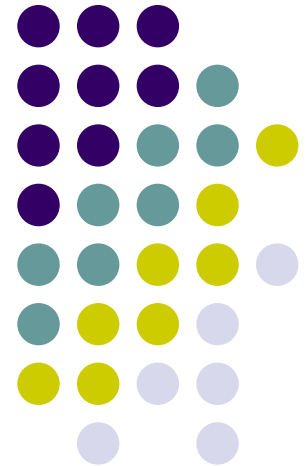
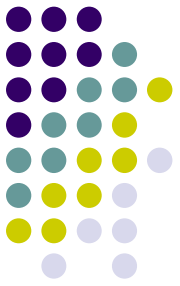


Εισαγωγή

Διαμόρφωση, φώραση και εκτίμηση
σημάτων



Σκοπός του μαθήματος



- Η βασική κατανόηση των:
 - **Σημάτων** που εμφανίζονται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα
 - **Παραμορφώσεων** που προκαλούνται από τους τηλεπικοινωνιακούς διαύλους
 - **Τεχνικών** επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες ώστε να επιτευχθεί η μεταφορά πληροφορίας
 - Αρχών της **ψηφιακής μετάδοσης**

Διαμόρφωση, φώραση και εκτίμηση σημάτων



- Τα κύρια θέματα που περιλαμβάνει το μάθημα
 - Γραμμική αναλογική διαμόρφωση και φώραση
 - Εκθετική αναλογική διαμόρφωση και φώραση
 - Θόρυβος στην αναλογική διαμόρφωση
 - Δειγματοληψία, σήματα στο διακριτό πεδίο
 - Παλμοαναλογική διαμόρφωση
 - Παλμοκωδική διαμόρφωση (PCM)
 - Χωρητικότητα διαύλου, κωδικοποίηση

Είναι οι αναλογικές διαμορφώσεις παλιές γνώσεις;



- Στην πραγματικότητα όχι
 - Σήμερα χρησιμοποιούμε AM και FM (PM) για τη μεταφορά ψηφιακών σημάτων
 - Το AM είναι η βάση για όλες τις ψηφιακές οπτικές μεταδόσεις
 - Το FDM είναι η βάση για την οπτική δικτύωση “DWDM”
 - FM (PM) είναι η βάση για πολλά άλλα τηλεπικοινωνιακά συστήματα
- Και θυμηθείτεΌλα στην πραγματικότητα είναι ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ

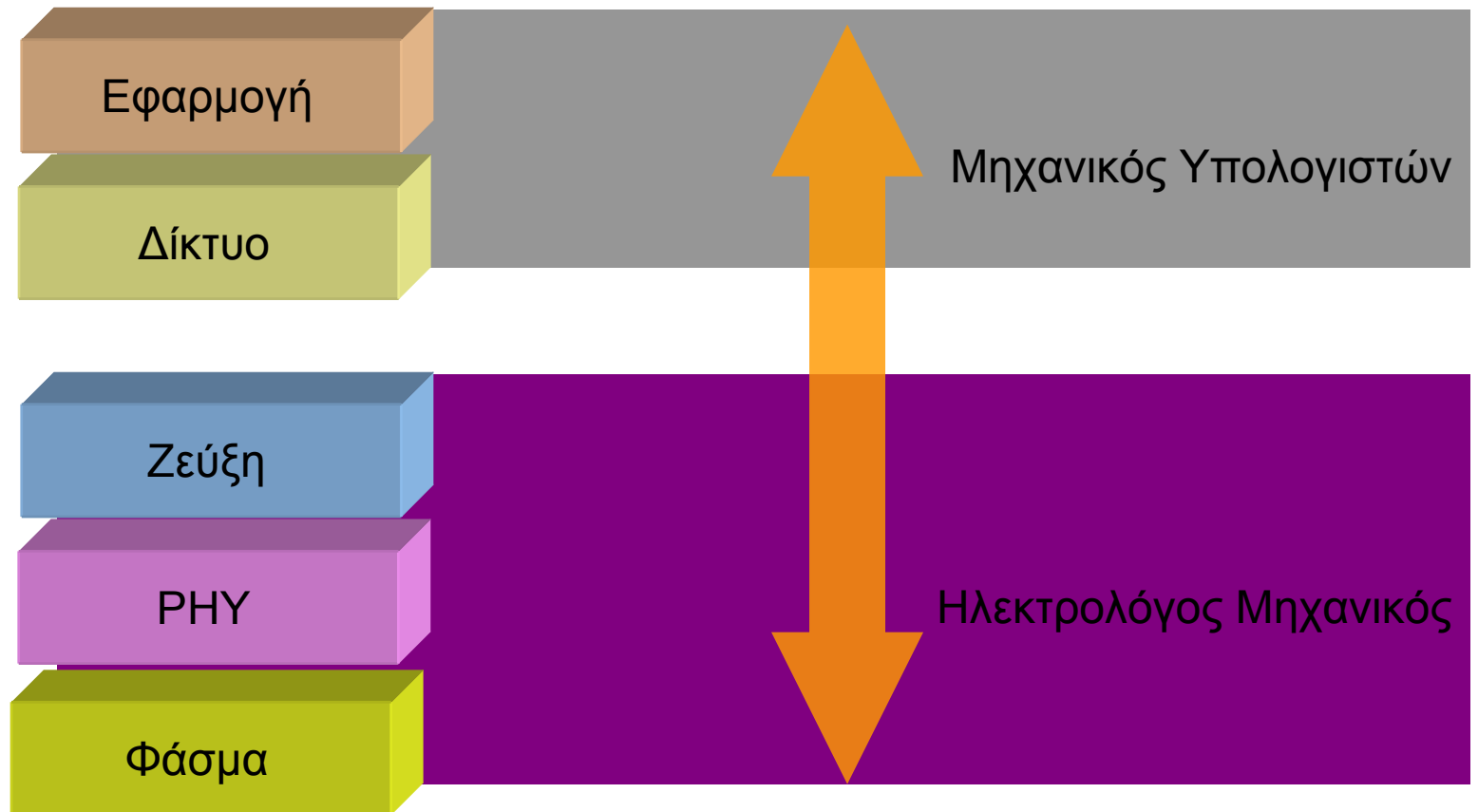
Αναλογικό & Γραμμικό = Υψηλή επίδοση



Γιατί στη ροή Δ

- Σχεδόν κάθε υπολογιστής και κάθε ηλεκτρονικό σύστημα σήμερα περιλαμβάνει τεχνολογία τηλεπικοινωνιών
- Το αυτοκίνητό σας αντί κλειδιού έχει ασύρματο τηλεκοντρόλ
- Το πληκτρολόγιο (ποντίκι) του υπολογιστή σας είναι μάλλον ασύρματο
- Ο εκτυπωτής σας έχει θύρα υπέρυθρων (InfraRed)
- Ο σκληρός σας δίσκος χρησιμοποιεί κωδικοποίηση και ισοστάθμιση
- Οι φωτογραφίες, οι ταινίες και τα τραγούδια είναι πλέον ψηφιακά
- Μπορείτε να δείτε τηλεόραση ή να ακούσετε ραδιόφωνο στον υπολογιστή σας
- Διαθέτετε τοπικό δίκτυο στο σπίτι σας (ίσως πάνω από τις γραμμές ισχύος)
- Σύντομα το ψυγείο σας θα έχει διεύθυνση IP!
- ...

Γιατί στη ροή Δ





Το μήνυμα είναι

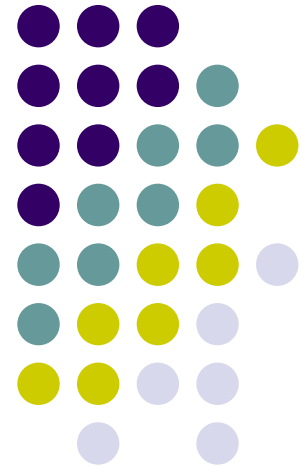
- Ηλεκτρολόγοι μηχανικοί, ηλεκτρονικοί μηχανικοί, μηχανικοί υπολογιστών, όχι μόνο τηλεπικοινωνιακοί μηχανικοί
 - Χρειάζονται βασικές γνώσεις Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων
- Αυτός είναι ο καλύτερος λόγος για να το παρακολουθήσετε

Διαμόρφωση, φώραση και εκτίμηση σημάτων

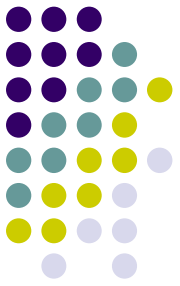


- Οργάνωση του μαθήματος
 - Σειρά διαλέξεων και ασκήσεων
 - 8 ασκήσεις MATLAB + τέστ στο ΕΠΥ (Πέμπτες μετά την 31/3)
- Βαθμολογία
 - Γραπτό διαγώνισμα 65%
 - Εργαστήριο MATLAB 35%
 - με την προϋπόθεση ότι ο βαθμός του γραπτού είναι προβιβάσιμος
- Βιβλία
 - *Communications Systems*, Carlson, εκ. Επίκεντρο
 - *Συστήματα Επικοινωνίας*, Simon Haykin, εκ. Παπασωτηρίου
 - *Συστήματα Τηλεπικοινωνιών*, Προάκης & Salehi, 2η έκδοση, ΕΚΠΑ
- Ιστοσελίδα μαθήματος courses.cn.ntua.gr

Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα



Τι είναι τηλεπικοινωνιακό σύστημα



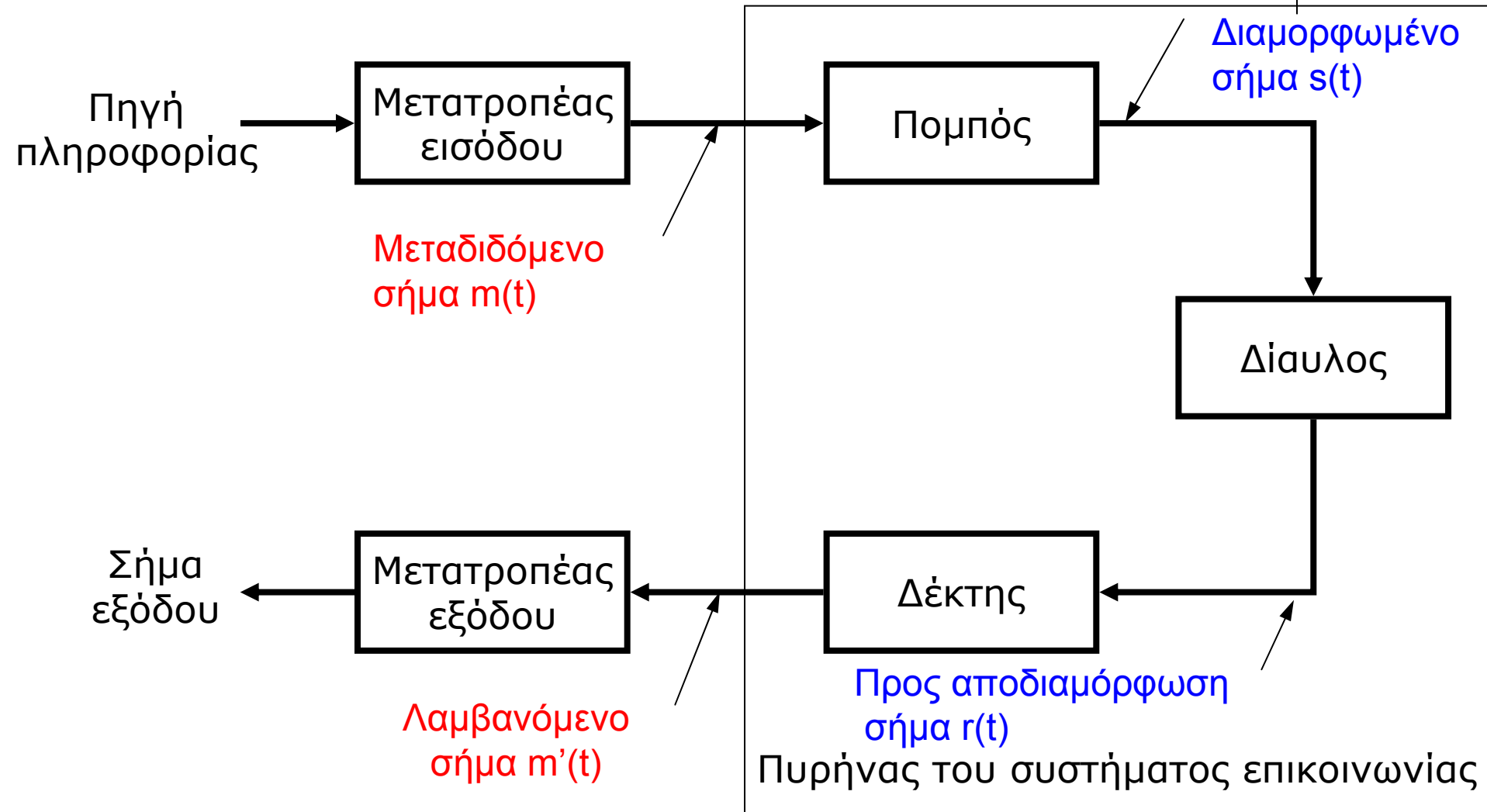
- Οποιοσδήποτε τρόπος για μεταφορά πληροφορίας
 - Πρέπει να είναι αποδοτικός, αξιόπιστος και ασφαλής
 - Παραδείγματα: τηλέφωνο, TV, σκληρός δίσκος
- Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα μεταφέρουν πληροφορία
 - από σημείο σε σημείο (unicast) ή
 - από σημείο σε πολλά σημεία (εκπομπή, broadcast)



Σύντομο ιστορικό

- 1837: τηλέγραφος, κώδικας Morse
- 1864: ηλεκτρομαγνητική θεωρία, εξισώσεις Maxwell
- 1875: τηλέφωνο (Bell)
- 1900: Ηλεκτρονικά και αναλογικές επικοινωνίες
 - 1918: υπερ-ετερόδυνος δέκτης (Armstrong)
 - 1928: TV (Farnsworth)
- 1930: Ψηφιακές επικοινωνίες
 - 1928: θεώρημα δειγματοληψίας, Nyquist
 - 1937: Σύστημα PCM (Reeves)
 - 1948: Χωρητικότητα διαύλου (Shannon)
- 1955: δορυφορικές επικοινωνίες (Pierce)
- 1966: επικοινωνίες οπτικών ινών
- 1975: δίκτυα υπολογιστών και μεταγωγή πακέτου

Σύστημα Επικοινωνίας

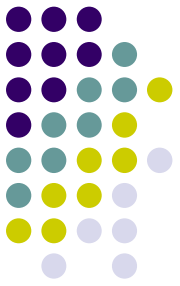




Πηγή (Source)

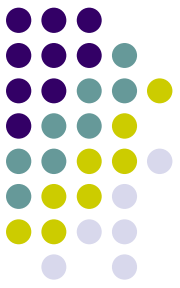
- Παράγει την προς μετάδοση πληροφορία
- Είδος πληροφορίας
 - Συνεχής, π.χ. φωνή, βίντεο
 - Διακριτή, π.χ. κείμενο, δεδομένα
- Η έξοδος της πηγής δεν είναι νομοτελειακή
 - Η πληροφορία δεν είναι γνωστή εκ των πρότερων!
 - Αλλιώς, δεν θα χρειαζόταν το τηλεπικοινωνιακό σύστημα για τη μετάδοσή της

Μετατροπέας (transducer)

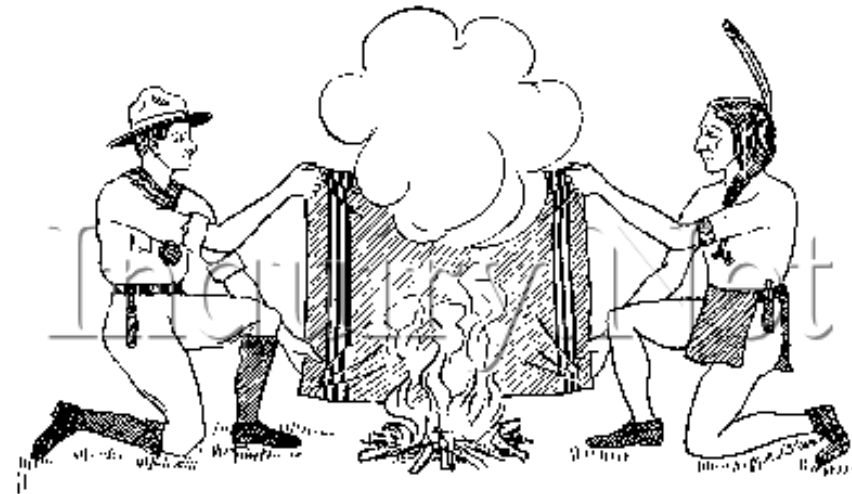


- Μετατρέπει την έξοδο της πηγής σε σήμα (συνήθως ηλεκτρικό) προς μετάδοση και αντιστρόφως το λαμβανόμενο σήμα σε έξοδο
 - Μικρόφωνο
 - Κάμερα
 - Ηχείο
 - Οθόνη

Είδη σημάτων

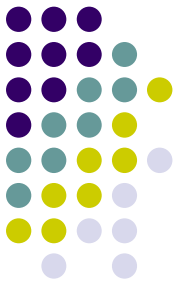


- Ντετερμινιστικά - Τυχαία
- Σήματα ενέργειας (παλμοί)
- Σήματα ισχύος (περιοδικά)
- Συνεχούς - διακριτού χρόνου
- Αναλογικά – Ψηφιακά
- Πραγματικά - Μιγαδικά



SMOKE SIGNALS

Αναλογικό ή Ψηφιακό σήμα



- Αναλογικά Σήματα
 - Συνεχώς μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα (τάση, ρεύμα)
- Ψηφιακά Σήματα
 - Χρονική αλληλουχία παλμών
- Συχνά τα αναλογικά σήματα ψηφιοποιούνται:
 - Ανίχνευση (και διόρθωση) λαθών
 - Πολυπλεξία

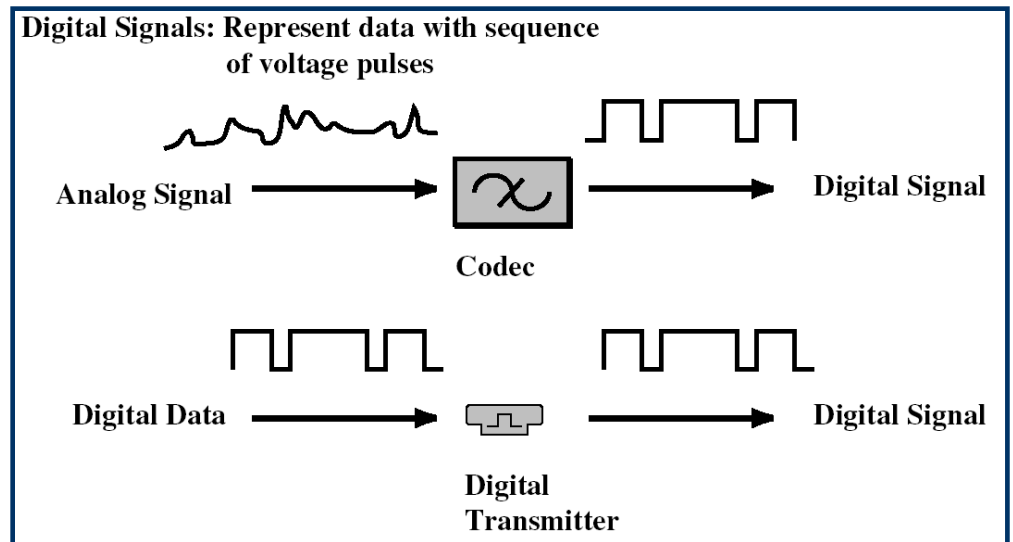
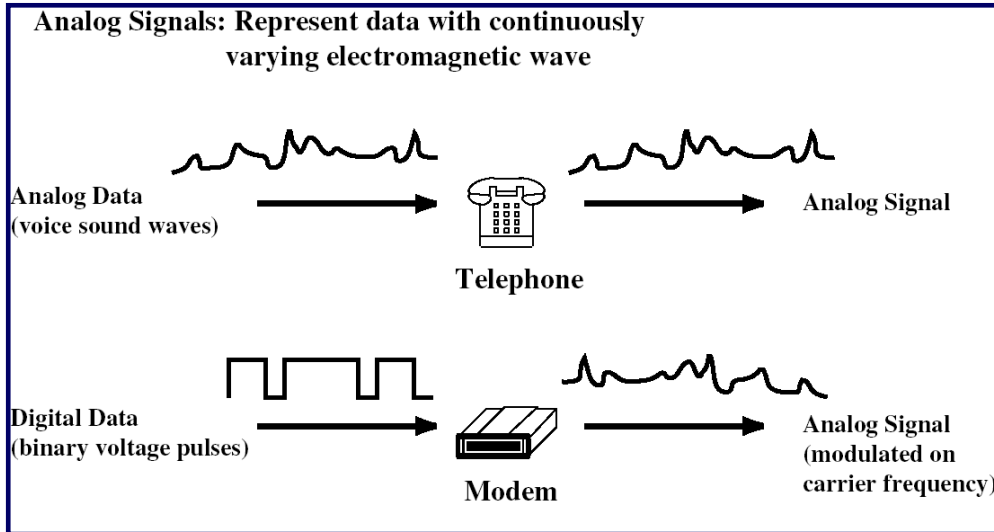
Αναλογικό ή Ψηφιακό σήμα



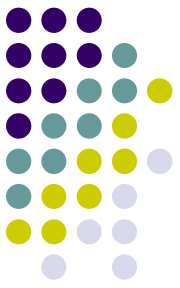
- Αναλογικό
 - Συνεχής μεταβολή
 - Περιλαμβάνει το σύνολο των συχνοτήτων
 - Μεταδίδεται όλη η πληροφορία
- Ψηφιακό
 - Λαμβάνονται δείγματα
 - Μη συνεχής ροή παλμών on/off
 - Μετατρέπονται σε 1 και 0



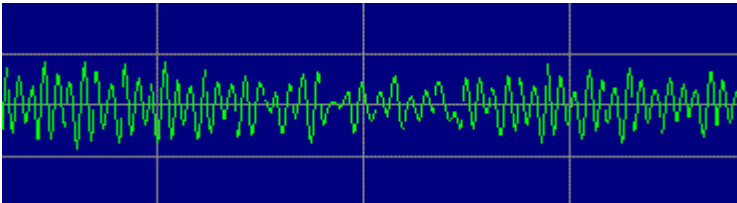
Αναλογικό ή Ψηφιακό σήμα



Αναλογικά σήματα

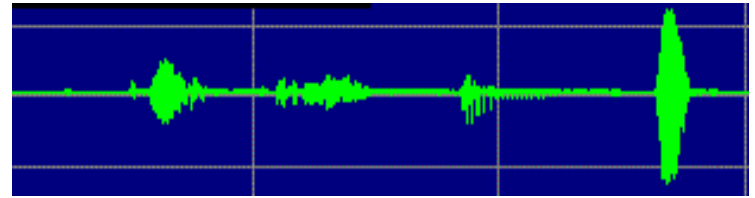


- Τόνοι



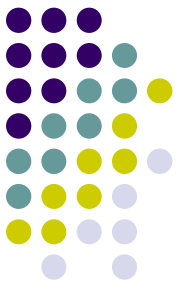
- Πολλές συχνότητες σε υπέρθεση
- Δε φαίνεται στο πεδίο του χρόνου
- Ξεκάθαρο στο πεδίο των συχνοτήτων

- Φωνή



- Ριπές
- Μεταβαλλόμενο πλάτος
- Συχνότητα και φάση αλλάζει





Πομπός (transmitter)

- Μετατρέπει το (ηλεκτρικό) σήμα σε μορφή κατάλληλη για μετάδοση μέσω του διαύλου (φυσικό μέσο)
- Είναι **αναγκαίος** διότι η έξοδος του μετατροπέα στις περισσότερες περιπτώσεις δε μπορεί να μεταδοθεί ως έχει
- Η μετατροπή γίνεται μέσω της διαμόρφωσης:
 - πλάτους (AM – Amplitude Modulation)
 - συχνότητας (FM – Frequency Modulation)
 - φάσης (PM – Phase Modulation)
 - παράδειγμα: Ραδιοφωνία AM, FM
- Άλλες λειτουργίες: φιλτράρισμα, ενίσχυση, εκπομπή



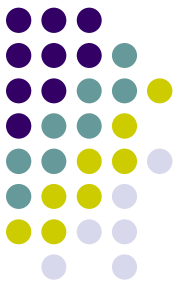
Δίαυλος (Channel)

- Τι είναι ο δίαυλος;
 - Το φυσικό μέσο ανάμεσα στον πομπό και δέκτη
 - Μπορεί να είναι ενσύρματος (τηλεφωνική γραμμή) ή ασύρματος (ραδιοφωνία)
- Ο δίαυλος είναι το σημαντικότερο μέρος του προβλήματος
 - Γιατί;

Δίαυλος



- Οποιοδήποτε και εάν είναι το μέσο, το σήμα υποβαθμίζεται λόγω
 - Αποσβέσεων
 - Παραμορφώσεων
 - Θορύβου
 - Παρεμβολών
- Η απόσβεση μπορεί να είναι σημαντική (100-200 dB)



Υποβαθμίσεις (Impairments)

- Οι υποβαθμίσεις μπορεί να είναι προσθετικές ή μη
- Προσθετικές υποβαθμίσεις:
 - θερμικός θόρυβος
 - ατμοσφαιρικός θόρυβος (ηλεκτρικές εκκενώσεις)
 - man-made noise (σπινθήρες ανάφλεξης βενζινοκινητήρων)
 - παρεμβολές από άλλους χρήστες
- Μη προσθετικές υποβαθμίσεις:
 - διαλείψεις (πολλαπλές διαδρομές), κλπ



Υποβαθμίσεις

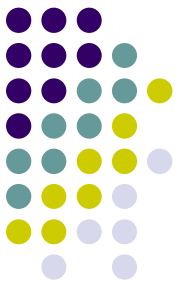
- Οι διάφορες υποβαθμίσεις χαρακτηρίζονται ως τυχαία φαινόμενα και περιγράφονται με στατιστικό τρόπο
 - Η στατιστική περιγραφή συχνά είναι εμπειρικό αποτέλεσμα
 - Φυσική δικαιολόγηση από μετρήσεις
- Πρέπει να ληφθούν υπόψη στη σχεδίαση του συστήματος
 - Προσαρμοστικά συστήματα



Δέκτης (Receiver)

- Η κύρια λειτουργία είναι η **ανάκτηση** του μηνύματος από το λαμβανόμενο σήμα (αποδιαμόρφωση) σε μορφή κατάλληλη για τον μετατροπέα εξόδου
 - Εξουδετερώνει την επίδραση του διαύλου
- Άλλες λειτουργίες: φιλτράρισμα, καταστολή του θορύβου και των παρεμβολών
- **Αποδιαμόρφωση**: το αντίστροφο της διαμόρφωσης
 - Λειτουργία παρουσία θορύβου και παρεμβολών
 - Κάποιες **παραμορφώσεις** είναι αναπόφευκτες

Δέκτης

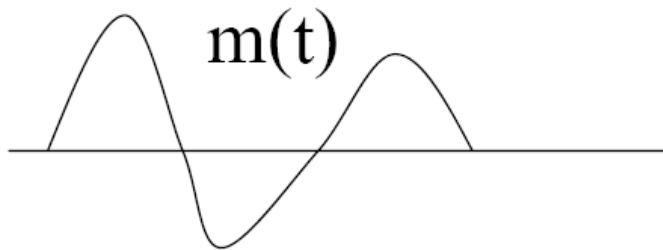


- Είναι $m(t) = m'(t)$;
- Η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος είναι συνάρτηση του τύπου διαμόρφωσης, έντασης θορύβου και των άλλων παραμορφώσεων
 - Το αναλογικό σήμα $m(t)$ μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή
 - Το ανακτώμενο σήμα $m'(t)$ στο δέκτη σχεδόν πάντα είναι μια παραμορφωμένη εκδοχή του $m(t)$

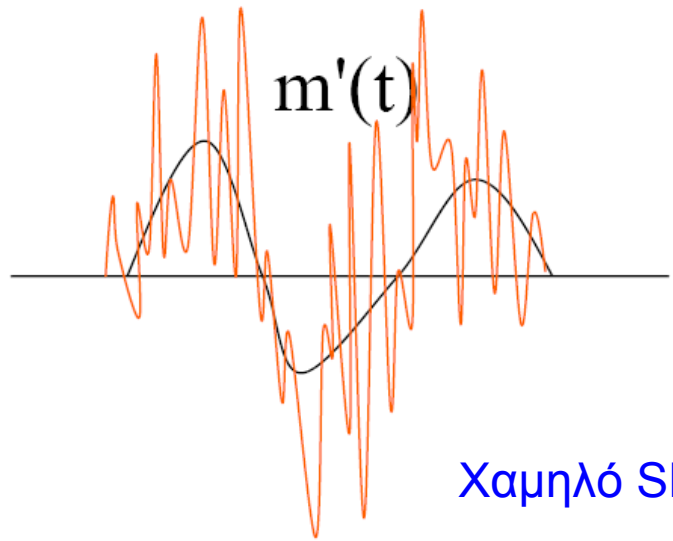
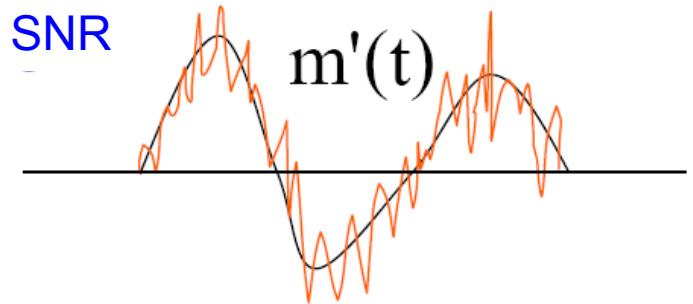


Μέτρο ποιότητας

- Λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR)



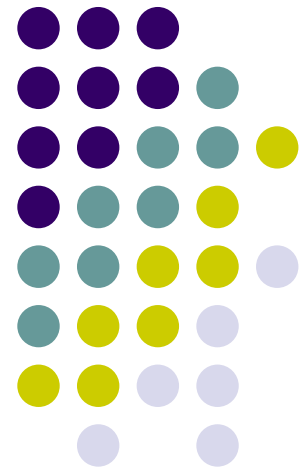
Υψηλό SNR



$$\text{SNR} = \frac{\text{Μέση ισχύς σήματος}}{\text{Μέση ισχύς θορύβου}}$$

Χαμηλό SNR

Διαμόρφωση





Τι είναι διαμόρφωση;

- Η βασική ιδέα είναι η συστηματική μεταβολή μιας παραμέτρου ενός σήματος φέροντος (υψηλής συχνότητας) σε σχέση με κάποιο σήμα πληροφορίας
- Στην αναλογική διαμόρφωση μεταβάλλουμε το πλάτος (AM), συχνότητα (FM) ή φάση (PM) του φέροντος
- Στην ψηφιακή διαμόρφωση μεταβάλλουμε το πλάτος παλμών ή ενός φέροντος (ASK), τη φάση (PSK) ή το πλάτος και τη φάση (QAM)

Τι χρειάζεται η διαμόρφωση;

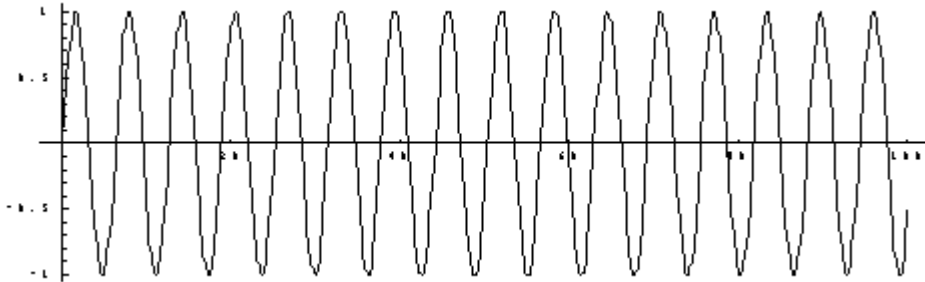


- Η μετάδοση γίνεται πιο αποδοτική σε άλλη συχνότητα
 - Για τη μετάδοση ήχου 100 Hz θα χρειάζονταν κεραία μήκους 300 km
 - Με διαμόρφωση στα 100 MHz το μέγεθος κεραίας περιορίζεται σε 1m
- Μπορεί να μοιρασθεί το φάσμα σε πολλούς
 - Κάθε ραδιοσταθμός έχει τη συχνότητά του και ξεχωρίζει από τους άλλους
- Πολυπλεξία
 - Πολλά σήματα μπορούν να μεταδοθούν στον ίδιο δίαυλο
 - FDM – Frequency Division Multiplexing
- Η υλοποίηση είναι πιο εύκολη (με τις διαθέσιμες ηλεκτρονικές μονάδες)



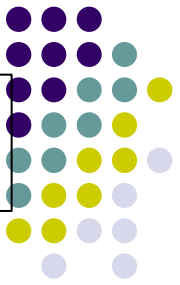
Αδιαμόρφωτο φέρον

- Ημιτονικό σήμα με παραμέτρους το πλάτος A_c , συχνότητα f_c και φάση φ :



- Όλες οι παράμετροι είναι σταθερές: άρα δεν μεταφέρεται πληροφορία
- Μαθηματικά όλες οι διαμορφώσεις μπορούν να αναπαρασταθούν ως

$$x(t) = A(t) \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)]$$



AM (Amplitude Modulation)
ASK (Amplitude Shift Keying)

$$x(t) = A(t) \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)]$$

Η συχνότητα του φέροντος

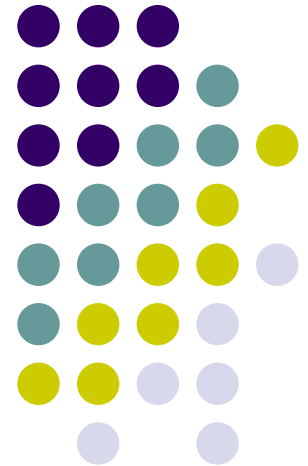
FM (Frequency Modulation)
PM (Phase Modulation)
PSK/FSK (Phase/Frequency Shift Keying)



Τι είναι αποδιαμόρφωση;

- Όταν ληφθεί το φέρον, η πληροφορία που το διαμόρφωσε αφαιρείται μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως
 - **φώρασης** (detection) ή
 - **αποδιαμόρφωσης** (demodulation)

Ψηφιακό Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα



Ψηφιακή μετάδοση πληροφορίας

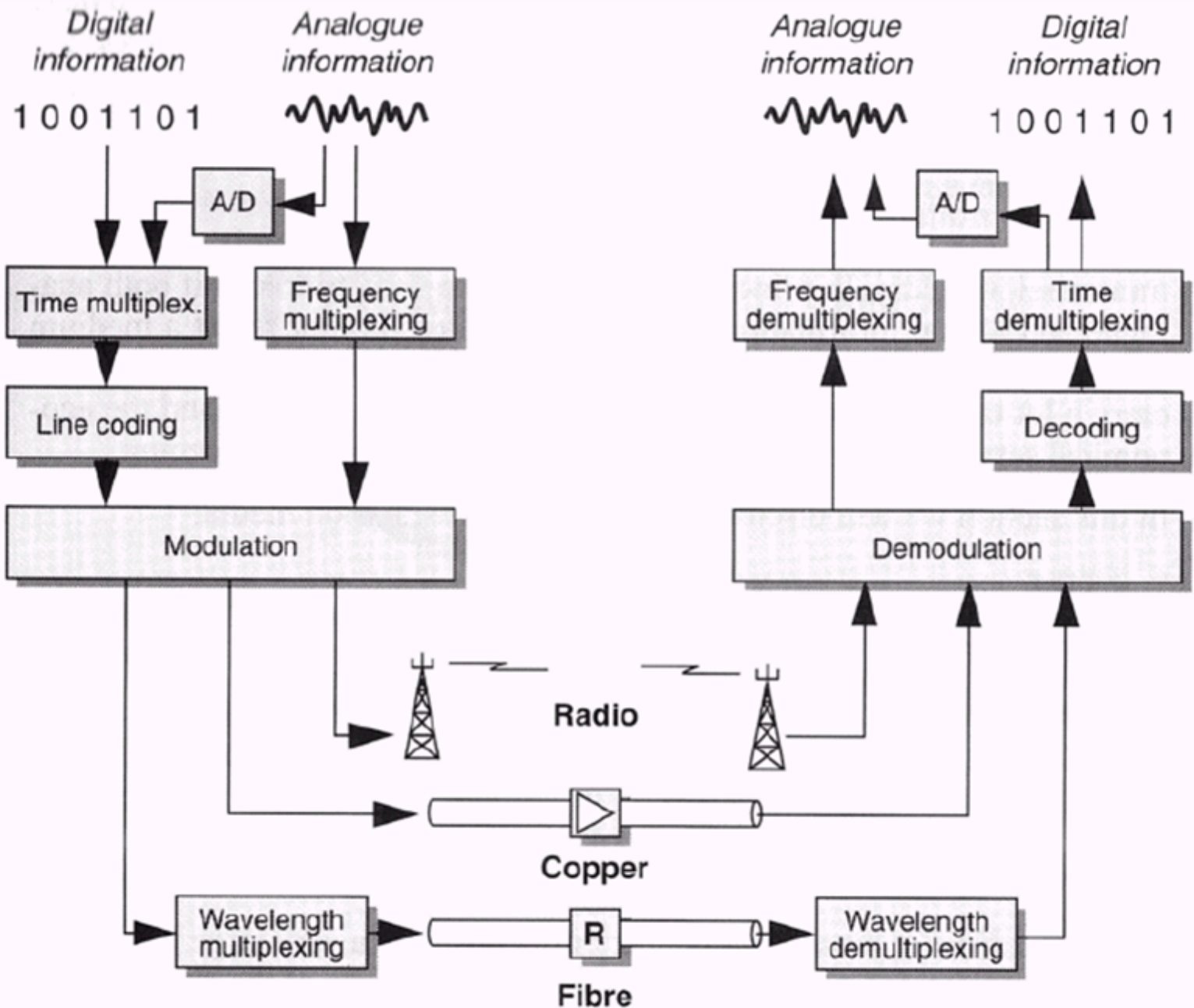
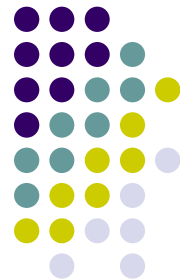


- Η παραδοσιακή θεώρηση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος περιλαμβάνει μια αναλογική πηγή
 - π.χ. φωνή
- Για να μεταδοθεί όμως με ψηφιακό τρόπο αυτή η αναλογική κυματομορφή, πρέπει να μετατραπεί σε ψηφιακό σήμα
 - Δειγματοληψία
 - Κβάντιση
 - Κωδικοποίηση

Ψηφιακή μετάδοση πληροφορίας



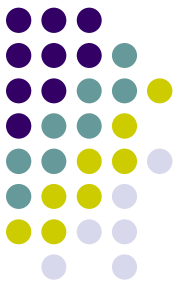
- Όμως, στα δίκτυα υπολογιστών, η πηγή πληροφορίας είναι ψηφιακή από τη φύση της
 - Η μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό δε θεωρείται μέρος του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, αλλά εφαρμογή των ανωτέρων στρωμάτων
- Εξασφάλιση της ορθότητας και ποιότητας της μετάδοσης μέσω
 - Διαμόρφωσης
 - Κωδικοποίησης
 - Πηγής
 - Διαύλου





Γιατί ψηφιακή μετάδοση (1);

- Μπορούμε να αφαιρέσουμε τον “θόρυβο” πιο εύκολα
 - Τα λάθη ανιχνεύονται ακόμη και εάν ο θόρυβος είναι μεγάλος
 - Τα λάθη μπορούν να διορθωθούν με χρήση κωδίκων (διόρθωσης λαθών)



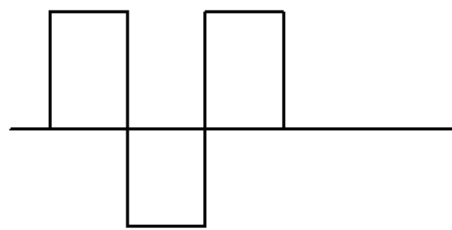
Γιατί ψηφιακή μετάδοση (2);

- Η πιστότητα του σήματος ελέγχεται πιο εύκολα στη ψηφιακή μετάδοση
 - Το ψηφιακό σήμα μπορεί να **αναγεννηθεί** εξαλείφοντας έτσι την επίδραση θορύβου
 - ο θόρυβος δε συσσωρεύεται
 - Το αναλογικό ενισχύεται οπότε
 - ο θόρυβος δρα προσθετικά

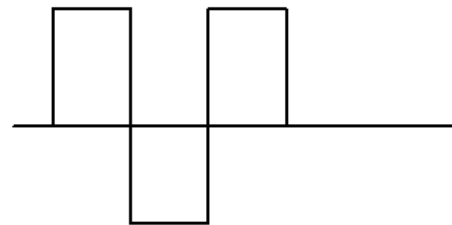
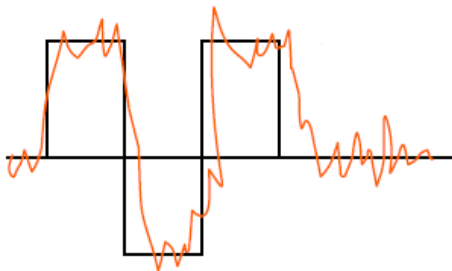
Αναγέννηση ψηφιακού σήματος



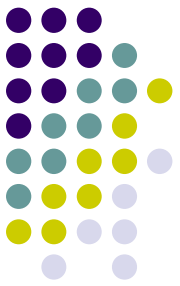
- Το ψηφιακό σήμα λαμβάνει συγκεκριμένες τιμές



- Εάν $SNR \gg 1$, η αρχική κυματομορφή μπορεί να προκύψει από την λαμβανόμενη



Ψηφιακός αναγεννητής



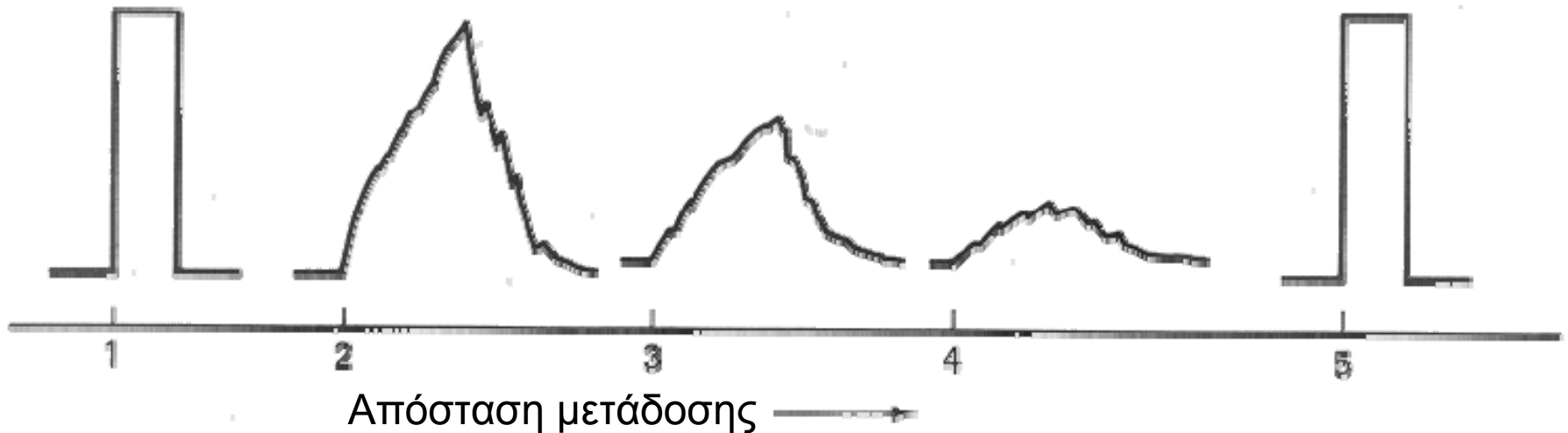
Αρχικός
παλμός

Μικρή
παραμόρφωση

Αρκετή
παραμόρφωση

Μεγάλη
παραμόρφωση

Αναγέννηση
παλμού



Απόσταση μετάδοσης →
Παραμόρφωση παλμού και αναγέννηση



Γιατί ψηφιακή μετάδοση (3);

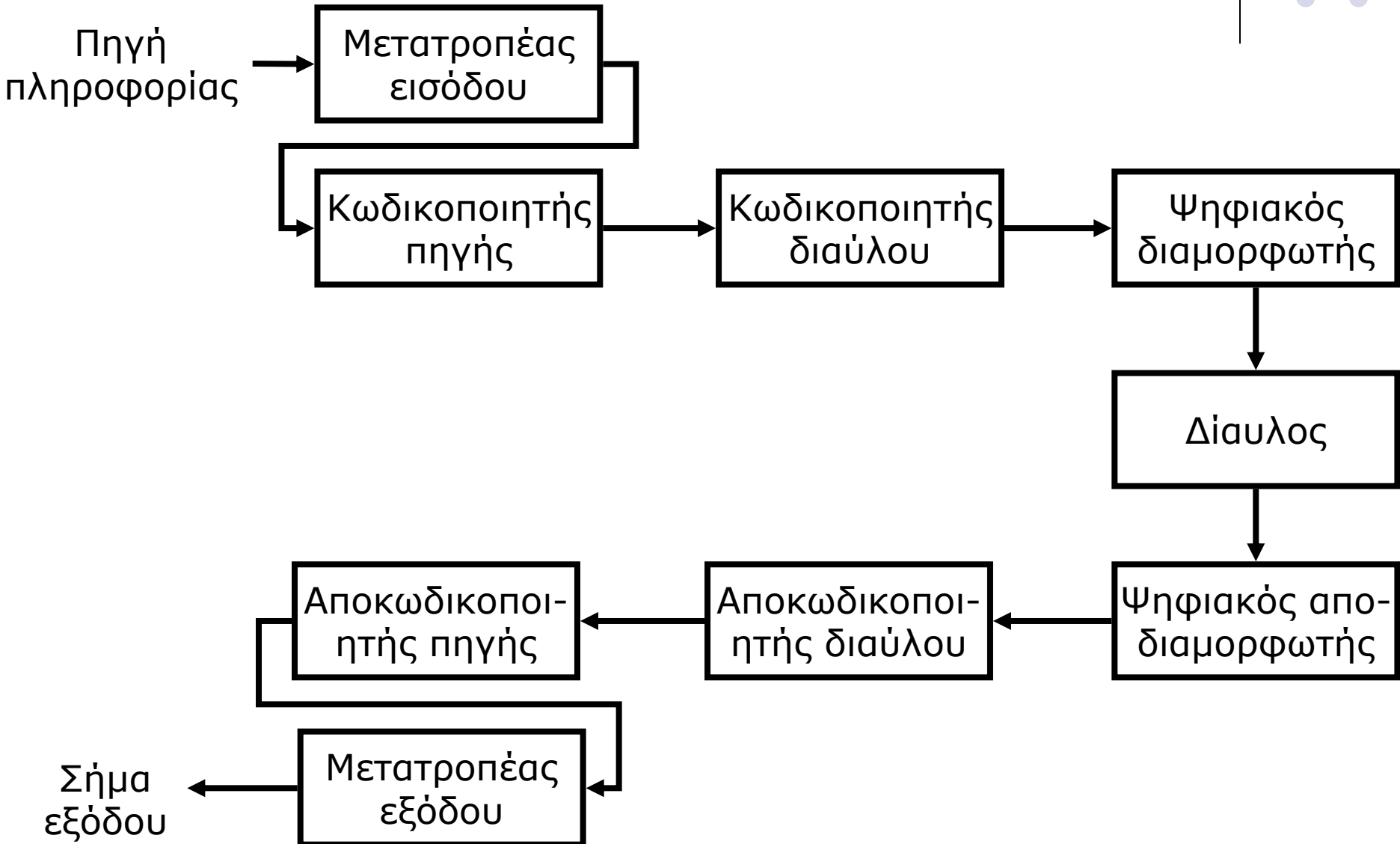
- Μπορούμε να εξαλείψουμε την πλεονάζουσα πληροφορία του αναλογικού σήματος
 - Μικρότερες απαιτήσεις εύρους ζώνης
- Δεδομένα από διαφορετικές πηγές (φωνή, βίντεο, κλπ) μπορούν να μεταδοθούν πάνω από το ίδιο τηλεπικοινωνιακό σύστημα
- Διασφάλιση απόρρητου με κρυπτογράφηση
- Τα ψηφιακά συστήματα είναι συνήθως πιο φθηνά

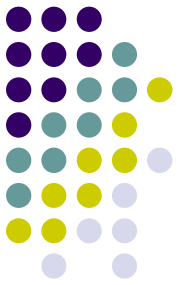
Μειονεκτήματα ψηφιακής μετάδοσης



- Εν γένει, το απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερο από ότι στα αναλογικά συστήματα
- Απαιτείται συγχρονισμός

Σύστημα Ψηφιακής Επικοινωνίας





Κωδικοποίηση πηγής

- Χρησιμοποιείται για τη συμπίεση των δεδομένων
 - με απώλειες (lossy)
 - χωρίς απώλειες (lossless)



Κωδικοποίηση διαύλου

- Χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του θορύβου που εισάγει ο δίαυλος
- Εισάγει “**πλεονασμό**” για προστασία από λάθη
 - Αναγνώριση (και διόρθωση) λαθών που εισάγονται από
 - Θόρυβο (noise)
 - Παρεμβολή (interference)
 - Παραμόρφωση (distortion)
 - Βασικές αρχές
 - Τετριμμένο: επανάληψη m φορές του προς μετάδοση bit
 - Αντιστοίχιση k bit σε n bit ($n > k$)
 - Ρυθμός κώδικα k/n



Ψηφιακή διαμόρφωση

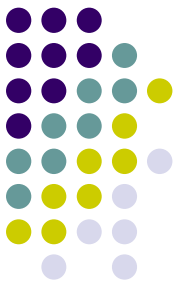
- Αναπαράσταση των bit με χρήση **συνεχών** σημάτων κατάλληλων για μετάδοση
 - Μετατροπή διακριτών τιμών σε **αναλογικές** κυματομορφές (συνήθως ημιτονικές)
 - Bit 0 κυματομορφή $s_0(t)$
 - Bit 1 κυματομορφή $s_1(t)$



Ψηφιακή διαμόρφωση

- Διαδική διαμόρφωση
 - Δύο κυματομορφές
- Μ-αδική διαμόρφωση
 - $M=2^b$ διακριτές κυματομορφές $s_i(i)$, $i=0,1,2,\dots,M-1$ για την αναπαράσταση b bit

Ψηφιακή αποδιαμόρφωση



- Επεξεργασία των αλλοιωμένων από τη μετάδοση στον δίαυλο κυματομορφών
- **Σύνοψη** κάθε κυματομορφής σε ένα αριθμό που αποτελεί εκτίμηση του μεταδοθέντος συμβόλου
- Στην περίπτωση δυαδικής διαμόρφωσης λαμβάνει μια
 - Δυαδική απόφαση, εάν αποφαίνεται 0 ή 1
 - Τριαδική απόφαση, εάν αποφαίνεται 0 ή 1 ή αδυνατεί να λάβει απόφαση (απαλοιφή)
- Στη γενική περίπτωση, ο αποδιαμορφωτής μπορεί να ειδωθεί ως μια μορφή κβάντισης $Q \geq M$ σταθμών



Μέτρο ποιότητας

- Η μέση πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος bit (BER - bit error rate) στην έξοδο του αποκωδικοποιητή
 - Αποτελεί μέτρο της επίδοσης του συνδυασμού αποδιαμορφωτή – αποκωδικοποιητή



Αποκωδικοποίηση διαύλου

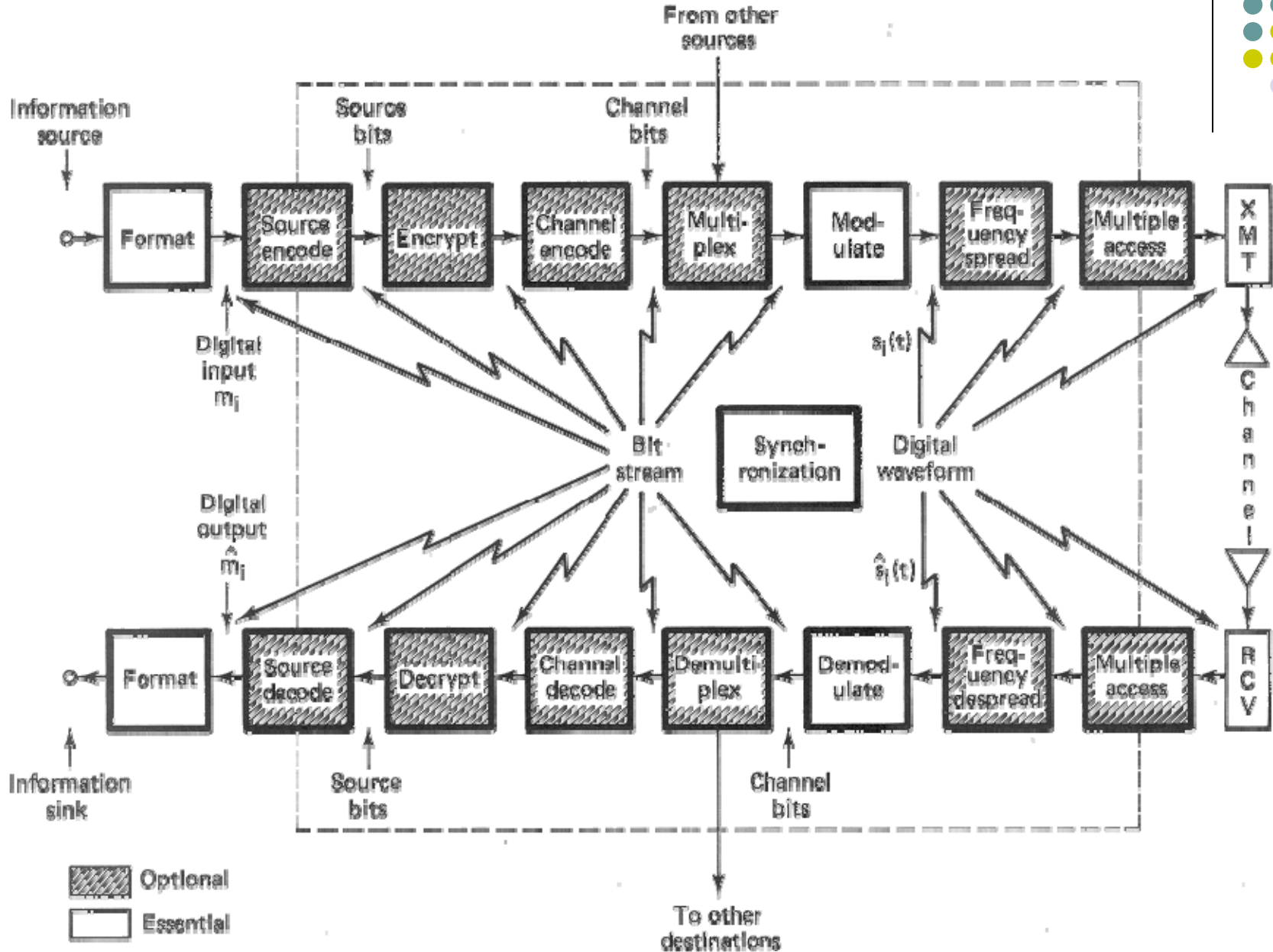
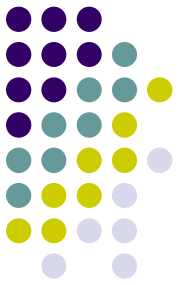
- Επεξεργασία της εξόδου του αποδιαμορφωτή για την αφαίρεση τυχόντος πλεονασμού που εισήγαγε ο κωδικοποιητής
- Πιθανότητα σφάλματος αποκωδικοποίησης
 - Η πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος εξαρτάται από τον τύπο διαμόρφωσης, κωδικοποίησης, κυματομορφές, ισχύ πομπού, χαρακτηριστικά διαύλου

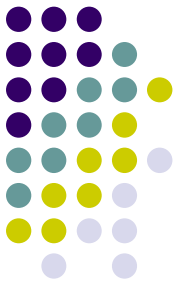


Αποκωδικοποίηση πηγής

- Επεξεργασία της εξόδου του αποκωδικοποιητή διαύλου για την ανάκτηση του σήματος, γνωρίζοντας τη μέθοδο κωδικοποίησης πηγής
- Η ανακατασκευή του αρχικού σήματος πηγής δεν είναι τέλεια, λόγω:
 - των σφαλμάτων bit του αποκωδικοποιητή διαύλου
 - της παραμόρφωσης που ίσως έχει εισαγάγει η κωδικοποίηση πηγής
- Η διαφορά μεταξύ του αρχικού σήματος και του ανακατασκευασμένου αποτελεί ένα μέτρο της παραμόρφωσης (αντίστοιχο με το SNR)

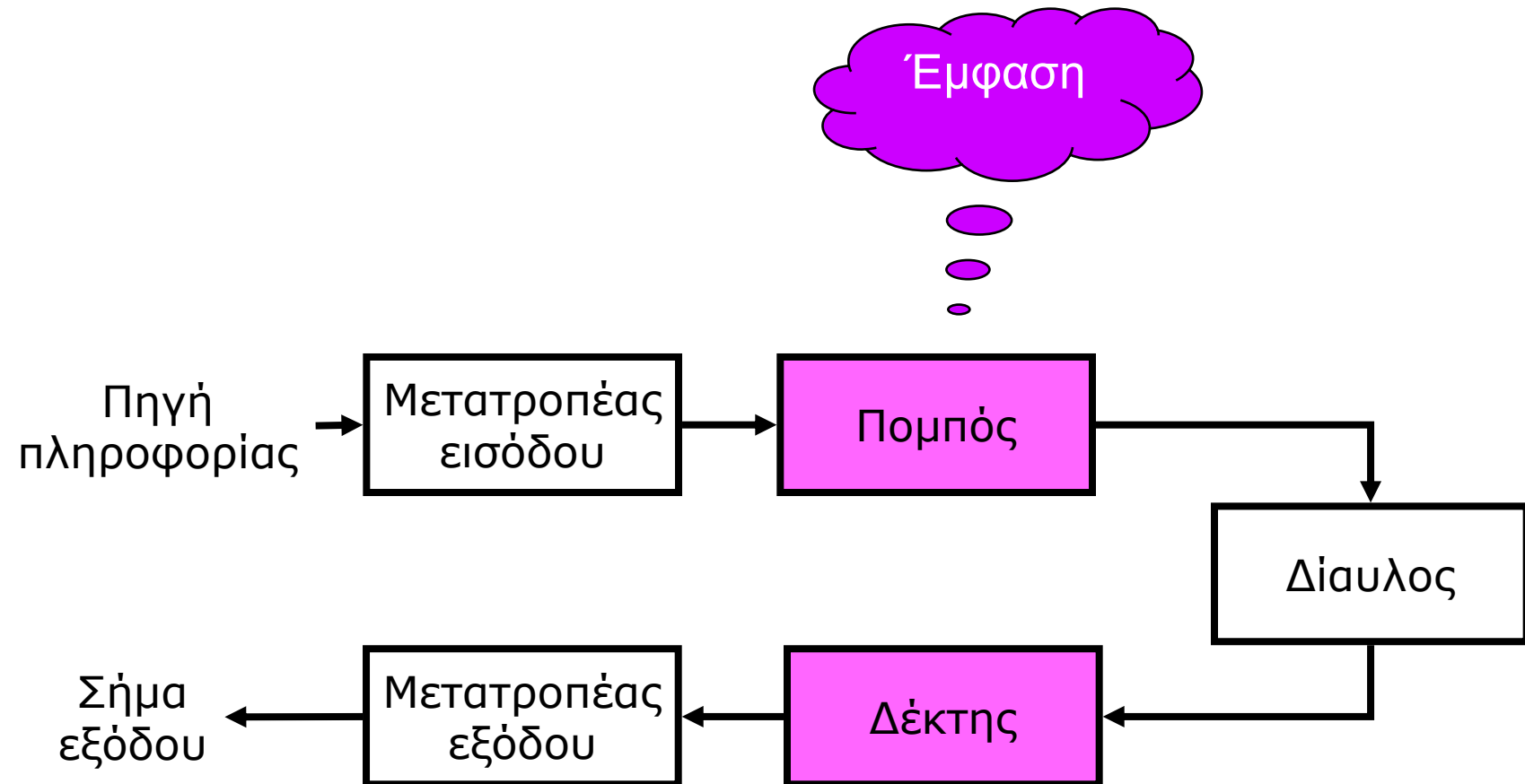
Τυπικό διάγραμμα





Σύνοψη

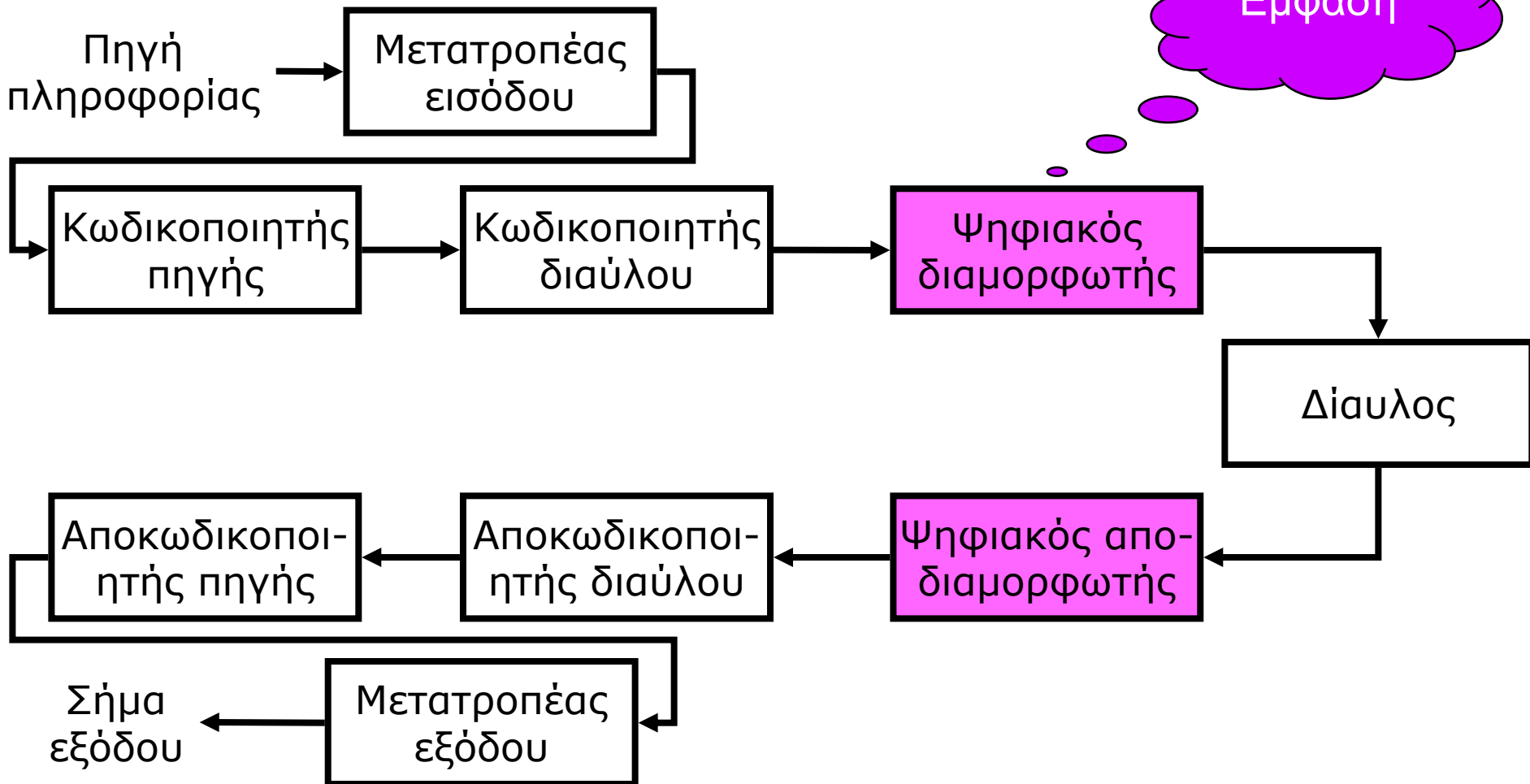
- Αναλογικά συστήματα επικοινωνίας



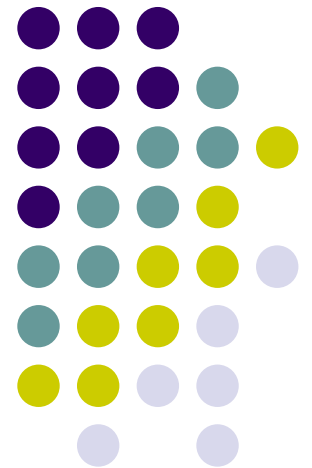
Σύνοψη



- Ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας



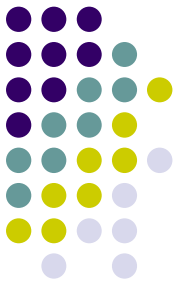
Θεμελιώδη όρια





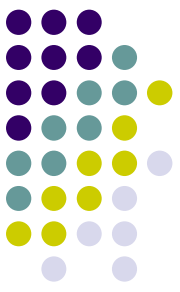
Παράδειγμα

- Υποθέστε ότι έχετε ένα διπλαγωγό 50 km με εύρος ζώνης 1 Hz
 - Μπορούμε να μεταδώσουμε σε ρυθμό 10 Mbps χωρίς λάθη;
- Υποθέστε ότι έχετε ένα ασύρματο κανάλι με θόρυβο, αλλά ο πομπός σας έχει ισχύ μόνο $\frac{1}{2}$ W
 - Μπορούμε να μεταδώσουμε ένα ηχητικό σήμα στο άλλο ημισφαίριο;
- Τι νομίζετε;



Βασικές τεχνικές έννοιες

- Πληροφορία (information)
- Εύρος Ζώνης (bandwidth)
- Ρυθμός δεδομένων (data rate)
- Ισχύς, ενέργεια σήματος



Πληροφορία

- Όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα σχεδιάζονται για να μεταφέρουν πληροφορία
- Τι είναι πληροφορία;
 - Η ποιοτική περιγραφή (γνώση για κάποιο θέμα) δεν είναι αρκετή
 - Απαιτείται ποσοτική περιγραφή
- Η πηγή πληροφορίας παράγει εξόδους που δεν είναι γνωστές στον δέκτη εκ των προτέρων
 - Εάν μπορούσαμε να τις προβλέψουμε δεν θα υπήρχε λόγος μετάδοσης



Ρυθμός μετάδοσης

- Ο ρυθμός μετάδοσης εξαρτάται από το εύρος ζώνης του διαύλου, τον αριθμό των σταθμών του προς μετάδοση σήματος και τη σηματοθορυβική σχέση
- Για L στάθμες του σήματος, ο μέγιστος θεωρητικός ρυθμός μετάδοσης σε δίαυλο εύρους ζώνης W (Nyquist bit rate) είναι

$$r_b = 2W \log_2(L)$$

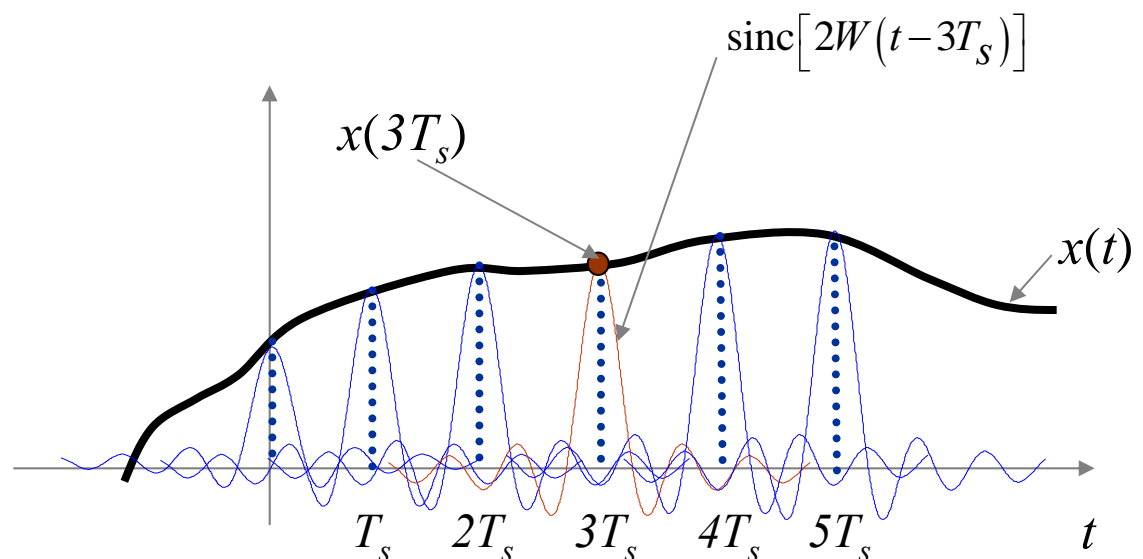
- και επιτυγχάνεται με σηματοδοσία παλμών sinc

$$g(t) = \sin(2\pi Wt) / (2\pi Wt)$$

Θεώρημα δειγματοληψίας



- Ένα βαθυπερατό σήμα πεπερασμένης ενέργειας που δεν περιέχει συχνότητες μεγαλύτερες των W Hertz μπορεί να ανακτηθεί πλήρως από δείγματά του που λαμβάνονται με ρυθμό $2W$ ανά sec
- Μπορούμε να λάβουμε το αρχικό σήμα χωρίς λάθη αθροίζοντας καθυστερημένες εκδοχές συναρτήσεων sinc με βάρη τα δείγματα





Χωρητικότητα διαύλου

- Εάν το μέγιστο πλάτος σήματος είναι περιορισμένο A_{max} (περιορισμός σταθερής ισχύος) και η διακριτική ικανότητα πλάτους είναι A_δ (λόγω της ύπαρξης θορύβου), συμπεραίνεται ότι υπάρχει ένας μέγιστος ρυθμός μετάδοσης
- Αυτό το άνω όριο (Shannon limit) στον ρυθμό που μπορεί να μεταδοθεί η πληροφορία αποκαλείται χωρητικότητα του διαύλου

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

- όπου S η μέση ισχύς σήματος, $N = W N_0$ η μέση ισχύς θορύβου, N_0 η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου, W το εύρος ζώνης μετάδοσης



Θεώρημα Shannon

- Εάν ο ρυθμός πληροφορίας R είναι μικρότερος της C τότε είναι θεωρητικό δυνατόν, με χρήση κατάλληλου κώδικα, να επιτευχθεί αξιόπιστη μετάδοση
- Αντίθετα, εάν ο ρυθμός πληροφορίας R είναι μεγαλύτερος της C τότε είναι αδύνατον να επιτευχθεί αξιόπιστη μετάδοση



Παράδειγμα 1

- Ένας τηλεπικοινωνιακός δίαυλος έχει εύρος ζώνης $W = 1 \text{ MHz}$ και $S/N = 63$
 - Ποιος είναι ο ρυθμός μετάδοσης και πόσες στάθμες σήματος απαιτούνται;

- Το θεωρητικό μέγιστο είναι

$$C = W \log_2(1 + S/N) = 10^6 \log_2(64) = \underline{6 \text{ Mbps}}$$

- Στην πράξη επιτυγχάνεται ένας μικρότερος ρυθμός, έστω

$$r_b \approx 4 \text{ Mbps} = 2W \log(L) \Rightarrow \underline{L = 4}$$



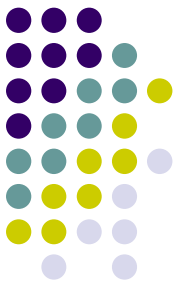
Παράδειγμα 2: το μόντεμ 56k

- Το σήμα φωνής στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο έχει εύρος ζώνης 3,1 kHz (από 300 Hz μέχρι 3.400 Hz).
- Η τυπική σηματοθρομβική σχέση SNR στον διπλαγωγό είναι περίπου 20 db

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(S/N) \Rightarrow S/N = 10^{SNR_{dB}/10}$$

$$\log_2(x) = \frac{\log_B(x)}{\log_B(2)}$$

$$C = 3.1 \log_2(1 + 100) \approx \underline{\underline{21 \text{ kbps}}}$$

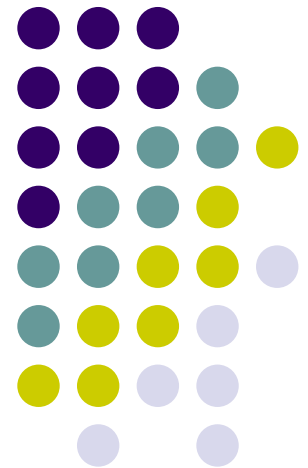


Παράδειγμα 2: το μόντεμ 56k

- Πώς τα καταφέρνει σε τέτοιο περιβάλλον;
 - Εκτιμά το SNR
 - Ανιχνεύει τα λάθη
 - Αυξάνει το ρυθμό μέχρι να εμφανισθούν λάθη
- Μεταπίπτει σε χαμηλότερο ρυθμό για να επιτευχθεί ασφαλής μετάδοση
 - Έχουν ορισθεί στάνταρ ρυθμοί και πρωτόκολλα για τη συνεννόηση
- Ποια σηματοθορυβική σχέση απαιτείται;

$$56 = 3.1 \log_2(1 + S/N) \Rightarrow S/N = \underline{\underline{54,4 \text{ dB}}}$$

Τηλεπικοινωνιακοί δίαυλοι

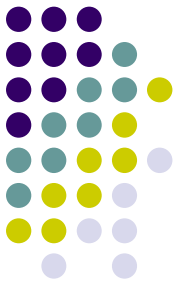


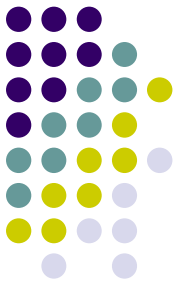


Τηλεπικοινωνιακοί δίαυλοι

- Οι τηλεπικοινωνιακοί δίαυλοι μπορεί να μεταφέρουν ή αποθηκεύουν πληροφορία
 - Ενσύρματοι (διπλαγωγοί, ομοαξωνικά καλώδια, κυματοδηγοί, ...)
 - Ασύρματοι (ελεύθερος χώρος)
 - Οπτικοί (οπτικές ίνες)
 - Ακουστικοί (υποβρύχιοι)
 - Αποθήκευσης (μαγνητικοί δίσκοι, ταινίες DAT, CD)

Τηλεπικοινωνιακοί δίαυλοι

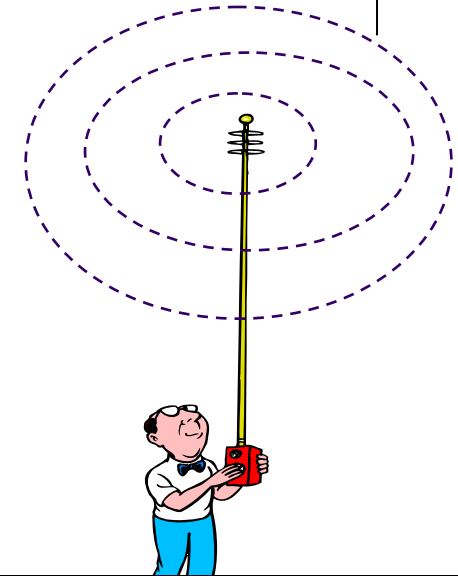
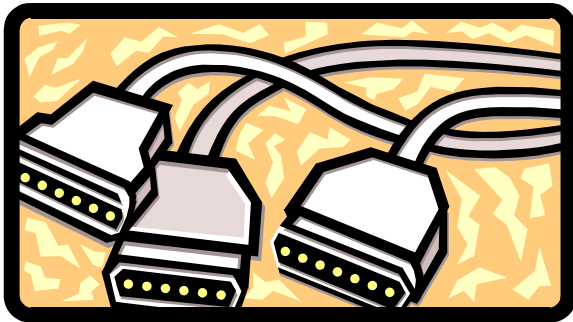
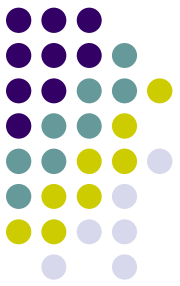




Εύρος ζώνης διαύλων

- Διπλαγωγοί: μερικές εκατοντάδες kHz
- Ομοαξονικό καλώδιο: μερικές εκατοντάδες MHz
- Κυματοδηγός: μερικά GHz
- Οπτική ίνα: μερικά THz

Ενσύρματος ή ασύρματος;



Ενσύρματος	Ασύρματος
Κάθε καλώδιο είναι διαφορετικός δίαυλος	Το μέσο μοιράζεται σε όλους
Μικρή απόσβεση	Μεγάλη απόσβεση
Μικρές παρεμβολές	Μεγάλες παρεμβολές



Ασύρματοι δίαυλοι

- Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που εκπέμπεται από την κεραία, φέρει το σήμα
- Σημαντικές αποσβέσεις (μέχρι 200 dB), άρα απαιτείται μεγάλη ισχύς μετάδοσης
- Επιρρεπείς σε εξωτερικές παρεμβολές
- Απαιτούνται κεραίες μεγέθους αντίστοιχου με το μήκος κύματος



Ασύρματοι δίαυλοι

- Η μετάδοση στον αέρα γίνεται σε διαφορετικές ζώνες (συχνότητες)
- Οι χρήσιμες για τον σκοπό αυτό ζώνες (μπάντες) δεν είναι άπειρες
- Το φάσμα είναι σπάνιος φυσικός πόρος
- Η διάθεσή του καθορίζεται από τις Κυβερνήσεις



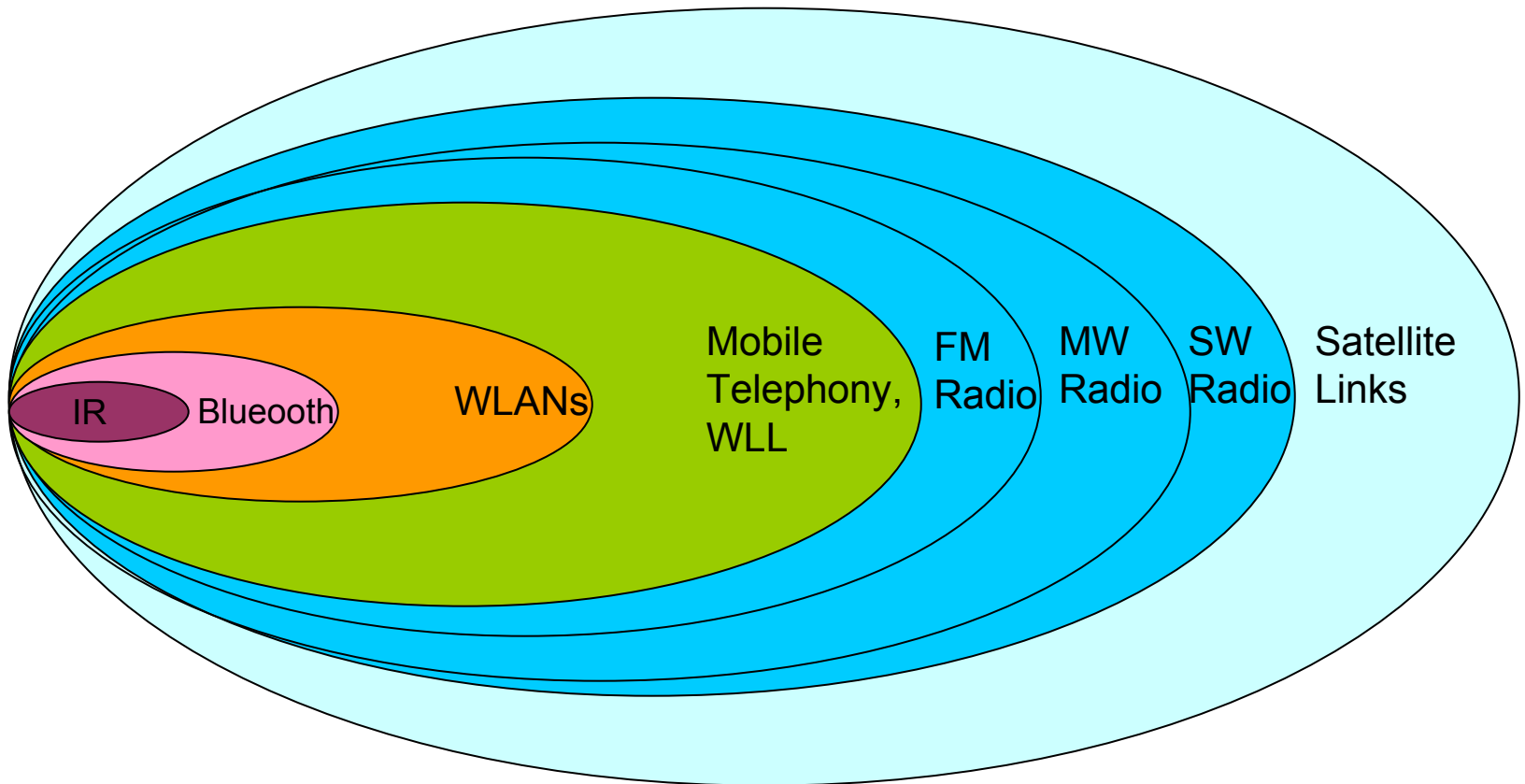
Ασύρματοι δίαυλοι: παραδείγματα

Ραδιοφωνία AM, FM Εκπομπή TV (Broadcast) Δορυφορική εκπομπή	Εκπομπή (αναλογική)
CB, Walkie-Talkie Ασύρματο τηλέφωνο	2-φορη επικοινωνία (αναλογική)
Δορυφορικές Ζεύξεις Σύστημα κινητής τηλεφωνίας Ασυρματικός συνδρομητικός βρόχος (WLL) Μικροκυματικές ζεύξεις Ασυρματικά LAN Υπέρυθρα (Infrared) LAN	2-φορη επικοινωνία (ψηφιακή)

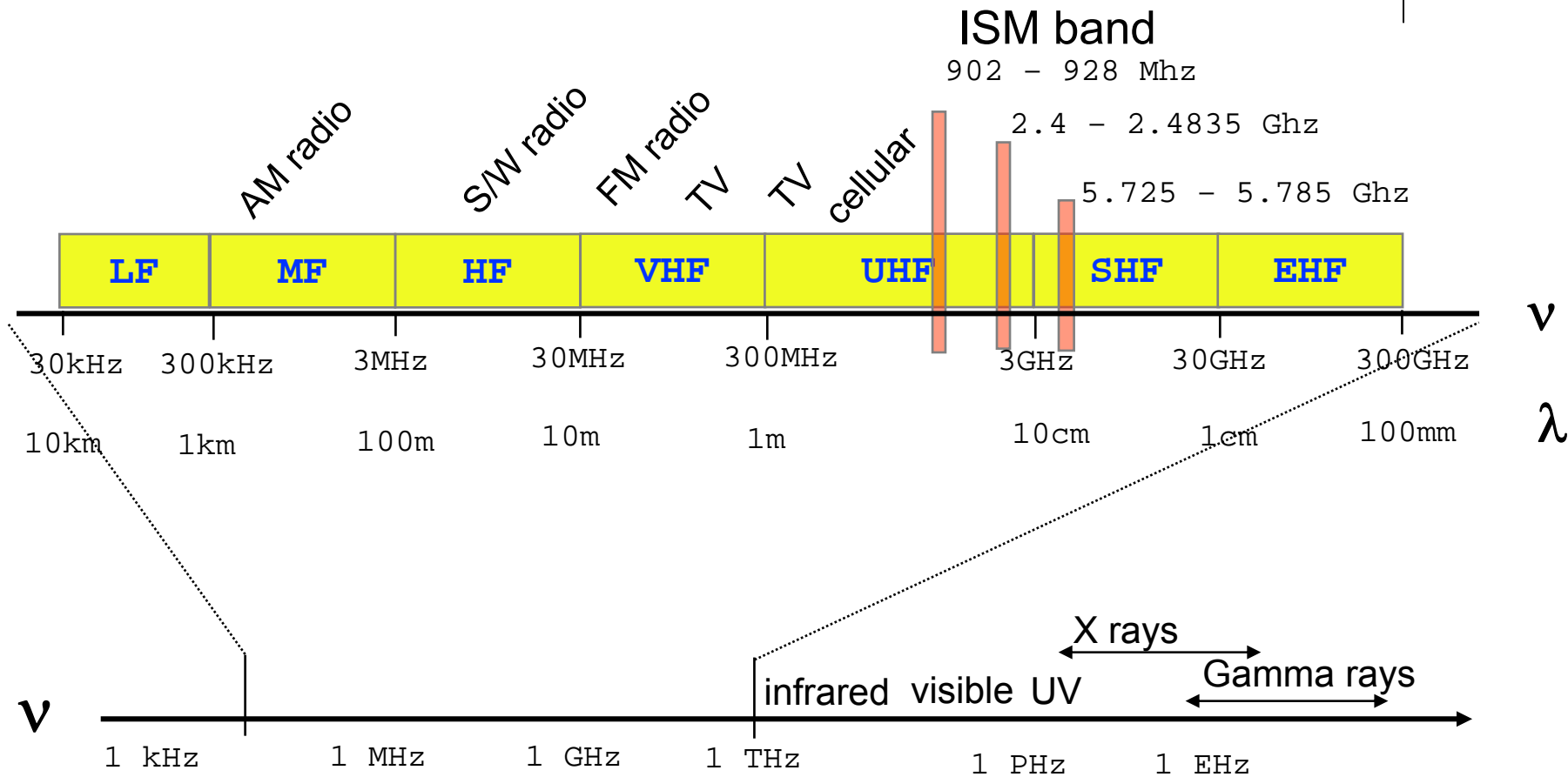
Ασύρματοι δίαυλοι: εμβέλεια

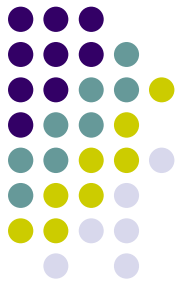


1 m 10 m 100 m 1 Km 10 Km 100 Km 1,000 Km

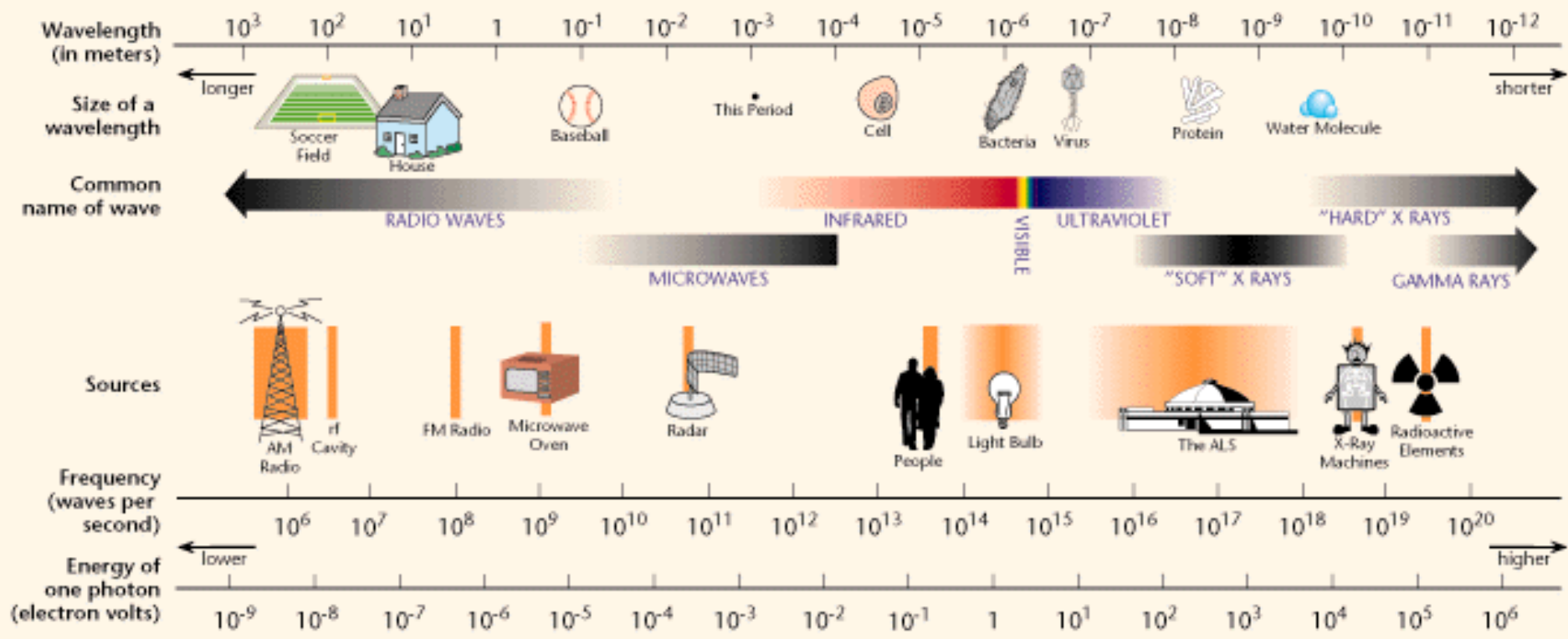


Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

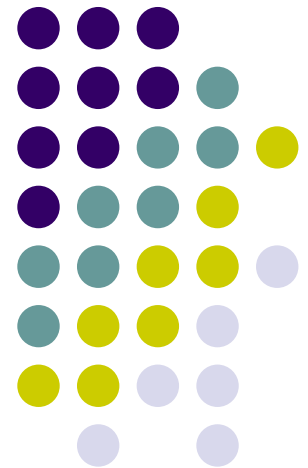




THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



Μοντελοποίηση





Φυσικό μέσο

- Το φυσικό μέσο είναι αναπόσπαστο μέρος του τηλεπικοινωνιακού συστήματος
- Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά ή οπτικά στοιχεία κατά μήκος της διαδρομής του σήματος
 - Εξισωτές, ενισχυτές, αναγεννητές
 - Το φυσικό μέσο καθορίζει μέρος μόνο της συμπεριφοράς του διαύλου, το άλλο καθορίζεται από τον τρόπο σύνδεσης του πομπού και του δέκτη στο μέσο
 - Επομένως, ως τηλεπικοινωνιακό δίαυλο αναφερόμαστε στο συνδυασμό των από άκρο σε άκρο φυσικών μέσων και των προσαρτημένων στοιχείων



Επιλογή φυσικού μέσου

- Η πρώτη απόφαση είναι μεταξύ
 - ενσύρματων
 - ασύρματων
- Μέγεθος/όγκος πληροφορίας/κίνησης
- Κόστος
- Παρεμβολές
- Ευρωστία
- Σημείο-προς-σημείο/εκπομπή
- Μεταφορά ισχύος
- Ψηφιακή ή αναλογική πληροφορία

Μοντέλο τηλεπικοινωνιακού διαύλου



- Συνήθως ο δίαυλος παριστάνεται μαθηματικά ως **φίλτρο** με παραμέτρους:
 - Ντετερμινιστικές
 - Τυχαίες
 - Χρονικά μεταβαλλόμενες
 - Γραμμικές/Μη γραμμικές



Παράμετροι διαύλων

- Απόσβεση [dB/Km],
 - Συνάρτηση μεταφοράς
 - Αντίσταση προσαρμογής [Ω]
 - Εύρος ζώνης [Hz]
 - Ρυθμός μετάδοσης
-
- Οι παράμετροι είναι συνάρτηση της συχνότητας, απόστασης μετάδοσης, θερμοκρασίας,...



Ιδανικός δίαυλος

- Ο ιδανικός δίαυλος έχει ως έξοδο μια καθυστερημένη και εξασθενημένη εκδοχή της εισόδου του

$$y(t) = Kx(t - t_d)$$

$$Y(f) = f[y(t)] = \underbrace{K \exp(-j\omega t_d)}_{H(f)} X(f)$$

- Άρα για τον ιδανικό δίαυλο $|H(f)| = |K|$, $\arg H(f) = -2\pi f t_d$

- Παραμορφώσεις μπορεί να είναι

- παραμόρφωση πλάτους:

$$|H(f)| \neq |K|$$

- Παραμόρφωση καθυστέρησης:

$$\arg H(f) \neq -2\pi t_d f$$

- Η καθυστέρηση φάσης ορίζεται ως $t_d(f) = -\arg H(f)/(2\pi f)$

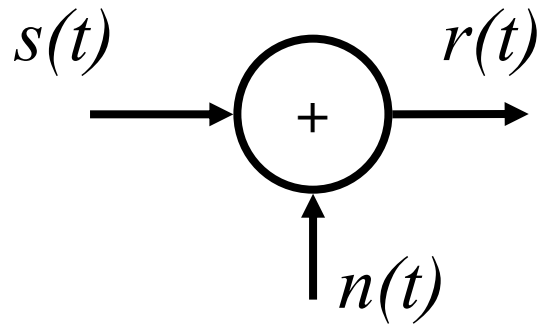
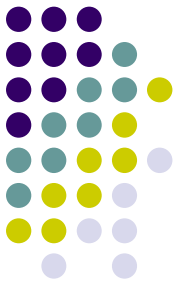
- Στον ιδανικό δίαυλο όλες οι συχνότητες διατηρούν τις σχετικές θέσεις των φάσεων τους καθώς μεταδίδονται μέσω του διαύλου

Υποβαθμίσεις μετάδοσης (transmission impairments)



- Αλλάζουν τις ιδιότητες του διαύλου
 - Εσωτερικές /εξωτερικές παρεμβολές (**interference**)
 - Διαφωνία (cross-talk)
 - Διασυμβολική παρεμβολή (ISI – inter-symbol interference)
 - Παρεμβολή από άλλες πηγές
 - Θόρυβος (noise) ευρείας ζώνης
 - Παραμόρφωση
 - Γραμμική (συνάρτηση μεταφοράς που δεν έχει αντισταθμισθεί)
 - Μη γραμμική (από μη γραμμικότητες των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων)

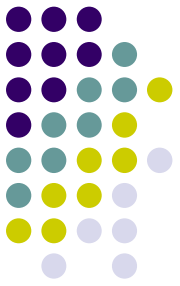
Δίαυλος προσθετικού θορύβου



$$r(t) = as(t) + n(t)$$

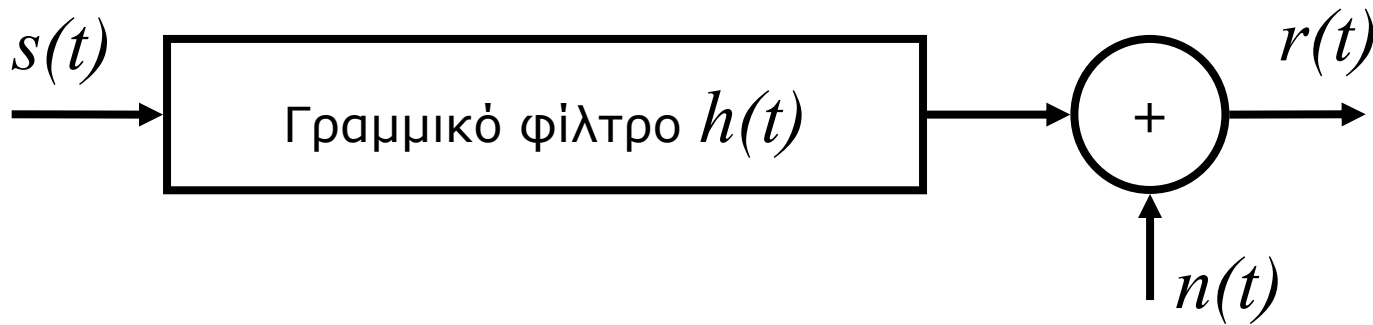
όπου $a < 1$ η εξασθένιση που εισάγει ο διάυλος

Μοντέλο τηλεπικοινωνιακού διαύλου



- Ο πιο συνηθισμένος δίαυλος είναι γραμμικός προσθετικός με λευκό Γκαουσιανό θόρυβο
 - AWGN (Additive White Gaussian Noise)
- Σε διαύλους AWGN η έξοδος είναι η συνέλιξη της κρουστικής απόκρισης του διαύλου με το σήμα εισόδου συν ένας προσθετικός όρος θορύβου

Δίαυλος AWGN



$$r(t) = s(t) \otimes h(t) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) s(t - \tau) d\tau + n(t)$$



Μη γραμμικοί δίαυλοι

- Λόγω ύπαρξης μη γραμμικών στοιχείων, έστω ότι η έξοδος είναι

$$y(t) = a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t) + \dots$$

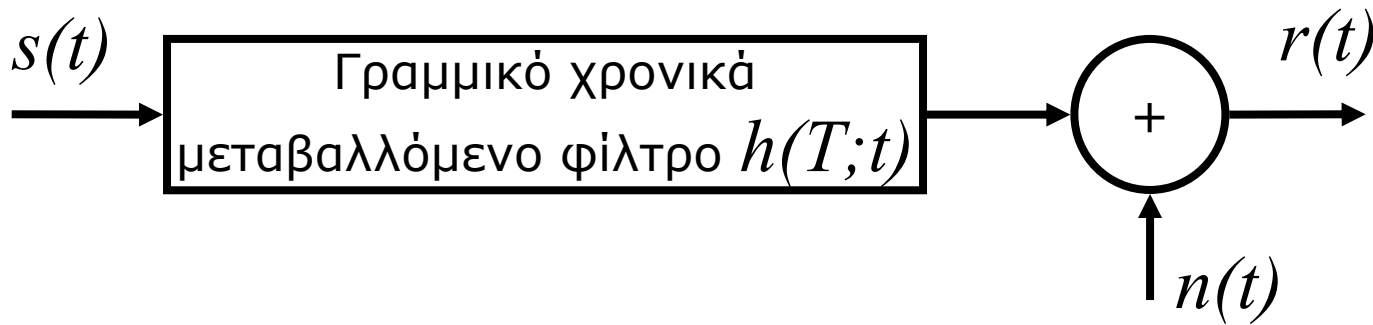
- Υποθέτοντας είσοδο $x(t) = \cos \omega_0 t$, τότε

$$y(t) = \left(\frac{a_2}{2} + \frac{3a_4}{8} \dots \right) + \left(a_1 + \frac{3a_3}{4} \dots \right) \cos \omega_0 t + \left(\frac{a_2}{2} + \frac{a_4}{4} \dots \right) \cos 2\omega_0 t + \dots$$

$$y(t) = D_0 + D_1 \cos(\omega_0 t) + D_2 \cos(2\omega_0 t) \dots$$

- όπου D_n είναι οι συντελεστές παραμόρφωσης
- Στους μη γραμμικούς διαύλους εμφανίζονται **νέες** συχνότητες που δεν υπήρχαν στο σήμα εισόδου

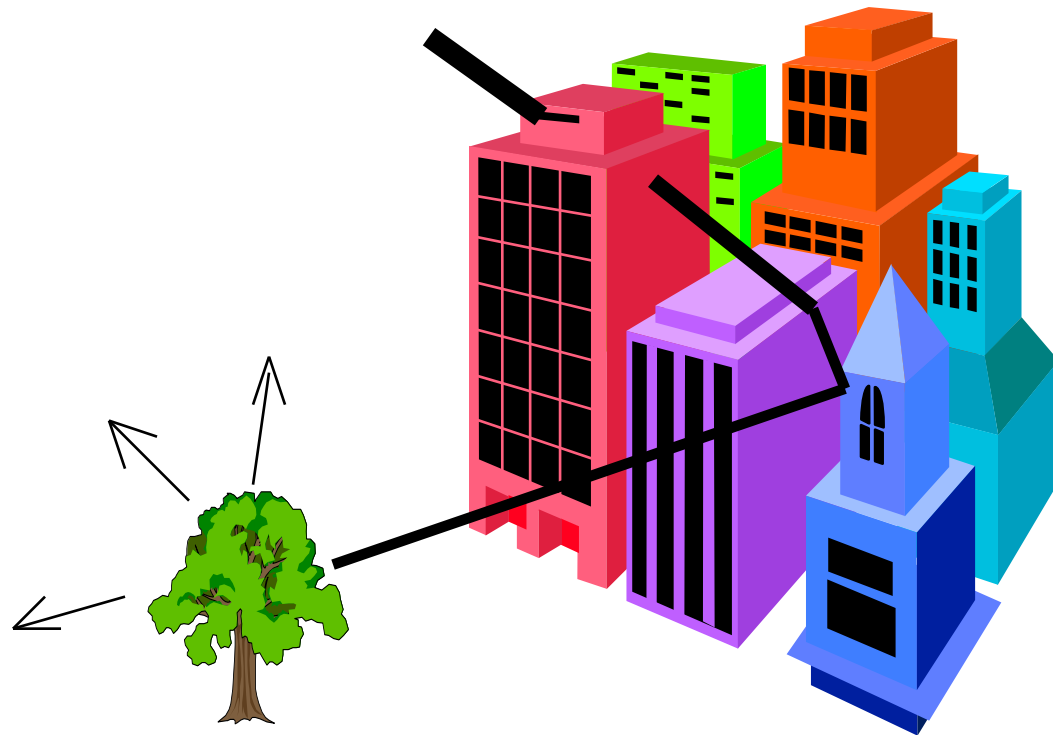
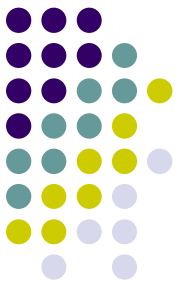
Χρονικά μεταβαλλόμενος δίαυλος



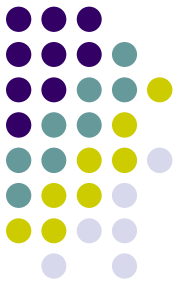
$$r(t) = s(t) \otimes h(T;t) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(T;\tau) s(t - \tau) d\tau + n(t)$$

όπου T η ηλικία του διαύλου

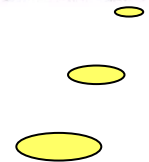
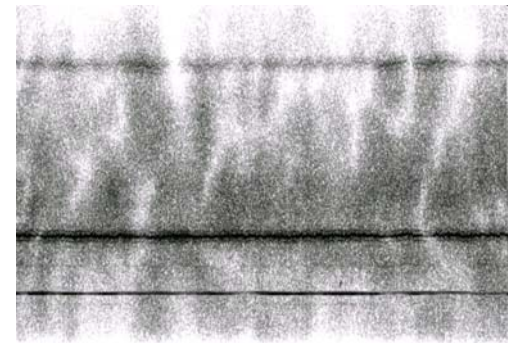
Διάδοση κυμάτων



Χρονικά μεταβαλλόμενοι δίαυλοι



- Διαλείψεις
 - Αργές ή γρήγορες μεταβολές στη λαμβανόμενη ισχύ σήματος

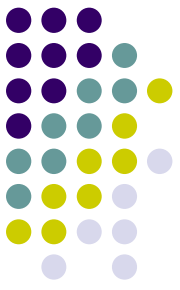


Φασματο-
γράφημα

Αργές διαλείψεις



- Το πλάτος και η φάση του σήματος μπορούν να θεωρηθούν σταθερά κατά τη διάρκεια της χρήσης του διαύλου
- Το σήμα που λαμβάνεται επηρεάζεται από εμπόδια μεταξύ του πομπού και του δέκτη (shadowing)
- Η τοπική μέση τιμή της ισχύος του σήματος έχει μια τυχαία συνιστώσα μηδενικής μέσης τιμής που ακολουθεί κανονική κατανομή



Γρήγορες διαλείψεις

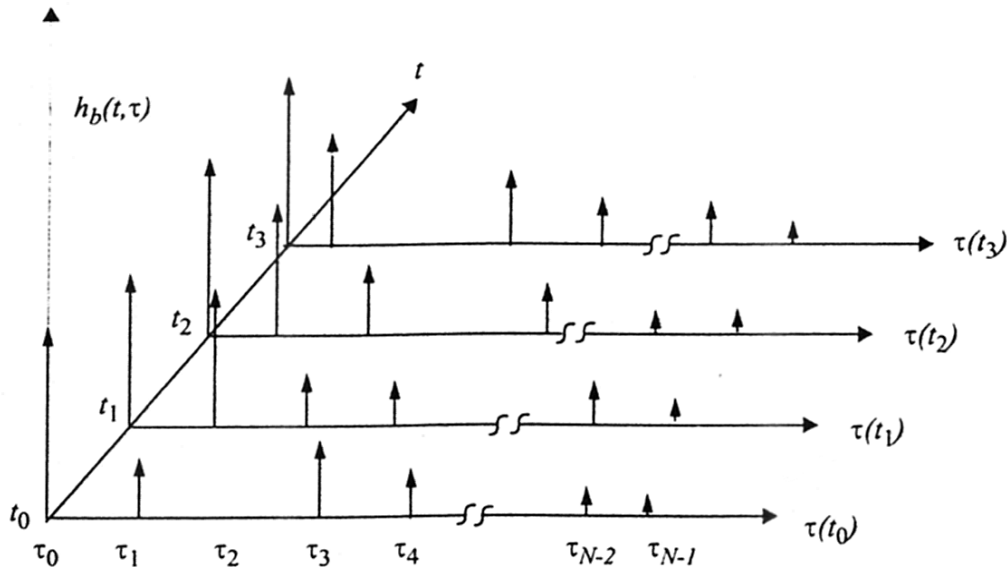
- Το πλάτος και η φάση του σήματος αλλάζουν κατά τη διάρκεια της χρήσης του διαύλου
- Το σήμα συνήθως προκύπτει από την υπέρθεση επί μέρους σημάτων που έχουν ακολουθήσει διαφορετικές διαδρομές (multipath)
- Η τοπική μέση τιμή της ισχύος του σήματος έχει μια τυχαία συνιστώσα που ακολουθεί κατανομή Rice (όταν υπάρχει το απευθείας σήμα λόγω οπτικής επαφής) ή Rayleigh (όταν δεν υπάρχει)



Πολλαπλές διαδρομές

- Το λαμβανόμενο σήμα είναι άθροισμα πολλαπλών καθυστερημένων και εξασθενημένων εκδοχών της εισόδου

$$h(\tau; t) = \sum_{k=1}^N a_k(t) \delta(\tau - \tau_k)$$



Απόκριση διαύλου πολλαπλών διαδρομών



- Για χρονικά μεταβαλλόμενο δίαυλο η απόκριση είναι

$$r(t) = \sum_{k=0}^N a_k(t) s(t - \tau_k) + n(t)$$



Απώλειες διαδρομής

- Οι απώλειες διαδρομής PL σε dBm

$$PL = S_{TdBm} - S_{Rdbm} = PL_0 + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) + X$$

- όπου X τυχαία μεταβλητή
 - π.χ. στην περίπτωση αργών διαλείψεων ακολουθεί την κανονική κατανομή οπότε οι απώλειες ακολουθούν κατανομή log-normal

$$p(S) = \frac{1}{\sigma_S \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(S - S_0)^2}{2\sigma_S^2} \right), S_0 = C / r^\gamma, \gamma = 2...5$$