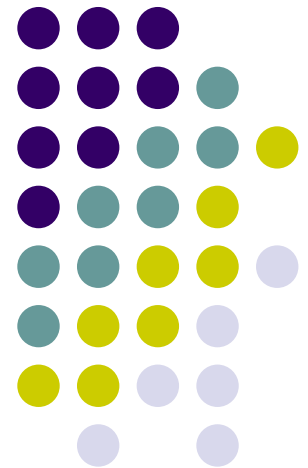


# Εισαγωγή

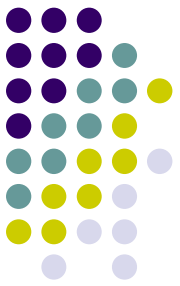


# Διαμόρφωση, φώραση και εκτίμηση σημάτων



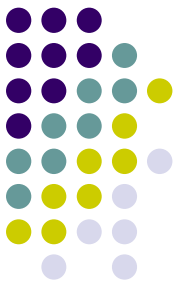
- Τα κύρια θέματα που περιλαμβάνει το μάθημα
  - Γραμμική αναλογική διαμόρφωση και φώραση
  - Εκθετική αναλογική διαμόρφωση και φώραση
  - Θόρυβος στην αναλογική διαμόρφωση
  - Δειγματοληψία
  - Παλμοκωδική διαμόρφωση (PCM)
  - Χωρητικότητα διαύλου, κωδικοποίηση
  - Σήματα στο διακριτό πεδίο

# Διαμόρφωση, φώραση και εκτίμηση σημάτων



- Εργαστήριο
  - 4 ή 5 ασκήσεις MATLAB στο ΕΠΥ της Σχολής
  - Προαιρετική παρακολούθηση
    - Το εργαστήριο συνεισφέρει 30% στον τελικό βαθμό
    - Απαλλαγή από μία άσκηση (αντίστοιχου βάρους) του γραπτού διαγωνίσματος
  - Θα αρχίσει μετά το Πάσχα (Πέμπτες 3:15-17:00)
- Βιβλία
  - Συστήματα Τηλεπικοινωνιών, Προάκης & Salehi, 2<sup>η</sup> έκδοση, ΕΚΠΑ
  - Συστήματα Επικοινωνίας, Simon Haykin, εκ. Παπασωτηρίου
- Ιστοσελίδα μαθήματος [www.cn.ntua.gr](http://www.cn.ntua.gr)

# Σκοπός του μαθήματος



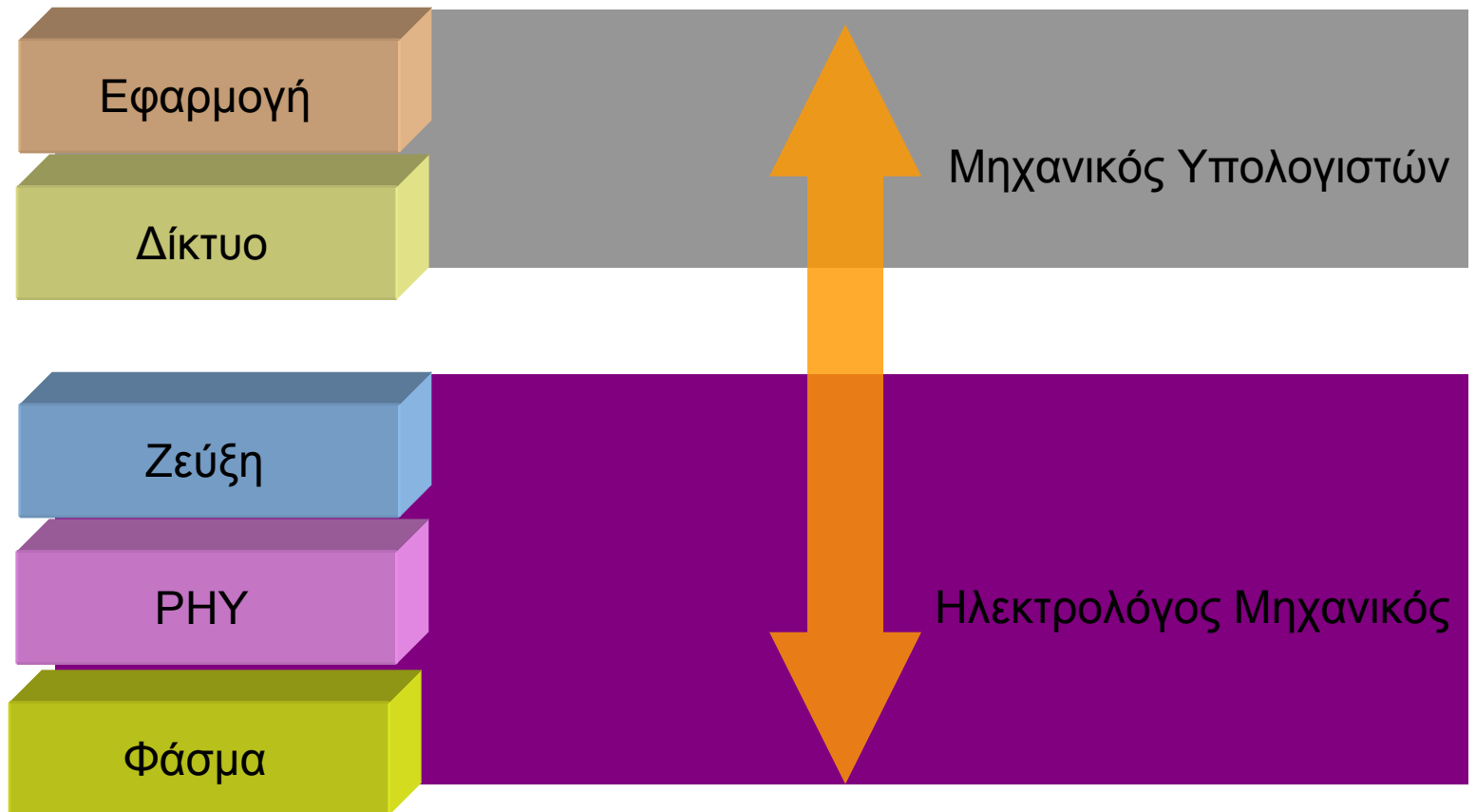
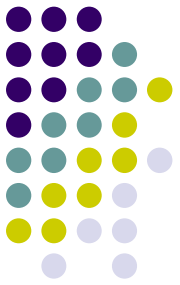
- Η βασική κατανόηση των:
  - **Σημάτων** που εμφανίζονται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα
  - **Παραμορφώσεων** που προκαλούνται από τους τηλεπικοινωνιακούς διαύλους
  - **Τεχνικών** επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες ώστε να επιτευχθεί η μεταφορά πληροφορίας
  - Αρχών της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

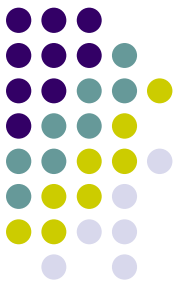
# Γιατί στη ροή Δ



- 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
  - Μπορείτε να δείτε τηλεόραση ή να ακούσετε ραδιόφωνο στον υπολογιστή σας
  - 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
  - Ίσως διαθέτετε τοπικό δίκτυο στο σπίτι σας (πάνω από τις γραμμές ισχύος)
  - Σύντομα το ψυγείο σας θα έχει διεύθυνση IP!
  - κλπ

# Γιατί στη ροή Δ

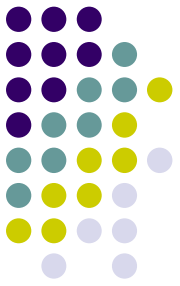




# Μερικές ερωτήσεις

- Γιατί ο κόσμος μεταβαίνει στη ψηφιακή TV;
- Γιατί αντικαθιστούμε τα παραδοσιακά ραδιόφωνα (AM και FM) με ψηφιακά;
- Γιατί στα μεσαία (AM) ακούτε το Κάιρο το βράδυ, αλλά μόνο τους τοπικούς σταθμούς το πρωί;
- Γιατί οι σταθμοί στα FM ακούγονται καλύτερα από τους σταθμούς στα μεσαία;
- Γιατί τα FM έχουν μικρή εμβέλεια, ενώ τα AM μεγάλη;

# Δεν είναι το AM και FM παλιές γνώσεις;



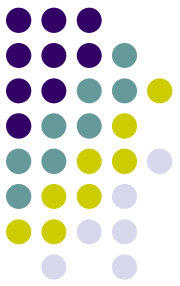
- **Στην πραγματικότητα όχι**

- 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 θυμηθείτε .....Όλα στην πραγματικότητα είναι ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ*

*Αναλογικό & Γραμμικό = Υψηλή επίδοση*



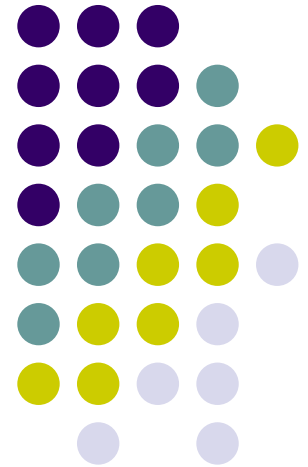


# Το μήνυμα είναι

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

# Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα

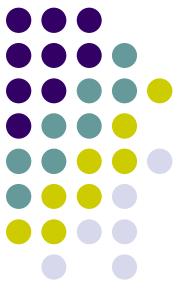
---



# Τι είναι τηλεπικοινωνιακό σύστημα



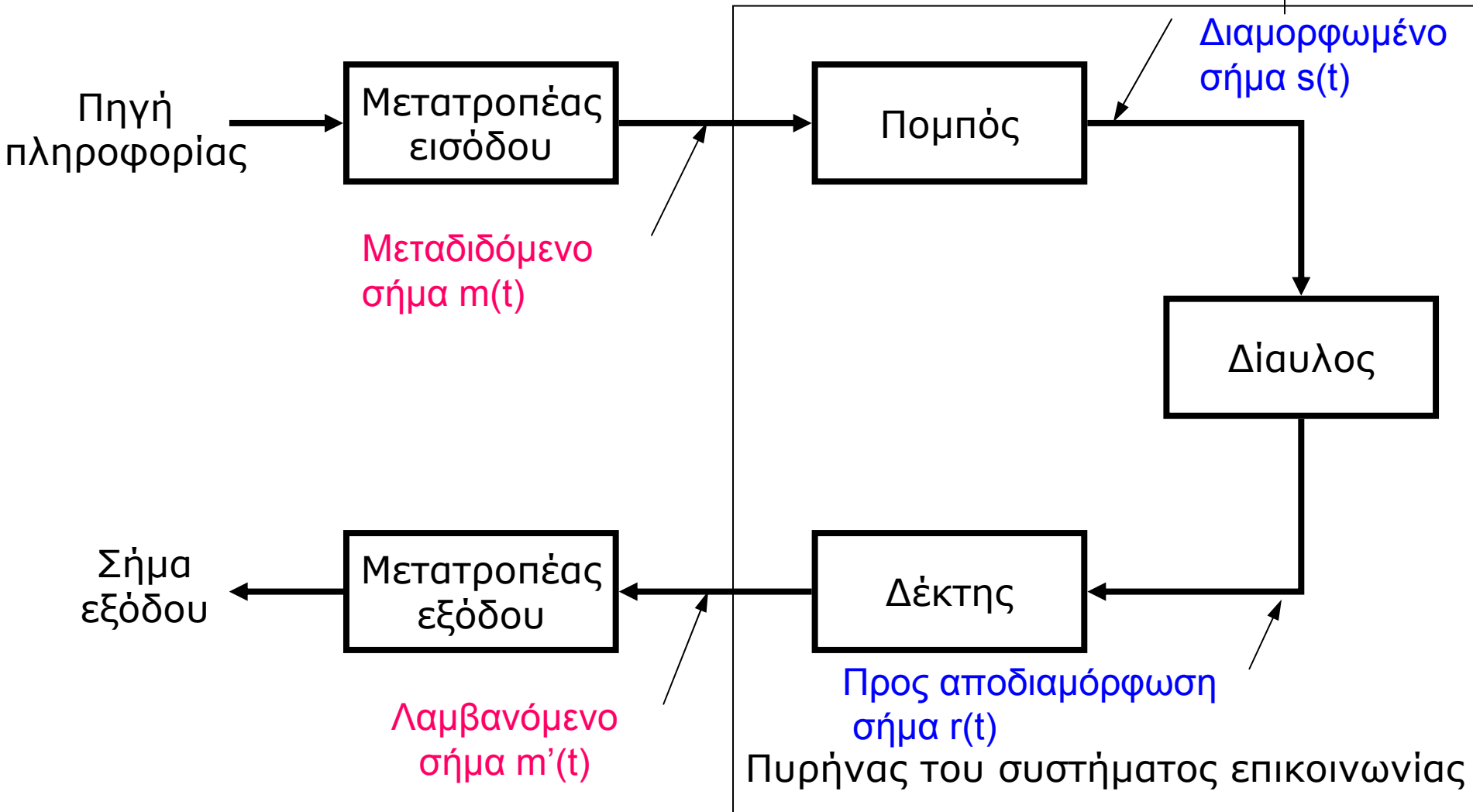
- Οποιοσδήποτε τρόπος για μεταφορά πληροφορίας
  - Πρέπει να είναι αποδοτικός, αξιόπιστος και ασφαλής
  - Παραδείγματα: τηλέφωνο, TV, σκληρός δίσκος
- Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα μεταφέρουν πληροφορία
  - από σημείο σε σημείο (unicast) ή
  - από σημείο σε πολλά σημεία (εκπομπή, broadcast)

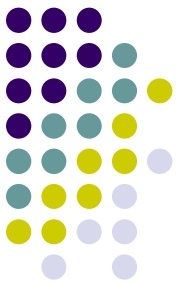


# Σύντομο ιστορικό

- 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

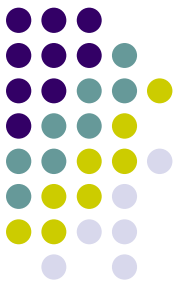
# Σύστημα Επικοινωνίας





# Πηγή (Source)

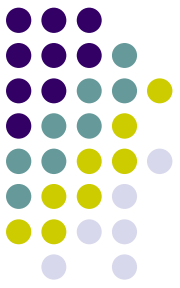
- Παράγει την προς μετάδοση πληροφορία
- Είδος πληροφορίας
  - Συνεχής, π.χ. φωνή, βίντεο
  - Διακριτή, π.χ. κείμενο, δεδομένα
- Η έξοδος της πηγής δεν είναι νομοτελειακή
  - Η πληροφορία δεν είναι γνωστή εκ των πρότερων!
  - Αλλιώς, δεν θα χρειαζόταν το τηλεπικοινωνιακό σύστημα για τη μετάδοσή της



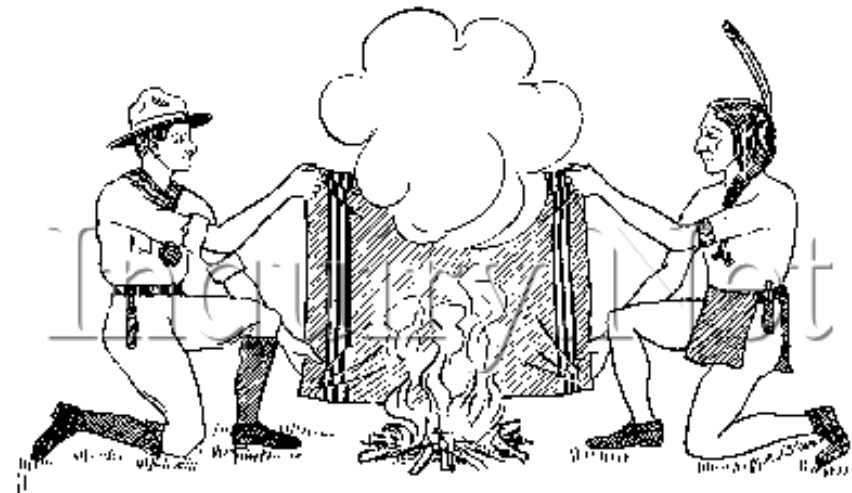
# Μετατροπέας (transducer)

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

# Είδη σημάτων



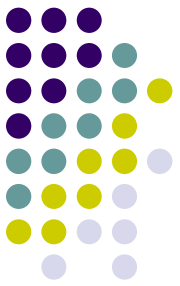
- Ντετερμινιστικά - Τυχαία
- Σήματα ενέργειας (παλμοί)
- Σήματα ισχύος (περιοδικά)
- Συνεχούς - διακριτού χρόνου
- Αναλογικά – Ψηφιακά
- Πραγματικά - Μιγαδικά



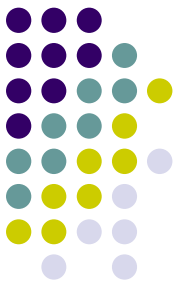
SMOKE SIGNALS



# Αναλογικό ή Ψηφιακό σήμα

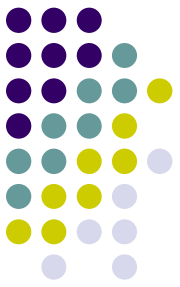


- Αναλογικά Σήματα
  - Συνεχώς μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα (τάση, ρεύμα)
- Ψηφιακά Σήματα
  - Χρονική αλληλουχία παλμών
- Συχνά τα αναλογικά σήματα ψηφιοποιούνται:
  - Ανίχνευση (και διόρθωση) λαθών
  - Πολυπλεξία

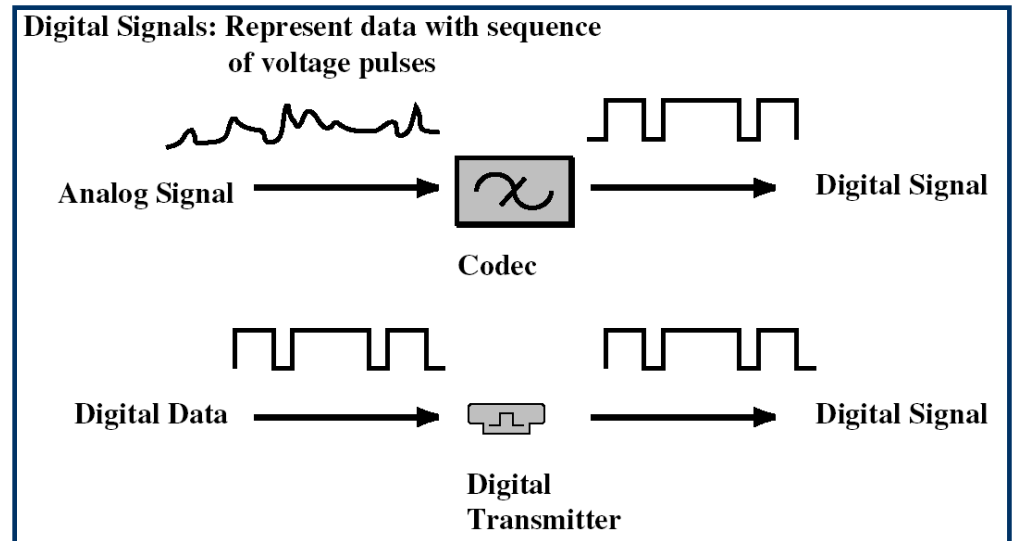
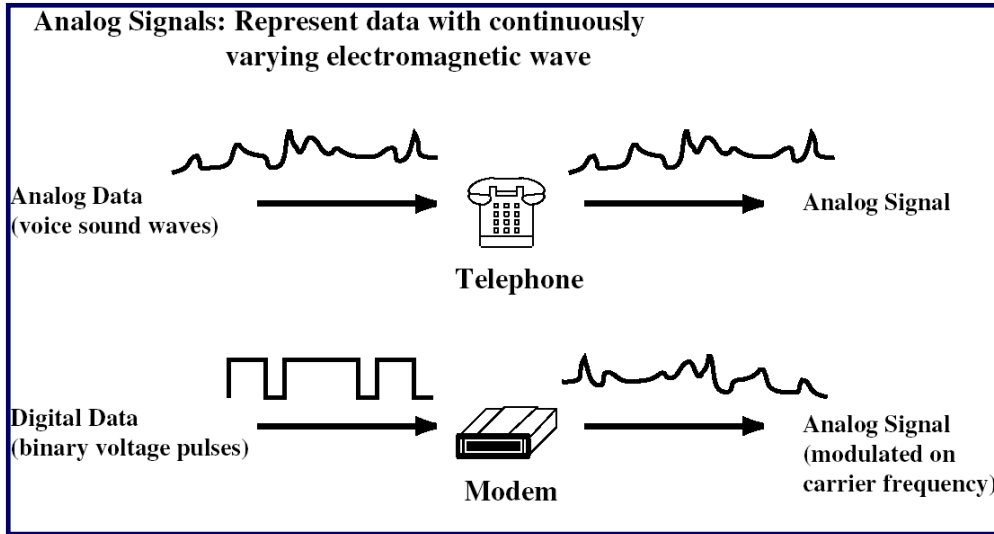


# Αναλογικό ή Ψηφιακό σήμα

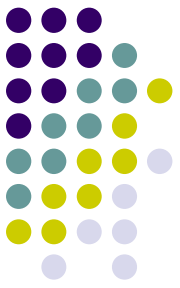
- Αναλογικό
  - Συνεχής μεταβολή
    - Περιλαμβάνει το σύνολο των συχνοτήτων
  - Μεταδίδεται όλη η πληροφορία
- Ψηφιακό
  - Λαμβάνονται δείγματα
    - Μη συνεχής ροή παλμών on/off
  - Μετατρέπονται σε 1 και 0



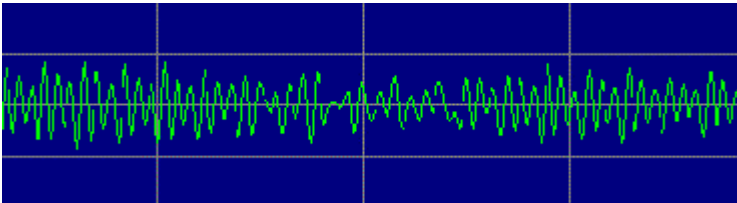
# Αναλογικό ή Ψηφιακό σήμα



# Αναλογικά σήματα

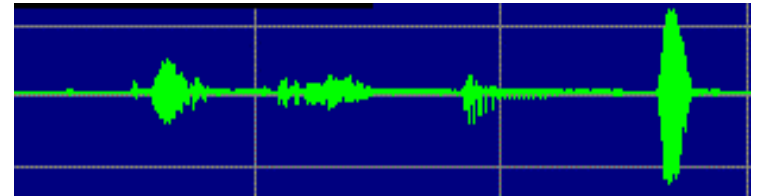


- Τόνοι



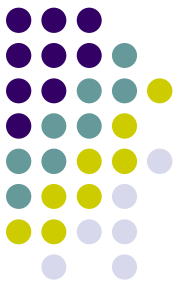
- Πολλές συχνότητες σε υπέρθεση
- Δε φαίνεται στο πεδίο του χρόνου
- Ξεκάθαρο στο πεδίο των συχνοτήτων

- Φωνή



- Ριπές
- Μεταβαλλόμενο πλάτος
- Συχνότητα και φάση αλλάζει

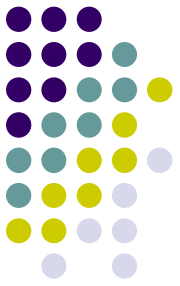




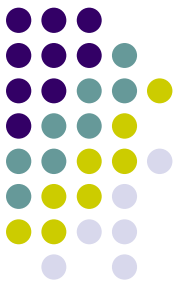
# Πομπός (transmitter)

- 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

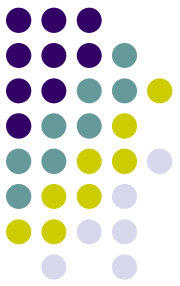
- Οποιοδήποτε και εάν είναι το μέσο, το σήμα υποβαθμίζεται λόγω
  - Αποσβέσεων
  - Παραμορφώσεων
  - Θορύβου, και
  - Παρεμβολών
- Η απόσβεση μπορεί να είναι σημαντική (100-200 dB)



# Υποβαθμίσεις (Impairments)

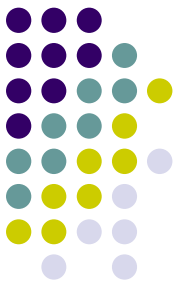
- Οι υποβαθμίσεις μπορεί να είναι προσθετικές ή μη
- Προσθετικές υποβαθμίσεις:
  - θερμικός θόρυβος
  - ατμοσφαιρικός θόρυβος (ηλεκτρικές εκκενώσεις)
  - man-made noise (σπινθήρες ανάφλεξης βενζινοκινητήρων)
  - παρεμβολές από άλλους χρήστες
- Μη προσθετικές υποβαθμίσεις:
  - διαλείψεις (πολλαπλές διαδρομές),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





# Υποβαθμίσεις

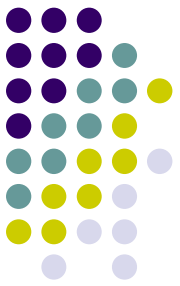
- Οι διάφορες υποβαθμίσεις χαρακτηρίζονται ως τυχαία φαινόμενα και περιγράφονται με στατιστικό τρόπο
  - Η στατιστική περιγραφή συχνά είναι εμπειρικό αποτέλεσμα
  - Φυσική δικαιολόγηση από μετρήσεις
- Πρέπει να ληφθούν υπόψη στη σχεδίαση του συστήματος
  - Προσαρμοστικά συστήματα



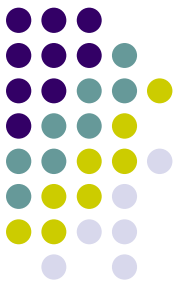
# Δέκτης (Receiver)

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

# Δέκτης

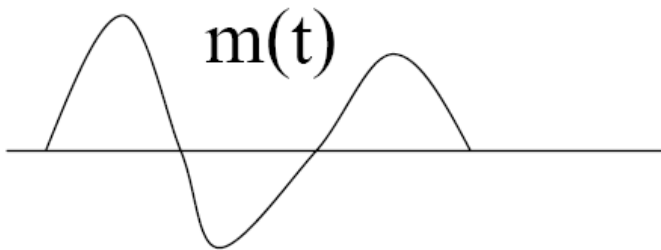


- Είναι  $m(t) = m'(t)$ ;
- Η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος είναι συνάρτηση του τύπου διαμόρφωσης, έντασης θορύβου και των άλλων παραμορφώσεων
  - Το αναλογικό σήμα  $m(t)$  μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή
  - Το ανακτώμενο σήμα  $m'(t)$  στο δέκτη σχεδόν πάντα είναι μια παραμορφωμένη εκδοχή του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



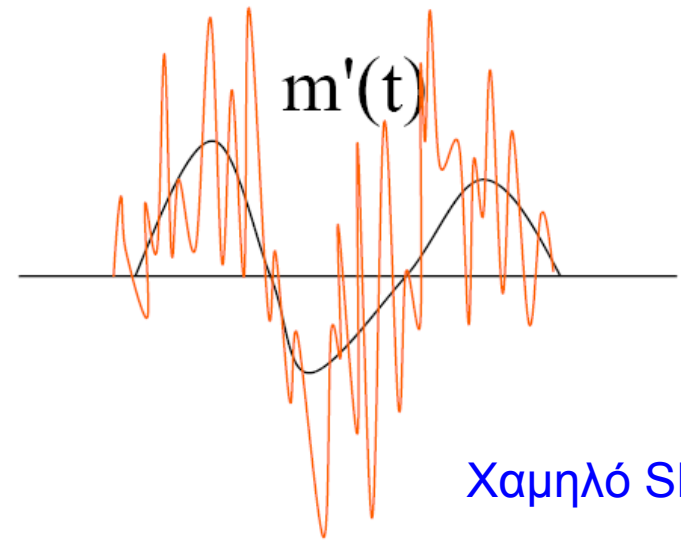
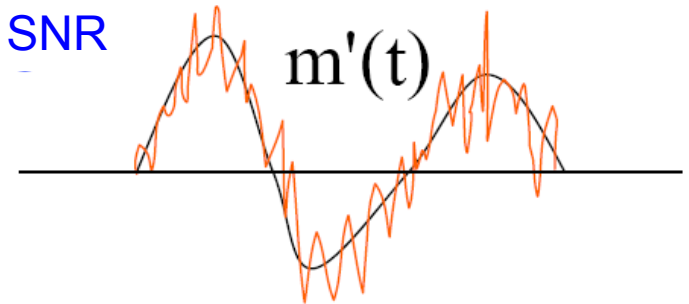
# Μέτρο ποιότητας

- Λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR)



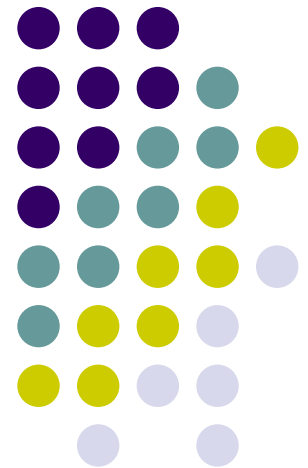
$$\text{SNR} = \frac{\text{Μέση ισχύς σήματος}}{\text{Μέση ισχύς θορύβου}}$$

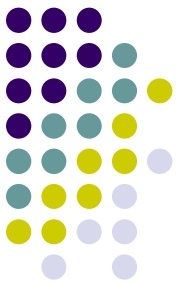
Υψηλό SNR



Χαμηλό SNR

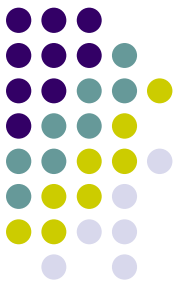
# Διαμόρφωση





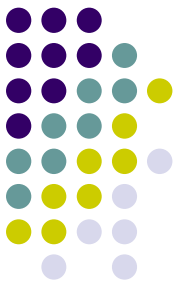
# Τι είναι διαμόρφωση;

- 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 (PAM) ή ενός φέροντος (ASK), τη φάση (PSK) ή το πλάτος και τη φάση (QAM)



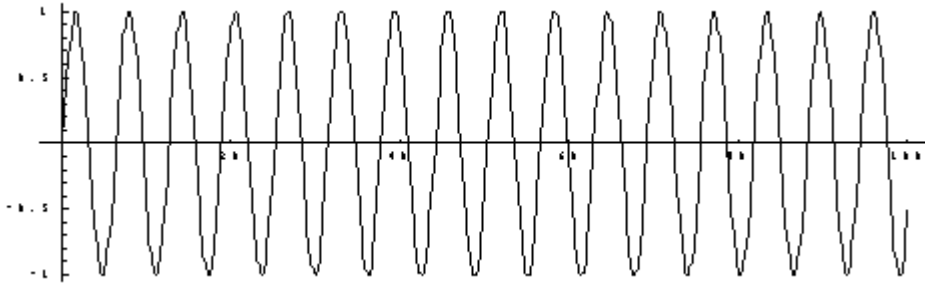
# Πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης

- 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 στο 1 m
- 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 (π.χ. FDM – Frequency Division Multiplexing)
- Η υλοποίηση είναι πιο εύκολη (με τις διαθέσιμες ηλεκτρονικές μονάδες)



# Αδιαμόρφωτο φέρον

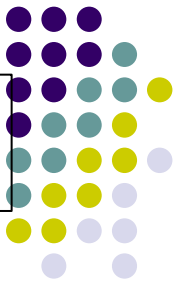
- Ημιτονικό σήμα με παραμέτρους το πλάτος  $A_c$ , συχνότητα  $f_c$  και φάση  $\varphi$ :



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

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



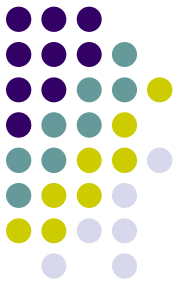


AM (Amplitude Modulation)  
ASK (Amplitude Shift Keying)

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

Η συχνότητα του φέροντος

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

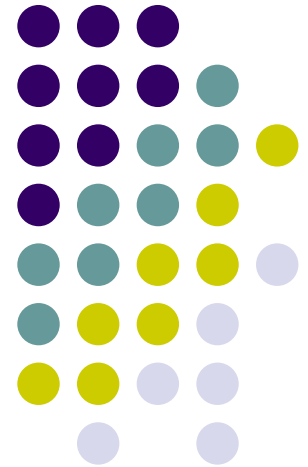


# Τι είναι αποδιαμόρφωση;

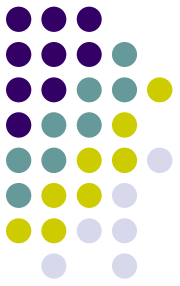
- Όταν ληφθεί το φέρον, η πληροφορία που το διαμόρφωσε αφαιρείται μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως
  - **φώρασης** (detection) ή
  - **αποδιαμόρφωσης** (demodulation)

# Ψηφιακό Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα

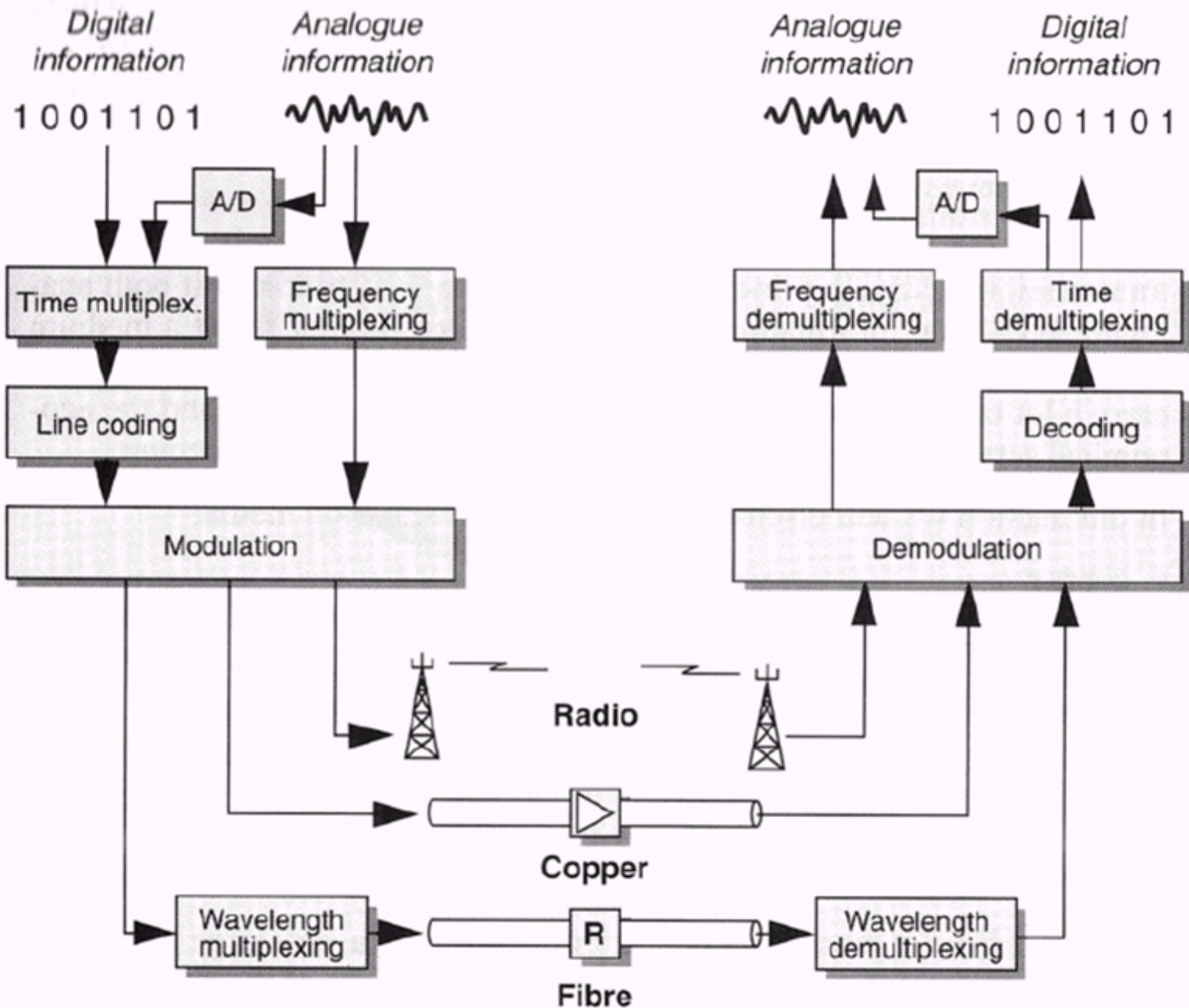
---



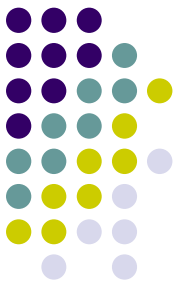
# Ψηφιακή μετάδοση πληροφορίας



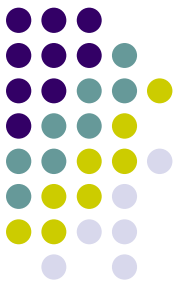
- Η παραδοσιακή θεώρηση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος περιλαμβάνει μια αναλογική πηγή (π.χ. φωνή)
- Για να μεταδοθεί όμως με ψηφιακό τρόπο αυτή η αναλογική κυματομορφή, πρέπει να μετατραπεί σε ψηφιακό σήμα
  - Δειγματοληψία
  - Κβάντιση
  - Κωδικοποίηση



# Ψηφιακή μετάδοση πληροφορίας

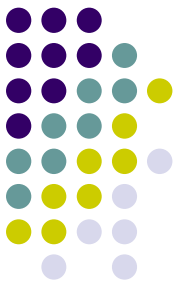


- Όμως, στα δίκτυα υπολογιστών, η πηγή πληροφορίας είναι ψηφιακή από τη φύση της
  - Η μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό δε θεωρείται μέρος του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, αλλά εφαρμογή των ανωτέρων στρωμάτων
- Εξασφάλιση της ορθότητας και ποιότητας της μετάδοσης μέσω
  - Διαμόρφωσης
  - Κωδικοποίησης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



## Γιατί ψηφιακή μετάδοση (2);

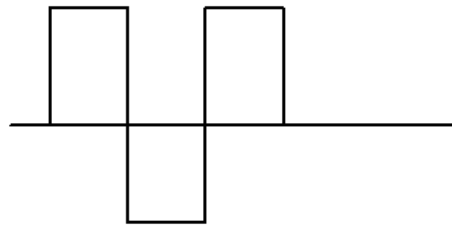
- Η πιστότητα του σήματος ελέγχεται πιο εύκολα στην ψηφιακή μετάδοση
  - Το ψηφιακό σήμα μπορεί να αναγεννηθεί εξαλείφοντας έτσι την επίδραση θορύβου
    - ο θόρυβος δε συσσωρεύεται
  - Το αναλογικό ενισχύεται οπότε
    - ο θόρυβος δρα προσθετικά



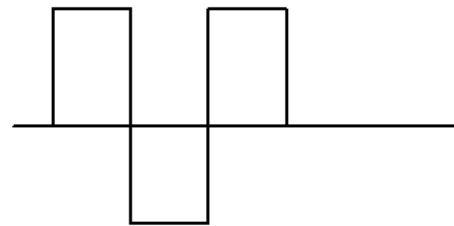
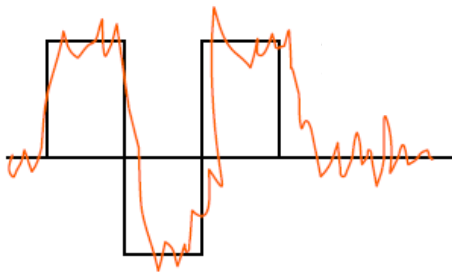
# Αναγέννηση ψηφιακού σήματος



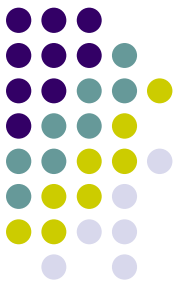
- Το ψηφιακό σήμα λαμβάνει συγκεκριμένες τιμές



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



# Ψηφιακός αναγεννητής



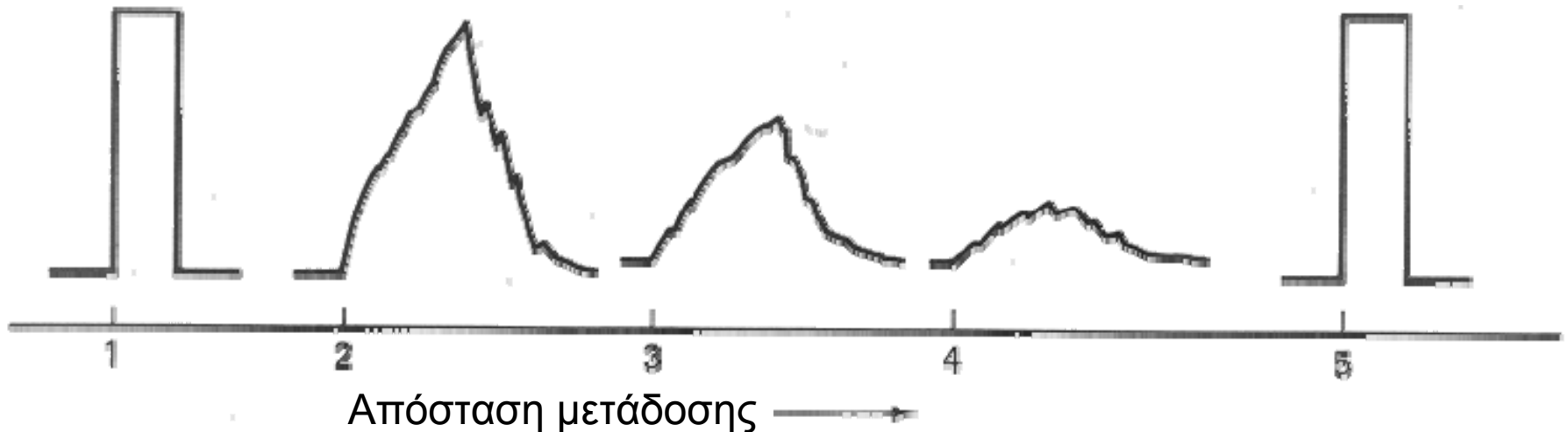
Αρχικός  
παλμός

Μικρή  
παραμόρφωση

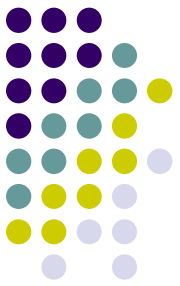
Αρκετή  
παραμόρφωση

Μεγάλη  
παραμόρφωση

Αναγέννηση  
παλμού



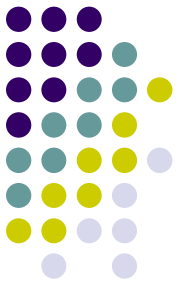
Παραμόρφωση παλμού και αναγέννηση



## Γιατί ψηφιακή μετάδοση (3);

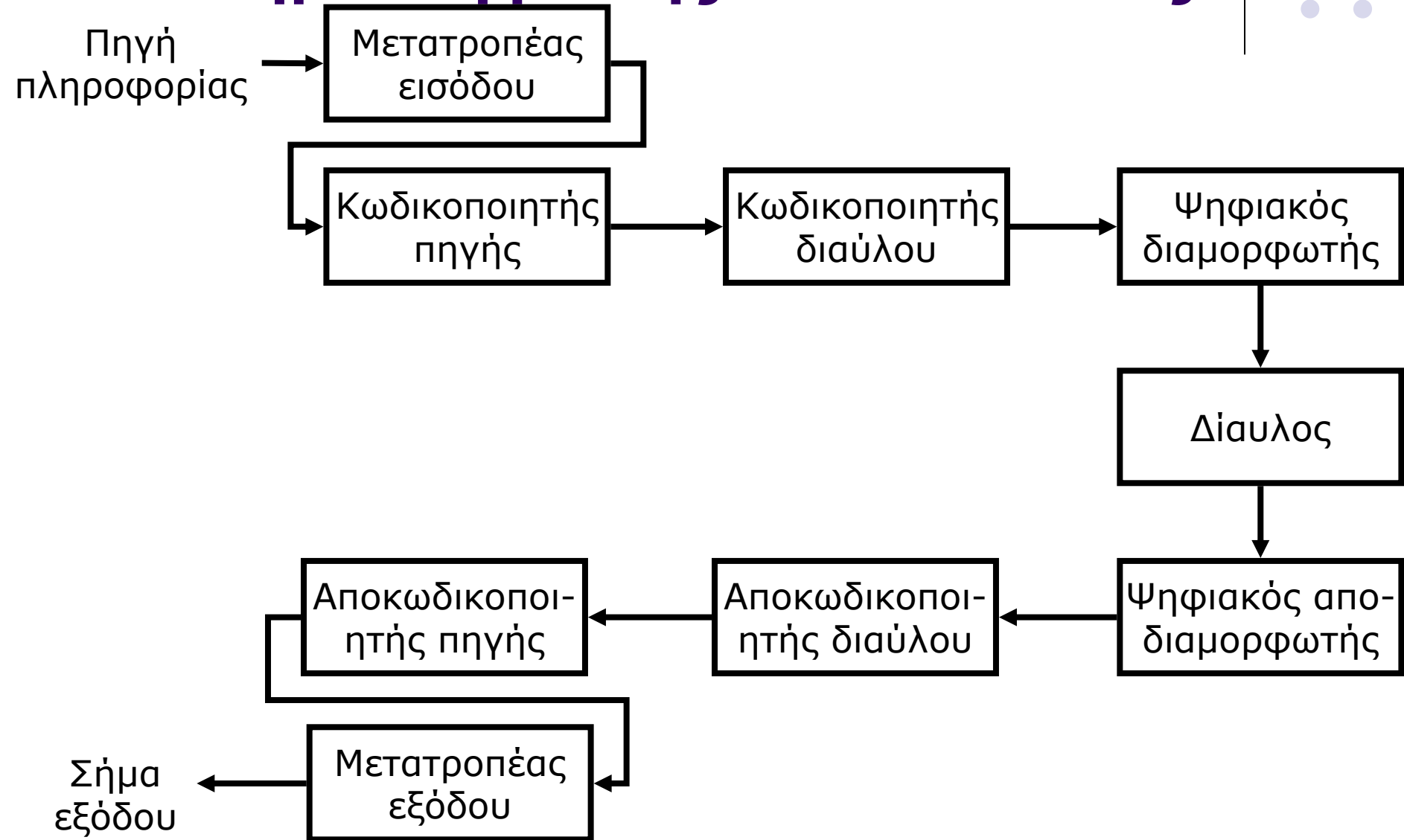
- Μπορούμε να εξαλείψουμε την πλεονάζουσα πληροφορία του αναλογικού σήματος
  - Μικρότερες απαιτήσεις εύρους ζώνης
- Δεδομένα από διαφορετικές πηγές (φωνή, βίντεο, κλπ) μπορούν να μεταδοθούν πάνω από το ίδιο τηλεπικοινωνιακό σύστημα
- Διασφάλιση απόρρητου με κρυπτογράφηση
- Τα ψηφιακά συστήματα είναι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

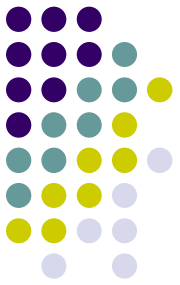
# Μειονεκτήματα ψηφιακής μετάδοσης



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

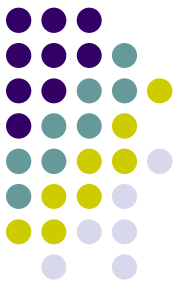
# Σύστημα Ψηφιακής Επικοινωνίας





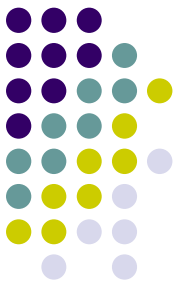
# Κωδικοποίηση πηγής

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



# Κωδικοποίηση διαύλου

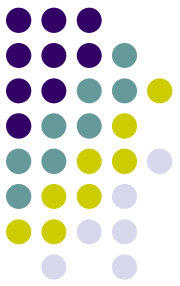
- Χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του θορύβου που εισάγει ο δίαυλος
- Εισάγει “πλεονασμό” για προστασία από λάθη
  - Αναγνώριση (και διόρθωση) λαθών που εισάγονται από
    - Θόρυβο (noise)
    - Παρεμβολή (interference)
    - Παραμόρφωση (distortion)
  - Βασικές αρχές
    - Τετριμμένο: επανάληψη  $m$  φορές
    - 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  $s_1(t)$

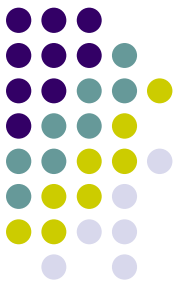




# Ψηφιακή διαμόρφωση

- 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

# Αποδιαμόρφωση

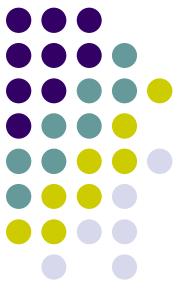


- Επεξεργασία των αλλοιωμένων από τη μετάδοση στον δίαυλο κυματομορφών
- **Σύνοψη** κάθε κυματομορφής σε ένα αριθμό που αποτελεί εκτίμηση του μεταδοθέντος συμβόλου
- Σε περίπτωση δυαδικής διαμόρφωσης λαμβάνει μια
  - Δυαδική απόφαση, εάν αποφαίνεται 0 ή 1
  - Τριαδική απόφαση, εάν αποφαίνεται 0 ή 1 ή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

# Αποκωδικοποίηση διαύλου

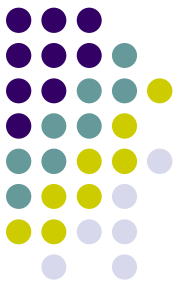


- Επεξεργασία της εξόδου του αποδιαμορφωτή για την αφαίρεση τυχόντος πλεονασμού που εισήγαγε ο κωδικοποιητής
- Πιθανότητα σφάλματος αποκωδικοποίησης
  - Η πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος εξαρτάται από τον τύπο διαμόρφωσης, κωδικοποίησης, κυματομορφές, ισχύ πομπού, χαρακτηριστικά διαύλου



# Μέτρο ποιότητας

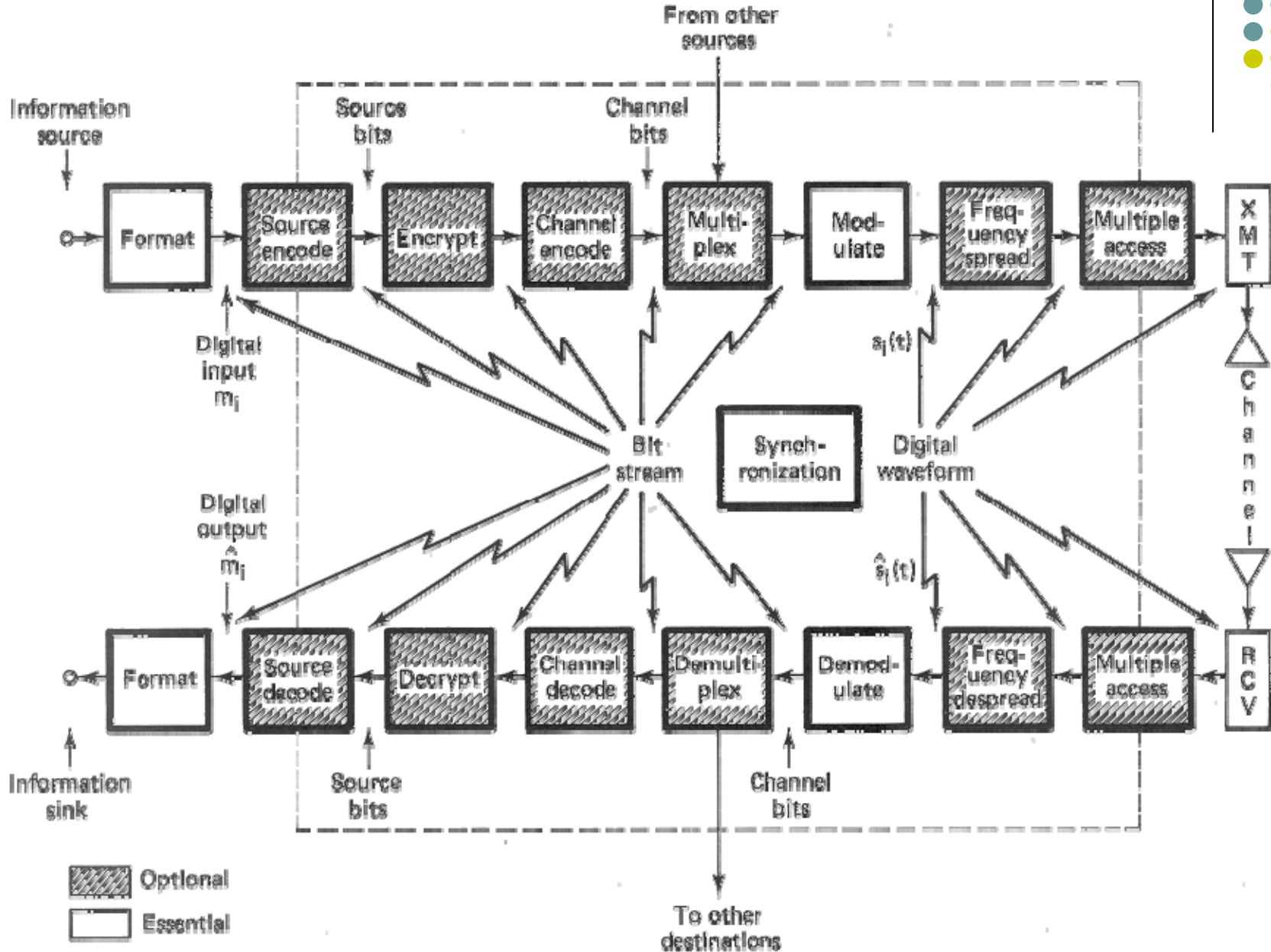
- Η μέση πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος bit στην έξοδο του αποκωδικοποιητή
  - Αποτελεί μέτρο της επίδοσης του συνδυασμού αποδιαμορφωτή – αποκωδικοποιητή



# 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

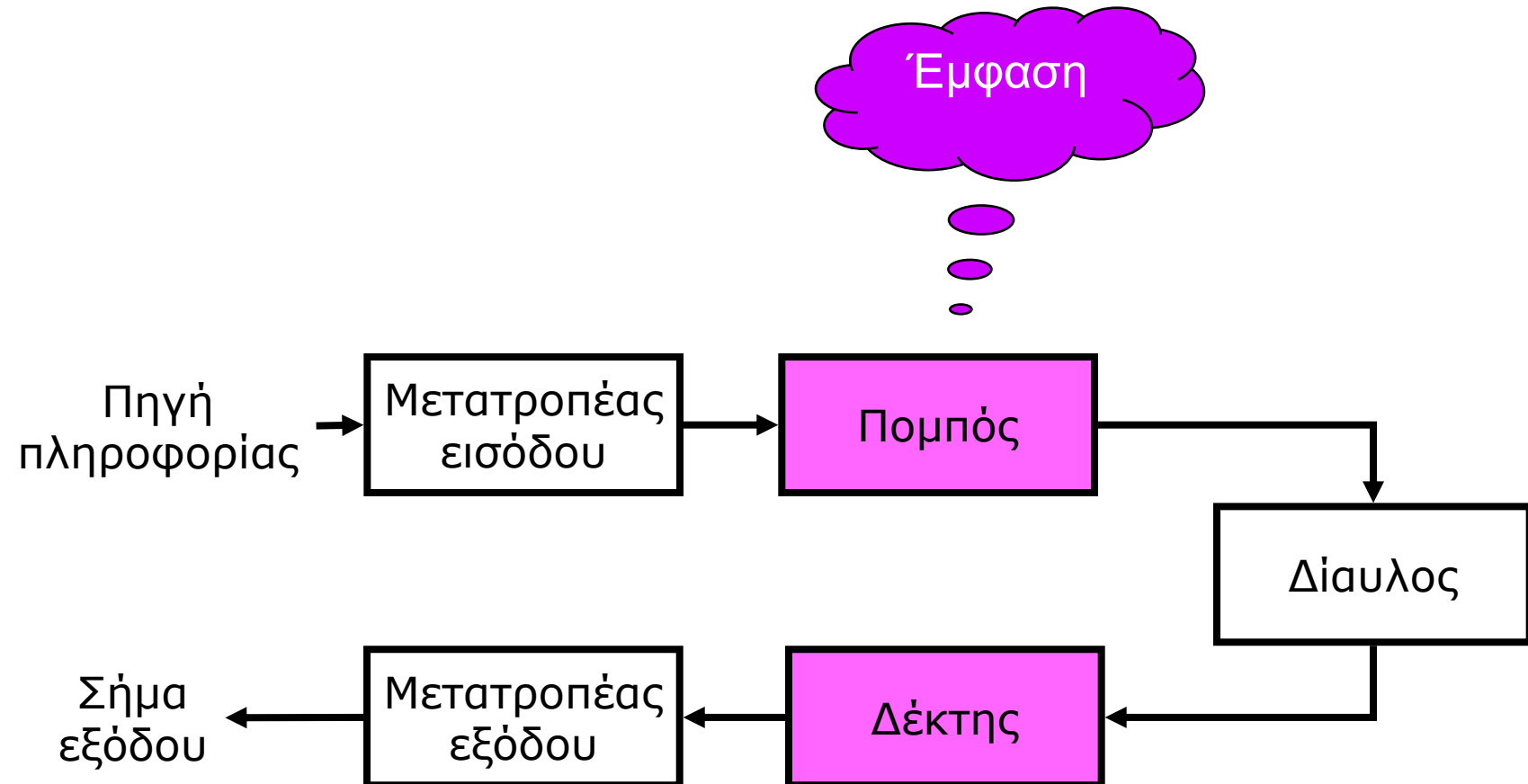
# Τυπικό διάγραμμα



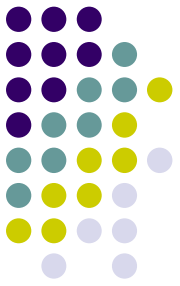


# Σύνοψη

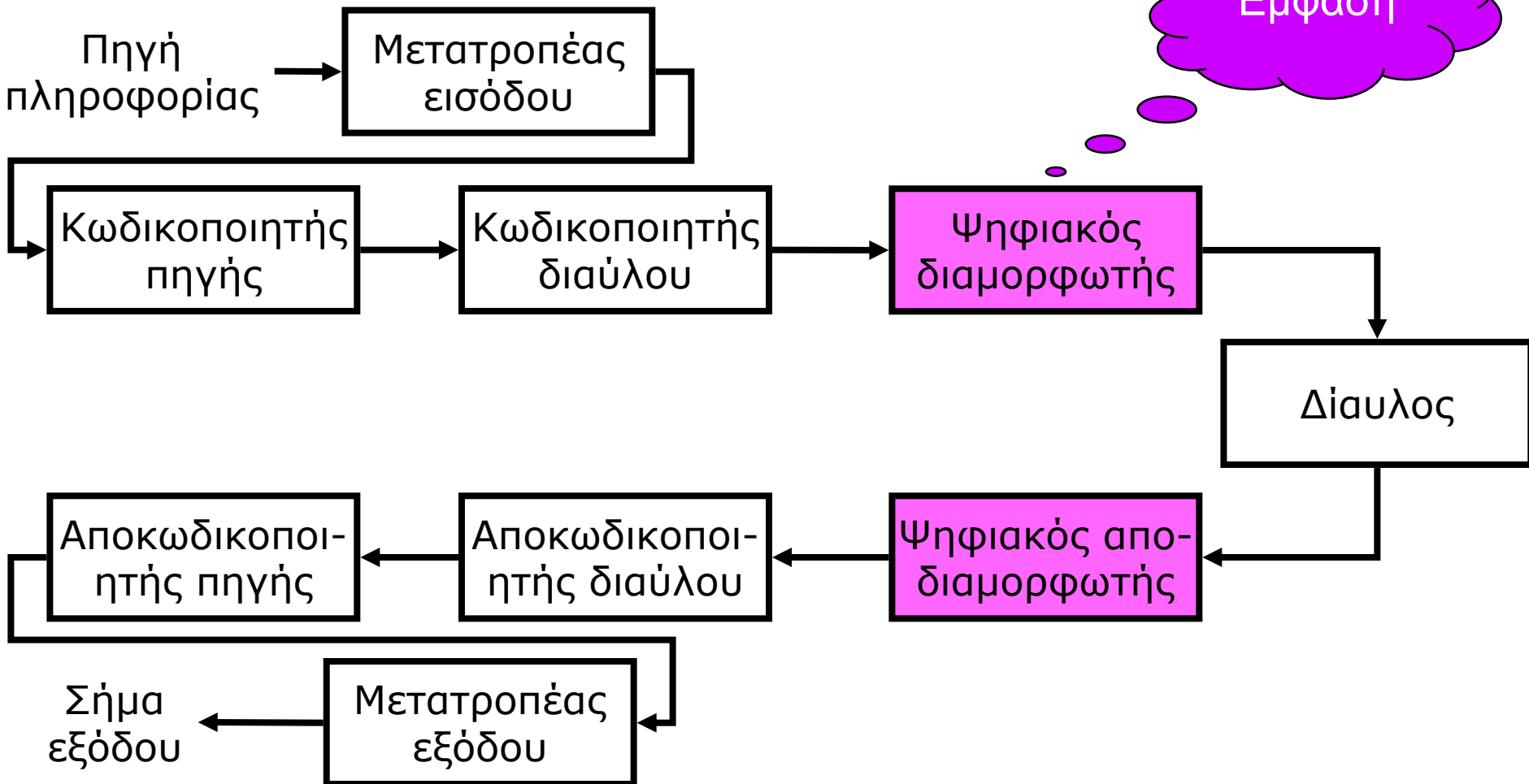
- Αναλογικά συστήματα επικοινωνίας



# Σύνοψη



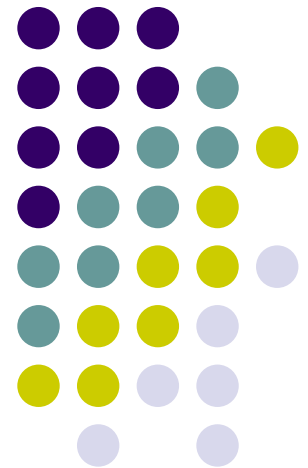
- Ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας

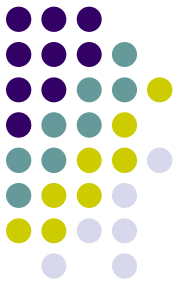




# Βασικές έννοιες

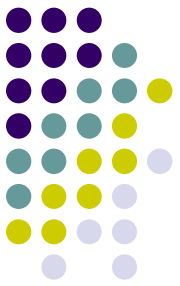
---





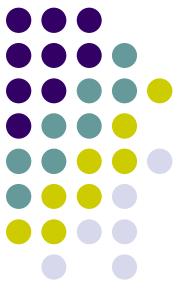
# Βασικές τεχνικές έννοιες

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



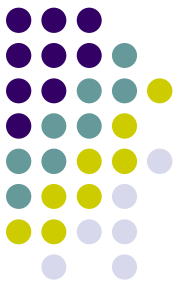
# Θεμελιώδη όρια

- 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;



# 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



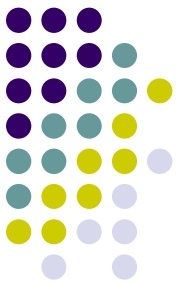
# Ρυθμός μετάδοσης

- 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 εύρος ζώνης  $W$  (Nyquist bit rate) είναι

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

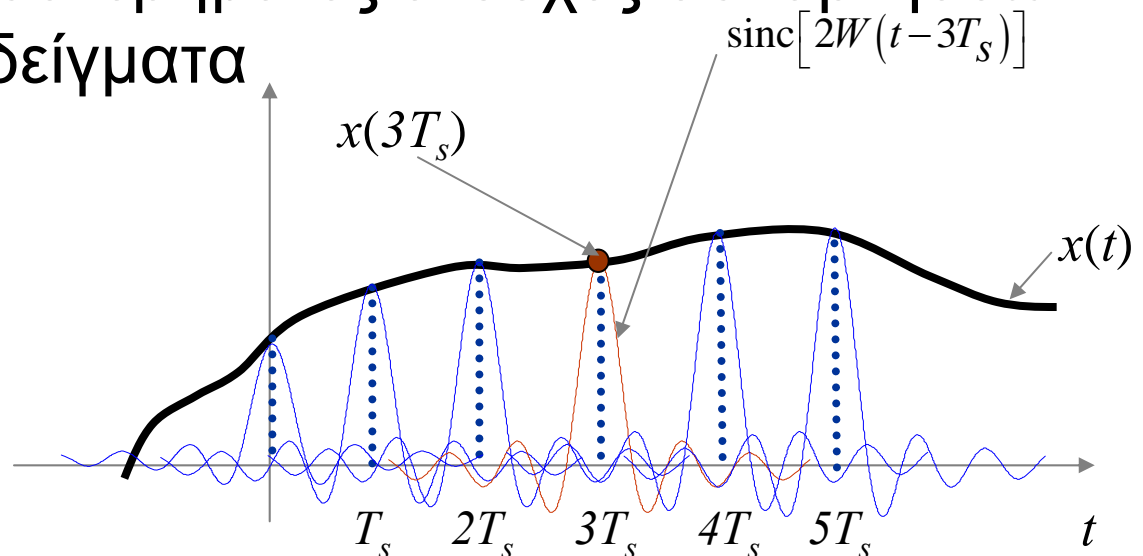
- και επιτυγχάνεται με σηματοδοσία παλμών sinc

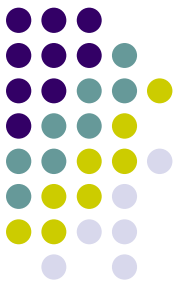
$$g(t) = \sin(2\pi Wt) / (2\pi Wt)$$



# 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





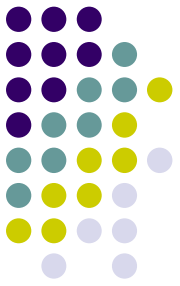
# Χωρητικότητα διαύλου

- Εάν το μέγιστο πλάτος σήματος είναι περιορισμένο  $A_{max}$  (περιορισμός σταθερής ισχύος) και η διακριτική ικανότητα πλάτους είναι  $A_\delta$  (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

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

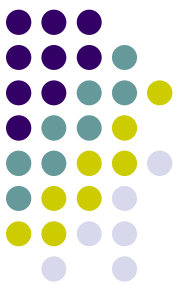
- όπου  $S$  η μέση ισχύς σήματος,  $N = W N_0$  η μέση ισχύς θορύβου,  $N_0$  η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου,  $W$  το εύρος ζώνης μετάδοσης

# 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

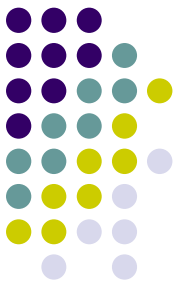
- Ένας τηλεπικοινωνιακός δίαυλος έχει εύρος ζώνης  $W = 1 \text{ MHz}$  και  $S/N = 63$ 
  - Ποιος είναι ο ρυθμός μετάδοσης και πόσες στάθμες σήματος απαιτούνται;

- 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

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



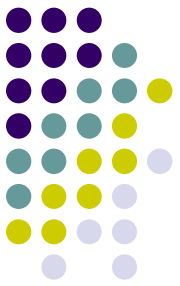
## Παράδειγμα 2: το μόντεμ 56k

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

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

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

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



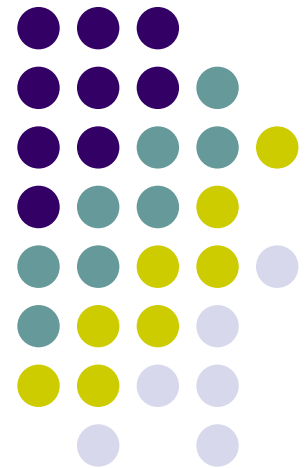
## Παράδειγμα 2: το μόντεμ 56k

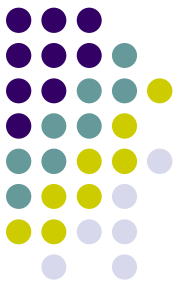
- Πώς τα καταφέρνει σε τέτοιο περιβάλλον;
  - Εκτιμά το SNR
  - Ανιχνεύει τα λάθη
  - Αυξάνει το ρυθμό μέχρι να εμφανισθούν λάθη
- Μεταπίπτει σε χαμηλότερο ρυθμό για να επιτευχθεί ασφαλής μετάδοση
  - Έχουν ορισθεί στάνταρ ρυθμοί και πρωτόκολλα για τη συνεννόηση
- Ποια σηματοθορυβική σχέση απαιτείται;

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

# Τηλεπικοινωνιακοί δίαυλοι

---

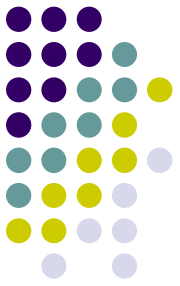


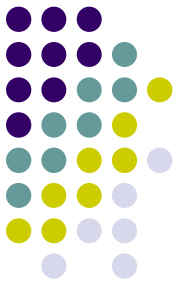


# Τηλεπικοινωνιακοί δίαυλοι

- 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

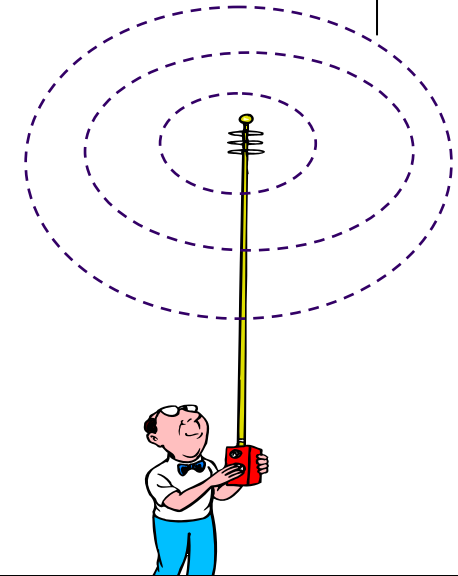
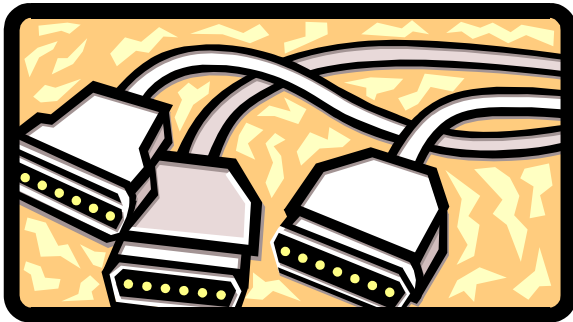
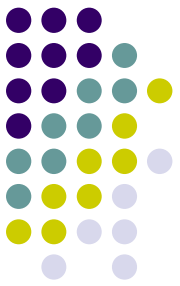




# Εύρος ζώνης διαύλων

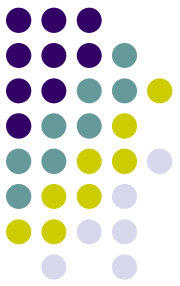
- Διπλαγωγοί: μερικές εκατοντάδες kHz
- Ομοαξονικό καλώδιο: μερικές εκατοντάδες MHz
- Κυματοδηγός: μερικά GHz
- Οπτική ίνα: μερικά THz

# Ενσύρματος ή ασύρματος;



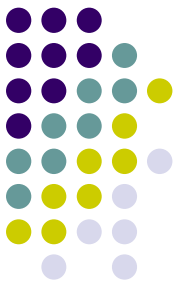
Ενσύρματος	Ασύρματος
Κάθε καλώδιο είναι διαφορετικός δίαυλος	Το μέσο μοιράζεται σε όλους
Μικρή απόσβεση	Μεγάλη απόσβεση
Μικρές παρεμβολές	Μεγάλες παρεμβολές





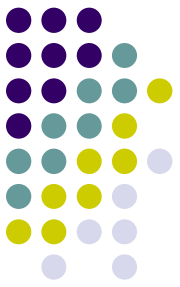
# Ασύρματοι δίαυλοι

- 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)

Εκπομπή (αναλογική)

Δορυφορική εκπομπή

CB, Walkie-Talkie

2-φορη επικοινωνία  
(αναλογική)

Ασύρματο τηλέφωνο

Δορυφορικές Ζεύξεις

Σύστημα κινητής τηλεφωνίας

Ασυρματικός συνδρομητικός βρόχος (WLL)

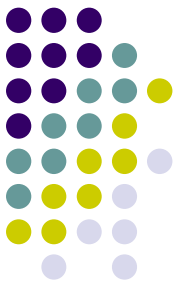
Μικροκυματικές ζεύξεις

2-φορη επικοινωνία  
(ψηφιακή)

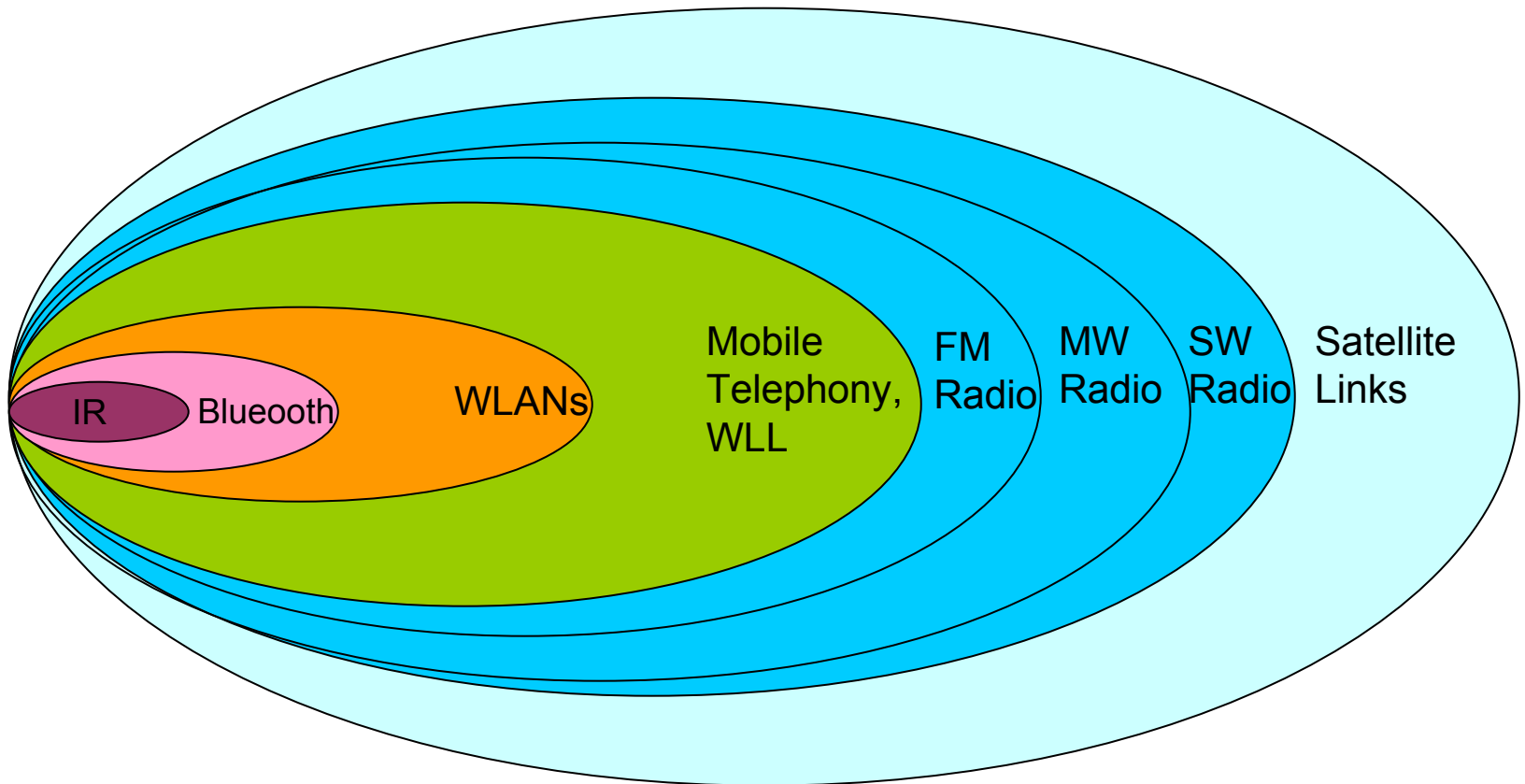
Ασυρματικά LAN

Υπέρυθρα (Infrared) LAN

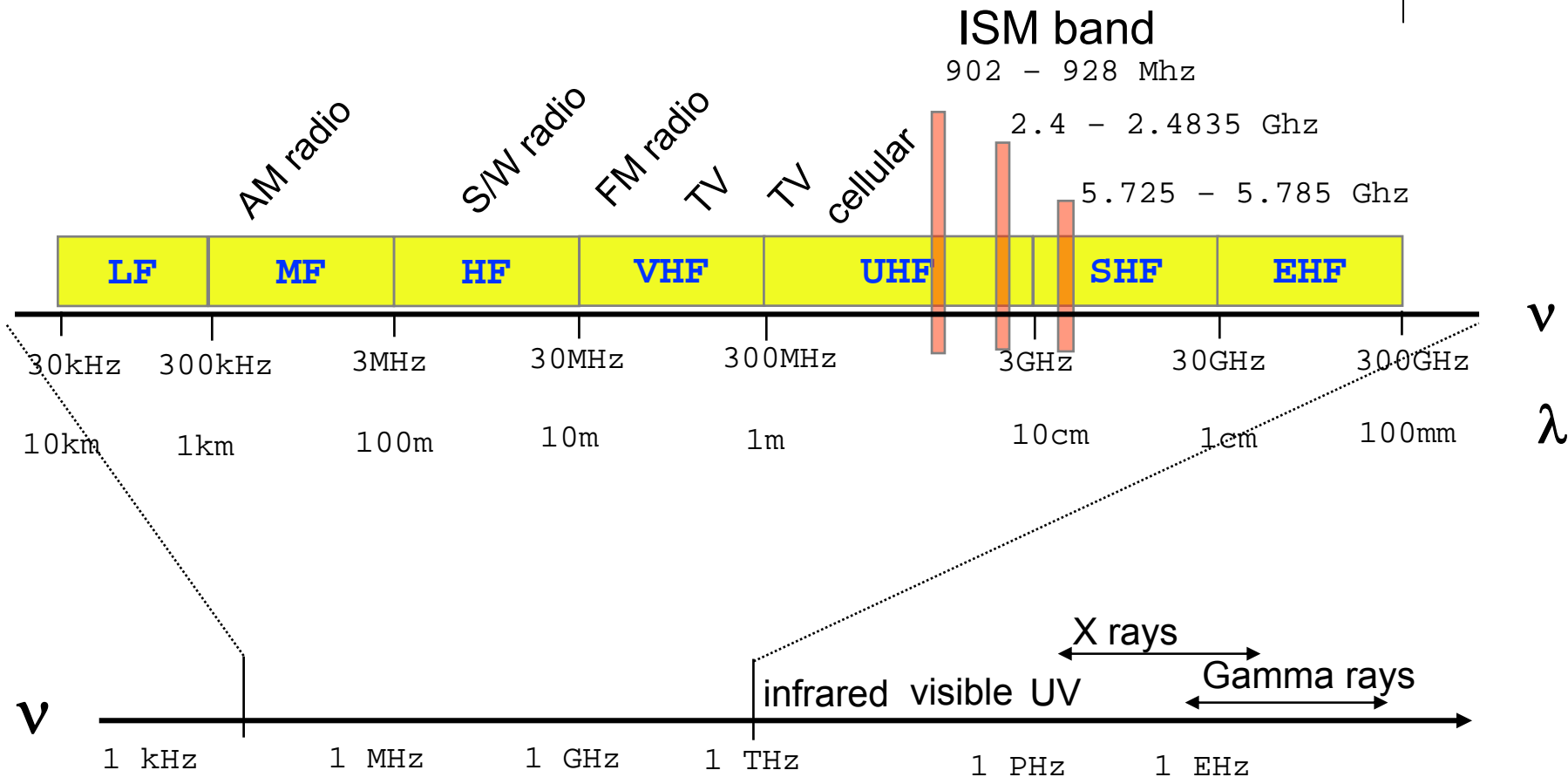
# Ασύρματοι δίαυλοι: εμβέλεια



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

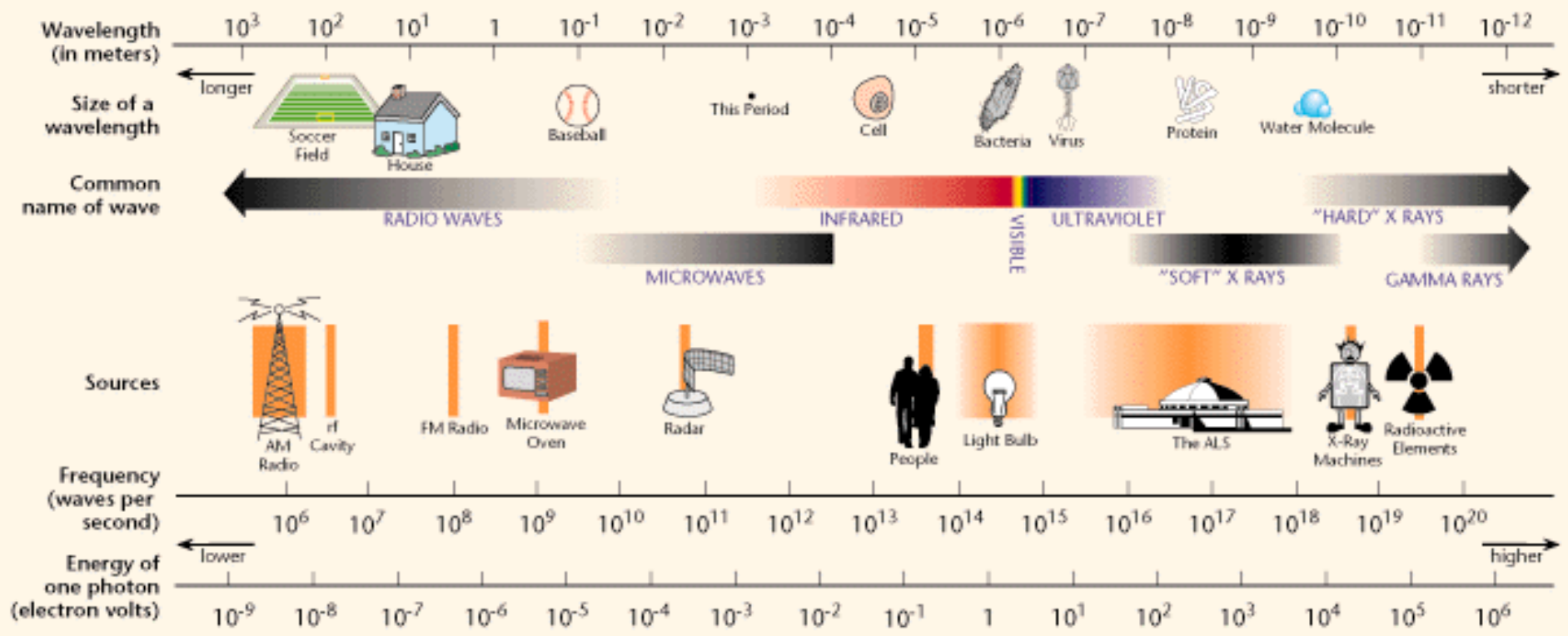


# Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα



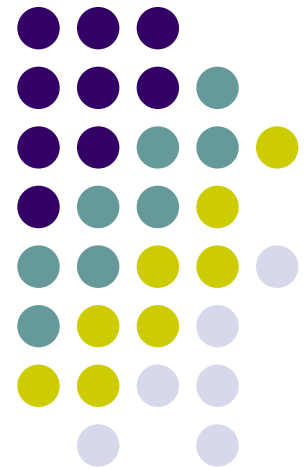


# THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

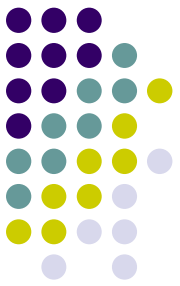


# Μοντελοποίηση

---

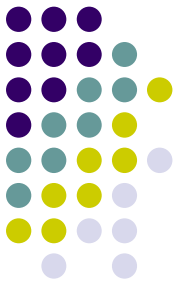


# Φυσικό μέσο



- 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

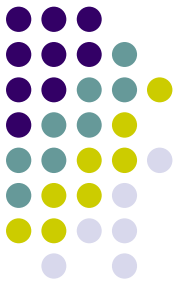




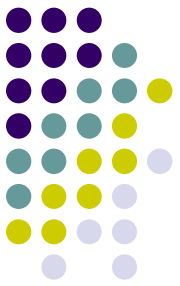
# Επιλογή φυσικού μέσου

- 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

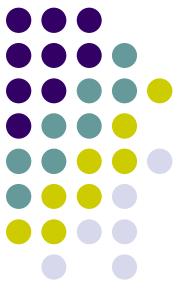


- Συνήθως ο δίαυλος παριστάνεται μαθηματικά ως **φίλτρο** με παραμέτρους:
  - Ντετερμινιστικές
  - Τυχαίες
  - Χρονικά μεταβαλλόμενες
  - Γραμμικές/Μη γραμμικές



# Παράμετροι διαύλων

- Απόσβεση [dB/Km],
  - Συνάρτηση μεταφοράς
  - Αντίσταση προσαρμογής [ $\Omega$ ]
  - 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  $t_d(f) = -\arg H(f)/(2\pi f)$

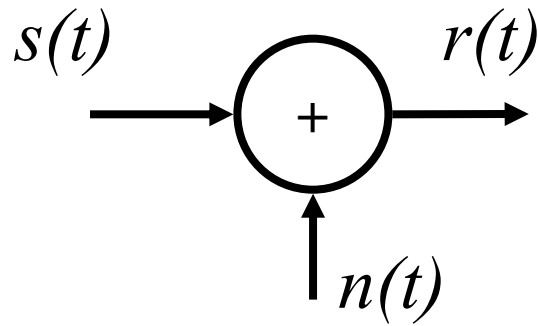
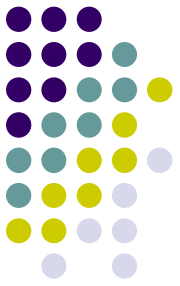
- Στον ιδανικό δίαυλο όλες οι συχνότητες διατηρούν τις σχετικές θέσεις των φάσεων τους καθώς μεταδίδονται μέσω του διαύλου

# 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



$$r(t) = \alpha s(t) + n(t)$$

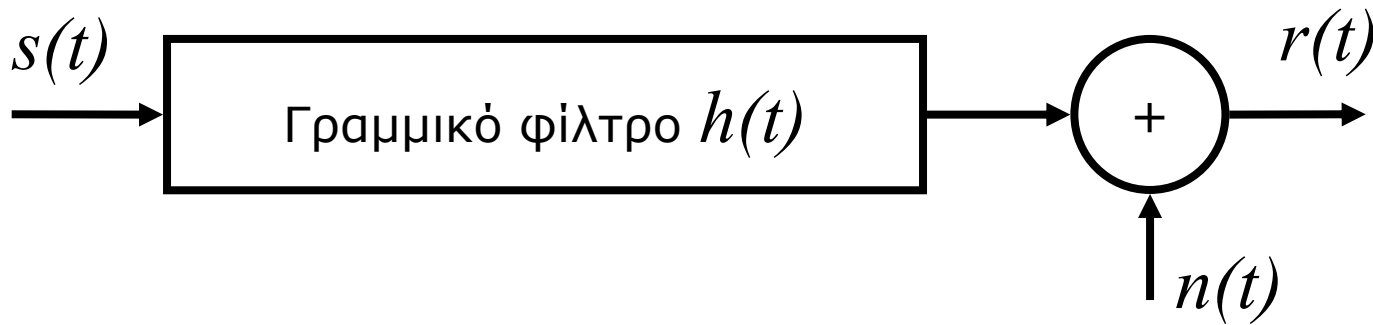
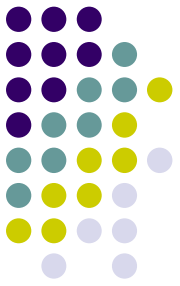
όπου  $\alpha < 1$  η εξασθένιση που εισάγει ο διάυλος

# Μοντέλο τηλεπικοινωνιακού διαύλου



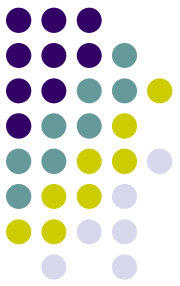
- Ο πιο συνηθισμένος δίαυλος είναι γραμμικός προσθετικός με λευκό Γκαουσιανό θόρυβο
  - AWGN (Additive White Gaussian Noise)
- Σε διαύλους AWGN η έξοδος είναι η συνέλιξη της κρουστικής απόκρισης του διαύλου με το σήμα εισόδου συν ένας προσθετικός όρος θορύβου

# 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

- Συνήθως λόγω ύπαρξης μη γραμμικών στοιχείων, έστω ότι η έξοδος είναι

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

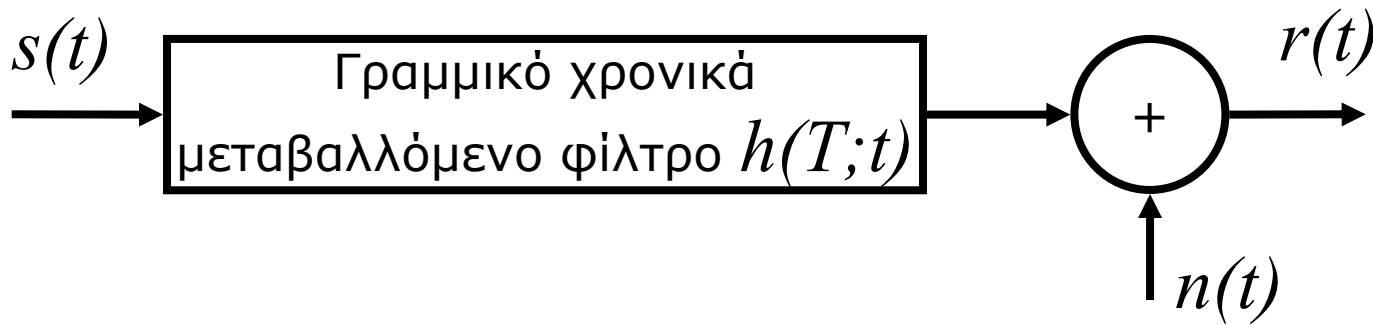
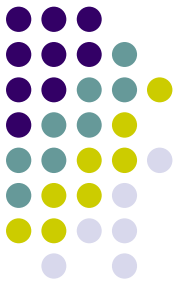
- Υποθέτοντας είσοδο  $x(t) = \cos \omega_0 t$ , τότε

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

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

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

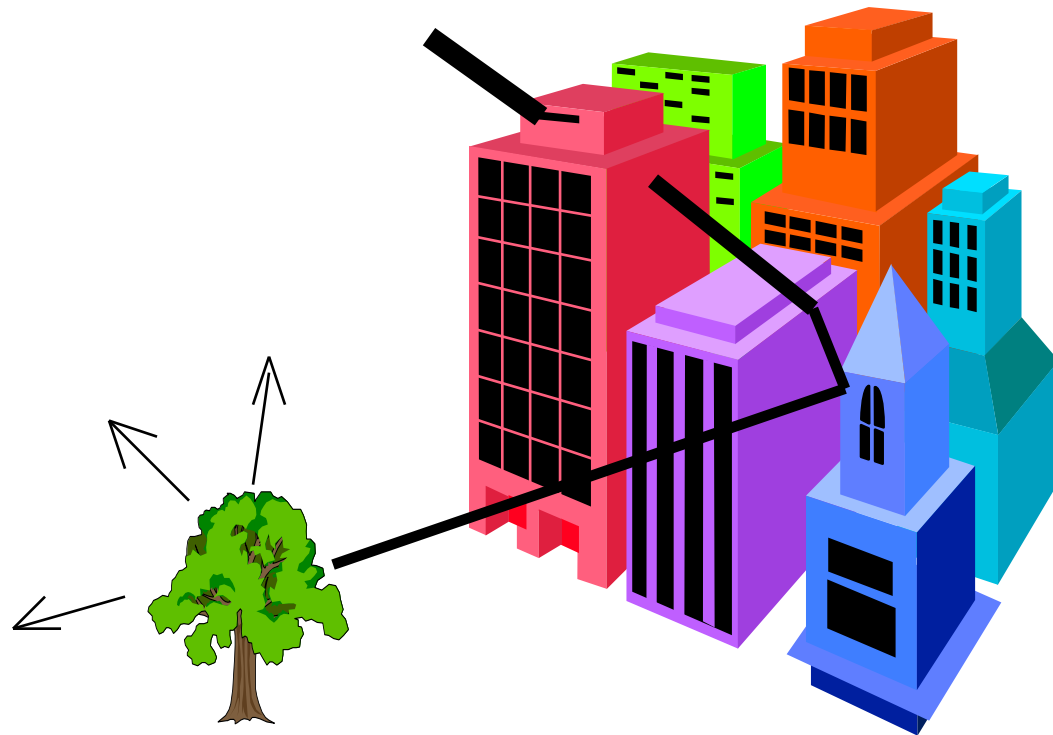
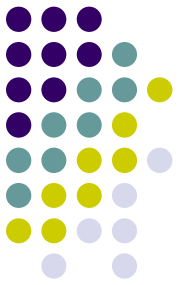
# Χρονικά μεταβαλλόμενος δίαυλος



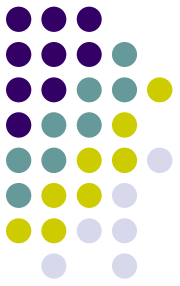
$$r(t) = s(t) \otimes h(T;t) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(T;\tau) s(t - \tau) d\tau + n(t)$$

όπου  $T$  η ηλικία του διαύλου

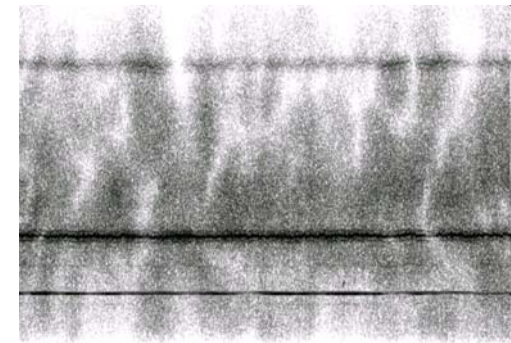
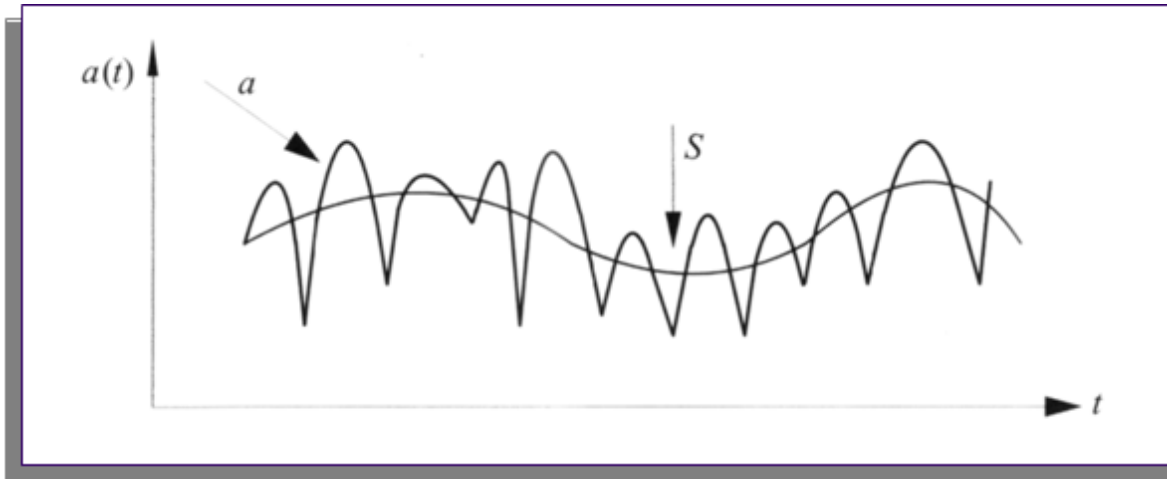
# Διάδοση κυμάτων



# Χρονικά μεταβαλλόμενοι δίαυλοι



- Διαλείψεις
  - Αργές ή γρήγορες μεταβολές στη λαμβανόμενη ισχύ σήματος

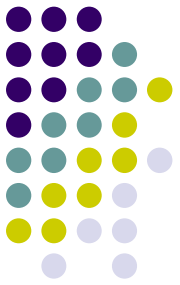


# Αργές διαλείψεις

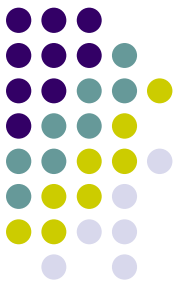


- Το πλάτος και η φάση του σήματος μπορούν να θεωρηθούν σταθερά κατά τη διάρκεια της χρήσης του διαύλου
- Το σήμα που λαμβάνεται επηρεάζεται από εμπόδια μεταξύ του πομπού και του δέκτη (shadowing)
- Η τοπική μέση τιμή της ισχύος του σήματος έχει μια τυχαία συνιστώσα μηδενικής μέσης τιμή που ακολουθεί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

# Γρήγορες διαλείψεις



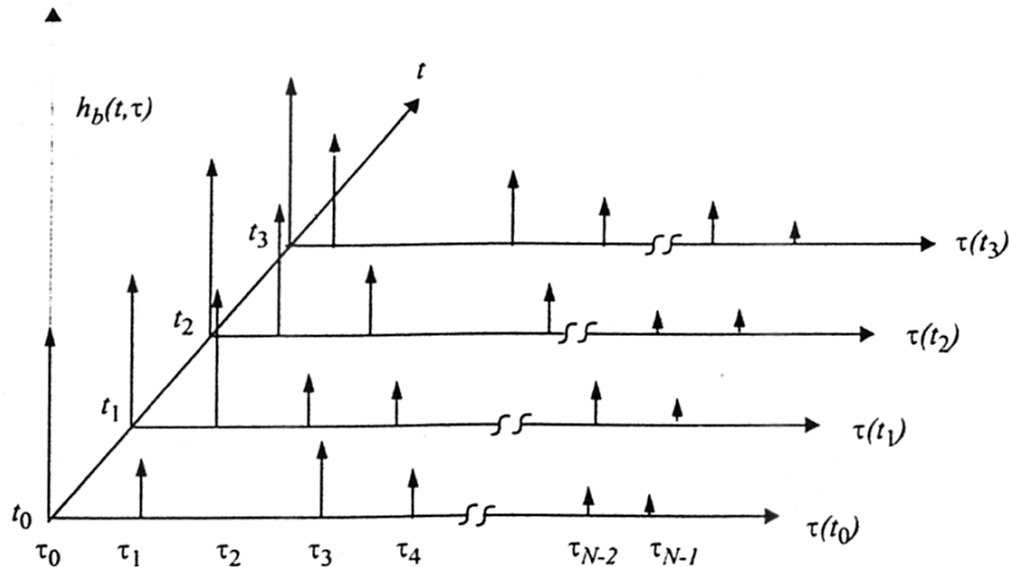
- Το πλάτος και η φάση του σήματος αλλάζουν κατά τη διάρκεια της χρήσης του διαύλου
- Το σήμα συνήθως προκύπτει από την υπέρθεση επί μέρους σημάτων που έχουν ακολουθήσει διαφορετικές διαδρομές (multipath)
- Η τοπική μέση τιμή της ισχύος του σήματος έχει μια τυχαία συνιστώσα που ακολουθεί κατανομή Rice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



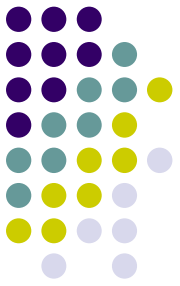
# Πολλαπλές διαδρομές

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

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



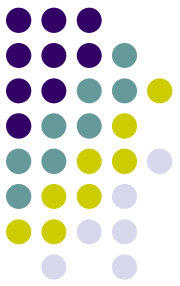
# Απόκριση διαύλου πολλαπλών διαδρομών



- 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

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