

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Εισαγωγή

Καθηγητής Συμεών Παπαβασιλείου

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής & Συστημάτων Πληροφορικής

(E-mail: papavass@mail.ntua.gr Τηλ: 210 772-2550
Γραφείο: B.3.15 Νέο Κτίριο Ηλεκτρολόγων)

4 Μαρτίου, 2022

Γενικά

- Κεντρική Ιστοσελίδα:

<https://helios.ntua.gr/course/view.php?id=928>

- Επιλογές Συγγραμμάτων:

- **Simon Haykin, Michael Moher**, *"Συστήματα Επικοινωνίας"*, 5^η Έκδοση, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2010 (*προτεινόμενη επιλογή*)
- **John G. Proakis, Masoud Salehi**, *"Συστήματα Τηλεπικοινωνιών"*, 2^η Έκδοση, εκδόσεις Εθνικού & Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα, 2002
- **Athanassios Papoulis**, *"Πιθανότητες, Τυχαίες Μεταβλητές και Στοχαστικές Διαδικασίες"*, εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2007

Διδακτέα Ύλη: Οι αριθμοί παραπέμπουν στα «Συστήματα Επικοινωνίας» Haykin & Moher (5^η έκδοση)

1.1-2.8: Εισαγωγή στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και στα σήματα, Μετασχηματισμός Fourier & ιδιότητες, Γραμμικά συστήματα, Φίλτρα

2.9-2.11 : Βαθυπερατά/ζωνοπερατά σήματα (*Low-Pass Band-Pass Signals*), Ζωνοπερατά συστήματα (*Band-Pass Filters*)

3.1-3.3: Διαμόρφωση πλάτους (*Amplitude Modulation, AM*), Διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης με καταπιεσμένο φέρον (*Double Sideband-Suppressed Carrier Modulation, DSB-SC*)

3.4-3.8: Πολυπλεξία ορθογωνικών φερόντων (*Quadrature-Carrier / Quadrature-Amplitude Multiplexing, QCM/QAM*), Διαμόρφωσης απλής και υπολειπόμενης πλευρικής ζώνης (*Single-Sideband / Vestigial Sideband, SSB/VSB*) Μετατόπιση συχνότητας (*Frequency Translation*), Πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (*Frequency-Division Multiplexing, FDM*)

5.1-5.3: Εισαγωγή, Πιθανότητες, Τυχαίες μεταβλητές (*Random Variables*)

5.4-5.6: Στατιστικοί μέσοι όροι, Στοχαστικές ανελίξεις (*Random Processes*), Μέση τιμή, συναρτήσεις συσχέτισης (*Correlation*) και συνδιασποράς (*Covariance*)

5.7-5.9: Μετάδοση στοχαστικής ανελίξης μέσω γραμμικού φίλτρου, Πυκνότητα φάσματος ισχύος (*Power Spectral Density*), Στοχαστική ανελίξη Gauss (*Gaussian Process*)

5.10-5.11: Θόρυβος (*Noise*) και Θόρυβος στενής ζώνης (*Narrowband Noise*)

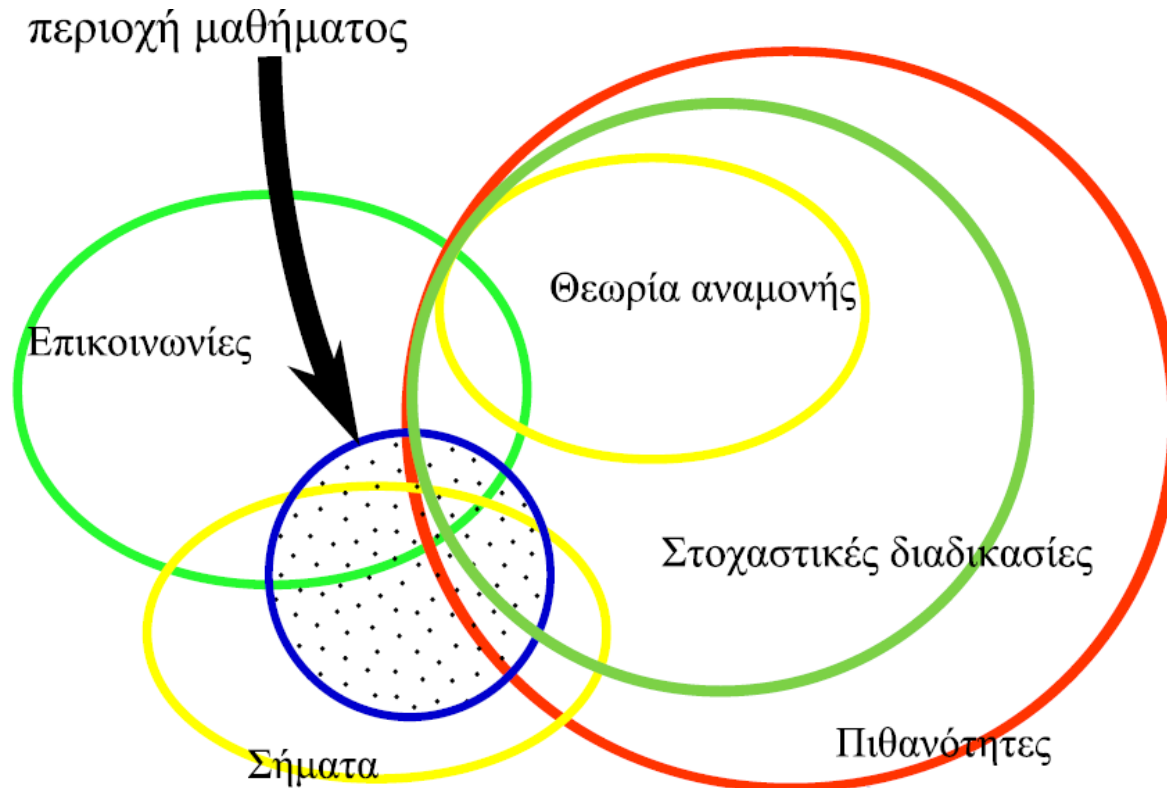
4.1-4.2: Διαμόρφωση γωνίας (*Angle Modulation*): Εισαγωγή & Βασικοί ορισμοί, Διαμόρφωση κατά συχνότητα (*Frequency Modulation, FM*), Διαμόρφωση κατά φάση (*Phase Modulation, PM*)

4.3-A: Διαμόρφωση συχνότητας στενής & ευρείας ζώνης (*Narrow-Band & Wide-Band FM*), εύρος ζώνης συχνοτήτων μετάδοσης σημάτων FM (*Transmission Bandwidth of FM Signals*)

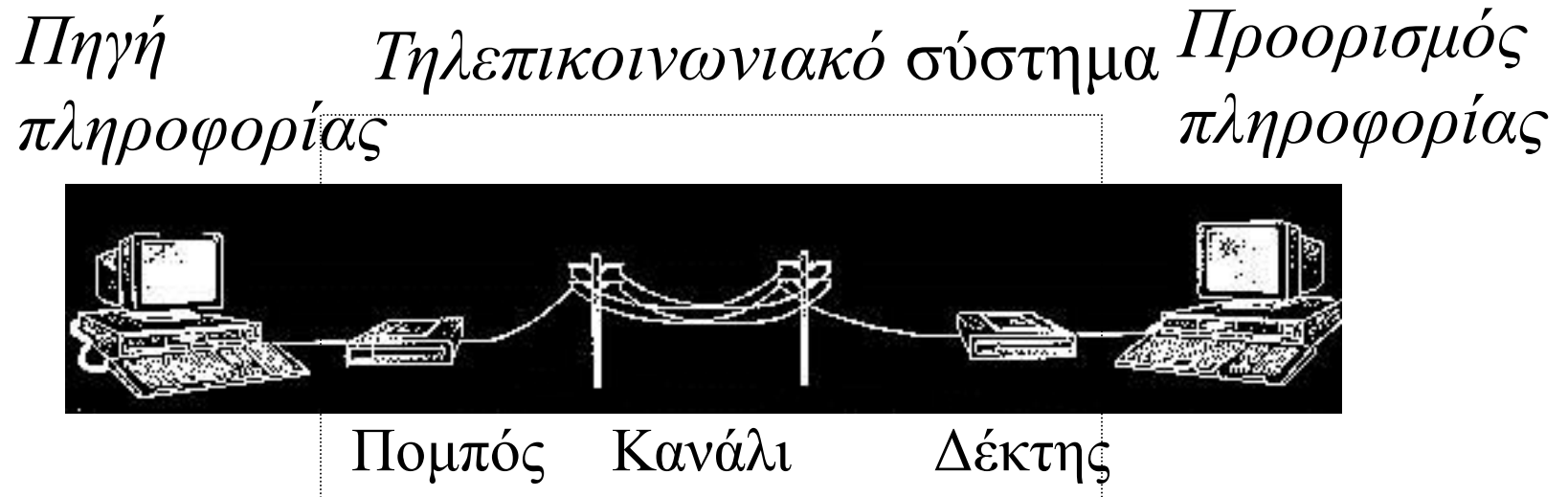
4.3-B: Δημιουργία και αποδιαμόρφωση σημάτων FM, Στερεοφωνική πολυπλεξία FM

4.4-4.7: Βρόχος κλειδωμένης φάσης (*Phase-Locked Loop, PLL*), Μη γραμμικά φαινόμενα στα συστήματα FM, Υπερετερόδυνος δέκτης (*Superheterodyne Receiver*), Θεματικό παράδειγμα

Σχετικές Περιοχές



Το μοντέλο του τηλεπικοινωνιακού συστήματος



Πομπός/δέκτης: Διαμόρφωση/αποδιαμόρφωση

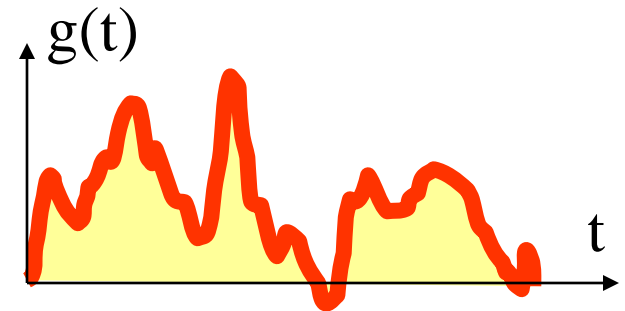
Κανάλι: Εύρος ζώνης, θόρυβος

Αναλογικά-Ψηφιακά Σήματα

Αναλογικό σήμα:

Συνεχής συνάρτηση του χρόνου

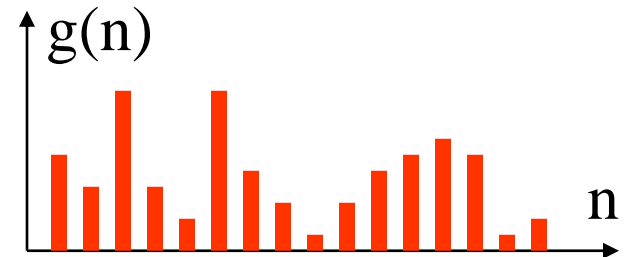
$g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$



Σήμα διακριτού χρόνου (δειγματοληψία):

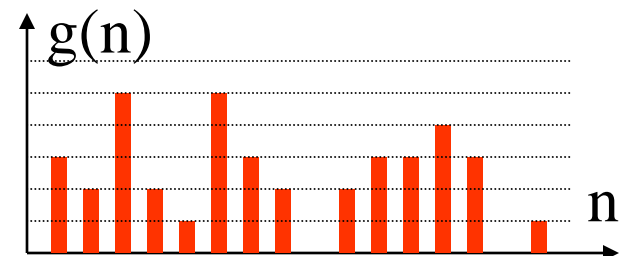
Ορίζεται σε διακεκριμένες στιγμές

$g: I \rightarrow \mathbb{R}$ (I αριθμήσιμο σύνολο)

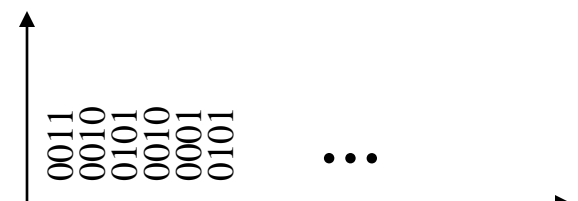


Σήμα διακριτού χρόνου με διακριτές στάθμες (κβαντιζμένο):

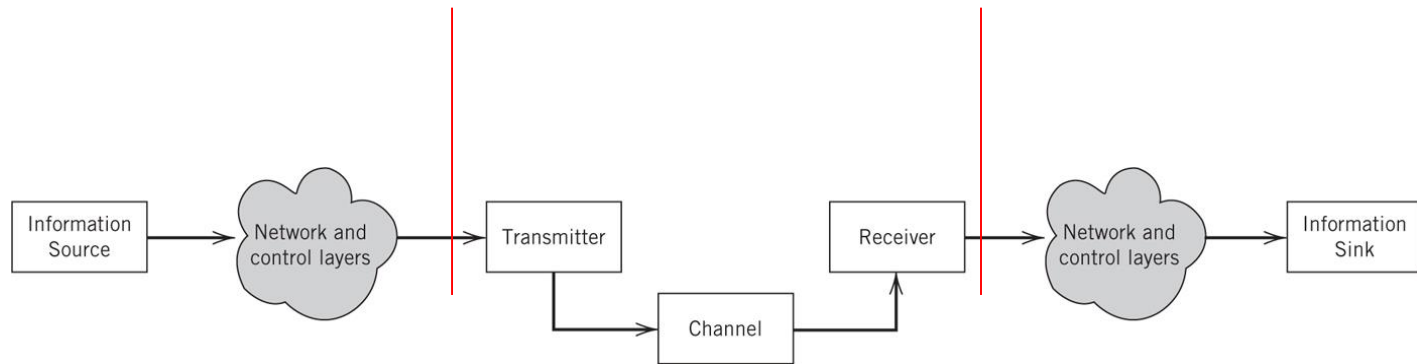
$g: I \rightarrow K$ (I, K αριθμήσιμα σύνολα).



Ψηφιακό σήμα: Σήμα διακριτού χρόνου με διακριτές στάθμες και κατόπιν κωδικοποιημένο.



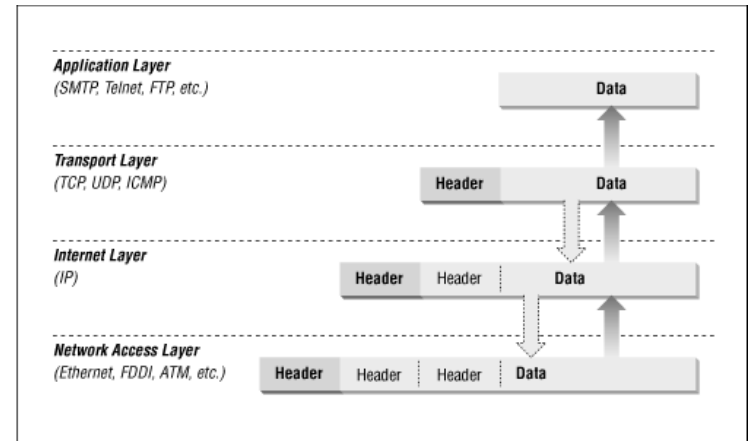
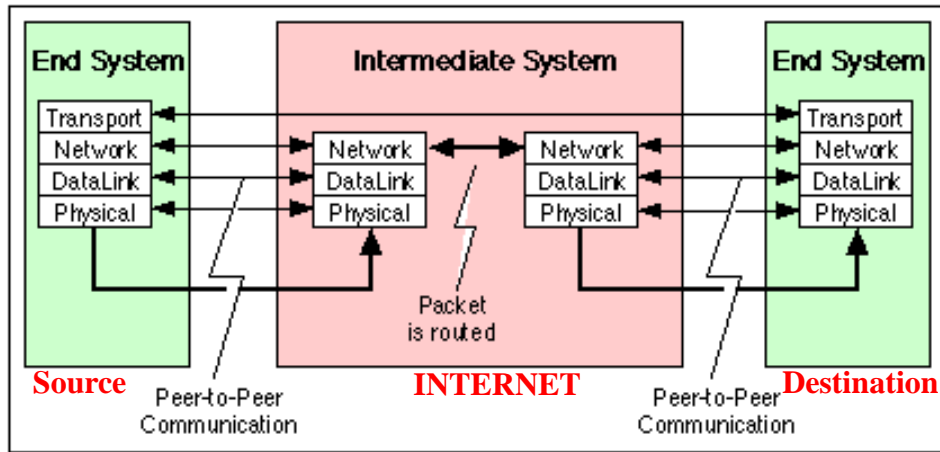
Δομή Επικοινωνιακών Συστημάτων



Φυσικό Επίπεδο - PHY

- **Πηγή (Source) – Αποδέκτης (Sink) Πληροφορίας:** Αναλογική ή ψηφιακή φωνή, video, data
- **Πομπός (Transmitter) – Δέκτης (Receiver):** Διαμόρφωση/αποδιαμόρφωση πληροφορίας σε σήμα κατάλληλο για μετάδοση
- **Δίαυλος (Channel):** Καλώδιο, οπτική ίνα, ελεύθερος χώρος (ραδιοκύματα, υπέρυθρη ακτινοβολία)
- **Επίπεδα Δικτύου & Ελέγχου:** Εξασφαλίζουν αξιόπιστη και αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου, πρωτόκολλα ελέγχου ή σηματοδότησης (control plane - signaling protocols) και διαχείρισης δικτύων (network management) υπολογιστών - Internet και κινητής τηλεφωνίας

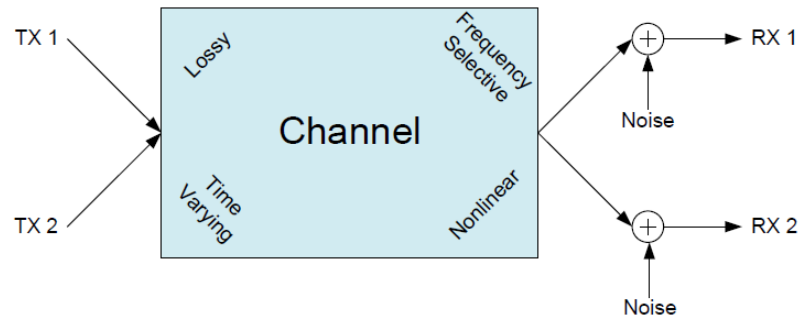
Πολυστρωματική Οργάνωση Λειτουργιών (Υπηρεσιών) Επικοινωνιών



Σε ένα δίκτυο υπολογιστών αρχιτεκτονικής **Internet**:

- Τα δύο άκρα (source - destination) υλοποιούν εφαρμογές (applications) με συνεργατικό τρόπο (π.χ. *Simple Message Transfer Protocol* - *SMTP* για e-mail) μέσω ανταλλαγής κωδικοποιημένων ψηφιακών μηνυμάτων, κατατεταγμένων σε πακέτα που προωθούνται αυτόνομα στο Internet
- Για την διάφανη και αξιόπιστη υλοποίηση της επικοινωνίας, τα δύο άκρα υλοποιούν διαδικασίες πρωτοκόλλων peer-to-peer σε πολλαπλά στρώματα (layers) που καθιστούν συμβατά τις επιμέρους εφαρμογές, ανεξάρτητα από λειτουργικά συστήματα, κατασκευαστή και λεπτομέρειες υλοποίησης (π.χ. *Transport Layer*; *TCP/UDP/ICMP*)
- Η υλοποίηση γίνεται με την διαδοχική ενθυλάκωση των μηνυμάτων σε φακέλους (onion skin model) με επικεφαλίδες που επιτρέπουν την συμβατή προώθηση στα δίκτυα επικοινωνιών, χωρίς γνώση του περιεχομένου τους (π.χ. *Internet Layer*, αλγόριθμος δρομολόγησης - routing με βάση τις διευθύνσεις *IP* των δυο άκρων)
- Στα χαμηλότερα στρώματα γίνεται η αξιόπιστη και αποδοτική πρόσβαση στο φυσικό μέσο (**PHY**) των ενδιαμέσων δικτύων, συμπεριλαμβανόμενης της διαμόρφωσης του ψηφιακού μηνύματος σε σήματα (ηλεκτρικά, οπτικά, ηλεκτρομαγνητικά) ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του μέσου (π.χ. *Network Access Layer* = *Data Link & Physical Layers*: Αλγόριθμοι πρόσβασης Ethernet, διαμόρφωση - modulation, πολυπλεξία - multiplexing που είναι τα **κύρια αντικείμενα του μαθήματος**)
- Από τα επίπεδα πρωτοκόλλων τα τρία πρώτα (*Physical*, *Data Link* & *Network*) αφορούν στις ενδιάμεσες δικτυακές υποδομές (switches, routers) που μπορεί να τροποποιούν τις επικεφαλίδες ανάλογα με τις προδιαγραφές των δικτύων. Οι επικεφαλίδες *Transport* (*TCP/UDP/ICMP*) και το αρχικό περιεχόμενο των μηνυμάτων αφορούν μόνο τις τελικές εφαρμογές και διαπερνούν διαφανώς τις ενδιάμεσες δικτυακές διασυνδέσεις

Θεματικό Παράδειγμα: Ασύρματες Επικοινωνίες – Ιδιότητες Διαύλου

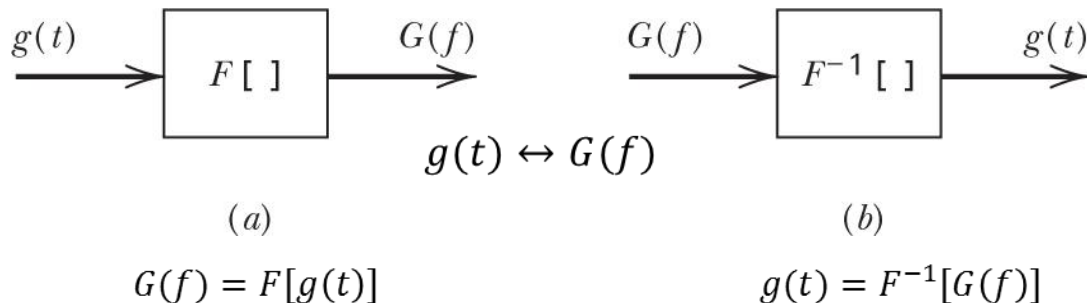


Ιδιότητες Διαύλου

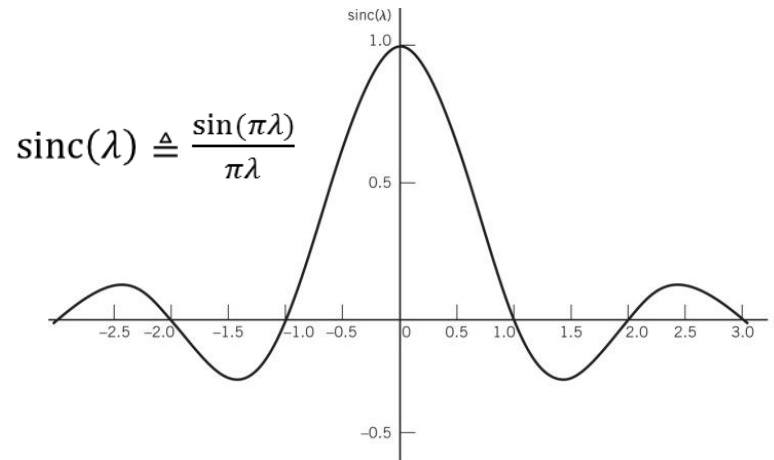
- Απώλειες διάδοσης (Propagation Loss): Σε RF ανάλογη με τετράγωνο απόστασης (γραμμική απώλεια σε οπτικές ίνες)
- Επιλεκτικότητα συχνοτήτων (Frequency Selectivity): Μεταβαλλόμενη απόδοση ανάλογα με ζώνη συχνοτήτων
- Χρονική μεταβολή (Time-Variation): Ευαισθησία σε αλλαγές περιβάλλοντος, π.χ. καιρικές συνθήκες (εξασθένηση - fading)
- Μη γραμμικότητα (Nonlinearity): Δύσκολα αναστρέψιμη παραμόρφωση, π.χ. λόγω ενισχυτών πέρα από τα όρια γραμμικής ενίσχυσης
- Κοινή χρήση (Shared Use): Παρεμβολές (interference) στο χρόνο ή τη συχνότητα σε πολυπλεγμένες μεταδόσεις
- Θόρυβος (Noise): Λόγω θερμικού θορύβου στον δέκτη και τυχαίων παρεμβολών στο μέσο

Μετασχηματισμός Fourier (FT)

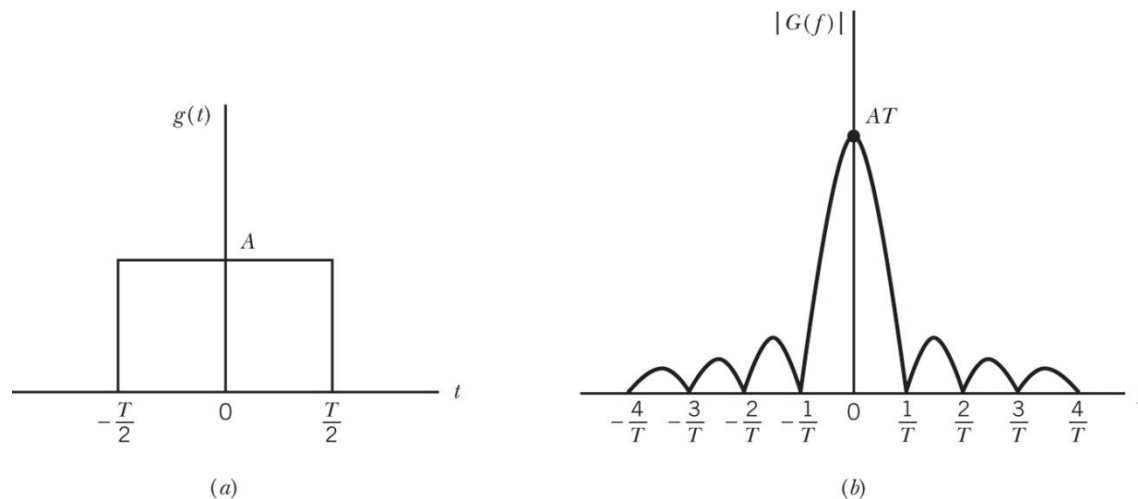
- $G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(-j2\pi ft) dt$ όπου f : συχνότητα σε *Hertz* (Hz, sec⁻¹), $\omega = 2\pi f$ σε *ακτίνια/sec* (rad/sec)
- $g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \exp(j2\pi ft) df$
- Ο Μετασχηματισμός Fourier ή το **φάσμα** $G(f) = |G(f)| \exp[j\theta(f)]$ είναι γενικά μιγαδικός αριθμός με **πλάτος** $|G(f)|$ και **φάση** $\theta(f)$
- Αν η $g(t)$ παίρνει **πραγματικές** τιμές $\Rightarrow G(-f) = G^*(f)$ **συζυγείς μιγαδικές συναρτήσεις** και το πλάτος $|G(f)|$ είναι άρτια συνάρτηση ενώ η φάση $\theta(f)$ περιττή συνάρτηση $|G(-f)| = |G(f)|$, $\theta(-f) = -\theta(f)$
- $g(0) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) df$, $G(0) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) dt$



Μετασχηματισμός Fourier (FT) – Ορθογώνιος παλμός



$$g(t) = A \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \leftrightarrow G(f) = 2 \int_0^{T/2} A \cos(2\pi ft) dt = AT \left(\frac{\sin(\pi fT)}{\pi fT} \right) = AT \text{sinc}(fT)$$

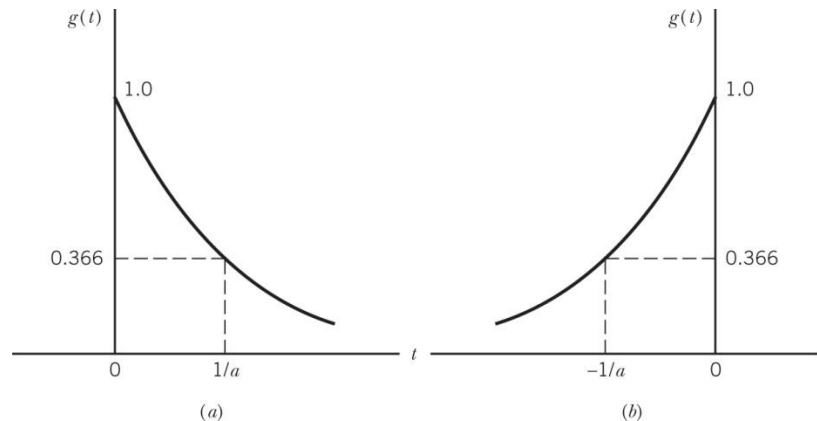
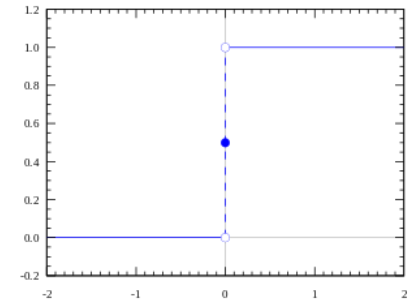


Μικρή διάρκεια $(-T/2, T/2) \rightarrow$ Μεγάλο εύρος συχνότητας $(-1/T, 1/T)$

Μετασχηματισμός Fourier – Εκθετικός παλμός

Μοναδιαία Βηματική Συνάρτηση (*Unit Step Function, Heaviside Function*)

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{1}{2}, & t = 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$



Εκθετικός Παλμός

Αποσβεννόμενος: $g(t) = \exp(-at) u(t) \leftrightarrow G(f) = \int_0^{\infty} \exp[-t(a + j2\pi f)] dt = \frac{1}{a + j2\pi f} = \frac{a - j2\pi f}{a^2 + (2\pi f)^2}$

Ανερχόμενος: $g(t) = \exp(at) u(-t) \leftrightarrow G(f) = \int_{-\infty}^0 \exp[t(a - j2\pi f)] dt = \frac{1}{a - j2\pi f}$