κτίριο δίπλα στη Φοιτητική Λέσχη του ΑΠΘ επί της οδού 3ης Σεπτεμβρίου, Πανεπιστημιούπολη, 546 36 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Δείτε το πρόγραμμα της εκδήλωσης [εδώ](#)

Κυριότερες Ειδήσεις

ΦΕΒ
23

Ενημερωτική εκδήλωση Erasmus+ Πρακτική Άσκηση

ΦΕΒ
15

Ημερίδα καριέρας VODAFONE

ΦΕΒ
13

Η Ένωση Γαλλόφωνων Πανεπιστημίων προκηρύσσει "Πρόσκληση εκδήλωσης ενδιαφέροντος ...

ΦΕΒ
13

Ορκωμοσία εξεταστικής περιόδου Φεβρουαρίου 2018

ΦΕΒ
13

Ηλεκτρονική δήλωση μαθημάτων εαρινού εξαμήνου 2017-2018

ΦΕΒ
09

Παρουσίαση Κατευθύνσεων 2017-2018



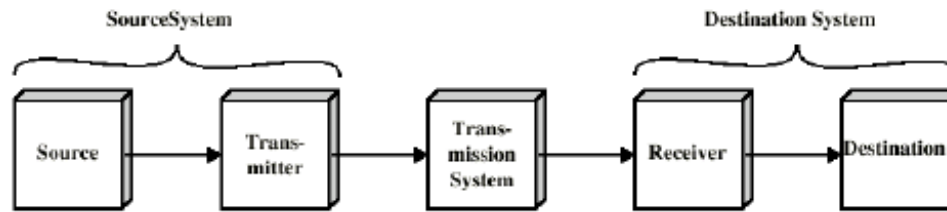
Μέρος Α – Παρουσιάσεις (10.00–15.00)

- 10:00–11:00** **5G broadband: Η Νέα Βιομηχανική Επανάσταση**
Λάμπρος Ίσκος – Technology Director
- 11:00–12:00** **Τεχνολογική εξέλιξη των σταθερών ευζωνικών δικτύων NGA**
Δημήτρης Γοργίας – Head of Fixed, TES & Partner Management
- 12:00–13:00** **Συμβάλλοντας Στη Διαμόρφωση του Μέλλοντος της Νέας Γενιάς Νεανικά Προγράμματα Εργασιακής Εμπειρίας – Πρακτική Άσκηση Η Γυναίκα στην Τεχνολογία**
Φραγκίσκη Μελίσσα – HR Director
Βάσω Παπαϊωάννου – Resourcing Manager
Τάσος Μακρής – In Prepay Services / Graduate Trainee
- 13:00–13:30** **5 Χρόνια Μετά – Παράγοντες που διαμορφώνουν το IT**
Γιώργος Κωνσταντέλος – IT Architecture SPV
- 13:30–15:00** **VF Digital Telco – Digital Transformation & Agile τρόπος Εργασίας στη VF**
Μένος Οκανταρίδης – Technology /IT Delivery Manager
Ιάσωνας Αντωνόπουλος – Head of Digital
Λεωνίδας Μαμάης – Digital Web Developer

Μέρος Β – Career fair (15.00–18.00)

Table	Subject
1	HR/Discoverers
2	Network
3	Network
4	IT
5	IT
6	IT / Developers
7	IT / Developers

Επικοινωνιακό σύστημα



(a) General block diagram



(b) Example

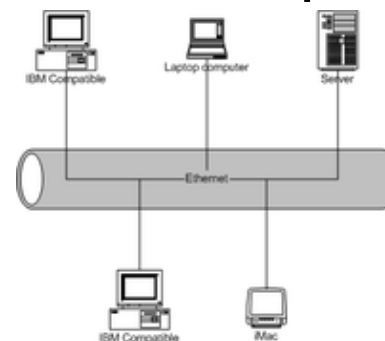
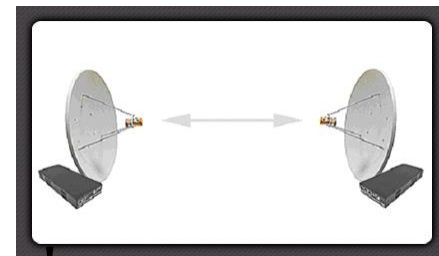
- Πηγή πληροφορίας
- Πομπός
- Σύστημα μετάδοσης
- Δέκτης
- Αποδέκτης πληροφορίας

3.1.1 Βασικές έννοιες (1)

- Πομπός
- Δέκτης
- Μέσα μετάδοσης
 - Μεταφέρουν σήματα που αναπαριστώνται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα
 - Κατευθυνόμενα (guided) μέσα μετάδοσης
 - Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρονται κατά μήκος συγκεκριμένου φυσικού μονοπατιού
 - Π.χ. Συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων, οπτική ίνα
 - Μη κατευθυνόμενα (unguided) μέσα μετάδοσης
 - Δεν «οδηγούν» τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα
 - Π.χ. αέρας, νερό, κενό

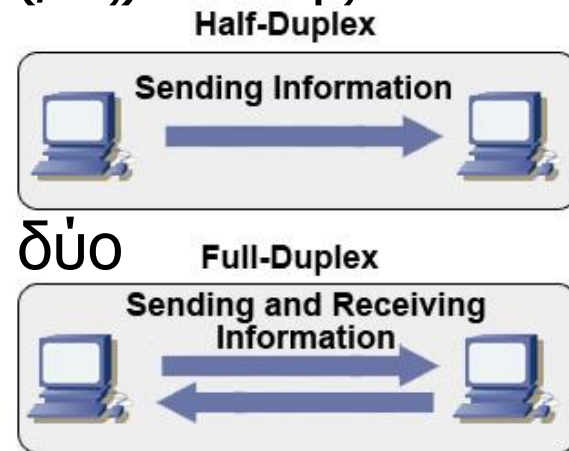
3.1.1 Βασικές έννοιες (2)

- Απευθείας ζεύξη
 - Μονοπάτι διάδοσης με απουσία ενδιάμεσων συσκευών μεταξύ πομπού και δέκτη.
 - Εξαίρεση η παρουσία ενισχυτών ή επαναληπτών
 - Είτε σε guided είτε σε unguided μέσα
- Σημείου προς σημείο (point-to-point)
 - Απευθείας σύνδεση πομπού και δέκτη
 - Μόνο οι δύο συσκευές χρησιμοποιούν το μέσο μετάδοσης
- Πολυσημειακή (Multi-point)



3.1.1 Βασικές έννοιες (3)

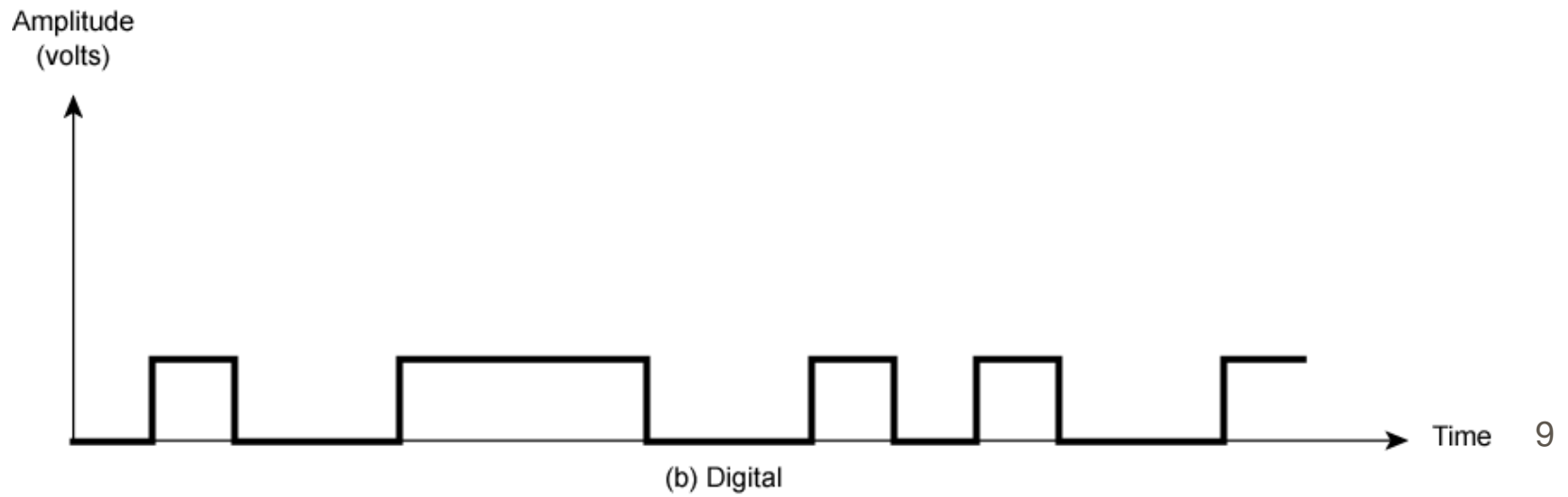
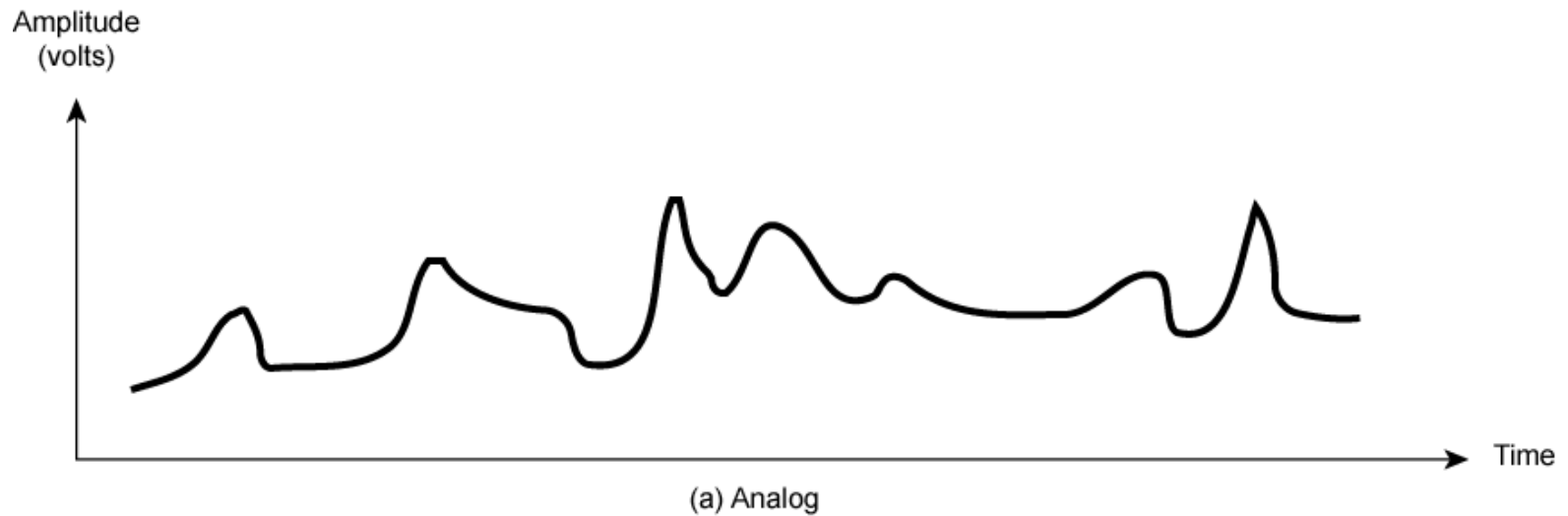
- Μετάδοση Simplex
 - επικοινωνία μονής κατεύθυνσης
 - Μια συσκευή είναι πομπός και η άλλη (/ες) δέκτης
 - Π.χ. τηλεόραση
- Μετάδοση Half duplex
 - δυνατότητα επικοινωνίας και προς τις δύο κατευθύνσεις αλλά όχι ταυτόχρονα
 - Π.χ. GSM
- Μετάδοση Full duplex
 - δυνατότητα ταυτόχρονης επικοινωνίας και προς τις δύο κατευθύνσεις
 - Π.χ. Τηλέφωνο
 - Συνεπώς το μέσο μεταφέρει σήματα ταυτόχρονα



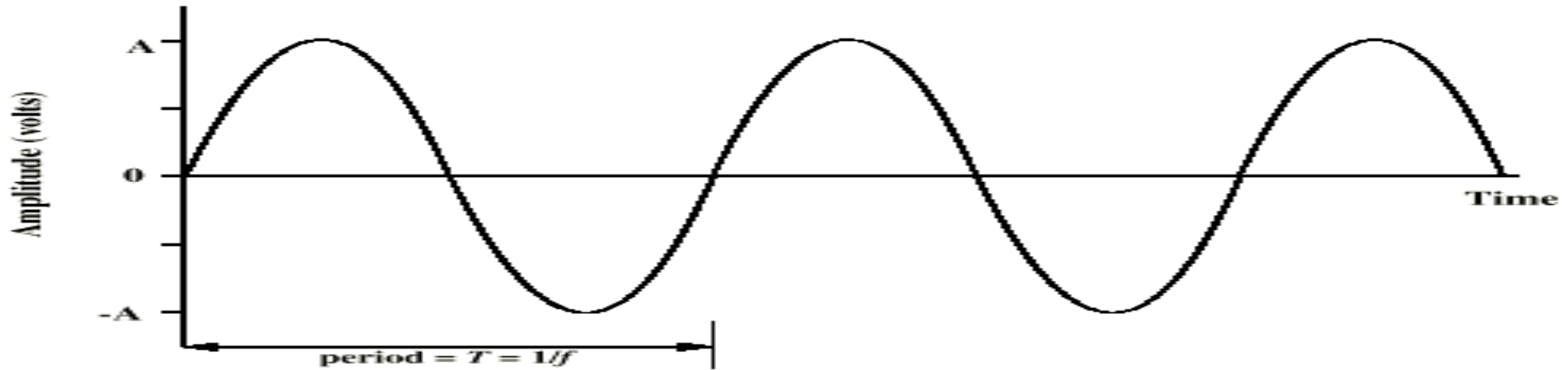
3.1.2 Συχνότητα, Φάσμα και εύρος ζώνης

- Έννοιες στο πεδίο του χρόνου
 - Συνεχές (αναλογικό) σήμα
 - Πλάτος που μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο ως προς το χρόνο
 - Δεν υπάρχουν ασυνεχειες στο σήμα
 - Διακριτό (ψηφιακό) σήμα
 - Διατηρεί ένα σταθερό επίπεδο και στη συνέχεια αλλάζει σε άλλο σταθερό επίπεδο.
 - Περιοδικό σήμα
 - Χρονικά επαναλαμβανόμενη συμπεριφορά
 - Μη περιοδικό σήμα
 - Το σήμα δεν επαναλαμβάνεται στο χρόνο

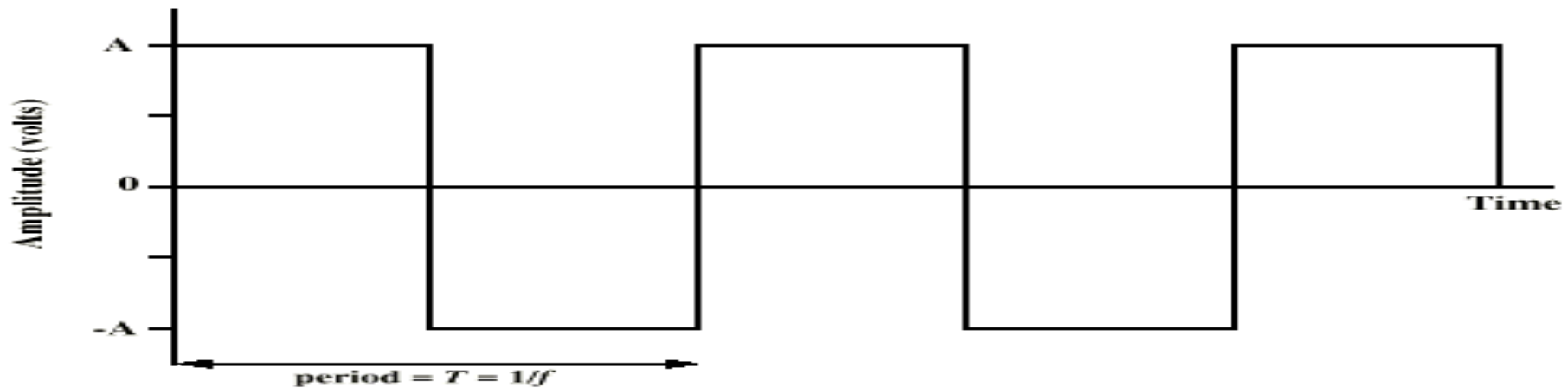
3.1.2 Συνεχή & Διακριτά σήματα



3.1.2 Περιοδικά σήματα



(a) Sine wave



(b) Square wave

3.1.2 Περιοδικά σήματα

- Ένα σήμα ονομάζεται **περιοδικό** αν και μόνο αν υπάρχει μια σταθερά T , τέτοια ώστε:
 $s(t+T)=s(t), \quad -\infty < t < +\infty.$
- Η μικρότερη σταθερά T που ικανοποιεί την παραπάνω συνθήκη ονομάζεται **περίοδος** του σήματος.

3.1.2 Ημιτονοειδής κυματομορφή

- Βασικό περιοδικό σήμα: Ημιτονοειδές σήμα:

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \theta)$$

- όπου:

— A : Μέγιστο πλάτος

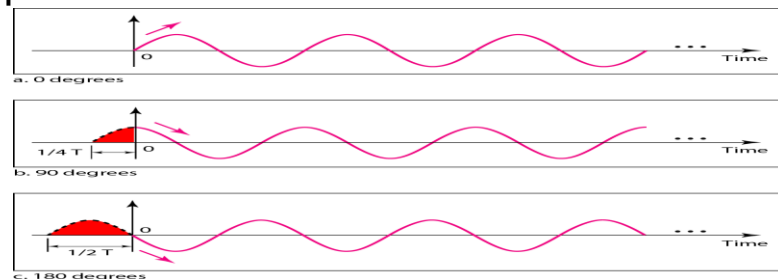
- Καθορίζει την ισχύ του σήματος
- Μετριέται σε **volts**

— f : Συχνότητα

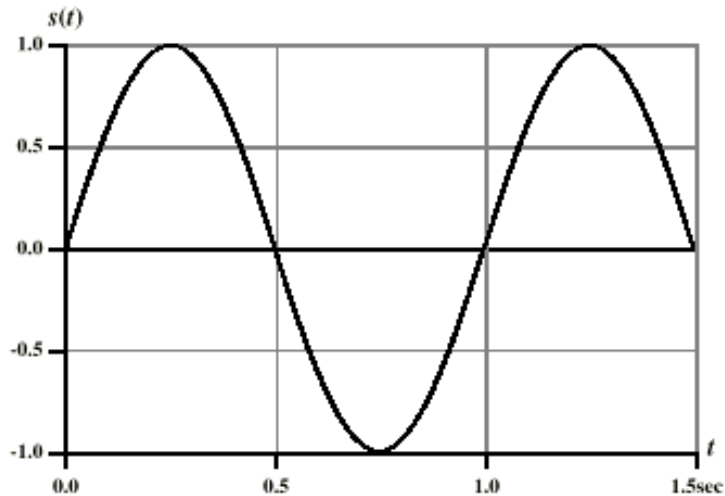
- Ρυθμός επανάληψης του σήματος
 - Μεγάλος/μικρός ρυθμός μεταβολής \rightarrow μεγάλη/μικρή συχνότητα
- Μονάδα μέτρησης: Hertz (Hz) ή κύκλοι per second
- Περίοδος = χρόνος επανάληψης (T)
- $T = 1/f$

— θ : Φάση

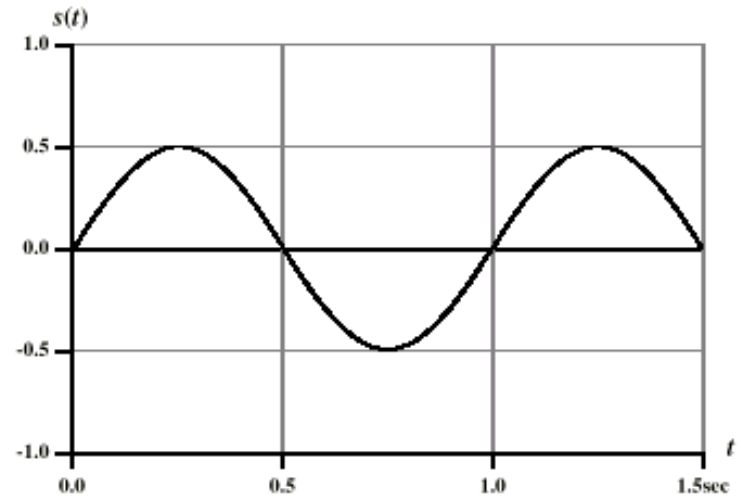
- Σχετική θέση στο χρόνο
 - Το μέρος της περιόδου κατά την οποία το σήμα έχει «προχωρήσει» ως προς ένα αυθαίρετο σημείο έναρξης (συνήθως η τελευταία διέλευση από τιμή 0)



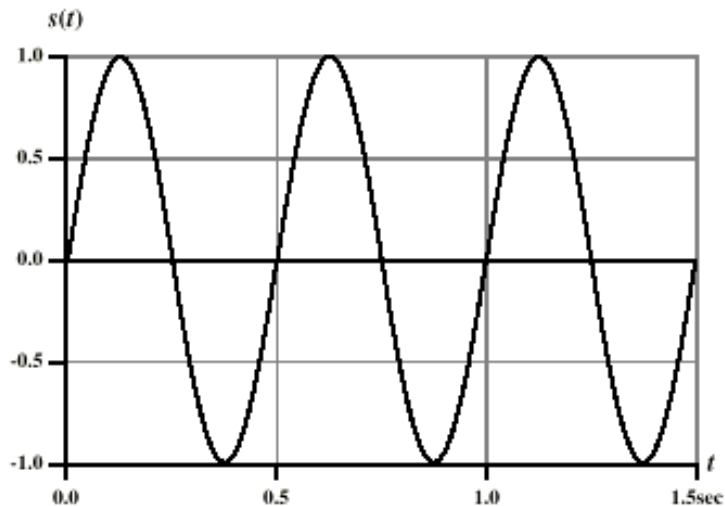
3.1.2 Μεταβάλλόμενες ημιτονοειδείς κυματομορφές $s(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi)$



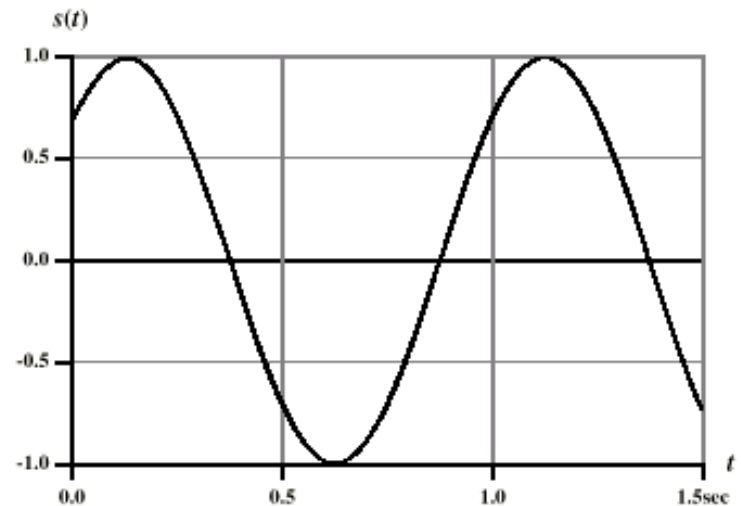
(a) $A = 1, f = 1, \phi = 0$



(b) $A = 0.5, f = 1, \phi = 0$



(c) $A = 1, f = 2, \phi = 0$



(d) $A = 1, f = 1, \phi = \pi/4$

Μονάδες μέτρησης περιόδου και συχνότητας

<i>Unit</i>	<i>Equivalent</i>	<i>Unit</i>	<i>Equivalent</i>
Seconds (s)	1 s	Hertz (Hz)	1 Hz
Milliseconds (ms)	10^{-3} s	Kilohertz (kHz)	10^3 Hz
Microseconds (μ s)	10^{-6} s	Megahertz (MHz)	10^6 Hz
Nanoseconds (ns)	10^{-9} s	Gigahertz (GHz)	10^9 Hz
Picoseconds (ps)	10^{-12} s	Terahertz (THz)	10^{12} Hz

3.1.2 Μήκος κύματος

- Απόσταση που καλύπτεται από μια επανάληψη του σήματος
- Απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μεγίστων ή ελαχίστων
- Αναπαρίστανται με λ
- Υποθέτοντας ταχύτητα διάδοσης v
 - $\lambda = v * T$
 - $\lambda * f = v$
 - Στις επικοινωνίες $c = 3 * 10^8$ m/s (ταχύτητα φωτός στο κενό), επομένως $\lambda = c / f$

3.1.3 Έννοιες στο πεδίο της συχνότητας

- Ένα σήμα αποτελείται συνήθως από πολλές συχνοτικές συνιστώσες
- Οι συνιστώσες του σήματος είναι ημιτονοειδείς κυματομορφές

3.1.3 Πρόσθεση συχνοτικών συνιστωσών

- Το σήμα του (c) αποτελείται από το άθροισμα των ημοτονοειδών συνιστωσών των (a) και (b)
 - Η δεύτερη συνιστώσα έχει συχνότητα ακέραιο πολλαπλάσιο της πρώτης
- Όταν όλες οι συνιστώσες είναι ακέραιο πολλαπλάσιο συνιστώσας συχνότητας f , τότε η συχνότητα f ονομάζεται **κύρια συχνότητα**.
- Η **περίοδος του σήματος** είναι ίση με τη περίοδο της συνιστώσας κύριας συχνότητας

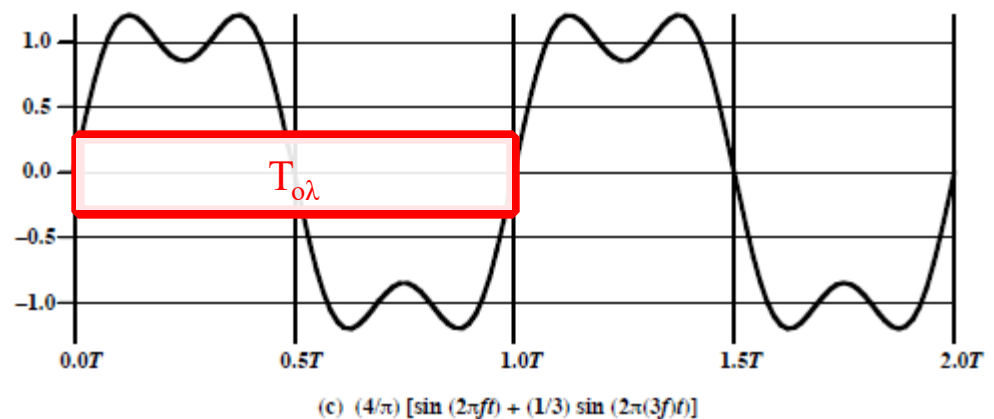
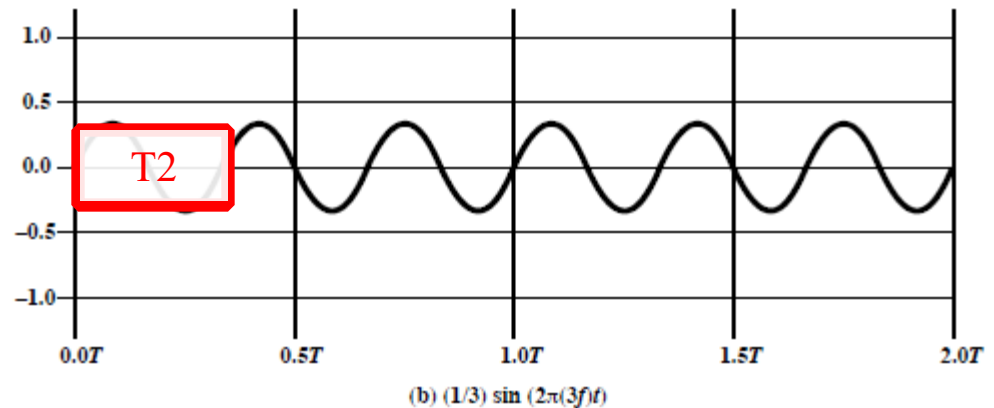
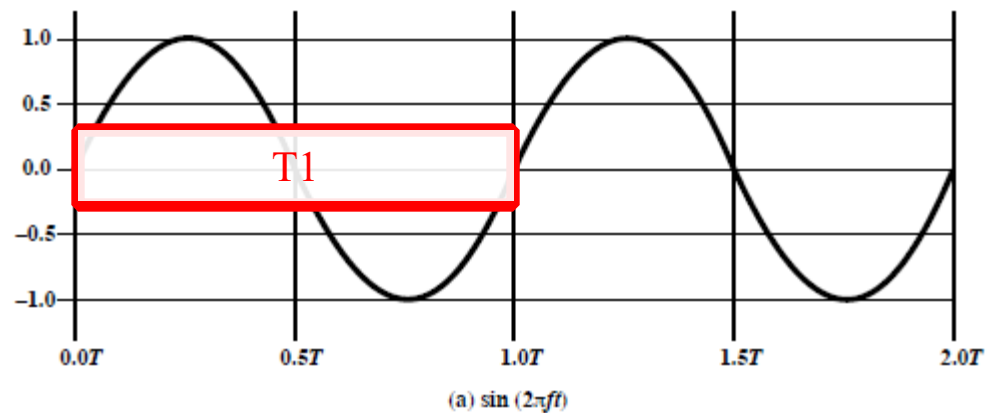


Figure 3.4 Addition of Frequency Components ($T = 1/f$)

3.1.3 Έννοιες στο πεδίο της συχνότητας

- Μπορεί ΝΔΟ **κάθε περιοδικό σήμα** μπορεί να αναλυθεί σε **άθροισμα συνιστωσών ημιτονοειδών σημάτων** χρησιμοποιώντας **σειρές Fourier**.
 - Μεγάλη χρησιμότητα, καθώς οι επιδράσεις των μέσων μετάδοσης εκφράζονται σε όρους συχνοτήτων!

Ορισμός
$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [(a_n \cos 2\pi f n t) + (b_n \sin 2\pi f n t)]$$

Συντελεστής
$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt$$

Συντελεστής
$$\alpha_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos 2\pi f n t dt$$

Συντελεστής
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin 2\pi f n t dt$$

3.1.3 Έννοιες στο πεδίο της συχνότητας

- Η μεταβλητή του αθροίσματος k καλείται **αριθμός αρμονικής k**
- Οι συντελεστές a_k, b_k ονομάζονται συντελεστές και δείχνουν την βαρύτητα κάθε αρμονικής στο τελικό σήμα
- Οι ημιτονοειδείς συνιστώσες βρίσκονται σε συχνότητες που είναι πολλαπλάσιες της κύριας συχνότητας.

Παράδειγμα

- Να βρεθεί η σειρά Fourier της συνάρτησης $f(x)=1-x^2, -1 < x < 1$
- Υπολογισμός a_0
$$a_0 = \frac{2}{2} \int_{-1}^1 (1-x^2) dx = \frac{1}{2} \left(x - \frac{1}{3} x^3 \right) \Big|_{-1}^1 = \frac{2}{3}$$
- Υπολογισμός a_n
$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{2} \int_{-1}^1 (1-x^2) \cos n\pi x dx = \int_{-1}^1 \cos n\pi x dx - \int_{-1}^1 x^2 \cos n\pi x dx = \\ &= 0 - \frac{1}{n\pi} x^2 \sin n\pi x \Big|_{-1}^1 + \frac{2}{n\pi} \int_{-1}^1 x \sin n\pi x dx = \\ &= 0 - 0 - \frac{2}{n^2 \pi^2} x \cos n\pi x \Big|_{-1}^1 + \frac{2}{n^2 \pi^2} \int_{-1}^1 \cos n\pi x dx = \\ &= -\frac{4}{n^2 \pi^2} \cos n\pi = (-1)^{n+1} \frac{4}{n^2 \pi^2} \end{aligned}$$
- Υπολογισμός b_n
$$b_n = \frac{1}{1} \int_{-1}^1 (1-x^2) \sin(n\pi x) dx = 0$$
- Σειρά Fourier
$$f(x) = \frac{2}{3} + \frac{4}{\pi^2} \left\{ \cos(\pi x) - \frac{1}{4} \cos(2\pi x) + \frac{1}{9} \cos(3\pi x) - \dots \right\}.$$

3.1.3 Έννοιες στο πεδίο της συχνότητας

- Τριγωνομετρική σειρά Fourier
- Ορισμός $x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [c_n \cos(2\pi nft - \phi_n)]$

$$c_0 = a_0 / 2$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

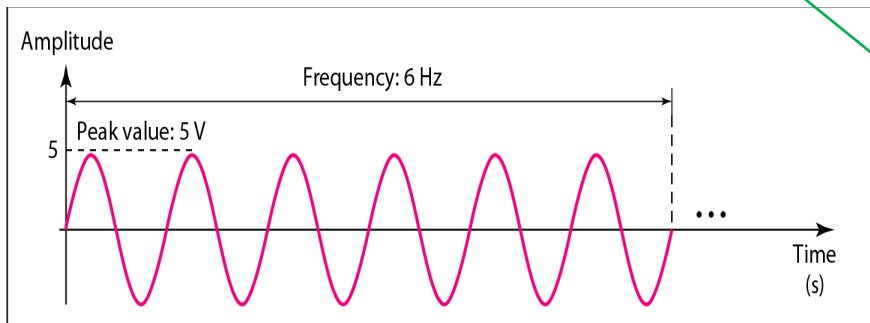
$$\phi_n = 1 / \left(\tan \frac{b_n}{a_n} \right)$$

3.1.3 Έννοιες στο πεδίο της συχνότητας

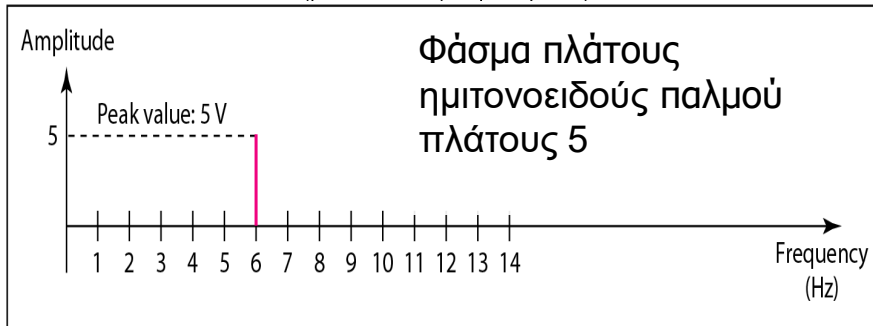
- Όπως στο πεδίο του χρόνου υπάρχει μια συνάρτηση $x(t)$ που περιγράφει το πλάτος σε κάθε χρονική στιγμή
 - Έτσι και στο πεδίο της συχνότητας υπάρχει μια συνάρτηση $x(f)$ που περιγράφει το πλάτος κάθε συχνοτικής συνιστώσας του σήματος
 - Η συνάρτηση αυτή είναι γνωστή ως **φάσμα πλάτους**

3.1.3 Αναπαράσταση στο πεδίο της συχνότητας

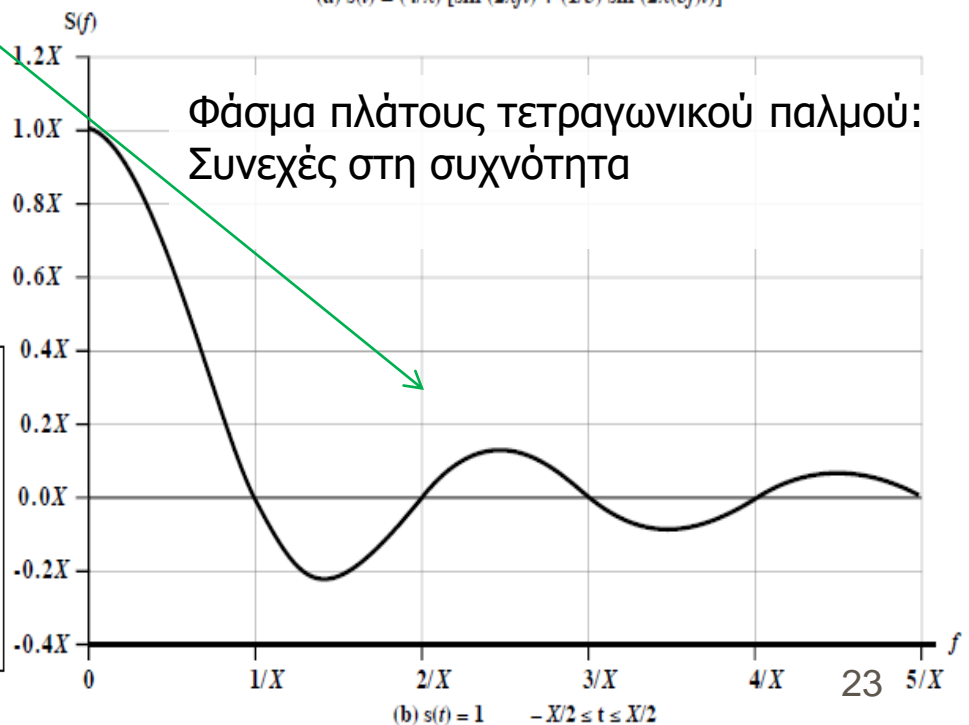
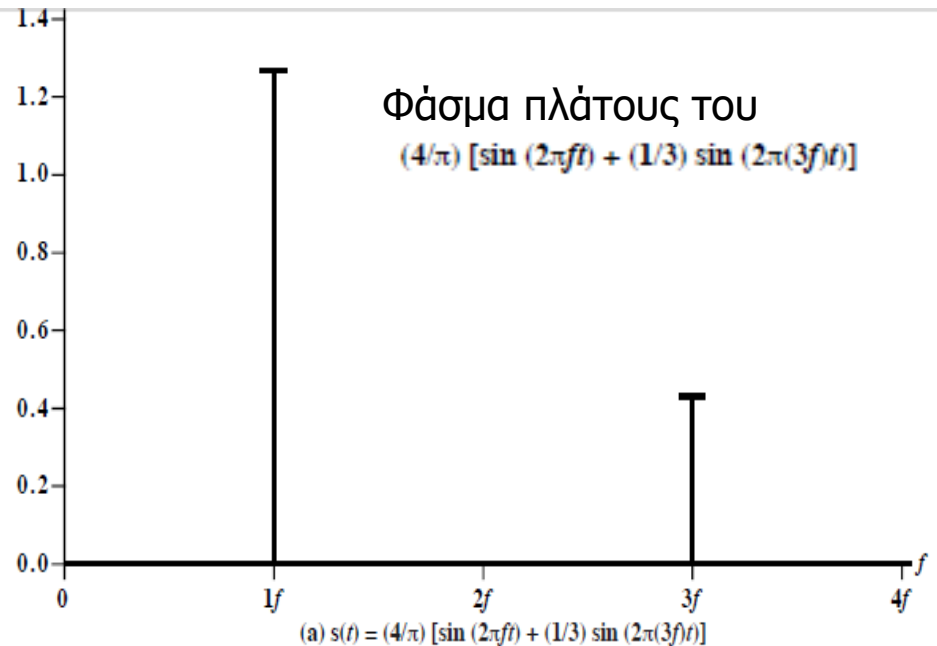
- Το εύρος ζώνης του σήματος είναι η διαφορά μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης συχνότητας που περιέχεται στο σήμα ($2f$ και 6 Hz για τα δυο παραδείγματα περιοδικού σήματος).
- Τετραγωνικός παλμός: άπειρο εύρος ζώνης!



a. A sine wave in the time domain (peak value: 5 V, frequency: 6 Hz)



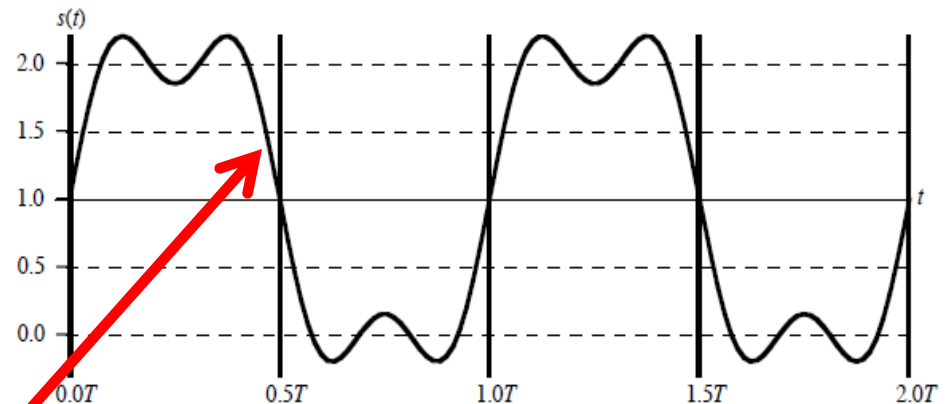
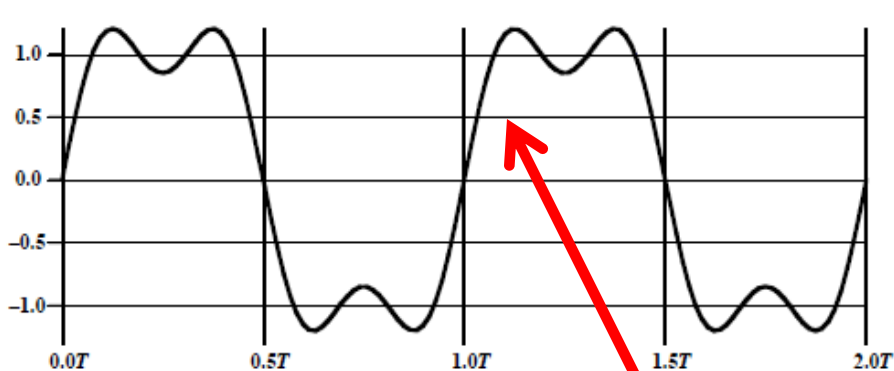
b. The same sine wave in the frequency domain (peak value: 5 V, frequency: 6 Hz)



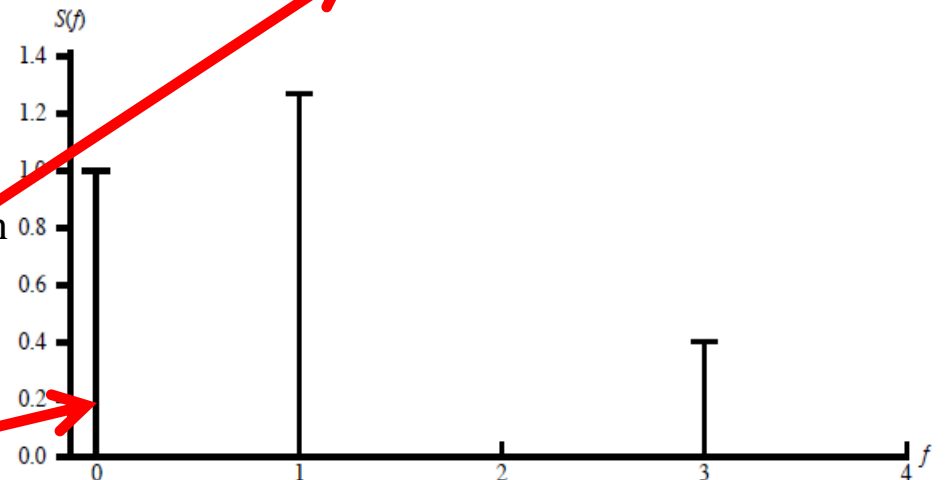
3.1.3 Φάσμα & εύρος ζώνης

- **Φάσμα συχνοτήτων** (spectrum) ενός σήματος ονομάζεται το σύνολο των συχνοτήτων που περιέχει.
 - Π.χ. Ποιό είναι το φάσμα συχνοτήτων για το σήμα του Σχήματος 3.4c;
- **Απόλυτο Εύρος Ζώνης** (absolute bandwidth) είναι το εύρος του φάσματος συχνοτήτων.
 - Π.χ. Ποιό είναι για το σήμα του Σχήματος 3.4c; Για τον τετραγωνικό παλμό;
- **Ενεργό Εύρος Ζώνης** (Effective Bandwidth) ή απλώς **Εύρος Ζώνης** (Bandwidth) είναι εύρος του φάσματος συχνοτήτων όπου περιέχεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του σήματος.
- **Συνεχής Συνιστώσα** (DC component). Αν ένα σήμα περιέχει μια συνιστώσα μηδενικής συχνότητας, τότε η συνιστώσα αυτή ονομάζεται συνεχής συνιστώσα.

3.1.3 Σήμα με Συνεχή Συνιστώσα



- Signal with No DC component
- Signal with DC component
 - Non-zero average amplitude in time domain
- DC component: time domain
- DC component: freq. domain



3.1.3 Έννοιες στο πεδίο της συχνότητας

Ακόμη και μη περιοδικά σήματα μπορούν να χαρακτηριστούν στο πεδίο της συχνότητας χρησιμοποιώντας ένα συνεχές φάσμα συνιστωσών συχνοτήτων

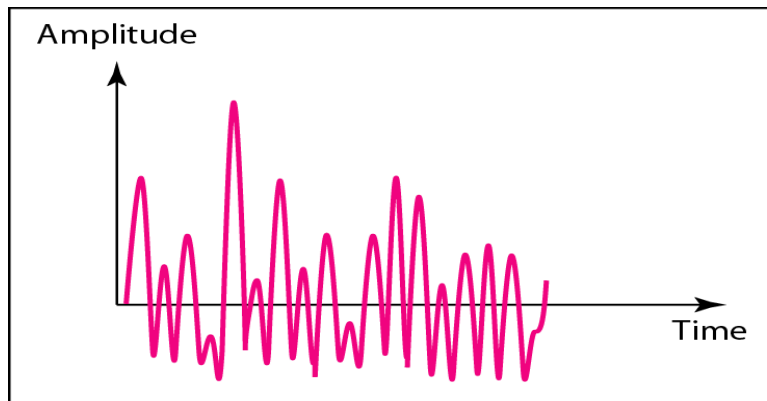
Επιτυγχάνεται με Μετασχηματισμό Fourier
Γενίκευση της σειράς Fourier για μη περιοδικά σήματα

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

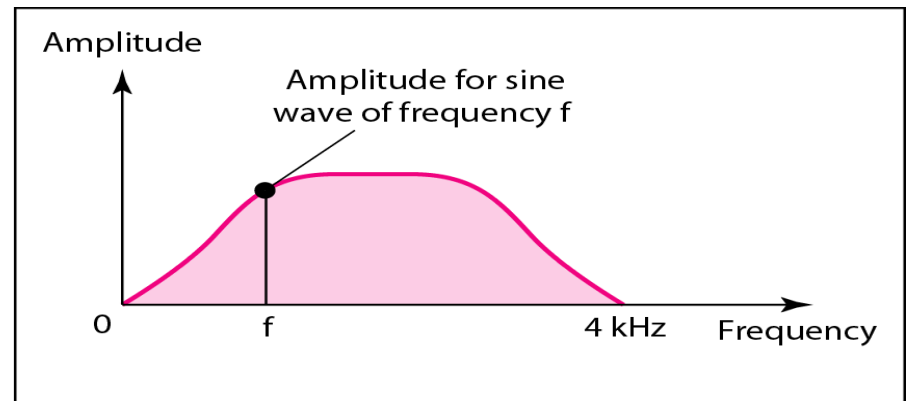
3.1.3 Έννοιες στο πεδίο της συχνότητας

Το σχήμα α δείχνει ένα μη περιοδικό σήμα (π.χ. Παράγεται από καταγραφή ομιλίας).

Το σχήμα β δείχνει την αναπαράστασή του στο πεδίο της συχνότητας



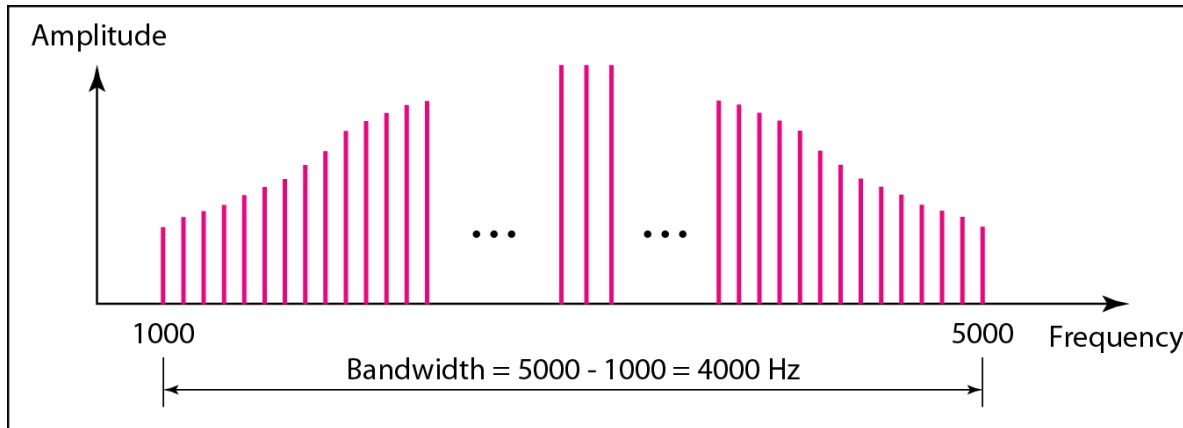
a. Time domain



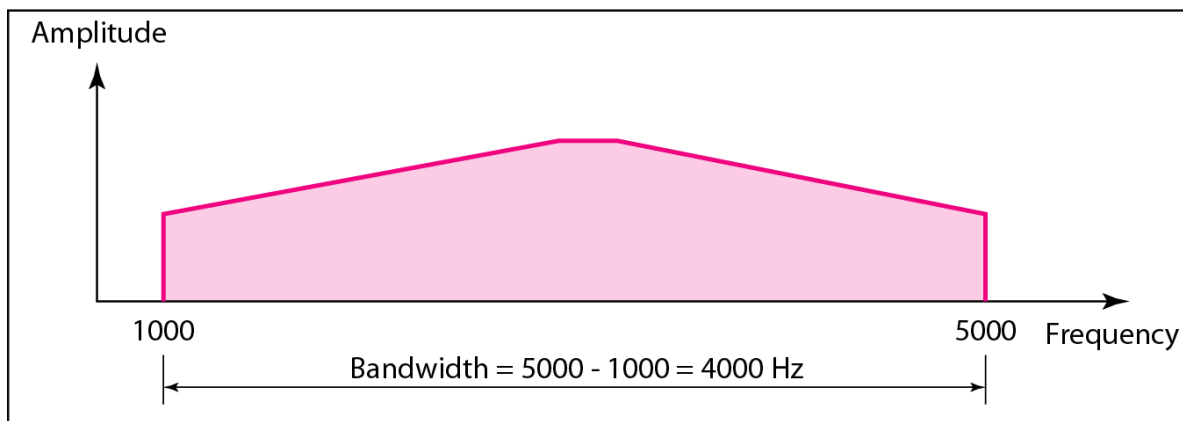
b. Frequency domain

Το εύρος ζώνης του σήματος είναι η διαφορά μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης συχνότητας που περιέχεται στο σήμα (4KHz στη παραπάνω περίπτωση)

3.1.3 Έννοιες στο πεδίο της συχνότητας



a. Bandwidth of a periodic signal



b. Bandwidth of a nonperiodic signal

Παράδειγμα

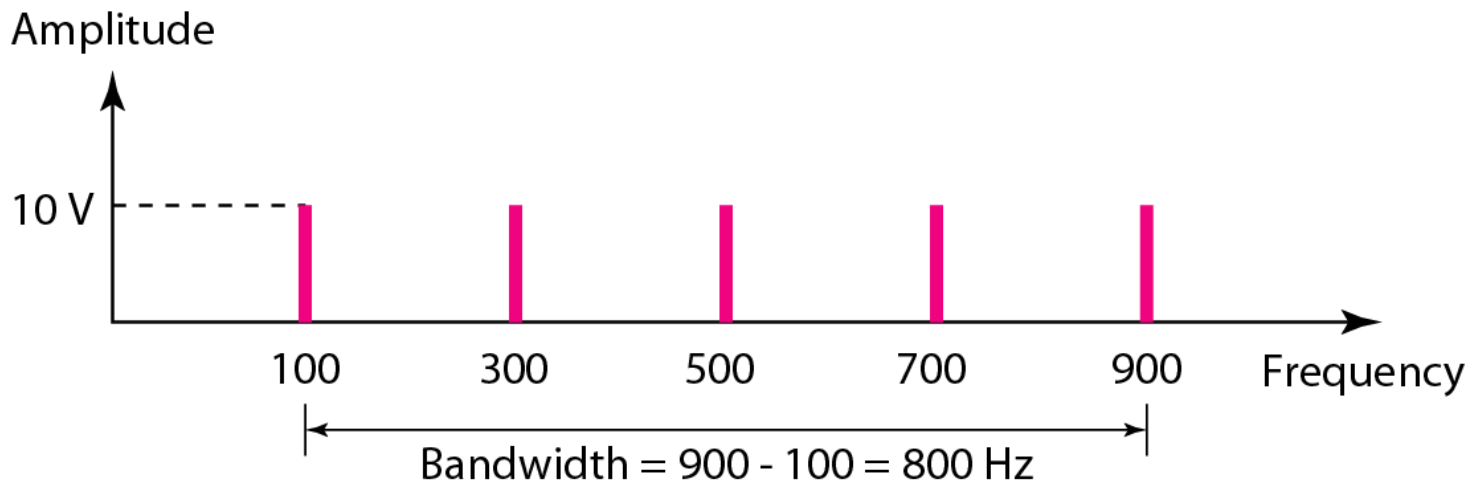
Αν ένα περιοδικό σήμα απλοποιείται σε άθροισμα πέντε ημιτονοειδών σημάτων με συχνότητες 100, 300, 500, 700 και 900 Hz, ποιό το εύρος ζώνης του; Σχεδιάστε το φάσμα του θεωρώντας ότι όλες οι συνιστώσες έχουν μέγιστο πλάτος 10 V.

Λύση

Αν f_h η υψηλότερη συχνότητα, f_l η χαμηλότερη συχνότητα και B το εύρος ζώνης, τότε.

$$B = f_h - f_l = 900 - 100 = 800 \text{ Hz}$$

Το φάσμα έχει πέντε συνιστώσες, στα 100, 300, 500, 700 και 900 Hz .



3.1.3 Ρυθμός μετάδοσης και εύρος ζώνης

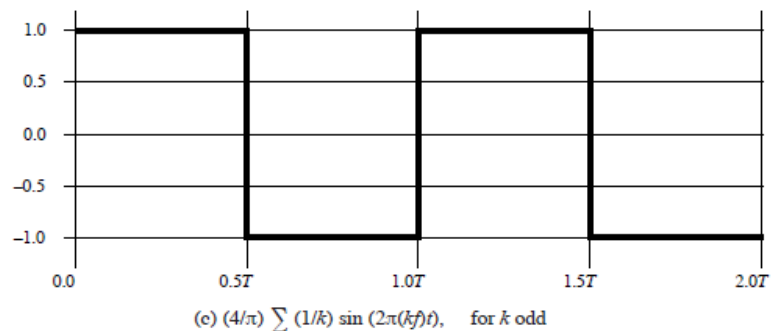
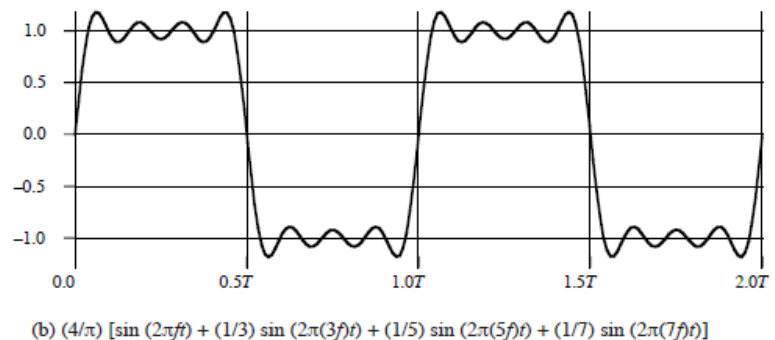
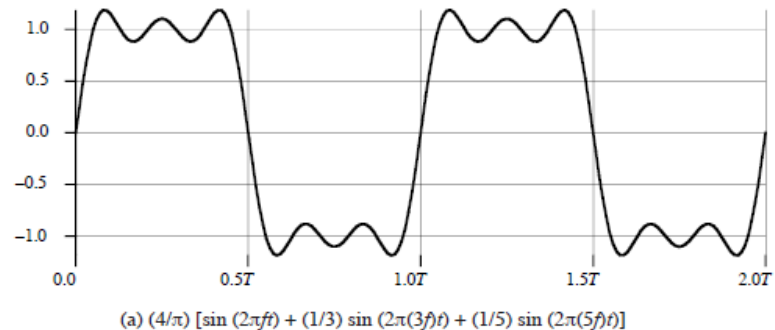
- Υποθέστε ότι δυαδικά δεδομένα κωδικοποιούνται σε ένα ψηφιακό σήμα και μεταδίδονται μέσω ενός μέσου μετάδοσης.
- Τα ψηφιακά σήματα έχουν άπειρο bandwidth, ενώ ένα πραγματικό μέσο μετάδοσης έχει πεπερασμένο bandwidth
 - γεγονός το οποίο περιορίζει το ρυθμό με τον οποίο μπορούν μεταδοθούν τα δεδομένα.
 - Το περιορισμένο bandwidth δημιουργεί παραμορφώσεις στο εισερχόμενο σήμα, γεγονός που καθιστά πιο δύσκολη την εξαγωγή των μεταδιδόμενων δεδομένων από το λαμβανόμενο σήμα
 - Οι παραμορφώσεις προέρχονται από το γεγονός ότι δε μπορούν να περάσουν όλες οι συχνοτικές συνιστώσες από το μέσο

3.1.3 Ρυθμός μετάδοσης και εύρος ζώνης

- Συνεπώς
 - Όσο μικρότερο είναι το bandwidth, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση και άρα τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να εξαχθούν εσφαλμένα τα δεδομένα από το λαμβανόμενο σήμα, ή αντίστοιχα
 - όσο μεγαλύτερο είναι το bandwidth ενός συστήματος μετάδοσης τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός με τον οποίο μπορούν να μεταδοθούν τα δεδομένα μέσω αυτού.

3.1.3 Ρυθμός μετάδοσης και εύρος ζώνης

- Προσέγγιση σήματος με άθροισμα συνιστωσών.
 - Όσο περισσότερες συχνотικές συνιστώσες προσθέτουμε, τόσο το τελικό σήμα μοιάζει με το αρχικό.
- Επειδή όμως
 - έχει άπειρες συχνотικές συνιστώσες και επομένως άπειρο εύρος ζώνης (δεν υπάρχουν μέσα μετάδοσης για κάτι τέτοιο)
 - και το πλάτος της k -οστής συνιστώσας είναι $1/k$ το πλάτος της κύριας
 - περιοριζόμαστε σε πεπερασμένο αριθμό συνιστωσών ώστε να καταλήξουμε σε σήμα με πεπερασμένο εύρος ζώνης



3.1.3 Ρυθμός μετάδοσης και εύρος ζώνης

- Το μέσο μετάδοσης έχει συγκεκριμένο εύρος ζώνης
- Επομένως δρα ως φίλτρο το οποίο αποκόπτει τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας (εκείνες με συχνότητα μεγαλύτερη από το απόλυτο εύρος ζώνης του)

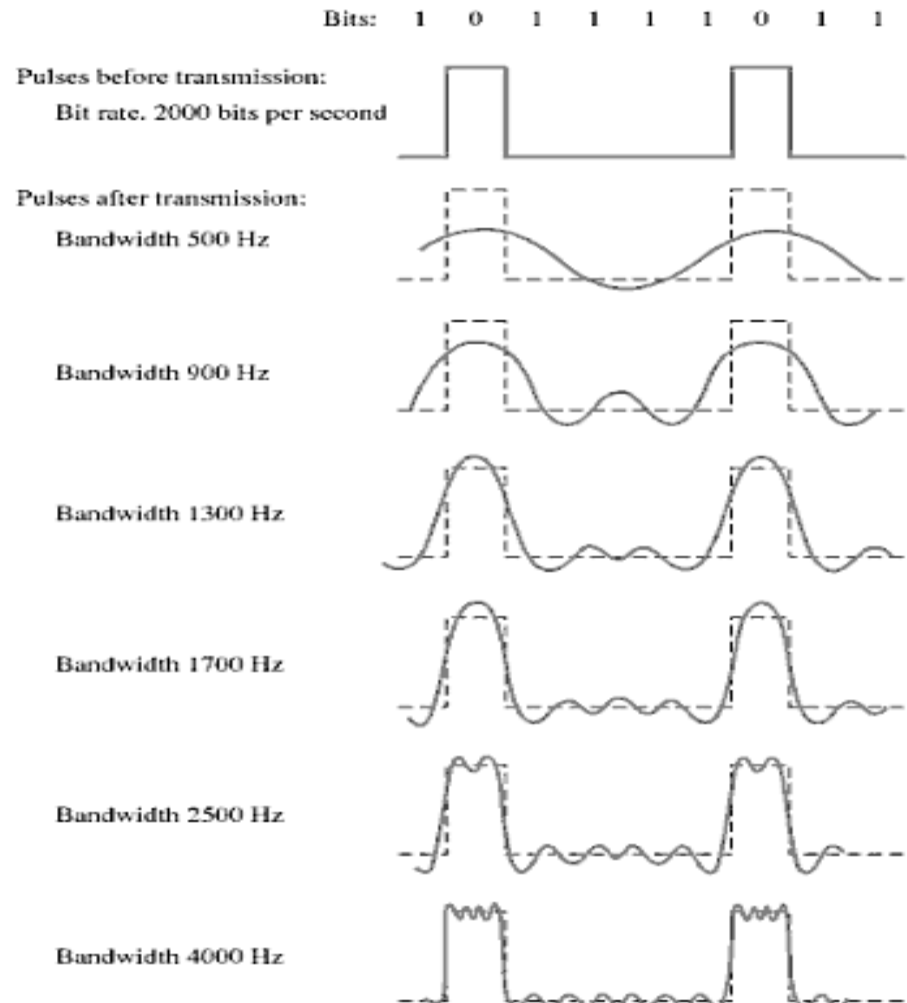


Figure 3.8 Effect of Bandwidth on a Digital Signal

3.2 Μετάδοση αναλογικών και ψηφιακών δεδομένων

- **Δεδομένα**
 - Οντότητες που εμπεριέχουν κάποια σημασία-έννοια
- **Σήματα**
 - Ηλεκτρικές ή ηλεκτρομαγνητικές αναπαραστάσεις των δεδομένων
- **Μετάδοση**
 - Μετάδοση δεδομένων με διάδοση και επεξεργασία των σημάτων
- Θα διευκρινήσουμε σύντομα τις έννοιες αναλογικό/ψηφιακό
 - Για δεδομένα και σήματα

3.2.1 Δεδομένα: Αναλογικά / Ψηφιακά

- Αναλογικά
 - Συνεχείς τιμές σε κάποιο διάστημα
 - Π.χ ομιλία
 - Εύρος ζώνης (ακοής) 20 Hz-20 kHz
 - Ομιλία: 100 Hz-7 kHz
 - Μετατρέπεται εύκολα σε ηλεκτρομαγνητικό σήμα για μετάδοσή του
 - Οι ηχητικές συνιστώσες με μεταβλητή ένταση μετατρέπονται σε ηλεκτρομαγνητικές συχνότητες με μεταβαλλόμενη ισχύ
 - Π.χ. video
 - Φάσμα: 4 MHz για ανάλυση ~540x480 σε 30 fps
 - Π.χ περισσότερα δεδομένα απο αισθητήρες

3.2.1 **Δεδομένα:** Αναλογικά / Ψηφιακά

- Ψηφιακά
 - Διακριτές τιμές
 - Π.χ. κείμενο, ακέραιοι
 - Αναπαράσταση με δυαδικό τρόπο (ακολουθίες 0 1)
 - με δύο συνιστώσες dc

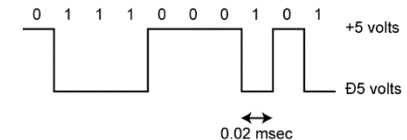
3.2.2 Σήματα: Αναλογικά / Ψηφιακά

- Φορέας μεταφοράς των δεδομένων
- Αναλογικά
 - Μεταβάλλονται συνεχώς στο χρόνο
 - Διάφορα μέσα μετάδοσης
 - καλώδιο, οπτική ίνα, ελεύθερος χώρος



In this graph of a typical analog signal, the variations in amplitude and frequency convey the gradations of loudness and pitch in speech or music. Similar signals are used to transmit television pictures, but at much higher frequencies.

- Ψηφιακά
 - Αναπαράσταση δεδομένων με χρήση δύο DC συνιστωσών
 - Π.χ. Θετική τάση:1, αρνητική τάση: 0

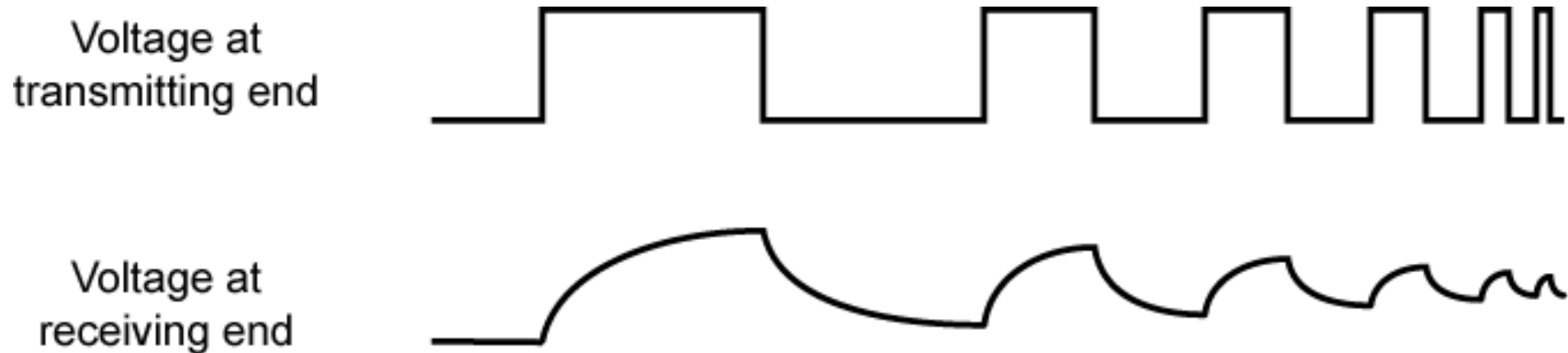


User input at a PC is converted into a stream of binary digits (1s and 0s). In this graph of a typical digital signal, binary one is represented by 5 volts and binary zero is represented by 0 volts. The signal for each bit has a duration of 0.02 msec, giving a data rate of 50,000 bits per second (50 kbps).

3.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ψηφιακής σηματοδοσίας

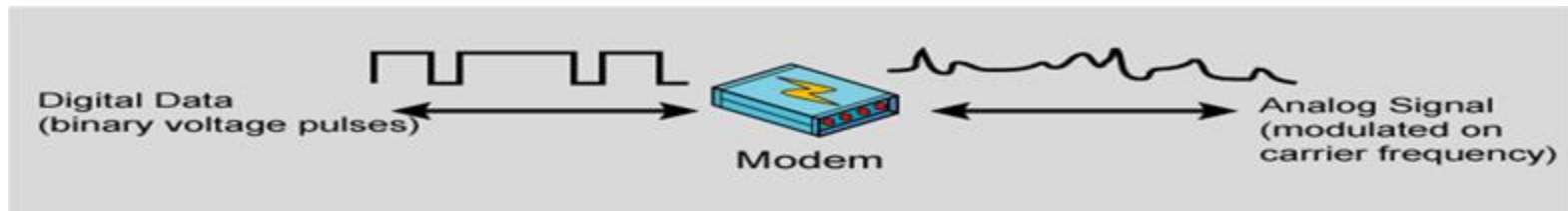
- Πλεονεκτήματα
 - Φθηνότερη απο αναλογική σηματοδοσία
 - Λιγότερο ευπαθής σε θόρυβο
- Κύριο Μειονέκτημα:
 - Μεγαλύτερη εξασθένηση
 - Λόγω εξασθένησης των συνιστωσών υψηλής συχνότητας, οι παλμοί «στρογγυλεύουν» και μικραίνουν σε πλάτος
 - Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια πληροφορίας.

3.2.2 Εξασθένηση Ψηφιακών σημάτων



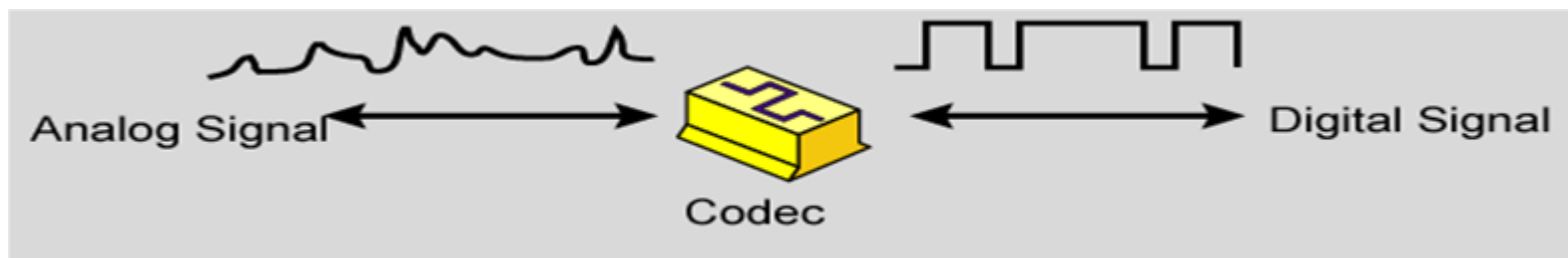
3.2.2 Δεδομένα και σήματα

- Συνήθως χρησιμοποιούμε ψηφιακά σήματα για ψηφιακά δεδομένα και αναλογικά σήματα για αναλογικά δεδομένα
- Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε αναλογικό σήμα για να μεταφέρουμε ψηφιακά δεδομένα
 - Π.χ. Modem: μεταφέρει δυαδικά δεδομένα με διαμόρφωση αναλογικού φέροντος με βάση αυτά
 - Το σήμα που παράγεται είναι αναλογικό, με πεπερασμένο εύρος ζώνης
 - Μπορεί συνεπώς να μεταφερθεί από το μέσο μετάδοσης



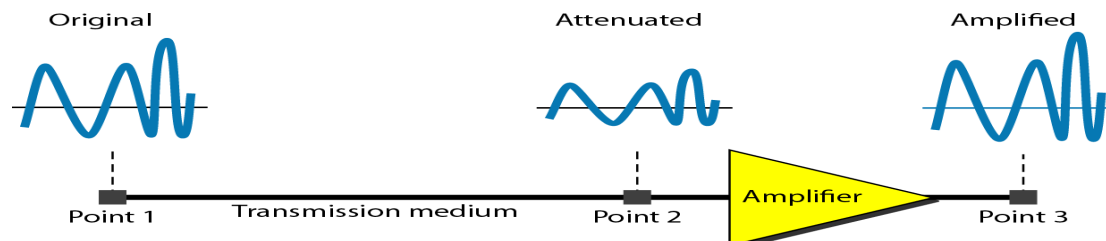
3.2.2 Δεδομένα και σήματα

- Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ψηφιακό σήμα για να μεταφέρουμε αναλογικά δεδομένα
 - Π.χ. Compact Disc audio, VoIP (ψηφιοποίηση)
 - Ο κωδικοποιητής προσεγγίζει το αναλογικό σήμα φωνής με bit stream



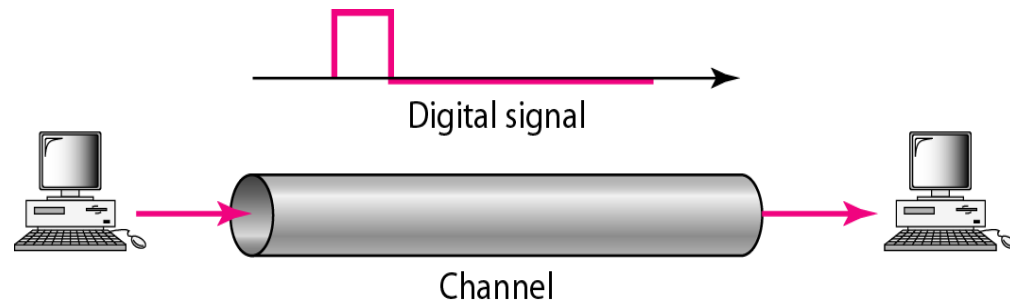
3.2.2 Αναλογική μετάδοση

- Το αναλογικό σήμα μεταδίδεται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το περιεχόμενο
 - Το σήμα μπορεί να αναπαριστά αναλογικά ή ψηφιακά δεδομένα
- Το αναλογικό σήμα εξασθενεί με την απόσταση
- Επομένως γίνεται χρήση **ενισχυτών** για ενίσχυση του σήματος
 - Οι οποίοι όμως επίσης ενισχύουν και το θόρυβο!



3.2.2 Ψηφιακή μετάδοση (βασικής ζώνης)

- Πομπός και δέκτης γνωρίζουν ότι τα δεδομένα είναι ψηφιακά
- Η ακεραιότητα απειλείται από το θόρυβο, την εξασθένηση κτλ που αυξάνουν με την απόσταση.
- Χρησιμοποιούνται επομένως **επαναλήπτες**.
- Ο επαναλήπτης:
 - Λαμβάνει το σήμα
 - Ανακτά το bit pattern
 - Επαναμεταδίδει
- Έτσι αντιμετωπίζεται η εξασθένηση
 - Και ο θόρυβος δεν ενισχύεται.



3.2.2 Ψηφιακή μετάδοση (με διαμόρφωση φέροντος)

- Η ίδια τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί εαν το μεταδιδόμενο σήμα είναι αναλογικό αλλά τα μεταφερόμενα δεδομένα ψηφιακά
- Ο επαναλήπτης:
 - Λαμβάνει το αναλογικό σήμα
 - Ανακτά το bit pattern με analog to digital conversion
 - Με βάση το bit pattern επαναδιαμορφώνει το φέρον (επαναμεταδίδει το αρχικό αναλογικό σήμα)

3.2.2 Ψηφιακή μετάδοση (βασικής ζώνης)

- Όπως είδαμε ένα ψηφιακό σήμα είναι ένα σύνθετο αναλογικό σήμα με άπειρο εύρος ζώνης (συνιστώσες)
- Η μετάδοση **βασικής ζώνης** απαιτεί ένα **χαμηλοπερατό κανάλι**
 - Κανάλι του οποίου το εύρος συχνοτήτων ξεκινάει από το μηδέν.
- Το παραπάνω επιτυγχάνεται όταν έχουμε ένα μέσο μετάδοσης του οποίου το εύρος ζώνης χρησιμοποιείται ως μοναδικό κανάλι
 - Π.χ. Όλο το εύρος ζώνης ενός καλωδίου που συνδέει δύο υπολογιστές
 - Η το εύρος ζώνης της αρτηρίας ενός τοπικού δικτύου όπου μόνο ένα ζεύγος υπολογιστών μπορεί να συνομιλεί ταυτόχρονα με half-duplex μέθοδο

3.2.2 Πλεονεκτήματα ψηφιακής μετάδοσης δεδομένων

- Ψηφιακή τεχνολογία
 - Υλοποιείται με LSI/VLSI υλικό το οποίο είναι χαμηλού κόστους. Το ίδιο δεν ισχύει για υλικό αναλογικής μετάδοσης δεδομένων
- Ακεραιότητα δεδομένων
 - Μεγαλύτερες αποστάσεις με γραμμές μετάδοσης χαμηλότερης ποιότητας
 - Καθώς οι επαναλήπτες δεν ενισχύουν το θόρυβο όπως οι ενισχυτές
- Χρησιμοποίηση χωρητικότητας
 - Οι γραμμές υψηλής χωρητικότητας είναι πλέον οικονομικές και χρησιμοποιούνται ευρέως
 - Για να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά χρειάζεται πολυπλεξία πολλαπλών συνδέσεων (στο χρόνο) πάνω από τέτοιες γραμμές.
 - Με τη χρήση ψηφιακών τεχνικών η πολυπλεξία είναι πιο εύκολη

3.2.2 Πλεονεκτήματα ψηφιακής μετάδοσης δεδομένων

- Ασφάλεια και ιδιωτικότητα
 - Εύκολα εφαρμόζεται κρυπτογράφηση σε ψηφιακά δεδομένα και σε αναλογικά δεδομένα τα οποία έχουν ψηφιοποιηθεί
- Ολοκλήρωση
 - Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση ψηφιοποιημένων αναλογικών και ψηφιακών δεδομένων ταυτόχρονα

3.3 Βλάβες μετάδοσης

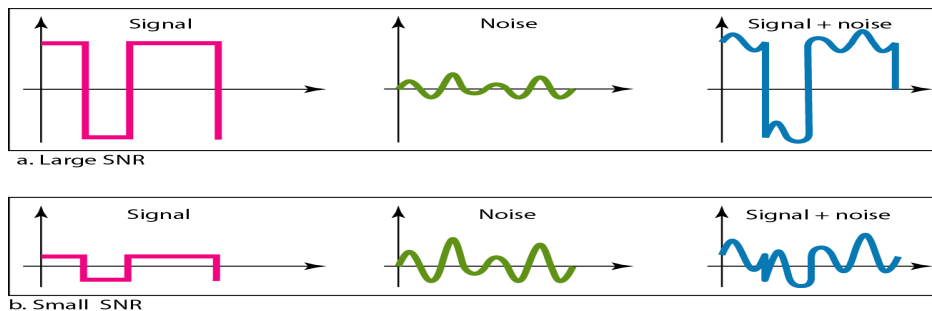
- Το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να διαφέρει από εκείνο που μεταδόθηκε
- Αναλογικό: Υποβάθμιση ποιότητας σήματος
 - Π.χ. Φωνής σε τηλεφωνία
- Ψηφιακό - bit errors (1->0, 0->1)
- Τα πιο σημαντικά προβλήματα είναι:
 - Εξασθένηση και παραμόρφωση εξασθένησης
 - Παραμόρφωση καθυστέρησης
 - Θόρυβος

3.3 Εξασθένιση

- Η ισχύς του σήματος μειώνεται με την απόσταση
 - Χάνεται ενέργεια λόγω της αντίστασης του μέσου
 - Για το λόγο αυτό κάποια καλώδια που μεταφέρουν ηλεκτρικά σήματα θερμαίνονται
 - Η απώλεια εξαρτάται από το μέσο μετάδοσης
- Σε κατευθυνόμενα: εκθετική μείωση ως προς απόσταση
 - Συνήθως ορίζεται ως σταθερός αριθμός dB ανά μονάδα απόστασης
- Σε μη κατευθυνόμενα μέσα η εξασθένιση έχει πιο περίπλοκη συμπεριφορά
 - Εξαρτάται από την απόσταση και το περιβάλλον διάδοσης

3.3 Εξασθένηση

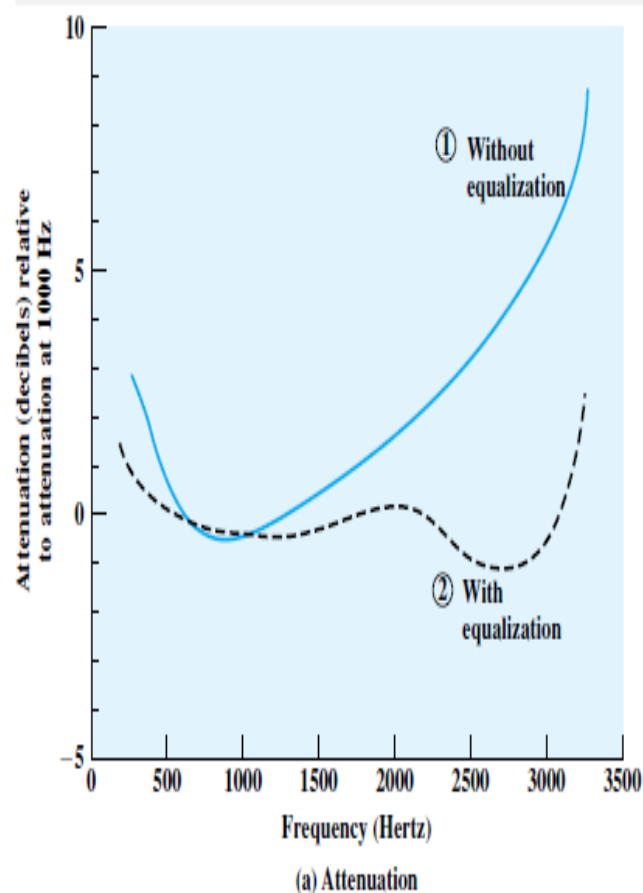
- Η εξασθένηση εισάγει τρία προβλήματα:
 1. Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος θα πρέπει να είναι αρκετή για να επιτρέψει ανίχνευσή του απο το δέκτη (>από ευαισθησία δέκτη)
 2. Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλότερη από εκείνη του θορύβου ώστε η λήψη να γίνεται δίχως σφάλματα



3. Η εξασθένηση είναι μια αύξουσα συνάρτηση της συχνότητας (παραμόρφωση εξασθένησης)

3.3 Παραμόρφωση εξασθένησης

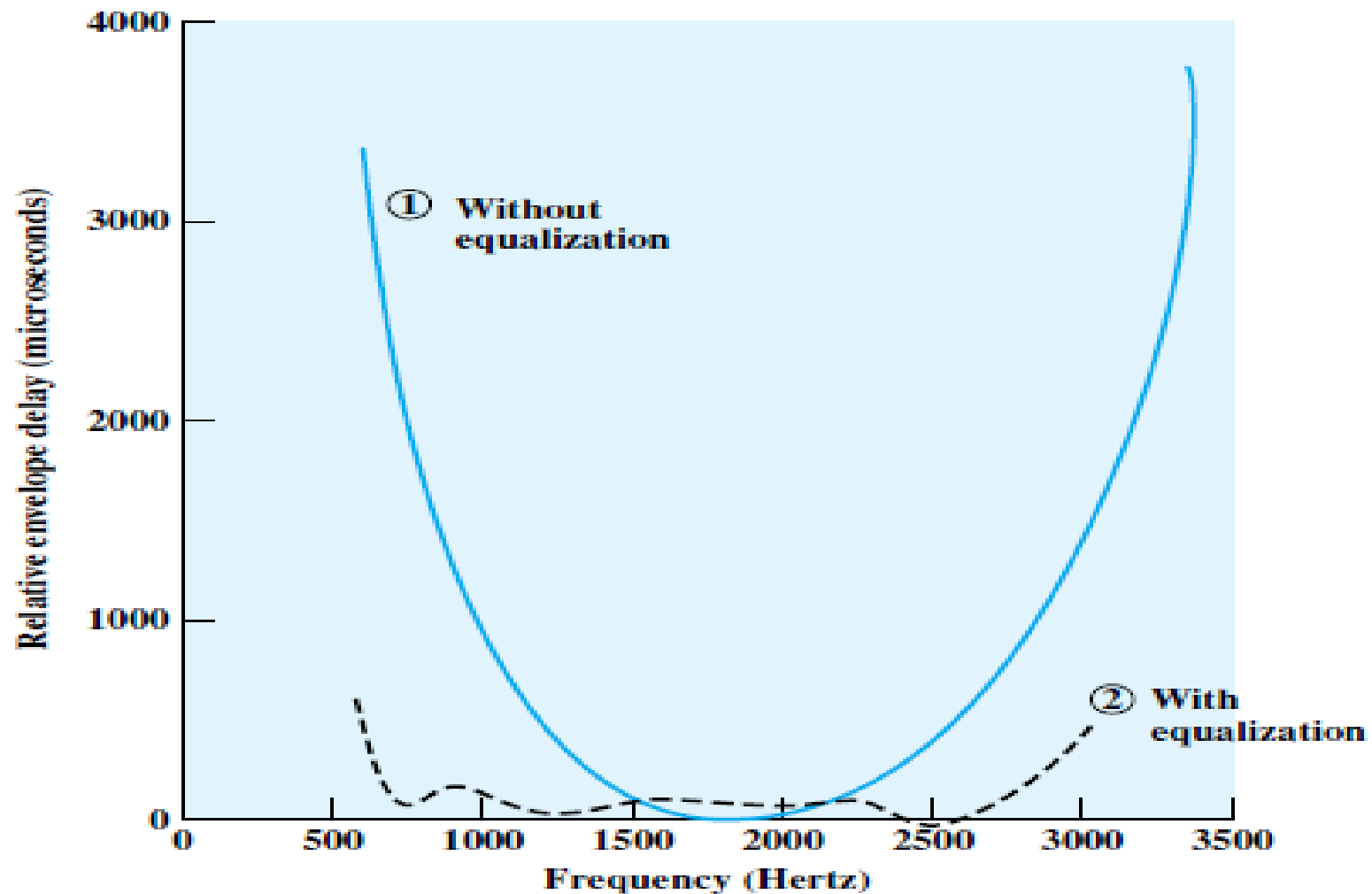
- Τα πρώτα δύο προβλήματα λύνονται με τη χρήση **επαναλήπτη**.
- **Παραμόρφωση εξασθένησης:** Η εξασθένηση είναι αύξουσα συνάρτηση της συχνότητας
 - Το παραπάνω παραμορφώνει το λαμβανόμενο σήμα καθώς οι συνιστώσες υψηλότερης συχνότητας εξασθενούν περισσότερο
- Λύνεται με ειδικές διατάξεις για την εξίσωση της εξασθένησης στις διάφορες συχνότητες του μεταφερόμενου σήματος.
 - Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενισχυτές για την ενίσχυση των συνιστωσών υψηλότερης συχνότητας



3.3 Παραμόρφωση καθυστέρησης

- Οφείλεται στο ότι η ταχύτητα διάδοσης είναι διαφορετική για τις διάφορες συχνοτικές συνιστώσες (εξαρτάται από τη συχνότητα)
 - Τείνει να είναι μεγαλύτερη κοντά στη κεντρική συχνότητα του καναλιού και να μειώνεται πλησιάζοντας στις δύο συχνοτικές «άκρες» του
- Επομένως οι συνιστώσες φτάνουν σε διαφορετικό χρόνο στο δέκτη
 - Με αποτέλεσμα να φτάνουν με διαφορά φάσης μεταξύ τους
- Αποτελεί πρόβλημα για τα δυαδικά δεδομένα
 - Ενέργεια που αφορά ένα bit μπορεί να φτάσει στο δέκτη σε χρόνο ίδιο με εκείνο της λήψης ενέργειας από επόμενα bits
 - Το παραπάνω είναι γνωστό ως **διασυμβολική παρεμβολή**
 - Υπάρχουν τεχνικές ισοστάθμισης για τη αντιμετώπιση της παραμόρφωσης καθυστέρησης.

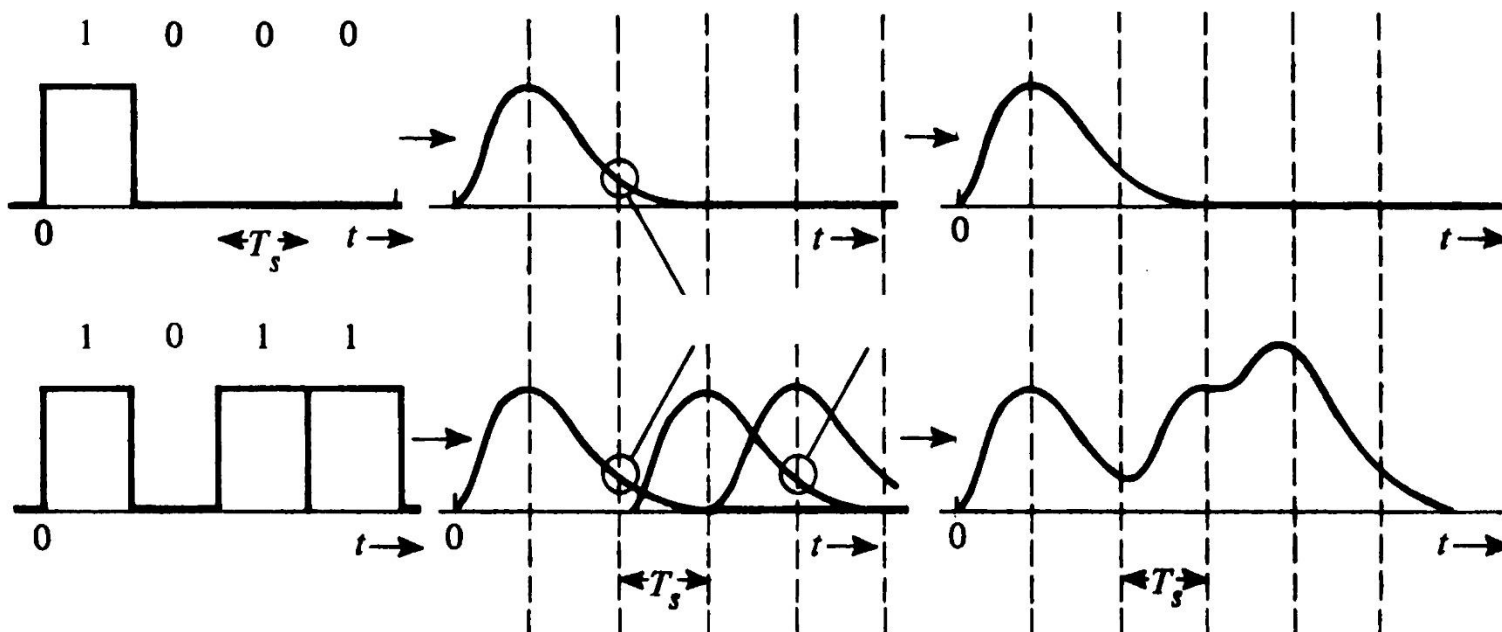
3.3 Παραμόρφωση καθυστέρησης



(b) Delay distortion

3.3 Παραμόρφωση καθυστέρησης

Διασυμβολική παρεμβολή (ISI)



3.4 Θόρυβος (1)

- Σήμα που ειπαισέγχεται μεταξύ πομπού και δέκτη
 - ο σημαντικότερος περιοριστικός παράγοντας στην απόδοση
- **Θερμικός**
 - Λόγω θερμικής διαταραχής των ηλεκτρονίων
 - Υπάρχει σε όλες τις ηλεκτρονικές διατάξεις
 - Η ισχύς του εξαρτάται από τη θερμοκρασία
 - Δε μπορεί να απαλειφθεί και επομένως θέτει ένα άνω όριο στην απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί
 - Ομοιόμορφα κατανεμημένος στο φάσμα συχνοτήτων
 - Γνωστός γι' αυτό και ως λευκός θόρυβος
 - Η ισχύς του δίνεται από τη σχέση $N_o = K * T$ (W/Hz), όπου
 - N_o : Πυκνότητα ισχύος θορύβου σε 1 Hz εύρους ζώνης
 - K : σταθερή Boltzman (1.38×10^{-23} J/K)
 - T : Θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

3.4 Θόρυβος (2)

- **Ενδοδιαμόρφωσης**

- Όταν πάνω από το μέσο μετάδοσης μεταφέρονται σήματα σε διαφορετικές συχνότητες, τότε παράγονται σήματα τα οποία είναι αθροίσματα ή διαφορές των αρχικών συχνοτήτων που μοιράζονται το μέσο μετάδοσης
 - Το παραπάνω δημιουργεί συχνά παρεμβολές σε δέκτες που λαμβάνουν σε κάποια άλλη συχνότητα.
- Π.χ. Αν μεταδίδονται σήματα σε συχνότητες $f1$ και $f2$, τότε πιθανά να δημιουργείται ενέργεια στη συχνότητα $f3=f1 + f2$
 - Κάτι που παρεμβάλλει σε δέκτη που ακούει στη συχνότητα $f3$.

3.4 Θόρυβος (2)

- **Συνακρόασης (Crosstalk)**

- Σήμα από μια γραμμή επάγει ενέργεια σε παρακείμενη γραμμή
- Σε ένα επικοινωνιακό σύστημα τυπικά έχει ίδια τάξη μεγέθους με θερμικό θόρυβο

- **Κρουστικός**

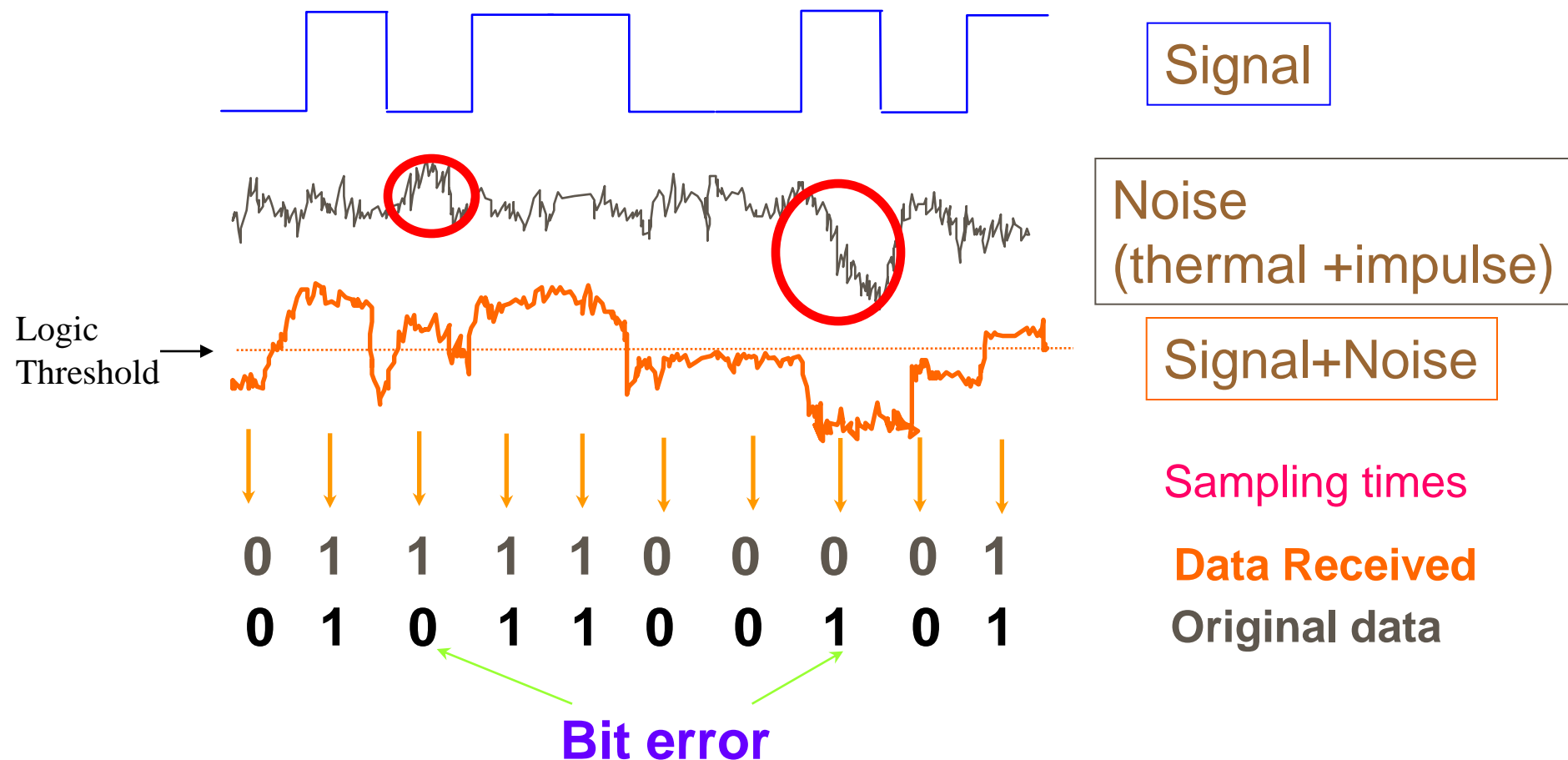
- Τα παραπάνω είδη θορύβου είναι γενικά προβλέψιμα και σταθερής ισχύος
- Αντίθετα, στον κρουστικό έχουμε ακανόνιστους παλμούς ή εξάρσεις
 - Μικρής διάρκειας
 - Μεγάλου πλάτους
 - Π.χ. Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές

3.4 Θόρυβος (3)

- **Κρουστικός**

- Δημιουργεί λίγα προβλήματα σε αναλογικά δεδομένα
 - Π.χ. Μια τηλεφωνική συνδιάλεξη θα επηρεαστεί από σύντομα «κλικ», αλλά θα είναι κατανοητή
- Σε μετάδοση ψηφιακών δεδομένων είναι η κύρια πηγή BER
 - Π.χ. σε μετάδοση δεδομένων φωνής σε ταχύτητα 56 Kbps μια έξαρση 0.01 s θα κατέστρεφε 560 bits ψηφιακών δεδομένων

3.4 Θόρυβος (4)



3.4 Η έννοια του **decibel**

- Η ενίσχυση (amplification) ή η εξασθένηση (attenuation) του σήματος εκφράζονται σε λογαριθμικές μονάδες που ονομάζονται **decibels** (dB).
- Αν P_{in} είναι η ισχύς του εισερχόμενου σήματος και P_{out} η ισχύς του εξερχόμενου σήματος, τότε το κέρδος (ενίσχυση) ή η απώλεια (εξασθένηση) που προκαλεί το επικοινωνιακό σύστημα στο σήμα εκφράζεται ως:

$$N_{dB} = 10 \log_{10}(P_{out}/P_{in})$$

Παράδειγμα

Θεωρείστε ένα σήμα το οποίο μεταδίδεται μέσα από ένα μέσο μετάδοσης και η ισχύς του μειώνεται στο μισό. Επομένως $P_2 = (1/2)P_1$.

Η εξασθένηση (απώλεια ισχύος) υπολογίζεται ως:

$$10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} \frac{0.5P_1}{P_1} = 10 \log_{10} 0.5 = 10(-0.3) = -3 \text{ dB}$$

Απώλεια 3 dB (−3 dB) αντιστοιχεί σε λαμβανόμενη ισχύ 50% της ισχύος εκπομπής.

Παραδείγματα

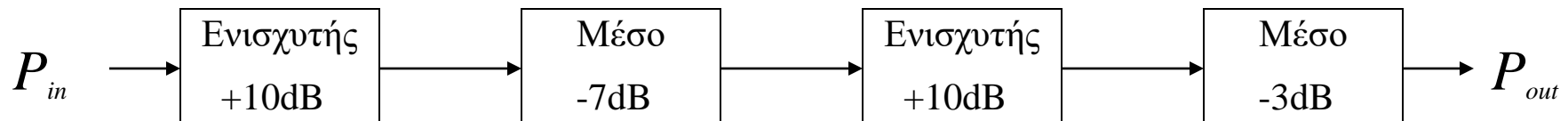
α) $P_{in}=10$ watts, $P_{out}=100$ watts \Rightarrow

$\Rightarrow N_{dB}=10 \log_{10}(100/10) = 10$ dB

β) $P_{in}=100$ watts, $P_{out}=10$ watts \Rightarrow

$\Rightarrow N_{dB}=10 \log_{10}(10/100) = -10$ dB

γ) Θεωρείστε το παρακάτω επικοινωνιακό σύστημα:



$$N_{dB}=10 \log_{10}(P_{out}/P_{in}) = +10 -7 +10 -3 = +10\text{dB}$$

3.5 Χωρητικότητα καναλιού

Έννοιες

- **Ρυθμός μετάδοσης**

- Σε bits per second
- Ρυθμός στον οποίο μπορεί να γίνει η μετάδοση των δεδομένων

- **Εύρος ζώνης**

- Το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος, όπως αυτο περιορίζεται από το μέσο μετάδοσης.
- Μετράται σε κύκλους ανά second ή Hz

3.5 Σχέση Nyquist

- Θεωρούμε κανάλι **χωρίς θόρυβο**
- Ο μόνος παράγοντας που περιορίζει το ρυθμό μετάδοσης είναι το **εύρος ζώνης** του καναλιού
- Αν ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας είναι $2B$ bps τότε ένα σήμα με εύρος ζώνης όχι μεγαλύτερο από B είναι αρκετό για την επίτευξη του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης
 - *Εναλλακτική διατύπωση:* Δεδομένου εύρους ζώνης καναλιού B , ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης είναι $2B$ bps

3.5 Σχέση Nyquist

- Ο ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί με B Hz εύρος ζώνης καναλιού είναι $2 * B$ bps
 - Για **δυναμικό σήμα** (2 symbols). Πχ 2 πλάτη, 2 φάσεις κτλ
- Μπορεί να αυξηθεί με χρήση **$M > 2$ συμβόλων**
 - $C = 2B \log_2 M$ bps
- Υπάρχει περιορισμός στον **αριθμό των συμβόλων** που μπορεί να χρησιμοποιηθούν
 - Πολλά σύμβολα: Μεγαλύτερη ευπάθεια σε θόρυβο (πιο εύκολα μια ριπή θορύβου αλλάζει ένα σύμβολο σε κάποιο άλλο)

3.5 Σχέση Nyquist

EXAMPLE 3.3 Consider a voice channel being used, via modem, to transmit digital data. Assume a bandwidth of 3100 Hz. Then the Nyquist capacity, C , of the channel is $2B = 6200$ bps. For $M = 8$, a value used with some modems, C becomes 18,600 bps for a bandwidth of 3100 Hz.

3.5 Σχέση Χωρητικότητας Shannon

- Συσχετίζει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης και θόρυβο
- Γιατί ο θόρυβος περιορίζει το bit rate;
 - Γρηγορότερη μετάδοση μειώνει τη διάρκεια κάθε bit με αποτέλεσμα μια ριπή θορύβου να επηρεάζει περισσότερα bits
 - Έτσι, για συγκεκριμένο επίπεδο θορύβου, υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης οδηγεί σε υψηλότερο ρυθμό σφαλμάτων

3.5 Σχέση Χωρητικότητας Shannon

- Λόγος σήματος προς θόρυβο (σε decibels)
 - $SNR_{db} = 10 \log_{10}(SNR)$ ($SNR = S/N$)
- **Χωρητικότητα** $C = B \log_2(1 + SNR)$ bps
 - Στη πράξη σπάνια επιτυγχάνεται διότι:
 - Θεωρεί μόνο **λευκό θόρυβο (θερμικό)**
 - Δε λαμβάνει υπόψη κρουστικό θόρυβο, παραμορφώσεις εξασθένησης και καθυστέρησης
 - Είναι η χωρητικότητα που μπορεί να επιτευχθεί χωρίς να εμφανίζονται σφάλματα
 - Ο Shannon απέδειξε ότι εάν γίνεται μετάδοση στο κανάλι με ρυθμό $< C$
 - τότε υπάρχει κωδικοποίηση που επιτυγχάνει μετάδοση χωρίς σφάλματα



Claude Shannon
(1916-2001)

3.5 Σχέση Χωρητικότητας Shannon

- Ένα ψηφιακό σήμα μεταφέρεται πάνω από ένα κανάλι εύρους 10KHz με λόγο σήματος προς θόρυβο 40 dB.
 1. Ποιός είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί;
 2. Με πόσα επίπεδα σηματοδοσίας μπορεί να επιτευχθεί αυτός ο ρυθμός μετάδοσης;

3.5 Σχέση Χωρητικότητας Shannon

1. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δίνεται από το νόμο του Shannon
 - $10\log SNR=40 \Rightarrow SNR=10^4=10000$
 - $C= H * \log_2(1+SNR)=10 * \log_2(10001)= 132.8 \text{ Kbps.}$

2. Συμφωνα με το νομο Nyquist: $C=2*B*\log_2 M \Rightarrow 132=20*\log_2 M \Rightarrow M =97 \text{ levels}$

3.5 Σχέση Χωρητικότητας Shannon

- Η παράμετρος E_b/N_0 : Λόγος **ενέργειας σήματος ανά bit** προς **ισχύ θορύβου ανά 1 Hz**
 - $E_b = S * T_b$ S ισχύς σήματος, T_b διάρκεια bit

$R = 1/T_b$: data rate

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S/R}{N_0} = \frac{S}{kTR}$$

or, in decibel notation,

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{dB}} &= S_{\text{dBW}} - 10 \log R - 10 \log k - 10 \log T \\ &= S_{\text{dBW}} - 10 \log R + 228.6 \text{ dBW} - 10 \log T \end{aligned}$$

3.5 Σχέση Χωρητικότητας Shannon

- E_b/N_0 : Πιο κατάλληλη μετρική από το SNR για το καθορισμό ρυθμού μετάδοσης δυαδικών δεδομένων και ρυθμών σφαλμάτων
 - Καθώς το BER για digital data είναι φθίνουσα συνάρτηση του E_b/N_0
 - Και, σε αντίθεση με το SNR , είναι ανεξάρτητο του εύρους ζώνης του καναλιού
- Πως χρησιμοποιείται: Είναι γνωστό το απαιτούμενο E_b/N_0 για μετάδοση δυαδικών δεδομένων με συγκεκριμένο BER για κάθε μέθοδο διαμόρφωσης
 - Έτσι επιλέγονται κατάλληλα οι παράμετροι S , R που ικανοποιούν τη προηγούμενη σχέση
$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{kTR}$$
- Προσέξτε ότι αν αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης απαιτείται αύξηση του S για να διατηρηθεί το ίδιο E_b/N_0 δηλ το ίδιο BER

3.5 Σχέση Χωρητικότητας Shannon

EXAMPLE 3.5 For binary phase-shift keying (defined in Chapter 5), $E_b/N_0 = 8.4$ dB is required for a bit error rate of 10^{-4} (one bit error out of every 10,000). If the effective noise temperature is 290°K (room temperature) and the data rate is 2400 bps, what received signal level is required?

We have

$$\begin{aligned} 8.4 &= S(\text{dBW}) - 10 \log 2400 + 228.6 \text{ dBW} - 10 \log 290 \\ &= S(\text{dBW}) - (10)(3.38) + 228.6 - (10)(2.46) \\ S &= -161.8 \text{ dBW} \end{aligned}$$

3.5 Σχέση Χωρητικότητας Shannon

- Ο όρος E_b/N_0 μπορεί να συσχετισθεί με τη **φασματική απόδοση C/B** (πόσα bps μπορούμε να στείλουμε ανα Hz)

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N_0 R} \xrightarrow{N = N_0 B} \frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \frac{B}{R}$$

- Από το νόμο του Shannon $\frac{S}{N} = 2^{C/B} - 1$
- Από τις δυο παραπάνω σχέσεις και για $R=C$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{B}{C} (2^{C/B} - 1)$$

3.5 Σχέση Χωρητικότητας Shannon

EXAMPLE 3.6 Suppose we want to find the minimum E_b/N_0 required to achieve a spectral efficiency of 6 bps/Hz. Then

$$E_b/N_0 = (1/6)(2^6 - 1) = 10.5 = 10.21 \text{ dB.}$$