



# Μάθημα Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες

Ενότητα 2η

Τεχνολογία Τηλεπικοινωνιών

Μάθημα 7<sup>ο</sup> - 8<sup>ο</sup>

ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Τομέας Επικοινωνιών και Επεξεργασίας Σήματος

Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών



# Περιεχόμενα

## ● Α ΜΕΡΟΣ

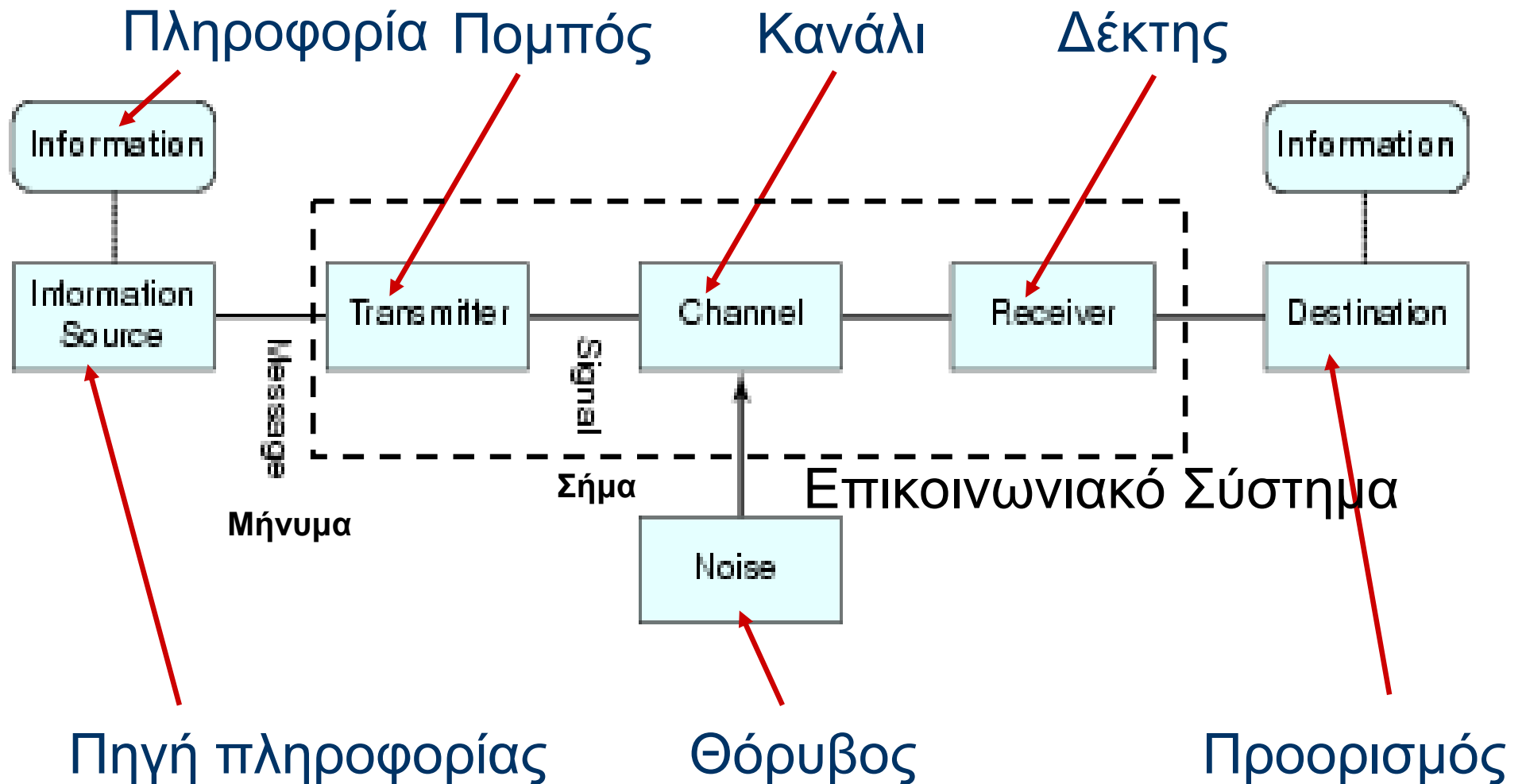
- Σύντομη ανασκόπηση της Τεχνολογίας
  - Ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα
  - Μικροκυματικές διατάξεις
  - Οπτικές Διατάξεις και οπτικοηλεκτρονική

## ● Β ΜΕΡΟΣ

- Γενικά χαρακτηριστικά του καναλιού
  - Φυσικά μέσα μετάδοσης
    - Ενσύρματα μέσα Μετάδοσης
      - ✓ Οπτικές ίνες
    - Ασύρματη Μετάδοση -χαρακτηριστικά



# Σύστημα Επικοινωνιών





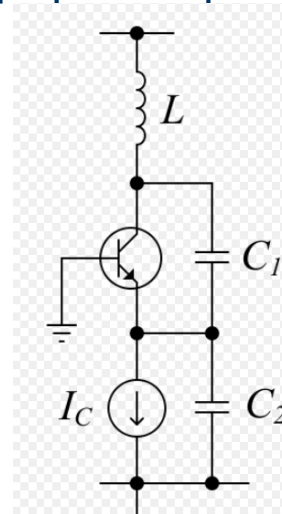
# Ηλεκτρονική και Τηλεπικοινωνίες

- Η εξέλιξη των επικοινωνιών υπήρξε Θεαματική σε όλη τη διάρκεια του 20ού αιώνα, ιδιαίτερα από το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο και μετά
- Επιτεύγματα της περιόδου αυτής είναι το ραντάρ, τα μικροκυματικά συστήματα, το τρανζίστορ και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι και τα laser
- Μέχρι το 1950 ορίζαμε την Ηλεκτρονική ως τη σπουδή των φαινομένων της αγωγιμότητας στο κενό, στα αέρια, ή στους ημιαγωγούς, καθώς και τη χρήση των διατάξεων που βασίζονται στα φαινόμενα αυτά
- ΣΗΜΕΡΑ: Η Ηλεκτρονική περιγράφεται ως το σύνολο των τεχνικών που χρησιμοποιούν τις μεταβολές φυσικών μεγεθών (ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, πληθυσμών φωτονίων και ηλεκτρονίων) για να συλλάβουν, να διαβιβάσουν και να εκμεταλλευτούν μια πληροφορία. Η πληροφορία και η ανταλλαγή αυτής (δηλ. η επικοινωνία), γίνεται επικρατούσα μορφή-στόχος της νέας Ηλεκτρονικής.
- Όλες αυτές οι εξελίξεις βασίζονται στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των:
  - Ολοκληρωμένων ημιαγωγικών κυκλωμάτων
  - Μικροκυματικών διατάξεων  $3\text{GHz} < f < 300\text{GHz}$
  - Οπτικοηλεκτρονικών διατάξεων (οπτικές συχνότητες -υπέρυθρο)



# Πομποί - Δέκτες

- Οι πομποί είναι καθετί που στέλνει πληροφορία σε έναν παρατηρητή (δέκτης)
- **Ο πομπός** αποτελείται από ένα σύστημα ηλεκτρικής τροφοδοσίας, **έναν ταλαντωτή**, έναν διαμορφωτή και ενισχυτές.
- **Ο δέκτης** αποτελείται από ένα σύστημα ηλεκτρικής τροφοδοσίας, ένα αποδιαμορφωτή και ενισχυτές
- Ο **διαμορφωτής** αποτυπώνει την πληροφορία προς μετάδοση σε ένα «μονοχρωματικό» φέρον  $\cos(2\pi f_0 t)$  το οποίο παράγεται από τον **ταλαντωτή**.
- Συχνά, όπως π.χ. στα κινητά τηλέφωνα, οι πομποί συνδυάζονται με τα αντίστοιχα κυκλώματα δεκτών. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται **πομποδέκτες**.
- Οι πομποί/δεκτες είναι δυνατόν να συνδέονται με κεραιές οι οποίες μετατρέπουν το ηλεκτρικό ρεύμα σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο διαδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας.



Ταλαντωτής  
(Colpitts)

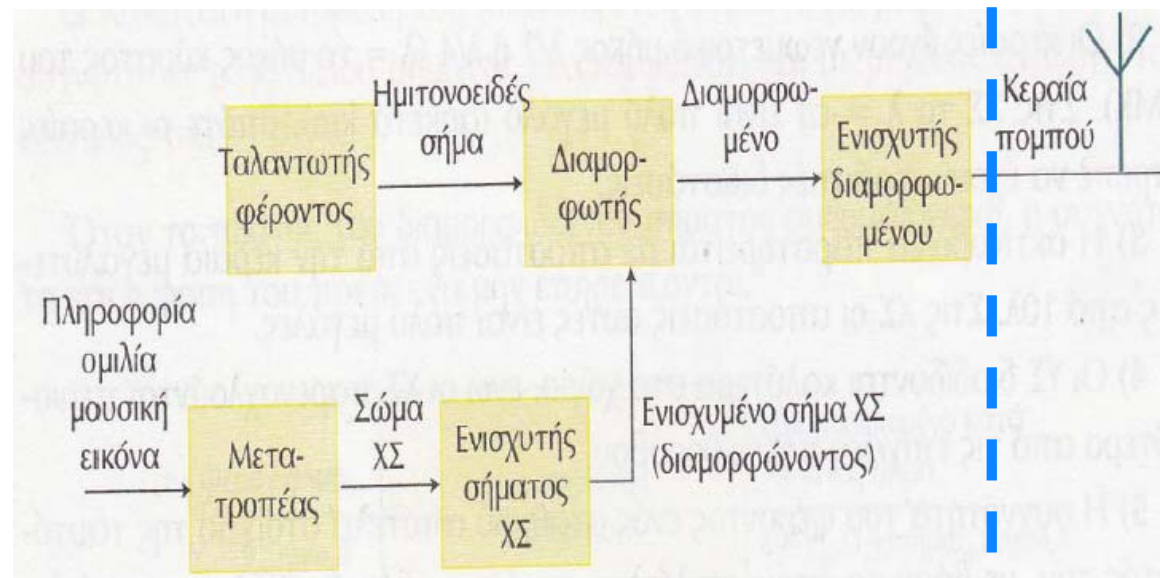


# Πομπός - Αναλογικό Σύστημα

**Πομπός** λέγεται το τμήμα του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, το οποίο παίρνει το ηλεκτρικό σήμα της πληροφορίας και το μετατρέπει σε κατάλληλη μορφή, ώστε να μπορεί να μεταδοθεί.

Η μετατροπή αυτή περιλαμβάνει:

- Ενίσχυση του σήματος
- Παραγωγή ενός άλλου σήματος πολύ μεγαλύτερης συχνότητας, το οποίο ονομάζεται φέρον ή φορέας
- Διαμόρφωση του φέροντος
- Ενίσχυση του διαμορφωμένου σήματος
- Εκπομπή του διαμορφωμένου σήματος





# Πομπός - Σύστημα ψηφιακό

- Σύμφωνα με τα προηγούμενα ο πομπός σε ένα σύστημα ψηφιακό πρέπει να υλοποιεί:
  - Μορφοποίηση και κωδικοποίηση πηγής
  - Διαμόρφωση
  - **Εξισορρόπηση καναλιού ή ισοστάθμιση**
  - Κωδικοποίηση καναλιού
  - Πολυπλεξία
  - Διασπορά φάσματος
  - Κρυπτοπροστασία
  - Συγχρονισμός
- Ο δέκτης υλοποιεί τις αντίστροφες διαδικασίες αλλά λαμβάνει υπόψη και το κανάλι κάνοντας διορθώσεις κατά την ανάκτηση του σήματος



# Ο δέκτης

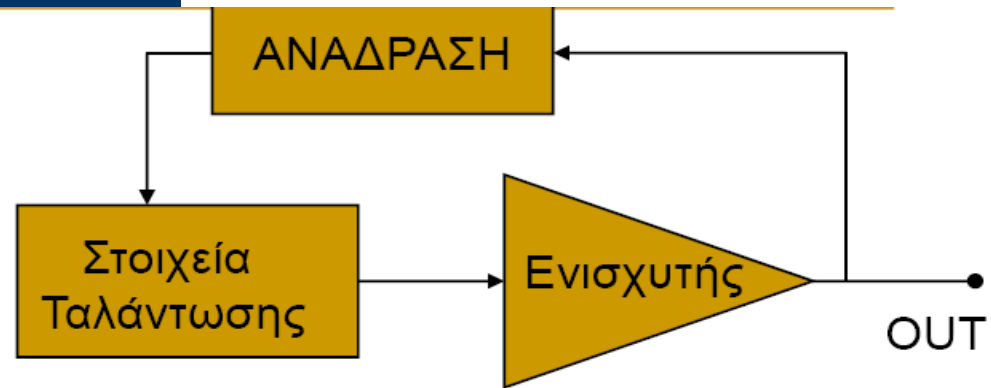
- Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία ενός τηλ/κου συστήματος είναι ο δέκτης και η αρχιτεκτονική του
- Οι βαθμίδες του είναι αντίστοιχες αυτών του πομπού
- Οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός δέκτη είναι:
  - Το πλήθος των υπηρεσιών που προσφέρονται σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα
  - ο αυξανόμενος αριθμός χρηστών
  - τα προβλήματα παρεμβολών, θορύβου κ.τ.λ.,
- Ο δέκτης παράλληλα πρέπει να έχει:
  - **υψηλή ευαισθησία** (ελάχιστη ισχύς για επίτευξη δεδομένου BER ή SNR)
  - καλή επιλεκτικότητα,
  - χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και
  - χαμηλό κόστος





# Δομικά στοιχεία πομπού -δέκτη: Ταλαντωτής

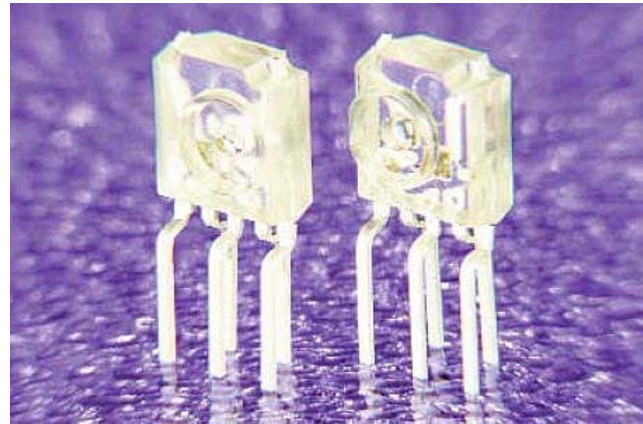
## Ταλαντωτές



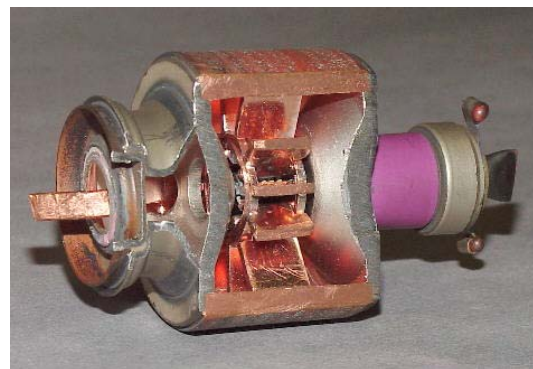
- Ταλαντωτής είναι ένα κύκλωμα που παράγει ηλεκτρικό σήμα σταθερής συχνότητας
  - Η συχνότητα ταλάντωσης εξαρτάται από από εξωτερικά στοιχεία (L,C,R). Έτσι έχουμε ταλαντωτή που ταλαντώνεται εξαιτίας του δικτυώματος RC ή του συντονισμένου κυκλώματος LC. Αυτοί οι ταλαντωτές είναι φθηνοί αλλά όχι σταθεροί και παράγουν χαμηλές συχνότητες
  - Το δίκτυο καθορισμού της συχνότητας (frequency-determining network) αποτελεί τον πυρήνα του ταλαντωτή και σκοπός του είναι να η δημιουργία μιας καθορισμένης συχνότητας
    - Ταλαντωτές χαμηλών συχνοτήτων, ακουστικών συχνοτήτων, ραδιοσυχνοτήτων
    - Ταλαντωτές μικροκυματικών συχνοτήτων (TV, Radar, Δορυφορικές επικοινωνίες)
    - Ταλαντωτές οπτικών συχνοτήτων (ή Laser) – Οπτικά συστήματα
- Ιδιαιτερότητα παρουσιάζουν οι πομποί υψηλών συχνοτήτων και μεγάλης ισχύος



# Παραδείγματα ταλαντωτών



Μαγνητρον

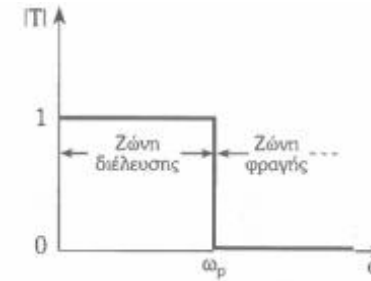




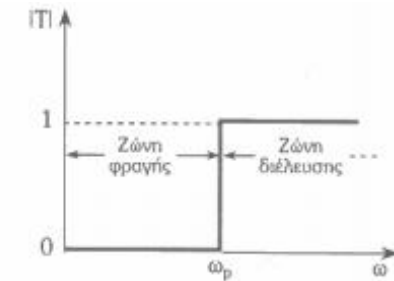
# Δομικά στοιχεία πομπού - δέκτη: Φίλτρα

- Φίλτρο ονομάζεται μια διάταξη που επιτρέπει τη διέλευση μιας ζώνης συχνοτήτων και απορρίπτει όλο το υπόλοιπο μέρος του φάσματος

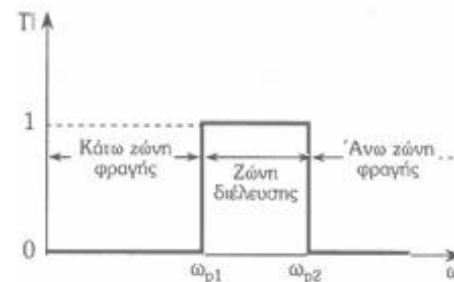
Υλοποιούνται, είτε μόνο με παθητικά στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία) είτε με τη χρήση ενεργών στοιχείων (τελεστικοί ενισχυτές )



(α) Βαθυπερατό (LP)



(β) Υψηπερατό (HP)



(γ) Ζωνοπερατό (BP)

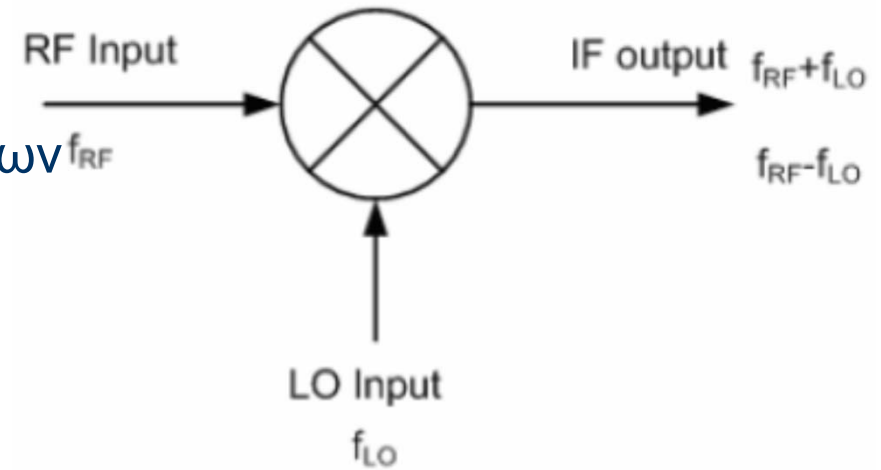


(δ) Ζωνοφρακτικό (BS)



# Δομικά στοιχεία πομπού -δέκτη: Μείκτες

- Ο μείκτης είναι από τα πιο σημαντικά στοιχεία ενός σύγχρονου τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Είναι κυκλώματα δύο εισόδων και μίας εξόδου (τρίθυρα)
- στην ιδανική περίπτωση να παρέχει ένα σήμα στην έξοδό, με συχνότητα ίση με το άθροισμα ή τη διαφορά των συχνοτήτων των δύο σημάτων εισόδου. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται μετατροπή συχνότητας ή **ετεροδύνηση** (Heterodyning)
- Οι μείκτες μπορούν να υλοποιηθούν με διάφορους τρόπους, χρησιμοποιώντας είτε ενεργά είτε παθητικά στοιχεία.



- Χρησιμοποιείται για να αυξήσουμε ή να μειώσουμε τη συχνότητα ενός σήματος

$$\sin(2\pi f_{RF}t) * \sin(2\pi f_{LO}t) = \frac{1}{2} \{ \cos[2\pi(f_{RF} + f_{LO})t] + \cos[2\pi(f_{RF} - f_{LO})t] \}$$

*up-conversion* (pointing to  $f_{RF} + f_{LO}$ )

- Η επιθυμητή συχνότητα (up ή down) επιλέγεται με φίλτρο *Down-conversion* (pointing to  $f_{RF} - f_{LO}$ )



# Δομικά στοιχεία πομπού δέκτη:

## Ενισχυτής Χαμηλού Θορύβου LNA

- Συνήθως το λαμβανόμενο σήμα συνοδεύεται από ισχυρές παρεμβολές
- μη γραμμικότητα του ενισχυτή θα δημιουργήσει προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης τρίτης τάξης. Επομένως είναι αναγκαίο, ο ενισχυτής - LNA να παρουσιάζει μεγάλη γραμμικότητα

## Βρόχος κλειδωμένης φάσης – PLL

Ο βρόχος κλειδωμένης φάσης (phase-locked loop - PLL) είναι το στοιχείο που χρησιμοποιείται σήμερα στα περισσότερα συστήματα για την παραγωγή **εξαιρετικά σταθερών συνθετών συχνοτήτων** τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη

Στους δέκτες χρησιμοποιείται για την ανάκτηση του αδιαμόρφωτου φέροντος από το εισερχόμενο σήμα, ως **διαμορφωτής/αποδιαμορφωτής** συχνότητας και φάσης και σε μια σειρά από άλλες εφαρμογές κυρίως σαν ζωνοπερατό φίλτρο για την εξάλειψη του θορύβου και των παρεμβολών

# Δομικά στοιχεία πομπού-δέκτη: I/Q (Απο)διαμορφωτές

- Οι τετραγωνικοί (quadrature) ή I/Q διαμορφωτές και αποδιαμορφωτές
- Η πιο διαδεδομένη μέθοδος σήμερα για παραγωγή και ανίχνευση τόσο ψηφιακά, αλλά και αναλογικά, διαμορφωμένων σημάτων.
- δημοφιλείς διότι είναι δυνατή η κατασκευή τους σε ολοκληρωμένα κυκλώματα
- Οι διαμορφωτές αυτοί, προσφέρουν τη δυνατότητα εύκολης παραγωγής πολύπλοκων σχημάτων διαμόρφωσης
- Οι I/Q αποδιαμορφωτές βασίζονται στο γεγονός ότι ένα οποιοδήποτε σήμα ζώνης μπορεί να εκφραστεί μέσω άλλων δύο, ενός συμφασικού I σήματος και ενός ορθογώνιου σήματος Q (μετατόπιση φάσης κατά 90°)
- Έστω το σήμα:

$$s(t) = A_c * \cos(\omega_c t + \varphi(t))$$



$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \cos(\varphi) - A_c \sin(2\pi f_c t) \sin(\varphi)$$



$$s(t) = I \cos(2\pi f_c t) - Q \sin(2\pi f_c t)$$



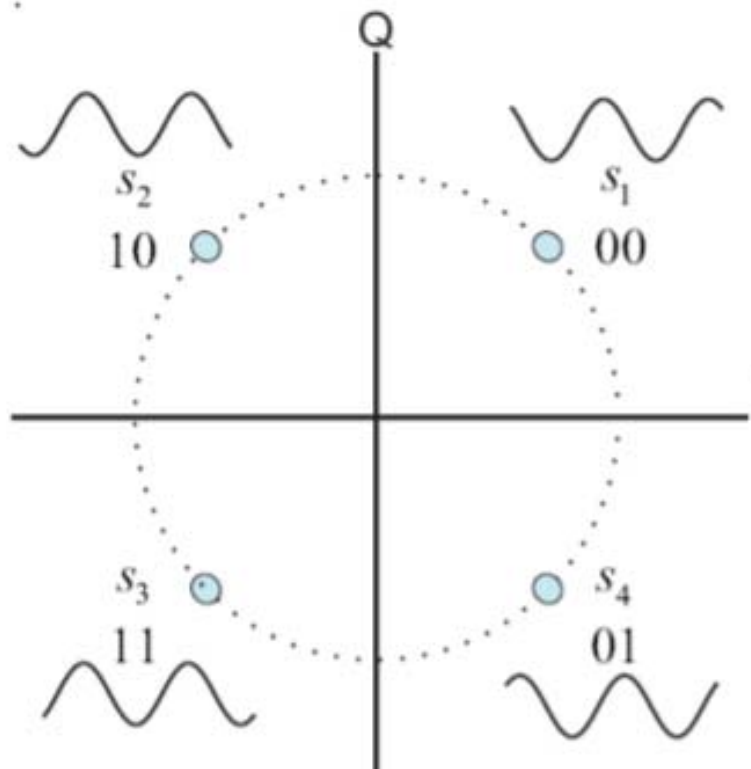
# I/Q διαμόρφωση σήματος QPSK

$a = \{111001001111\}$

$$s_i = \{\sqrt{\mathcal{E}_s} \cos \theta_i, \sqrt{\mathcal{E}_s} \sin \theta_i\}$$

$i = 1, \dots, 4, \rightarrow M=4$

$\rightarrow 2 \text{ bits / symbol}$



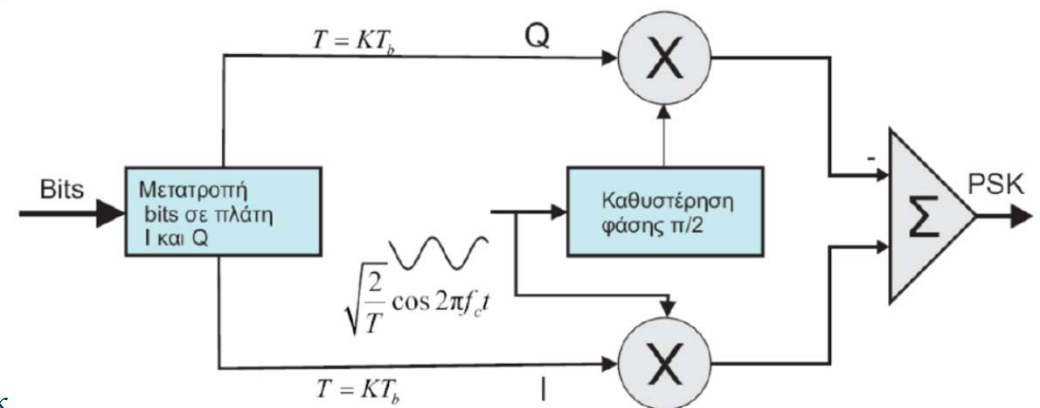
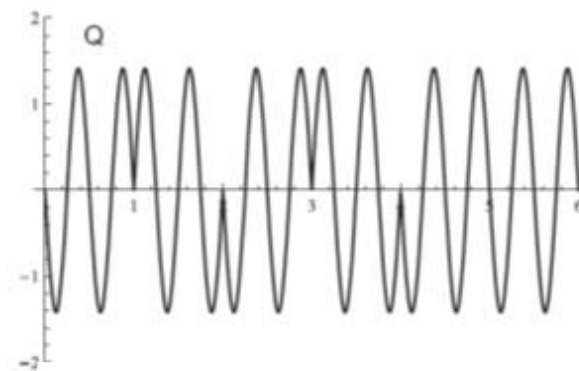
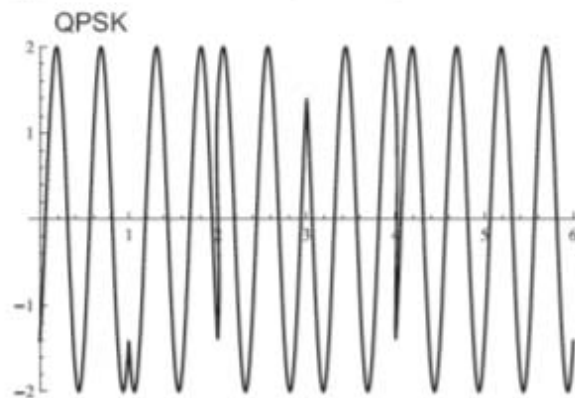
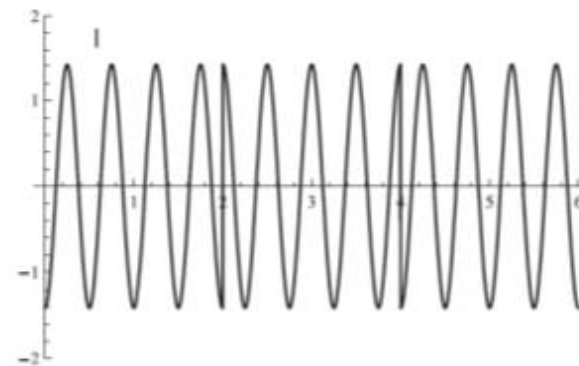
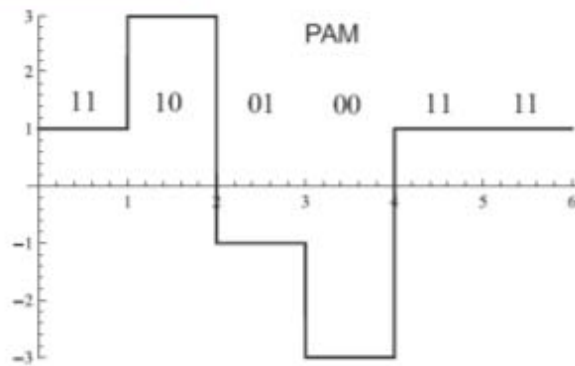
|    | I                                  | Q                                  |
|----|------------------------------------|------------------------------------|
| 00 | $\frac{\sqrt{2\mathcal{E}_s}}{2}$  | $\frac{\sqrt{2\mathcal{E}_s}}{2}$  |
| 01 | $\frac{\sqrt{2\mathcal{E}_s}}{2}$  | $-\frac{\sqrt{2\mathcal{E}_s}}{2}$ |
| 11 | $-\frac{\sqrt{2\mathcal{E}_s}}{2}$ | $-\frac{\sqrt{2\mathcal{E}_s}}{2}$ |
| 10 | $-\frac{\sqrt{2\mathcal{E}_s}}{2}$ | $\frac{\sqrt{2\mathcal{E}_s}}{2}$  |

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [I_n \cdot \cos(2\pi f_c t) - Q_n \cdot \sin(2\pi f_c t)] \quad f_c \geq R_s = \frac{R_b}{2}$$



# ...εναλλακτικά

$a = \{111001001111\}$



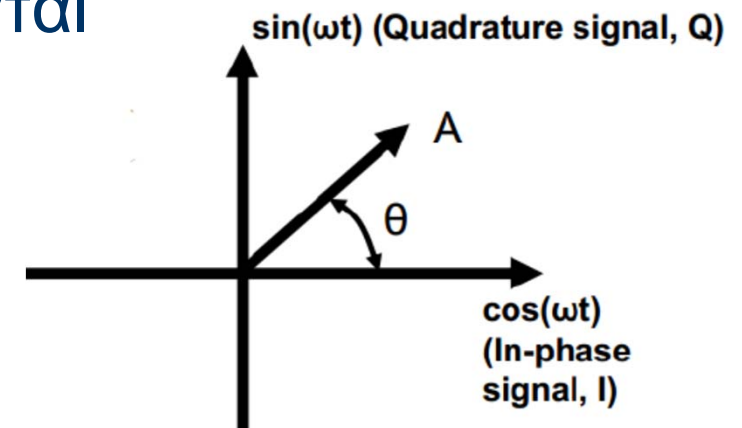


# Δομικά στοιχεία πομπού-δέκτη: I/Q (Απο)διαμορφωτές

- Γνωρίζοντας τις στιγμιαίες τιμές των I&Q για ένα σήμα  $s(t)$ , είναι δυνατό να υπολογίσουμε ο,τιδήποτε σχετικά με το σήμα αυτό. Το στιγμιαίο πλάτος και η στιγμιαία φάση του σήματος δίνονται μέσω των σχέσεων:

$$\text{Instantaneous Amplitude: } m_t = \sqrt{I_t^2 + Q_t^2}$$

$$\text{Instantaneous Phase : } \varphi_t = \tan^{-1} \frac{Q_t}{I_t}$$



- Μέσω αυτών των σχέσεων πλέον μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας η αποδιαμόρφωση




# Αποδιαμόρφωση

Το εισερχόμενο QPSK σήμα περιγράφεται ως:

$$s(t) = I(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \cdot \sin(2\pi f_c t)$$

$$s_I(t) = s(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) = I(t) \cdot \frac{1 + \cos(4\pi f_c t)}{2} - Q(t) \cdot \sin(4\pi f_c t)$$

$$s_Q(t) = s(t) \cdot \sin(2\pi f_c t) = Q(t) \cdot \frac{1 - \cos(4\pi f_c t)}{2} - I(t) \cdot \sin(4\pi f_c t)$$

Μετά από LPF:   $s_I(t) \approx I(t)$        $s_Q(t) \approx Q(t)$

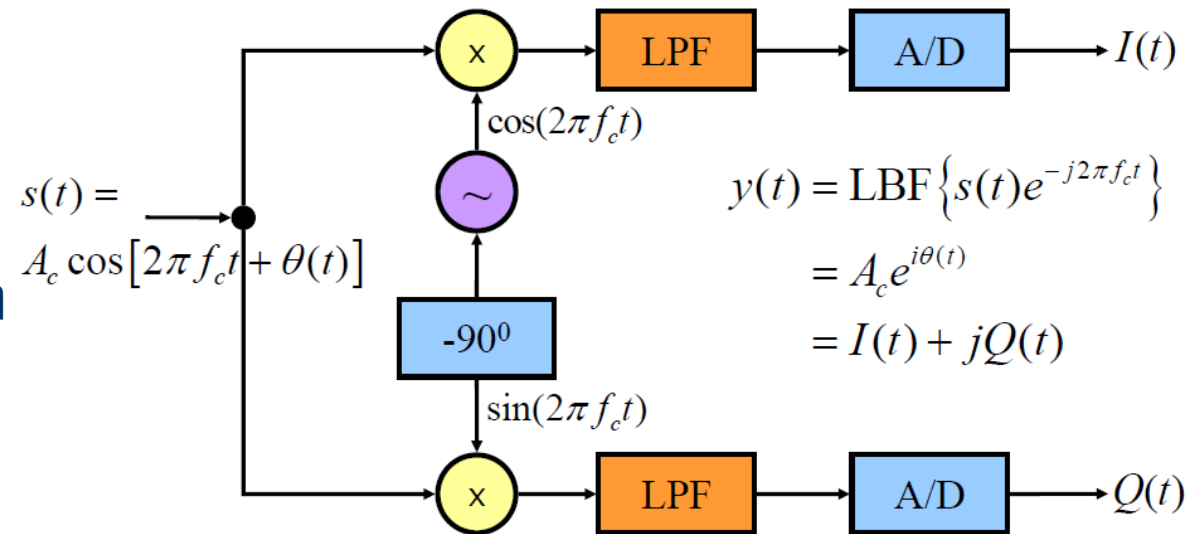
Για κάθε χρονικό διάστημα  $T_s = 1/f_s$  εξετάζουμε τις τιμές των  $I(t)$  και  $Q(t)$  για να καθορίσουμε τα bits:

- Αν  $I(t) > 0$  το πρώτο bit είναι 0. Αν  $I(t) < 0$  το πρώτο bit είναι 1.
- Αν  $Q(t) > 0$ , το δεύτερο bit είναι 0. Αν  $Q(t) < 0$ , το δεύτερο bit είναι 1.



# Δέκτες SDR (Software Defined Radio)

- Στα SDR συστήματα, η υλοποίηση στοιχείων όπως μεικτές, φίλτρα, ενισχυτές κ.α. , γίνεται μέσω λογισμικού που εκτελείται είτε σε προσωπικούς υπολογιστές είτε σε ενσωματωμένα συστήματα. Η χρήση της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, επιτρέπει την εκτέλεση λειτουργιών όπως διαμόρφωση/αποδιαμόρφωση σημάτων, παραγωγή σημάτων, κωδικοποίηση
- Στους συμβατικούς πομποδέκτες, έχουμε περιορισμούς στην διαλειτουργικότητα , που μπορούν να ξεπεραστούν μόνο με αλλαγές στο υλικό και μεγάλο κόστος.
- Η τεχνολογία SDR αποτελεί μια αποδοτική και σχετικά φθηνή λύση στο παραπάνω πρόβλημα, επιτρέποντας την κατασκευή ευέλικτων, ευρυζωνικών και πολυλειτουργικών συσκευών , οι οποίες μπορούν να βελτιωθούν μέσω αναβαθμίσεων λογισμικού



linear band filter



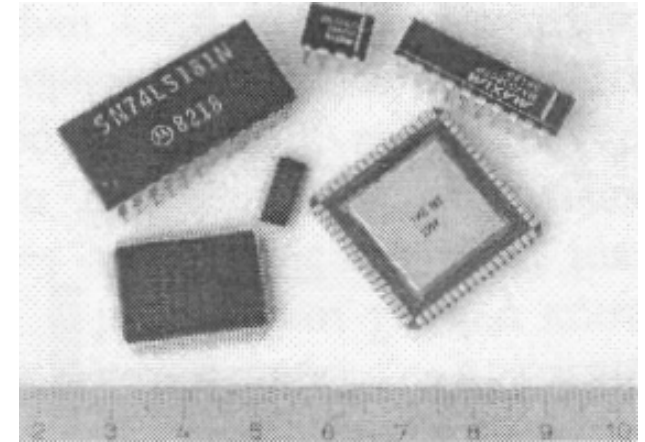
# Περιορισμοί χωρητικότητας τηλ/κων συστημάτων λόγω πομπού και δέκτη

- Οι παράγοντες που περιορίζουν τη χωρητικότητα προέρχονται είτε από τις ίδιες τις ηλεκτρονικές διατάξεις είτε από το περιβάλλον μέσα στο οποίο γίνεται η επικοινωνία,, αλλά και από περιορισμούς που τίθενται από εθνικούς και διεθνείς οργανισμούς
- **Παραμόρφωση**
  - Η πλειονότητα των κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες, όπως φίλτρα, μίκτες, ενισχυτές κ.α., καθώς και οι περισσότεροι τύποι καναλιών μετάδοσης, παραμορφώνουν το σήμα καθώς τα παραπάνω δεν είναι απόλυτα γραμμικά
- **Ενδοδιαμόρφωση**
  - όταν δύο ή περισσότερα σήματα εισέλθουν μέσα σε ένα μη γραμμικό σύστημα στην έξοδο του συστήματος εμφανίζονται, και σήματα με συχνότητες ίσες με το άθροισμα ή τη διαφορά ακέραιων πολλαπλασίων των συχνοτήτων των σημάτων. Αυτά τα παρασιτικά σήματα χαρακτηρίζονται ως προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης (IM products) και είναι ανεπιθύμητα. Η τάξη της μη γραμμικότητας και το πλήθος και η ισχύς των σημάτων που συζευγνύονται επηρεάζει το πλήθος των παρασιτικών
- **Θόρυβος**
  - Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους δημιουργείται θόρυβος μέσα στο ίδιο το σύστημά μας και αναλόγως παίρνουν και την ονομασία τους
  - **Ο θερμικός, ο θόρυβος βολής, ο θόρυβος αναλαμπής (flicker)**



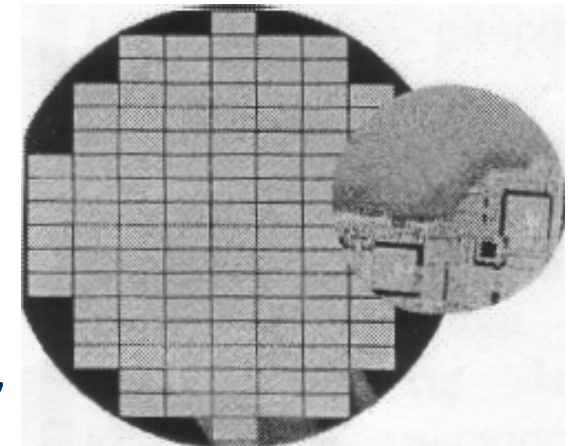
# Ολοκληρωμένα κυκλώματα - τεχνολογία Si, SiGe

- Συχνότητες < 3.5 GHz
- Βασικό υλικό : Si (ημιαγωγικό)
- Βασικό στοιχείο : transistor
- Συχνότητες 3,5-280GHz



## Βασικό υλικό : κράμμα SiGe (ημιαγωγικό)

- **Ολοκληρωμένο κύκλωμα (chip)** : σύστημα που περιλαμβάνει ενεργά στοιχεία (τρανζίστορ) και παθητικά στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές, διόδους),
- Οι διασυνδέσεις τους περιλαμβάνονται μέσα ή πάνω σε ένα τμήμα *μονοκρυστάλλου* (δηλ. ένα κομμάτι ημιαγωγού που έχει παντού την ίδια κρυσταλλική δομή) πυριτίου το οποίο ονομάζεται **υπόστρωμα (substrate)**, διαμέτρου μερικών εκατοστών και πάχους κλάσματος του χιλιοστού που ονομάζεται **δισκίο (wafer)**.



Σήμερα, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα περιέχουν ένα τεράστιο αριθμό τρανζίστορ που υπερβαίνει τα δέκα εκατομμύρια. Τα ICs με τέτοια μεγάλη πυκνότητα ημιαγωγικών στοιχείων (τρανζίστορ) ονομάζονται κυκλώματα VLSI (Very Large Scale Integration) και αποτελούν την τελευταία λέξη της τεχνολογίας



# Η τεχνολογία SiGe

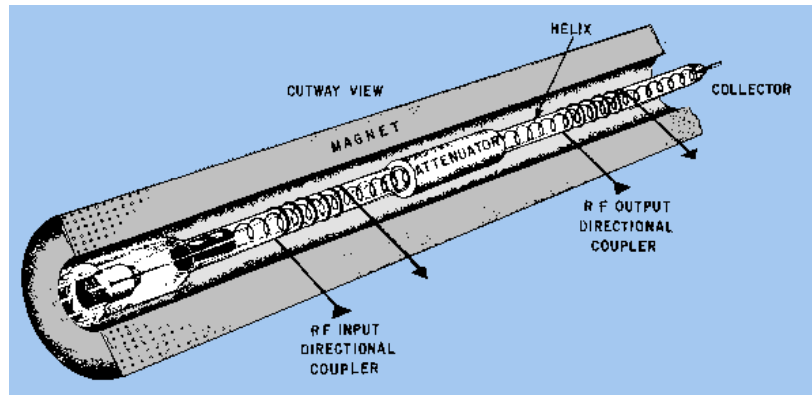
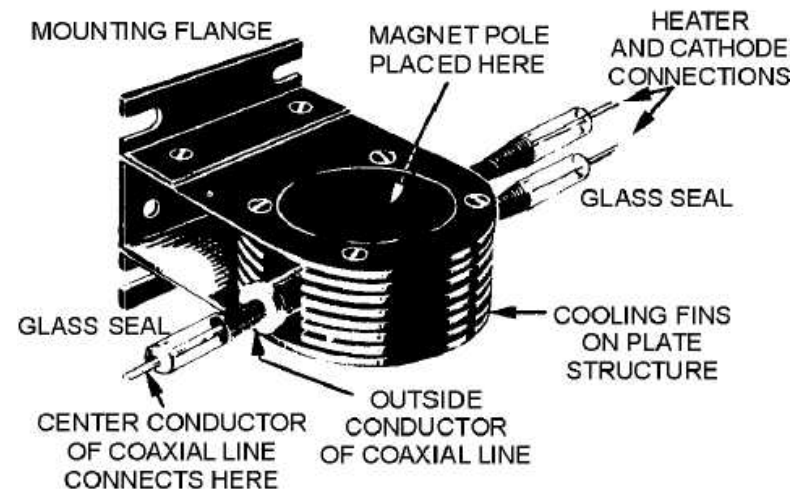
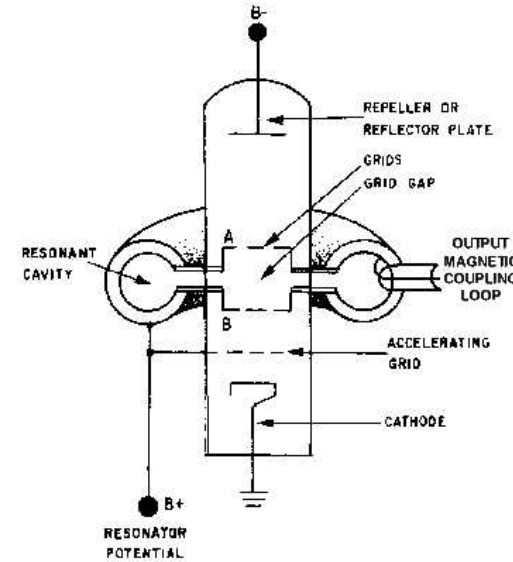
- Η καρδιά της τεχνολογίας SiGe είναι το διπολικό transistor ετεροεπαφής : SiGe (HBT)
- Σήμερα, τα πιο γρήγορα SiGe HBTs transistors έχουν συχνότητα αποκοπής μεγαλύτερη από 210 GHz και μέγιστη συχνότητα ταλάντωσης μεγαλύτερη από 285 GHz
  - Διατάξεις υψηλής συχνότητας, για επικοινωνίες RF, τα μικροκύματα, και τα ραντάρ. Η χρήση του γερμανίου βελτιώνει τις ηλεκτρικές και θερμικές του ιδιότητες, ενώ παραμένει συμβατό με την τεχνολογία πυριτίου, προσφέροντας υψηλότερες επιδόσεις και αποδοτικότητα.
  - Η τεχνολογία SiGe επεκτείνει τη ζωή των μπαταριών στα ασύρματα οικιακά τηλέφωνα και επιτρέπει την ύπαρξη μικρότερων συσκευών επικοινωνίας.
  - Αυτές οι δυνατότητες πολύ-λειτουργιών με χαμηλό κόστος και μικρό βάρος, είναι το κλειδί για το μέλλον των υπολογιστικών μηχανών και των τηλεπικοινωνιών.



# Μικροκυματικές διατάξεις I

- Μικροκυματικές λυχνίες
  - 2-6 GHz Λυχνίες klystron
  - 12-23 GHz Λυχνίες TWT

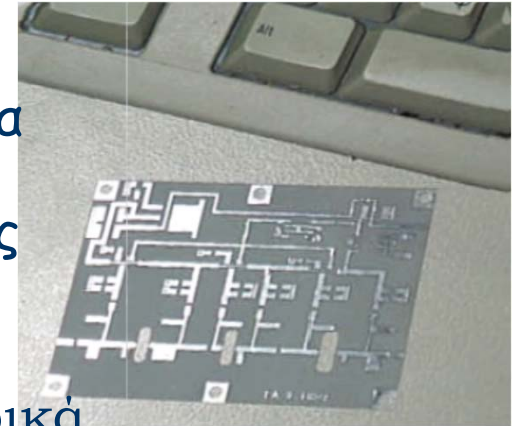
| Λυχνίες                | Εφαρμογές               |
|------------------------|-------------------------|
| Κλύστρον TWT           | Πηγές ισχύος, Ενισχυτές |
| Magnetron              | Πηγές ισχύος            |
| μικροκυματικές τρίοδοι | Ταλαντωτές - Πομποί     |





# Μικροκυματικές διατάξεις ΙΙ

- Διατάξεις που λειτουργούν στην περιοχή συχνοτήτων από 3 GHz έως 300 GHz ( $\lambda$ : 30 cm έως 1 mm)
- Η ιστορική εξέλιξη των μικροκυματικών κυκλωμάτων μοιάζει με αυτή των κλασικών ηλεκτρονικών. Υπήρξε μια συνεχής τάση για μετάβαση από τις ηλεκτρονικές μικροκυματικές λυχνίες σε στοιχεία στερεάς κατάστασης και στην περαιτέρω ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, διατάξεων και συστημάτων
- 1960-1980: αναπτύχθηκαν τα υβριδικά μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (Microwave Integrated Circuits, MIC) τα οποία συνδυάζουν ενεργές διατάξεις (λ.χ. FET) και παθητικά στοιχεία (γραμμές μεταφοράς, αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία) κατανομημένα ή συγκεντρωμένα πάνω σε ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα (αλουμίνα,  $Al_2O_3$ )
- Η λογική τους εξέλιξη είναι τα μονολιθικά μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (Monolithic Microwave Integrated Circuits, MMIC) όπου οι ενεργές διατάξεις και τα παθητικά στοιχεία διαμορφώνονται μέσα ή πάνω σε ένα ημιαγωγικό υπόστρωμα, χρησιμοποιώντας τις διαδικασίες κατασκευής των ICs χαμηλότερων συχνοτήτων σε διηλεκτρικό υπόστρωμα (GaAs)

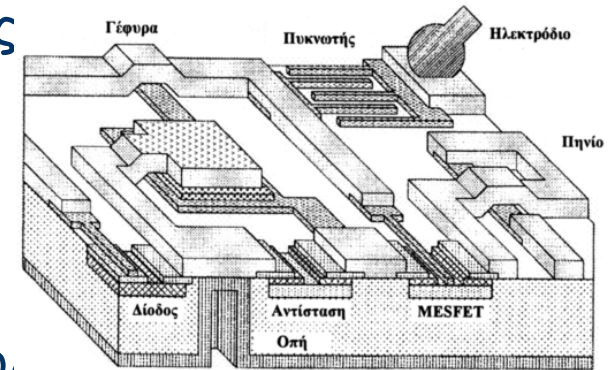






# Μικροκυματικές διατάξεις ΙΙΙ

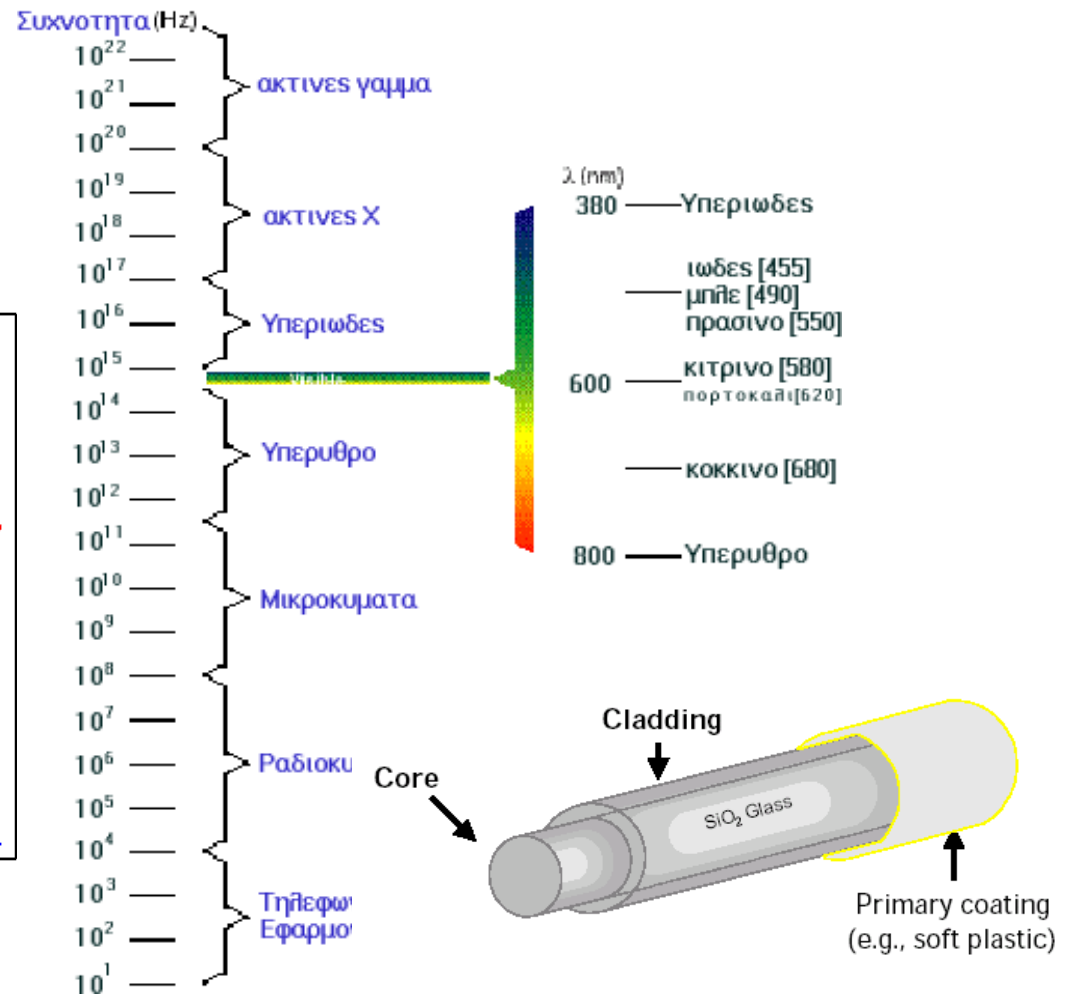
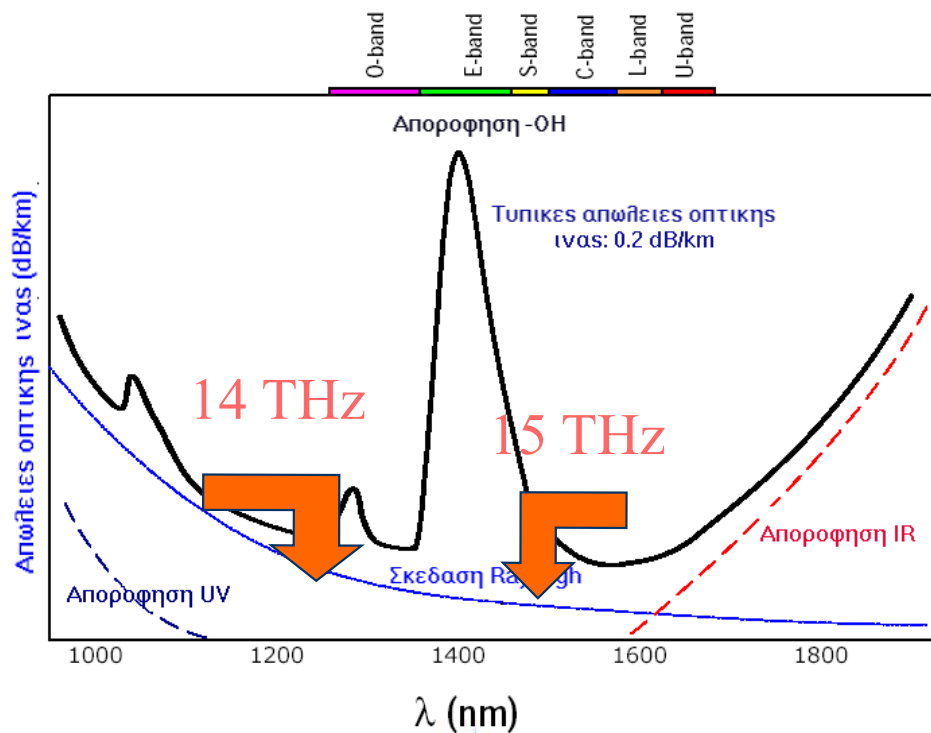
- **ΜΙC:** Οι βασικότερες λειτουργίες που παρέχουν τα μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι ως ενισχυτές, ταλαντωτές, μείκτες, ολισθητές φάσης μικροκυματικοί διακόπτες. (Gunh, Imratt, YIG)
- **ΜΙC:** μεγαλύτερο εύρος ζώνης, ευελιξία κυκλωματικής σχεδίασης συνδυασμός πολλών λειτουργιών πάνω στο ίδιο chip ("επίπεδη" τεχνολογία, δηλ. η τεχνολογία ανάπτυξης κυκλωμάτων υπό μορφή παράλληλων ημιαγωγικών επιπέδων)
  - **Οι εφαρμογές:** ραντάρ, και αμυντικά συστήματα. Οι δορυφορικοί πομποί και δέκτες σε συχνότητες 12 ή 4 GHz, η δορυφορική τηλεόραση, το δορυφορικό τηλέφωνο και τα κινητά τηλέφωνα στα 900 και 1800 MHz. Επίσης, τα ναντιλιακά και στρατιωτικά ραντάρ στρεφόμενου λοβού και τα συστήματα ηλεκτρονικού πολέμου
  - Τα ΜΙC έχουν σήμερα δυνατότητες επεξεργασίας ηλεκτρομαγνητικών σημάτων με φέρουσες συχνότητες της τάξης των 100 GHz





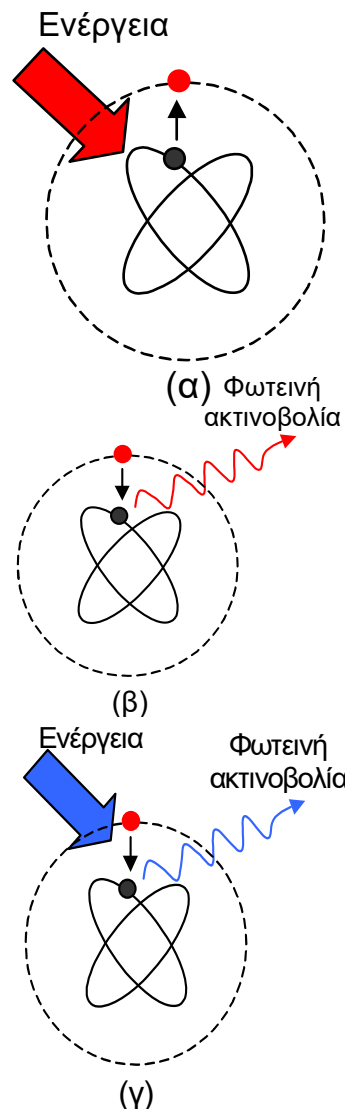
# Τεχνολογία οπτικών Επικοινωνιών

- Η επανάσταση στο χώρο των τηλεπικοινωνιών δόθηκε με την ανακάλυψη του laser (1960)
- Χρησιμοποιεί «φως» (κοντά στο υπέρυθρο 1.3  $\mu\text{m}$  – 1.55  $\mu\text{m}$ ) για τη μεταφορά της πληροφορίας
- Μέσο μετάδοσης: οπτική ίνα





# Οπτικές πηγές - Στοιχεία ημιαγωγών



- Ημιαγωγοί: επαφές p-n
- Υλικά: P, Ga, As, In, Al
- Κάθε ημιαγωγός χαρακτηρίζεται από την ενέργεια χάσματος  $E_G$
- Ενέργεια φωτονίων:  $E_\phi = hf$

## Οπτικές μεταπτώσεις στους ημιαγωγούς

α. Απορρόφηση

β. Αυθόρμητη εκπομπή

γ. Εξαναγκασμένη εκπομπή και δράση Laser

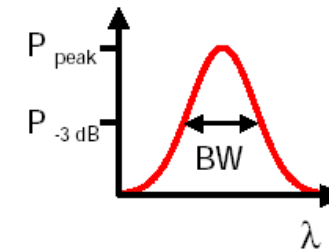
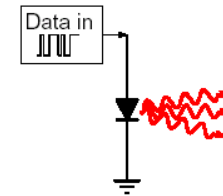
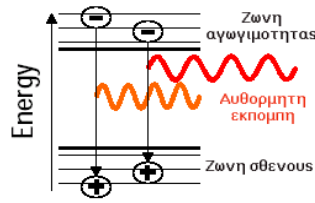
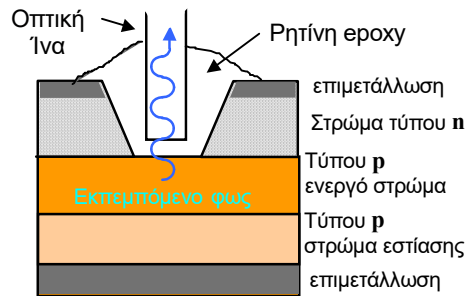
Ετεροεπαφές: *GaAs/GaAlAs* και *InGaAsP/InP*



# Ημιαγωγικές Οπτικές πηγές (I)

- LED (αυθόρμητη εκπομπή)

## Φασματικό εύρος

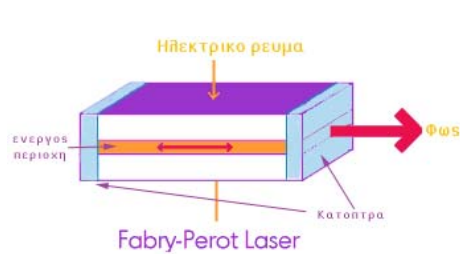
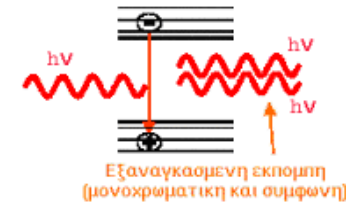


|        | Μήκος κύματος [μm] | φασματικό εύρος [nm] | Υλικό ημιαγωγού | Οπτική ισχύς που εισάγεται σε ίνα βαθμιαίου δ.δ. [μW] | Απόσταση Μετάδοσης [Km] | Ρυθμοί διαμόρφωσης [MB/s] |
|--------|--------------------|----------------------|-----------------|---|-------------------------|---------------------------|
| LED οε | 0.88 – 0.95        | 50                   | GaAs            | 2   | 0.01 - 0.1              | 5 - 10                    |
| LED εε | 0.80 – 0.885       | 45                   | AlGaAs/<br>GaAs | 30 - 100  | 1 - 5                   | 30 - 100                  |
| LED εε | 1.3 – 1.5          | 100                  | InGaAsP/Inp     | 50 - 100  | 1 - 5                   | 50 - 200                  |

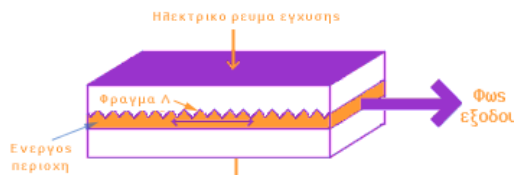


# Ημιαγωγικές Οπτικές πηγές (II)

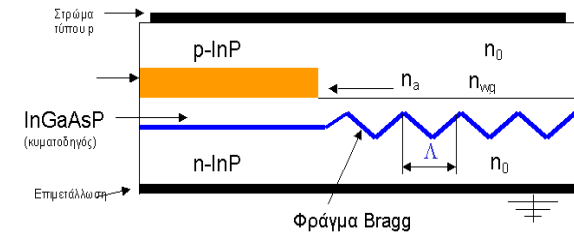
- Δίοδοι Laser (LD): εξαναγκασμένη εκπομπή



Fabry-Perot Laser



Distributed Feedback Laser  
DFB Laser

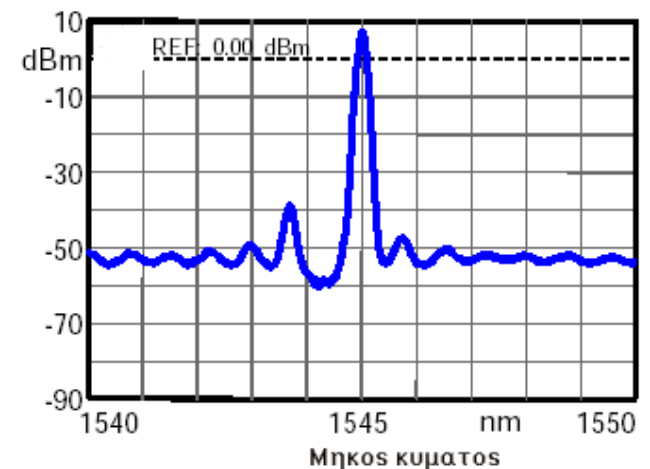
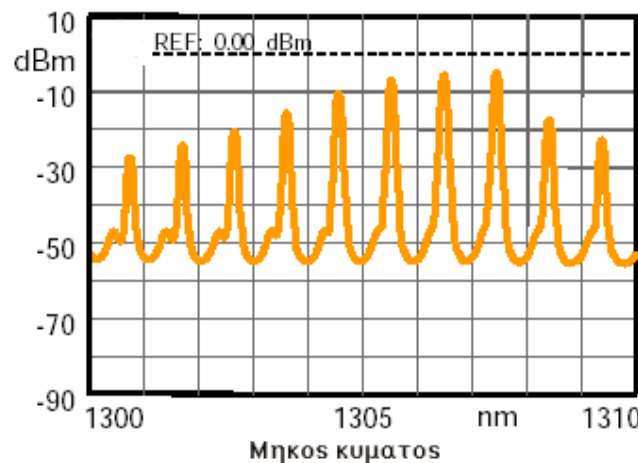


DBR Laser

Fabry-Perot Laser

DFB Laser

Φασματικό εύρος

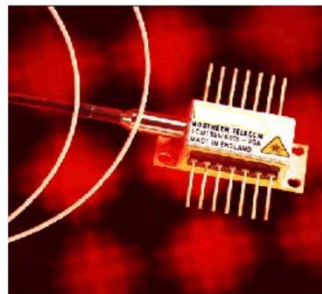




# Ημιαγωγικές Οπτικές πηγές (III)

|                       | Μήκος κύματος [ $\mu\text{m}$ ] | φασματικό εύρος [nm] | Υλικό ημιαγωγού | Οπτική ισχύς που εισάγεται (ίνα βαθμιαίου δ.δ.) - $\mu\text{W}$ | Απόσταση Μετάδοσης [Km] | Ρυθμοί διαμόρφωσης [MB/s] |
|-----------------------|---------------------------------|----------------------|-----------------|---|-------------------------|---------------------------|
| <b>LD FP</b>          | 0.80 - 0.885 1.3                | 3 -20                | AlGaAs/ GaAs    | 1 - 5   | 5 - 20                  | $\leq 565$                |
| <b>LD DFB και DBR</b> | 1.3,1.5                         | $0.8 \cdot 10^{-3}$  | InGaAsP/Inp     | 1 - 3<br>0.5 -1.5 (μονότροπη ίνα)                               | $\leq 70$               | $\leq 1200$               |

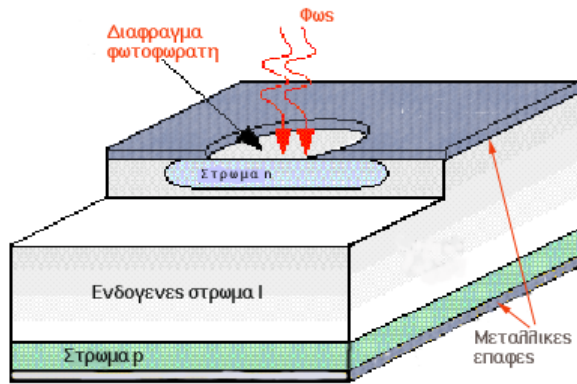
Laser  
Εμπορίου



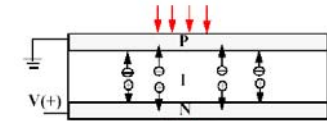


# Φωτοφωρατές (I)

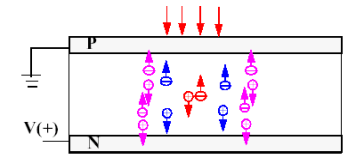
- Μετατρέπουν το προσπίπτον από την οπτική ίνα φωτεινό σήμα σε ηλεκτρικό (Φαινόμενο απορρόφησης)



• Φωτοφωρατές PIN



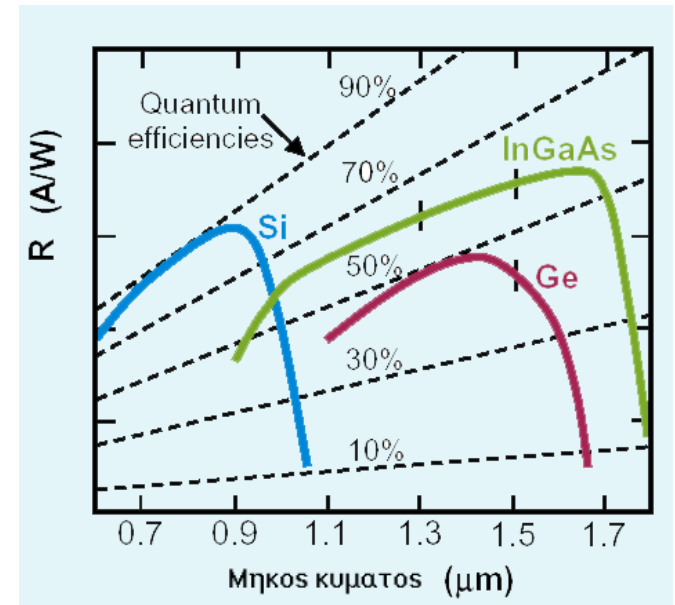
• Φωτοφωρατές APD



Οι χαρακτηριστικές παράμετροι ενός φωτοφωρατή είναι:

- Η κβαντική απόδοση (quantum efficiency)  $\eta$

- Η αποκρισιμότητα  $R$  που ορίζεται από τη σχέση:  $R = \mu \frac{i_{ph}}{P_{ph}}$  [W/A]





# Οπτικοί ενισχυτές

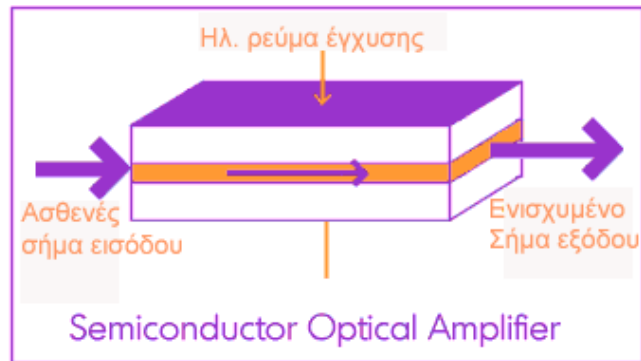
- Στα πρώτα οπτικά συστήματα η ενίσχυση του οπτικού σήματος γίνεται με ΟΕ-ΕΟ μετατροπή: εξαιρετικά πολύπλοκες ακριβές διατάξεις, που μπορούσαν να λειτουργήσουν μόνο για αναλογικά ή μόνο για ψηφιακά συστήματα, για ένα μήκος κύματος και ένα ρυθμό (bitrate), με αναπόφευκτο το θόρυβο της ηλεκτρονικής ενίσχυσης - και περιοριστικές για το σύστημα στην περίπτωση αναβαθμίσεων, και υψηλό κόστος συντήρησης
- Οι αδυναμίες αυτές ξεπερνιούνται με τη διατήρηση του σήματος σε οπτική μορφή σε όλο το μήκος της διαδρομής και επομένως με την απευθείας ενίσχυση του από καθαρά οπτικούς ενισχυτές, αποφεύγοντας τις πολύπλοκες οπτικοηλεκτρικές και ηλεκτροοπτικές μετατροπές. Οι οπτικοί ενισχυτές ενισχύουν οποιοδήποτε σήμα ανεξαρτήτως σχήματος διαμόρφωσης, μήκους κύματος και ρυθμού μετάδοσης





# Ενισχυτές ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifiers - SOA)

- Οι SOA μοιάζουν κατασκευαστικά με τις διατάξεις Laser (εξαναγκασμένη εκπομπή χωρίς οπτική ανατροφοδότηση)

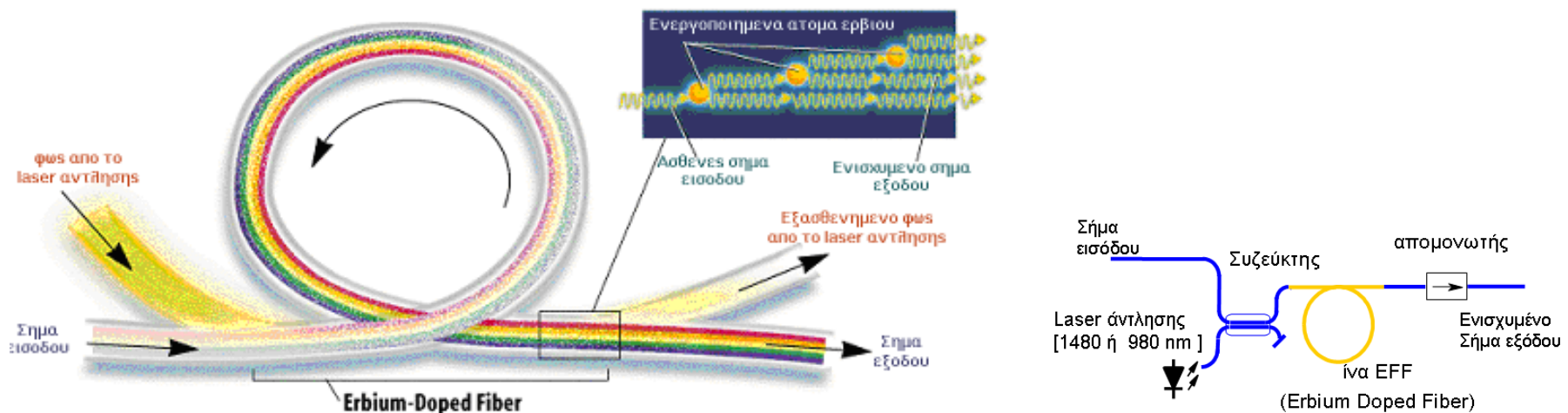


- $BW = 35 - 240\text{nm}$
- Μπορούν να ολοκληρωθούν μονολιθικά με άλλα ηλεκτρονικά κυκλώματα
- Εισάγουν θόρυβο στο οπτικό σήμα και έχουν σχετικά μεγάλο κόστος
- Δυσκολία σύνδεσης με οπτική ίνα
- Μικρή απολαβή ( $\sim 15\text{ dB}$ )

# Ενισχυτές Ίνας με Πρόσμειξη Ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifiers - EDFA)



- EDFA: μικρού μήκους οπτική ίνα της οποίας ο πυρήνας εμπλουτίζεται με έρβιο ( $Er^{++}$ ), ένα οπτικά ενεργό χημικό στοιχείο. Τα ιόντα ερβίου διεγείρονται σε μία ανώτερη ενεργειακή στάθμη με την απορρόφηση φωτός από μία πηγή LASER, συνήθως στα 1480 nm (Laser άντλησης). Τα διεγερμένα ιόντα ερβίου μεταπίπτουν στη βασική ενεργειακή στάθμη είτε με αυθόρμητη είτε με εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων (εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με τα φωτόνια του προς ενίσχυση σήματος)





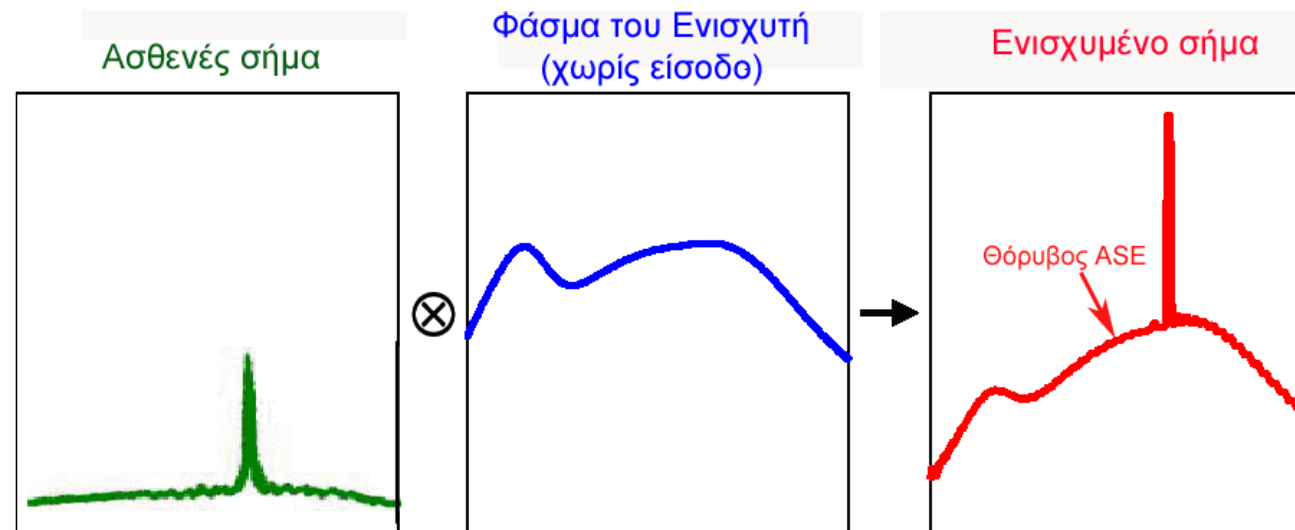
# Ενισχυτές Ίνας με Πρόσμειξη Ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifiers -EDFA)

- **BW: 35 nm**
- Οι EDFAs επιβάλλουν τη λειτουργία των οπτικών ζεύξεων μόνο στο οπτικό παράθυρο των 1525-1565nm
- Απολαβή πάνω από 40 dB και μέγιστη ισχύς εξόδου πάνω από 27 dBm
- Μεγάλος χρόνος ζωής των φωτονίων στη διεγερμένη κατάσταση (περίπου 10 msec)



# Ο θόρυβος στους οπτικούς ενισχυτές

- Σε έναν οπτικό ενισχυτή, η κύρια πηγή θορύβου είναι η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή (*amplified spontaneous emission – ASE*)

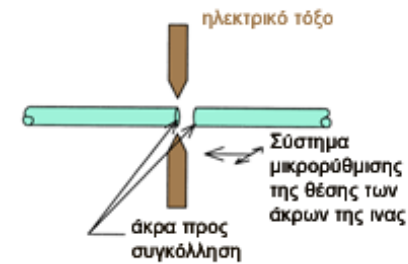


- Στην πράξη η απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει το σήμα μεταξύ των ενισχυτών μπορεί να είναι μέχρι τα 120 km. Για αποστάσεις μεγαλύτερες από 600 km έως 1000 km το σήμα πρέπει να αναγεννηθεί

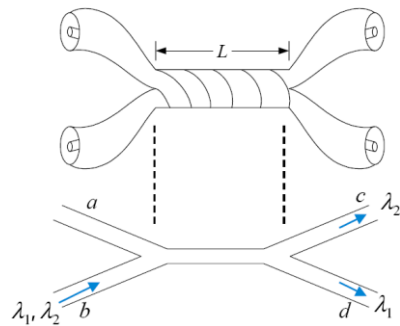


# Τα παθητικά στοιχεία των οπτικών συστημάτων (I)

- Συγκολλήσεις (splices) - οπτικοί σύνδεσμοι:



- Οπτικοί συζεύκτες (Couplers):



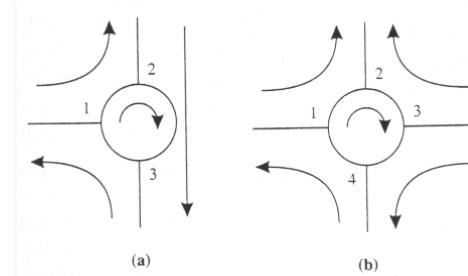
- Οπτικοί απομονωτές:



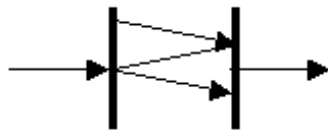


# Τα παθητικά στοιχεία των οπτικών συστημάτων (II)

- Κυκλοφορητές:



- Οπτικά φίλτρα: διαχωρισμός (ή συνδυασμός) διαφορετικών μηκών κύματος

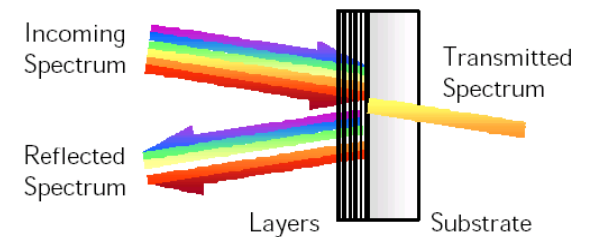


Προσπίπτον φως    Εσωτερικές ανακλάσεις    Εκπεμπόμενο φως

**Συμβολόμετρο Fabry-Perot**



**Fiber Bragg Gratings - FBG**

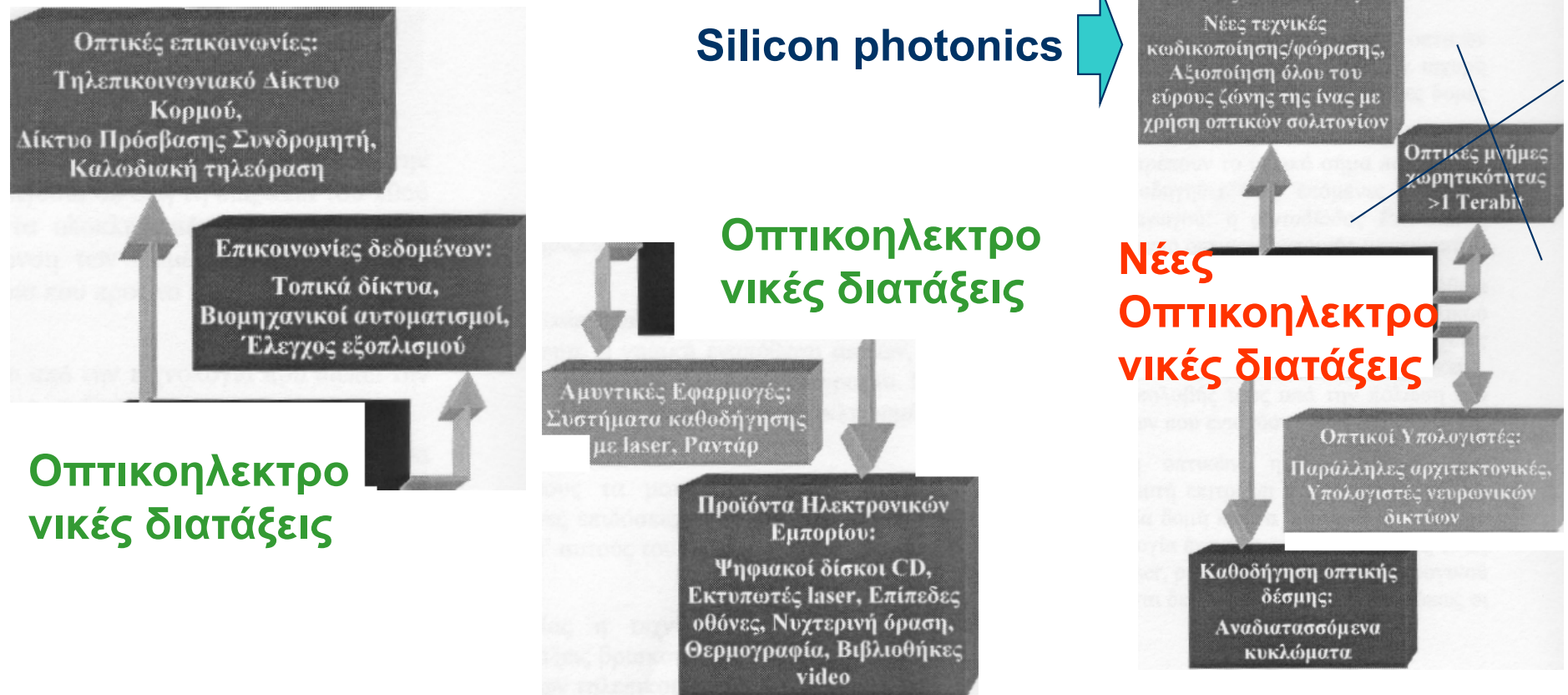


**Thin film filters**



# Οπτικοηλεκτρονική

- Σήμερα, βρισκόμαστε στο ξεκίνημα μιας νέας τεχνολογικής επανάστασης: **της οπτικοηλεκτρονικής ολοκλήρωσης** δηλαδή της ταυτόχρονης ανάπτυξης οπτικών, ηλεκτροοπτικών και ηλεκτρονικών διατάξεων στον ίδιο μονοκρύσταλλο.
- Νέες δυνατότητες και εφαρμογές
- Η οπτικοηλεκτρονική τεχνολογία είναι κεφαλαιώδους σημασίας στη νέα κοινωνία της πληροφορίας



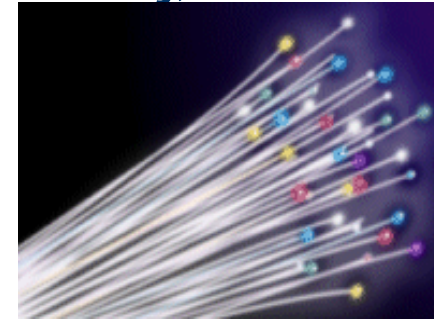


## ● Β ΜΕΡΟΣ



# Κανάλι Μετάδοσης ως Φυσικο μεσο

- Μέσο μετάδοσης (transmission medium) → είναι ο φορέας που μεταδίδει το σήμα
  - Ή αποθηκεύει το σήμα π.χ. CD, οπτικός δίσκος, κλπ
- Παραδείγματα



## – Ενσύρματα μέσα:

- τηλεφωνικά καλώδια (telephone cables) για μετάδοση της φωνής
- ομοαξονικό καλώδιο (coaxial cable)
- οπτικές ίνες (optical fiber) για μετάδοση δεδομένων κάθε μορφής -> είδος σήματος: παλμοί φωτός (η παρουσία παλμού υποδηλώνει το δυαδικό '1' και η απουσία παλμού το δυαδικό '0')
- κυματοδηγοί (waveguides)

## – Ασύρματα μέσα (wireless):

- αέρας (μετάδοση ηχητικών κυμάτων)
- ατμόσφαιρα της γης και το διάστημα (μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων)





# Το τηλεπικοινωνιακό κανάλι

ΚΑΝΑΛΙ: ένα φασματικό τμήμα του μέσου μετάδοσης

- Χαρακτηριστικά

- Αναλογικό - δυαδικό (συμμετρικό) - ψηφιακό κανάλι
- AWGN κανάλι (Additive Gaussian Noise Channel)
- Εύρος ζώνης - Χωρητικότητα  $C$

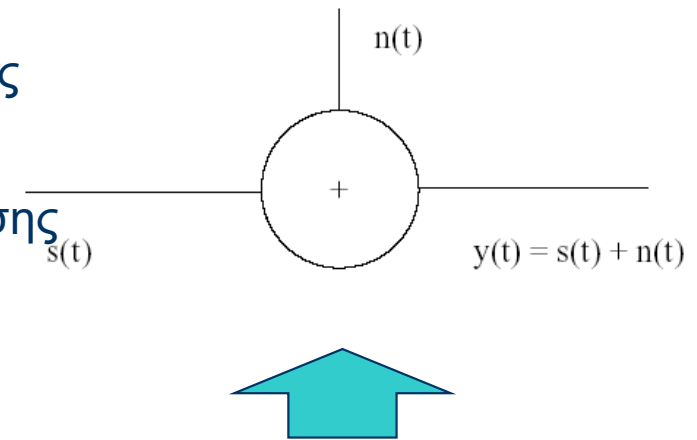
Για να χρησιμοποιηθεί το κανάλι πρέπει:

- Κωδικοποίηση καναλιού (Coding Theorem)
- ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ



# Θόρυβος Καναλιού

- Εξωτερικές πηγές -> εξωτερικός θόρυβος (external noise)
  - Από άλλο σύστημα επικοινωνίας (κεραίες, radar)
  - Από φυσικές πηγές και ατμοσφαιρικά φαινόμενα
    - ✓ Φως, ακτινοβολία, κεραυνοί
- Από το ίδιο το μέσο μετάδοσης -> εσωτερικός θόρυβος (internal noise)
  - ο θερμικός θόρυβος: προκαλείται από τις συγκρούσεις των ηλεκτρονίων του μέσου μετάδοσης
  - ο θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης: οφείλεται στη συνύπαρξη σημάτων διαφορετικών συχνοτήτων που μοιράζονται το ίδιο μέσο μετάδοσης
  - η συνακρόαση (cross-talk): προκαλείται όταν δύο ξένα μεταξύ τους σήματα, συζευχθούν ΗΜ για κάποιιο λόγο Q NEXT - FEXT



$S(t)$  το σήμα πληροφορίας

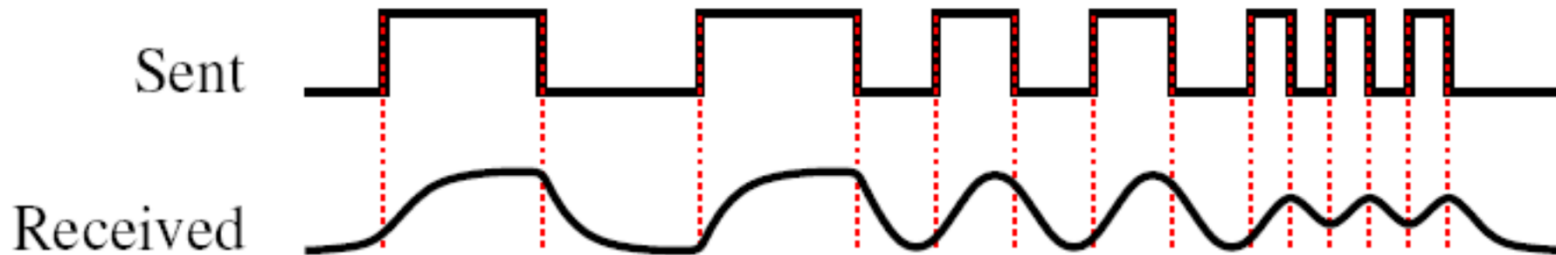
$n(t)$  λευκός Gaussian  
Θόρυβος

Η φασματική πυκνότητα  
 $N(f)$  είναι σταθερή

- **Αλλοιώνει την ποιότητα του σήματος και προκαλεί παραμόρφωση**
  - Πρόβλημα στην σωστή αναγνώριση του μηνύματος από τον δέκτη (Π.χ. θόρυβος στο AM ράδιο)
- **Στο ψηφιακό σύστημα το πρόβλημα του θορύβου είναι λιγότερα!!**
  - Ο δέκτης αποφασίζει μόνο μεταξύ του '1' και '0'

# Παραμόρφωση σήματος λόγω διασποράς

Distortion is changes in *shape* of a signal



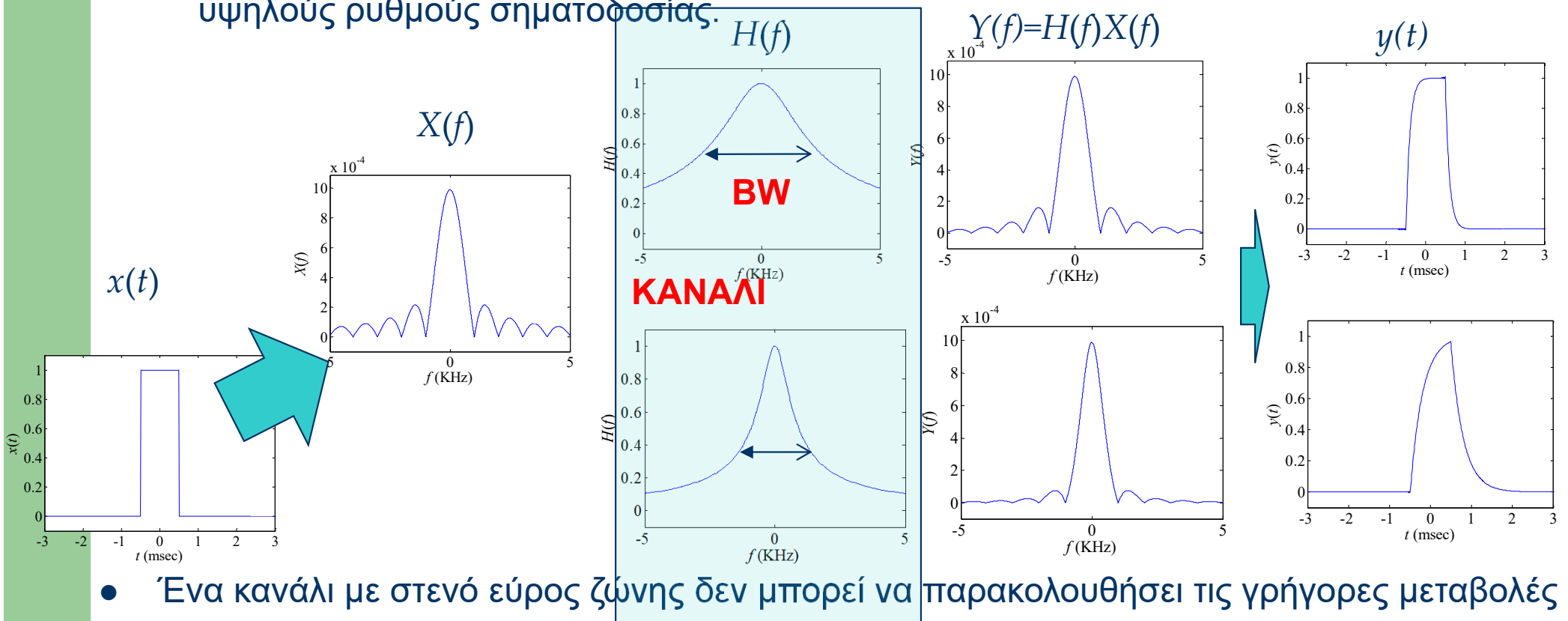
**Delay Distortion** common in guided media

- change in propagation velocity based on signal frequency
- implies the frequency components of the signal will have different phase based on frequency



# Επίδραση καναλιού στο φάσμα του σήματος

- Τα τηλεπικοινωνιακά κανάλια χαρακτηρίζονται και αυτά από μία φασματική απόκριση  $H(f)$  η οποία αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τις επιδόσεις του τηλεπικοινωνιακού συστήματος (=Εύρος ζώνης καναλιού BW).
- Στην έξοδο του καναλιού το φάσμα του σήματος είναι  $Y(f)=X(f)H(f)$  όπου  $X(f)$  το φάσμα στην είσοδο του καναλιού.
- Είδαμε πως όσο αυξάνει ο ρυθμός σηματοδότησης, αυξάνει και το εύρος ζώνης του σήματος. Ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι με στενό  $H(f)$  δεν μπορεί να υποστηρίξει υψηλούς ρυθμούς σηματοδότησης.



- Ένα κανάλι με στενό εύρος ζώνης δεν μπορεί να παρακολουθήσει τις γρήγορες μεταβολές του σήματος...

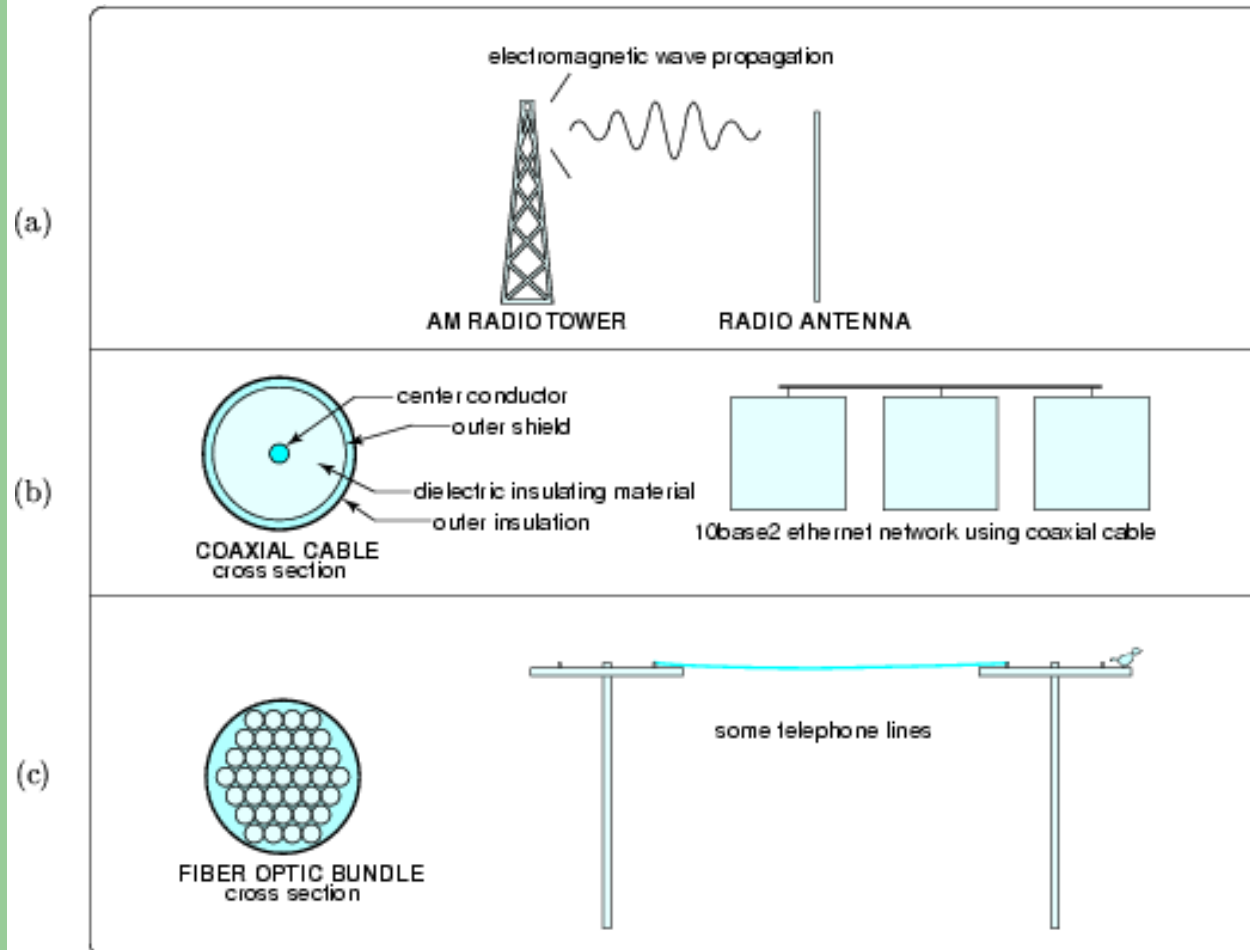


# Εύρος ζώνης και Χωρητικότητα

- Το εύρος ζώνης (bandwidth)  $B$  του καναλιού ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη και στην ελάχιστη συχνότητα, στην οποία η γραμμή μπορεί να μεταδώσει πληροφορίες (σε μονάδες Hz)
  - Κάθε σύστημα έχει ένα πεπερασμένο εύρος ζώνης (finite bandwidth)
- Η χωρητικότητα (capacity)  $C$  ενός μέσου μετάδοσης αποτελεί ένα μέτρο της δυνατότητας μεταφοράς δεδομένων από μια γραμμή επικοινωνίας, και ορίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων που υποστηρίζεται από το κανάλι, χωρίς η μετάδοση να χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση σφαλμάτων (σε μονάδες bit ανά δευτερόλεπτο ή bps – bits per sec).
- Η χωρητικότητα ενός μέσου μετάδοσης συσχετίζεται με το εύρος ζώνης, την ισχύ του σήματος  $S$  και την ισχύ του θορύβου  $N$ 
  - ένα μέσο μετάδοσης με μεγάλο εύρος ζώνης έχει αντίστοιχα και μεγάλη χωρητικότητα
  - **NΟΜΟΣ Shannon:  $C=B\log(1+S/N)$**



# Σήματα και φυσικά μέσα μετάδοσης



Μετάδοση σήματος με

- ηλεκτρομαγνητικά κύματα στον αέρα (a)
  - Ραδιόφωνο, TV, κινητή τηλεφωνία
- ηλεκτρικό ρεύμα σε ομοαξονικό καλώδιο (b) ή σε άλλα καλώδια
  - Δίκτυα Η/Υ όπως Ethernet, cable TV, τηλεφωνική γραμμή σπιτιού
- Παλμούς φωτός σε οπτικές ίνες (c)
  - γραμμές τηλεφώνου

Και στις 3 περιπτώσεις αυτό που μεταφέρεται είναι το ίδιο: ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο!



# Διαφορές Μέσων Μετάδοσης

- Ενσύρματα μέσα
  - Ψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης
  - Κόστος αυξάνει ανάλογα με την απόσταση
  - Αναγκαία η χρήση αναμεταδοτών (repeaters) λόγω εξασθένησης του σήματος
- Ασύρματα μέσα
  - Χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης
    - Διαχωρισμός σήματος σε πολλαπλές διαδρομές που οφείλεται σε ανάκλαση, διάθλαση κλπ
    - Πιθανή επιρροή έντονων καιρικών φαινομένων (π.χ. καταιγίδων)
  - Επηρεάζονται από βιομηχανικούς θορύβους

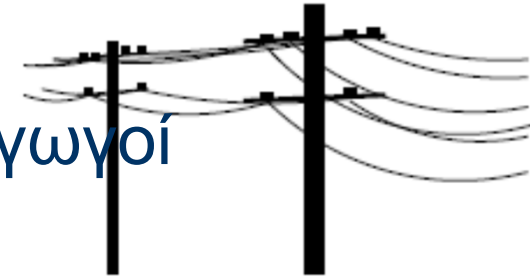




# Ενσύρματα μέσα μετάδοσης

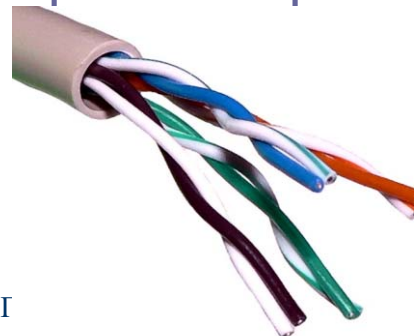
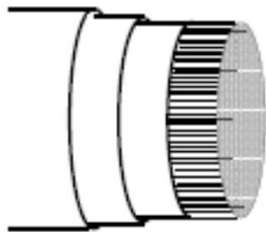
- **Δισύρματες γραμμές:** δυο μονωμένοι αγωγοί

- Μικρά μήκη ζεύξεων
- **BW:** μερικές δεκάδες KHz
- Ευαίσθησία στο θόρυβο – Παραδιαφωνία



- **Συνεστραμμένα ζεύγη (TP)**

- Μικρότερη ευαίσθησία στο θόρυβο
- **BW:** μερικές εκατοντάδες KHz (1MHz)
- Μεγάλη απόσβεση ( $\uparrow f^2$ )
- Ομάδες-θωρακισμένα καλώδια
- Εύκολη εγκατάσταση-απομάστευση



–Category 5e:  
10/100/1000  
Mbps ethernet

–Category 6:  
10Gbps @ 55m

–Cat6a:20 Gbps  
@ 55m

–Cat7:100 Gbps  
@ 15m

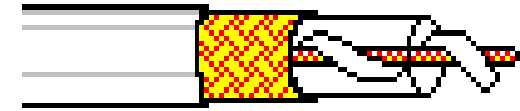




# Ενσύρματα μέσα μετάδοσης ΙΙ

## ● Ομοαξονικό καλώδιο (RGxy)

- Ο κεντρικός περιβάλλεται από τον αγωγό γείωσης
- Μηδενική ευαισθησία στον εξωτερικό θόρυβο
- Δυσκολία στη χρήση – connectors
- **BW: 800MHz – 1 GHz**
- Μετάδοση αναλογικών και ψηφιακών σημάτων TV – Υπεραστικά τηλεφωνικά δίκτυα

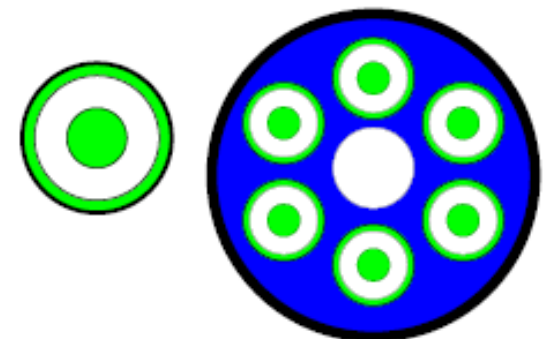
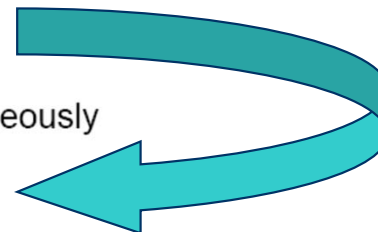


Long Distance Telephone Transmission

- can carry 10,000 voice calls simultaneously
- being replaced by fibre optic

Suitable for:

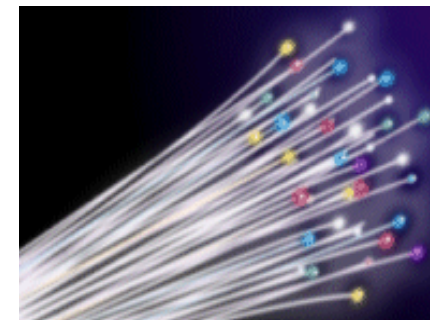
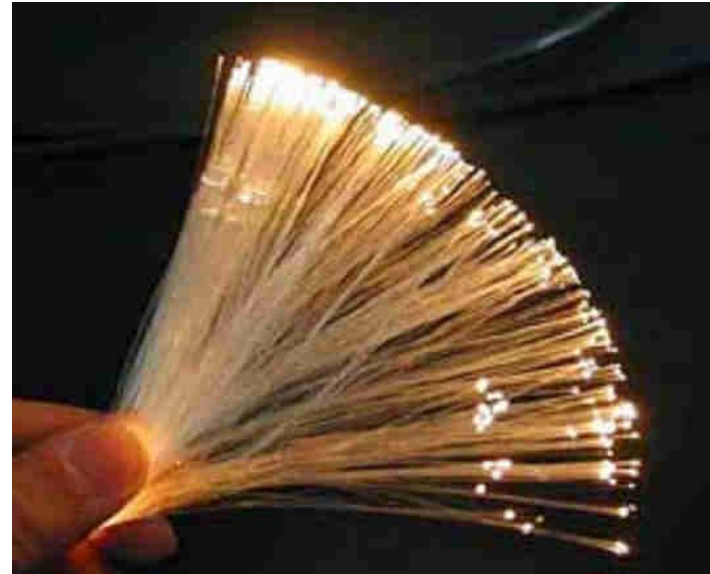
- short distance computer system links
- local area networks





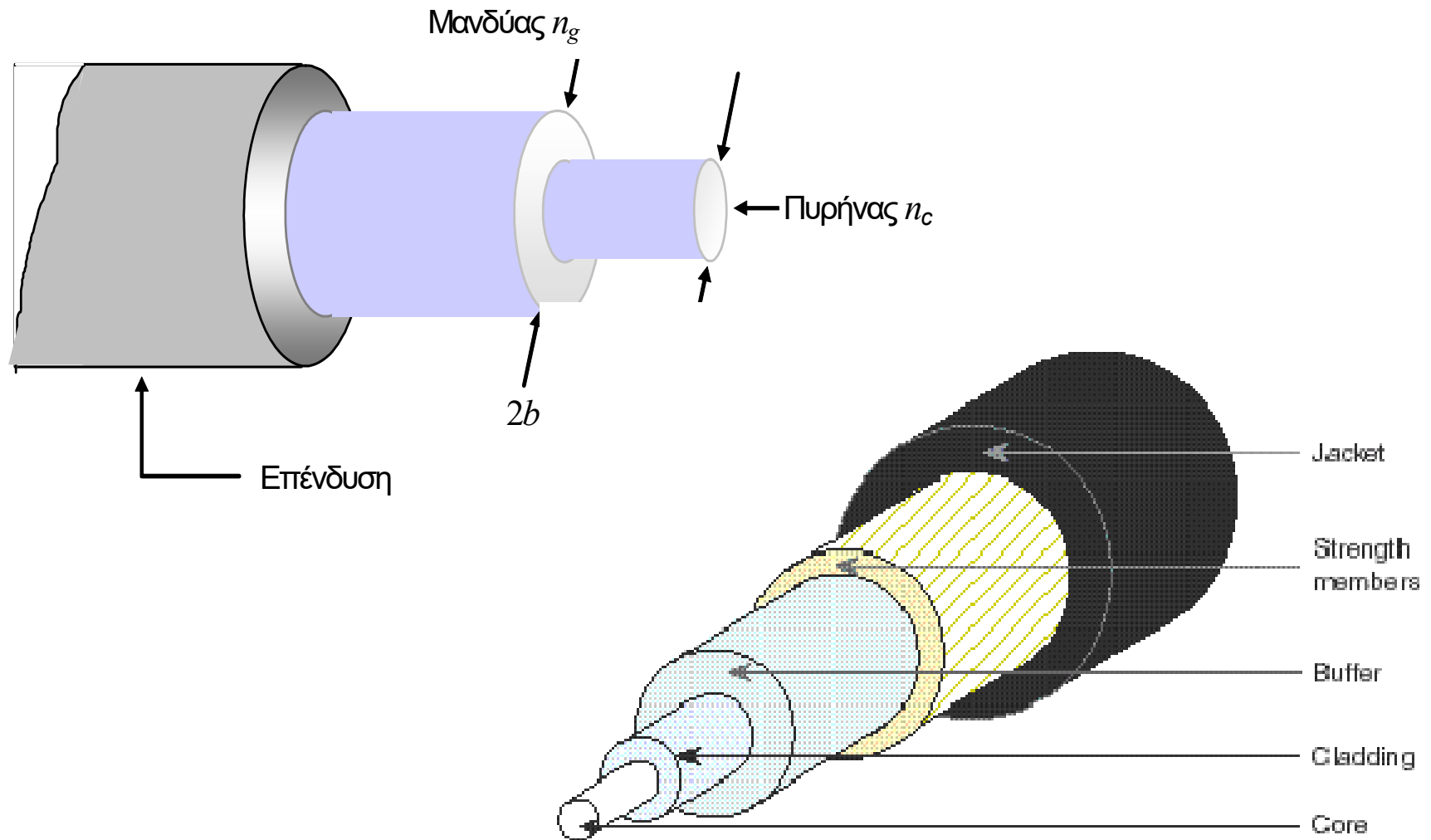
# Οπτικές ίνες

- Χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλο εύρος ζώνης γεγονός που οδηγεί σε ταχύτητες μετάδοσης της τάξεως του 1-2 Tbps.
- Δεν επηρεάζονται από απότομες μεταβολές στην τάση ενός δικτύου, από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, από οξειδωτικές χημικές ουσίες, ή από άλλα ατμοσφαιρικά και βιομηχανικά παράσιτα
- Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η πολύπλοκη τεχνολογία εγκατάστασής τους, και η υψηλή τιμή και ευαισθησία του εξοπλισμού διασύνδεσης που τη συνοδεύει



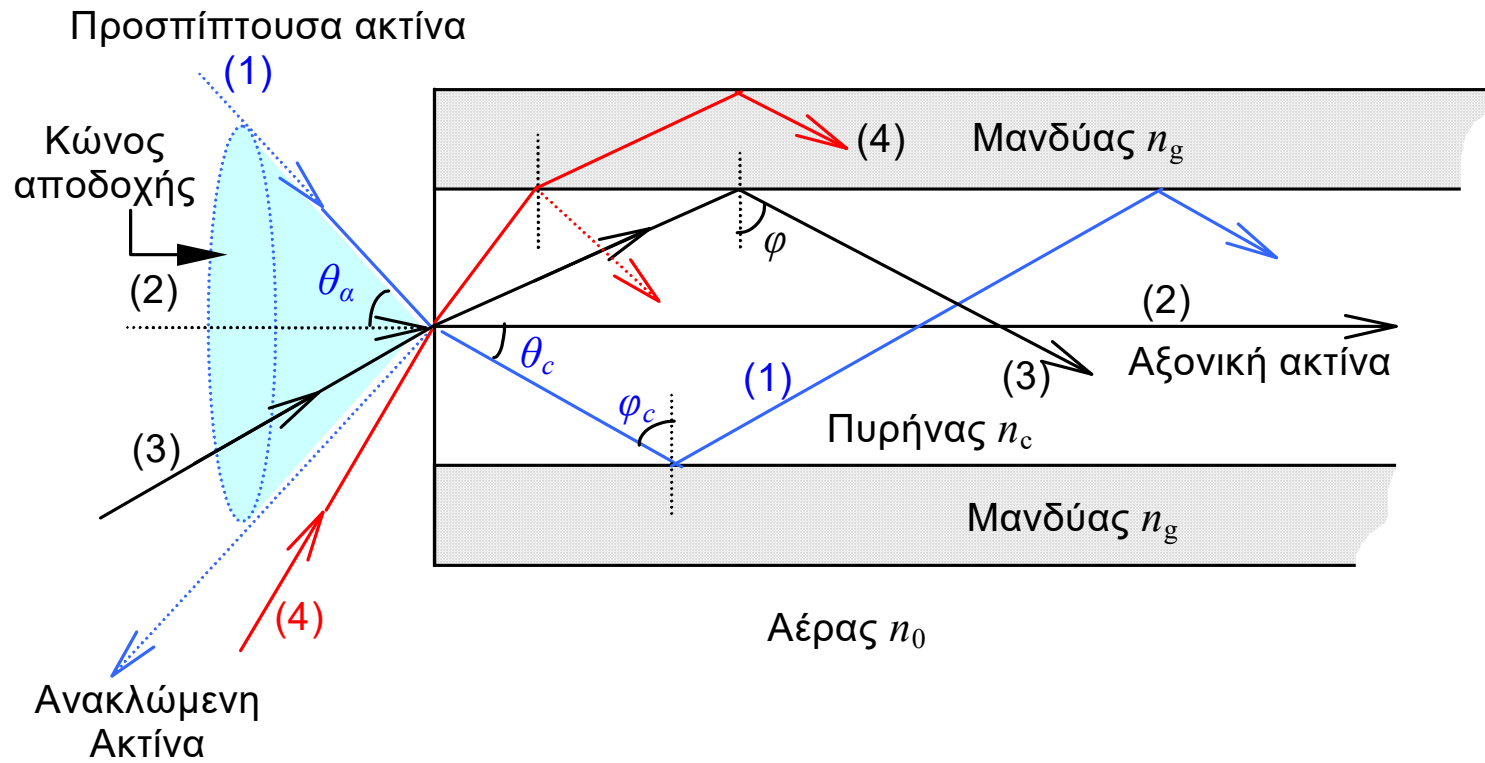


# ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ





# ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΗΣΗ



$$NA = \sin \theta_a = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

$$NA = \sin \theta_a = \frac{1}{n_e} \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

$$P_f = P_s (NA)^2$$

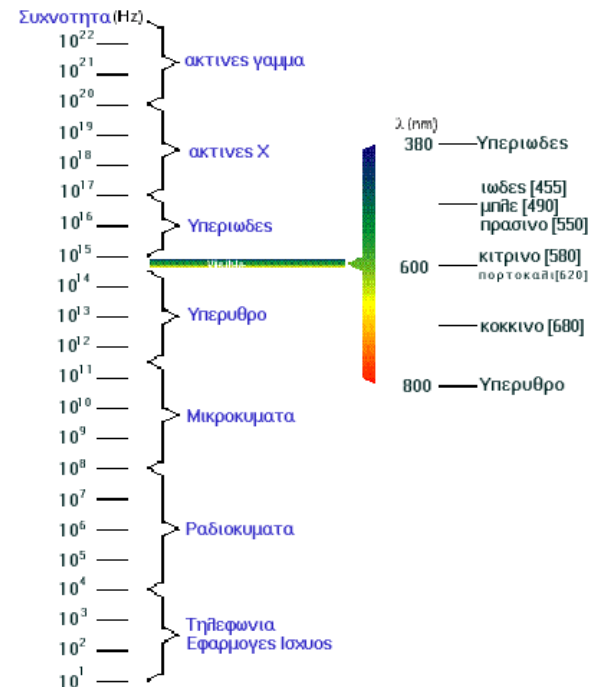
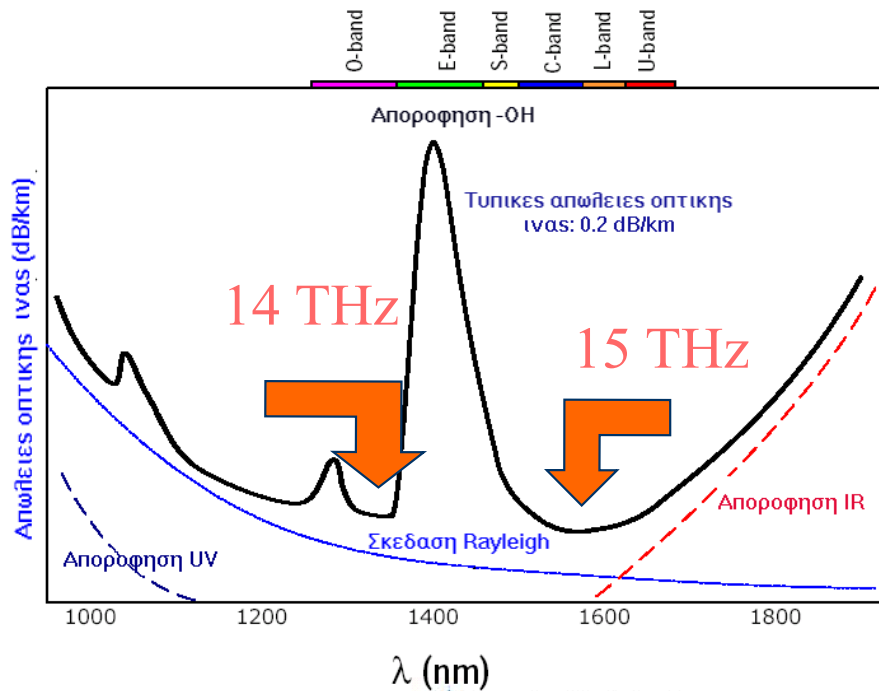
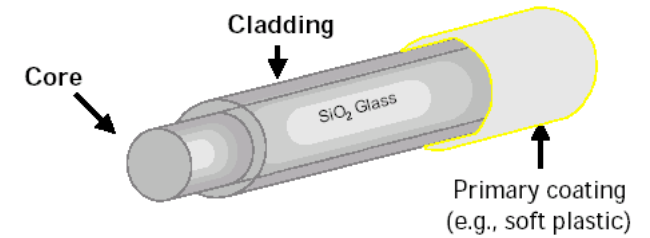
$$\theta_\delta < \theta_c < \frac{\pi}{2} - \phi_c$$

$$\phi_c \leftrightarrow \theta_a$$



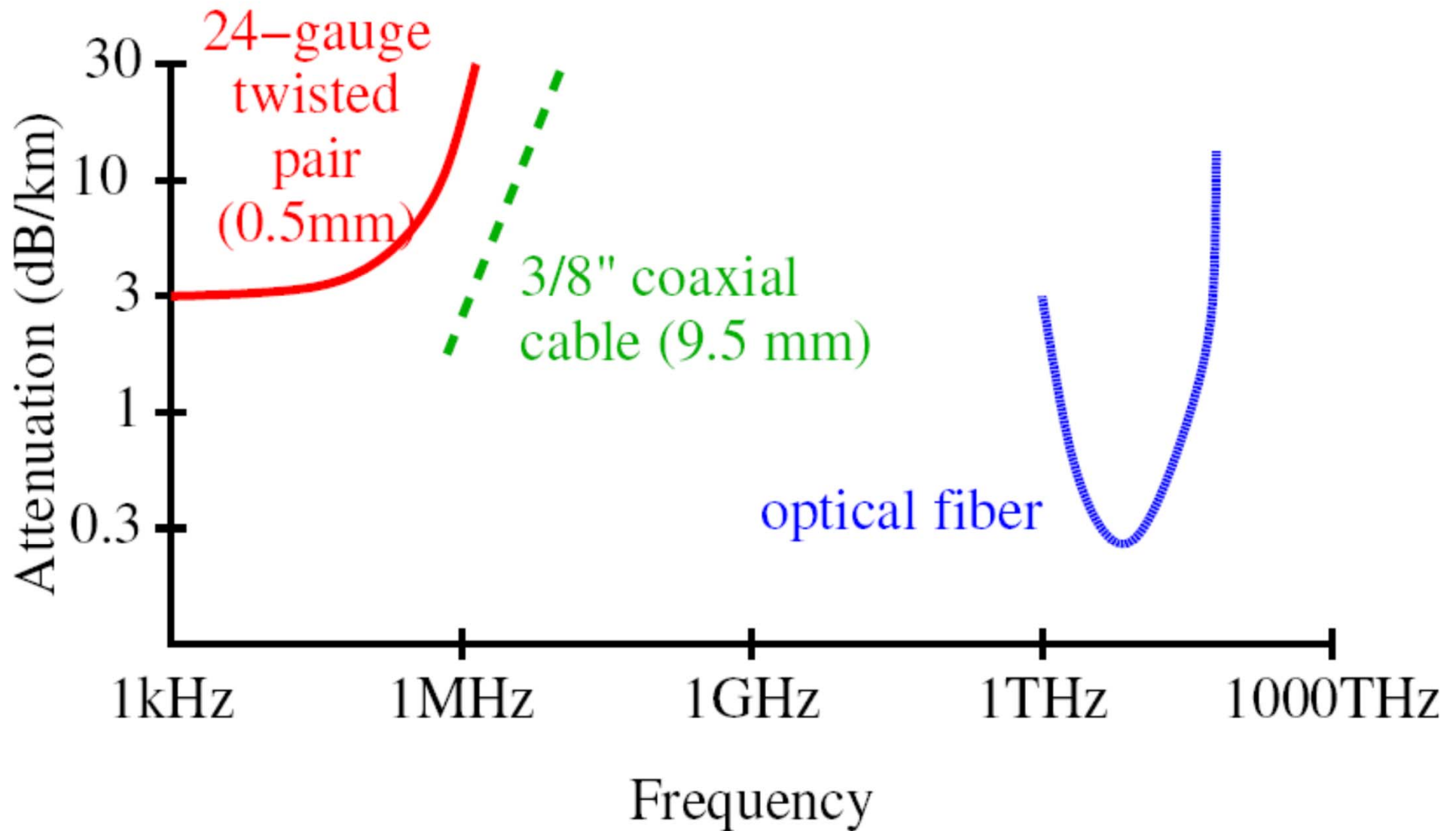
# ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

- Χρησιμοποιεί «φως» (κοντά στο υπέρυθρο 1.3 μm –1.55 μm) για τη μεταφορά της πληροφορίας
- Μέσο μετάδοσης: οπτική ίνα



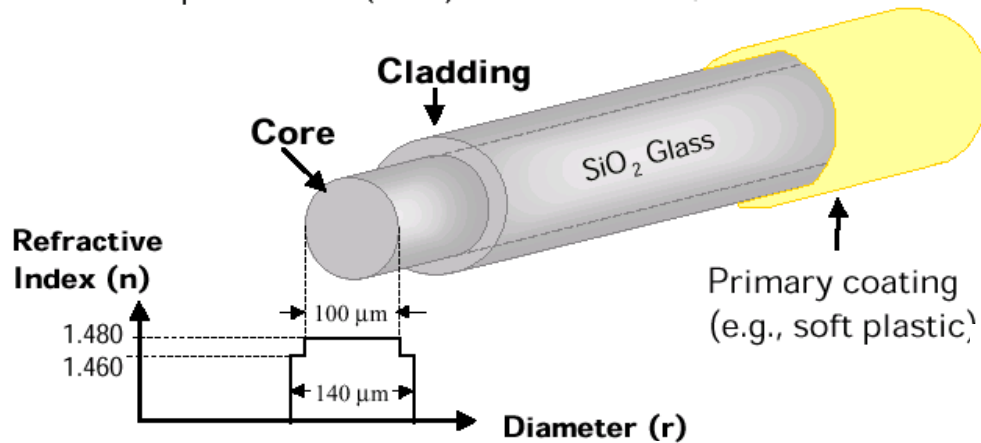


# Εξασθένιση και συχνότητα - Σύνοψη



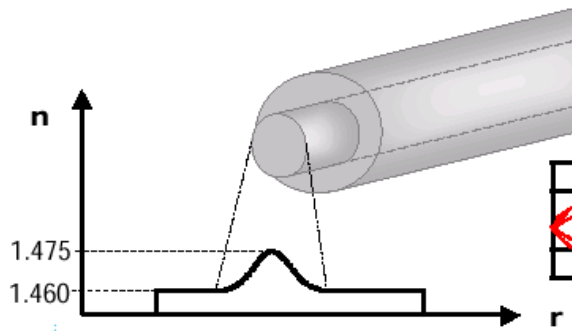


# ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ



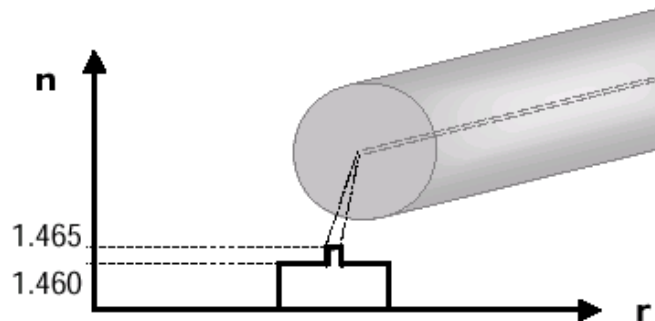
## • Ίνα βηματικού δ.δ.

- Most common designs: 100/140 or 200/280 μm
  - Plastic optical fiber (POF): 0.1 - 3 mm Ø, core 80 to 99%
- |                                   |                |
|-----------------------------------|----------------|
| 100/140 μm Silica Fiber:          | ~ 20 Mb/s • km |
| 0.8/1.0 mm Plastic Optical Fiber: | ~ 5 Mb/s • km  |



## • Ίνα βαθμιαίου δ.δ.

- Most common designs: 62.5/125 or 50/125 μm
- Bitrate x Distance product: ~ 1 Gb/s • km



## • Μονότροπη Ίνα (SMF)

- Most common design: 9/125 μm or 10/125 μm
- Bitrate x Distance product: up to 1000 Gb/s • km

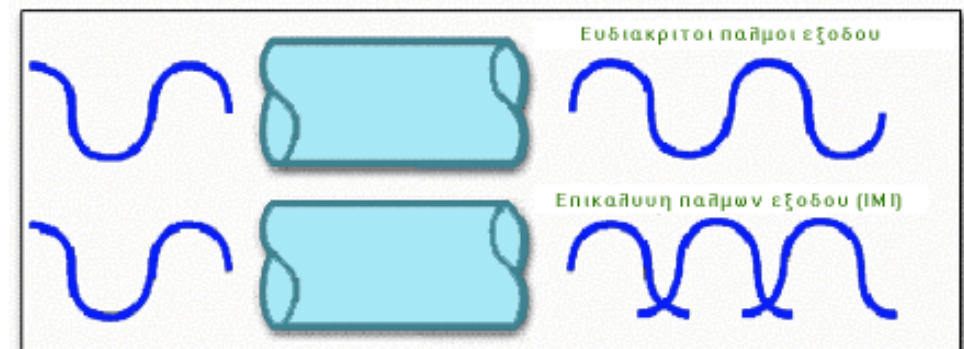
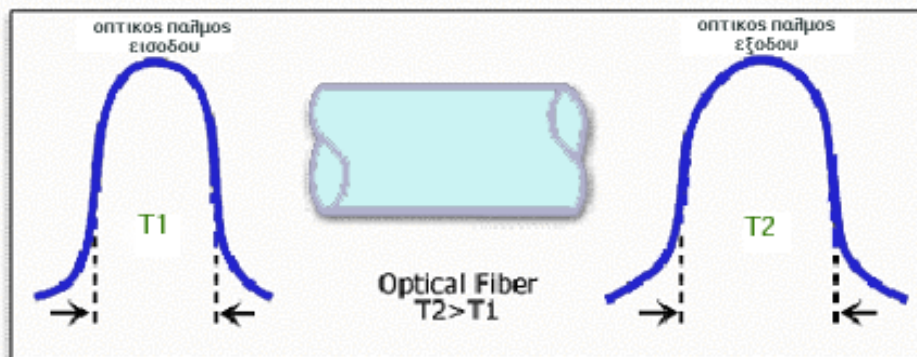




# Παράγοντες περιορισμού του εύρους ζώνης στις οπτικές ίνες ΙΙΙ

## ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΑΛΜΩΝ

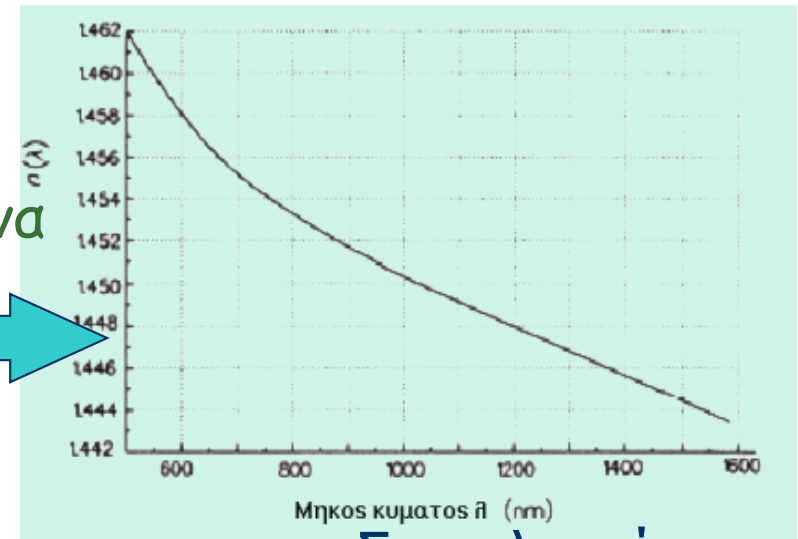
- ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΤΡΟΠΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ (MODAL DISPERSION)
- ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΥΛΙΚΟΥ -ΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑ (MATERIAL DISPERSION)
- ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ (WAVEGUIDE DISPERSION)



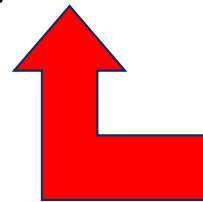
# Παράγοντες απωλειών και περιορισμού του εύρους ζώνης στις οπτικές ίνες (II)



- Διασπορά
- Διασπορά τρόπων  $\longleftrightarrow$  Μονότροπη ίνα
- Χρωματική διασπορά  $n_c = n_c(\lambda)$



$$\Delta\tau_{\Delta\lambda} = D_{chr} \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Υλικού \&} \\ \text{Κυματοδηγού} \end{array} \right.$$



Φασματικό εύρος πηγής

$D_{chr} \left[ \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \right]$  Συντελεστής χρωματικής διασποράς

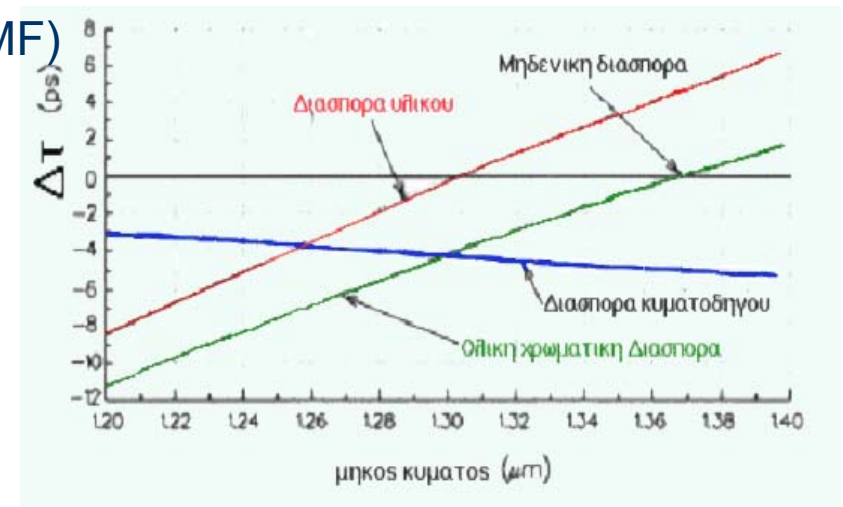
Τυπικές τιμές για μια συνήθη μονότροπη ίνα (SMF)

είναι:  $D_{chr} = 0 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$  για  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$

και  $D_{chr} = 17 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$  για  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

- Διασπορά τρόπου πόλωσης PMD

$$\langle \Delta\tau \rangle = D_{PMD} \sqrt{L}$$

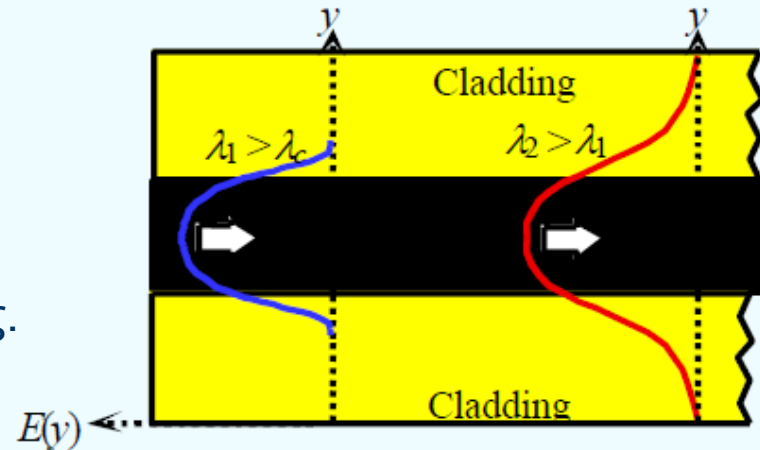




# Διασπορά κυματοδηγού

Όσο πιο πολύ αυξάνεται το μήκος κύματος, τόσο περισσότερο από το οπτικό πεδίο (ισχύς του οπτικού σήματος) εισχωρεί μέσα στον μανδύα:

- Συμβαίνει επειδή περίπου 80% της οπτικής ισχύος περιορίζεται στον πυρήνα σε μονότροπες οπτικές ίνες. Το φως που διαδίδεται στον μανδύα ταξιδεύει πιο γρήγορα. Δεν είναι σημαντικό σε πολύτροπες οπτικές ίνες.
- Για μονότροπες ίνες, διασπορά υλικού είναι η πιο σημαντική μορφή διασποράς



- Ακόμη και αν δεν έχουμε διασπορά υλικού, διασπορά κυματοδηγού θα υπάρχει λόγω της κατασκευής της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ πυρήνα-μανδύα



# ΟΛΙΚΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑ

- όταν η πηγή είναι μονοχρωματική, η Διεύρυνση παλμού οφείλεται στη διαμόρφωση της οπτικής δέσμης και αποδεικνύεται ότι:

Μήκος κύματος  
λειτουργίας

$$\delta\tau_{\text{mod}} = 2D \frac{\lambda^2}{c} R_b L$$

Μήκος ζεύξης

Ταχ. φωτός

- Η ολική διασπορά σε μια οπτική ίνα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\tau_{TOT} = \sqrt{\Delta\tau_m^2 + \Delta\tau_{\Delta\lambda}^2 + \Delta\tau_{\text{mod}}^2 + \langle\Delta\tau\rangle^2}$$

## Εκτίμηση του μέγιστου ρυθμού σηματοδοσίας.

Θεωρώντας ότι για αξιόπιστη μετάδοση, η διαπλάτυνση των παλμών δεν πρέπει να ξεπεράσει ένα ποσοστό  $\varepsilon$  της περιόδου bit  $T_b$  (ή της διάρκεια του bit) της αποσπελλόμενης πληροφορίας, θα ισχύει:

$$\Delta\tau \leq \varepsilon T_b = \varepsilon \frac{1}{R_b}$$

Προδιαγραφές ITU (G.957)

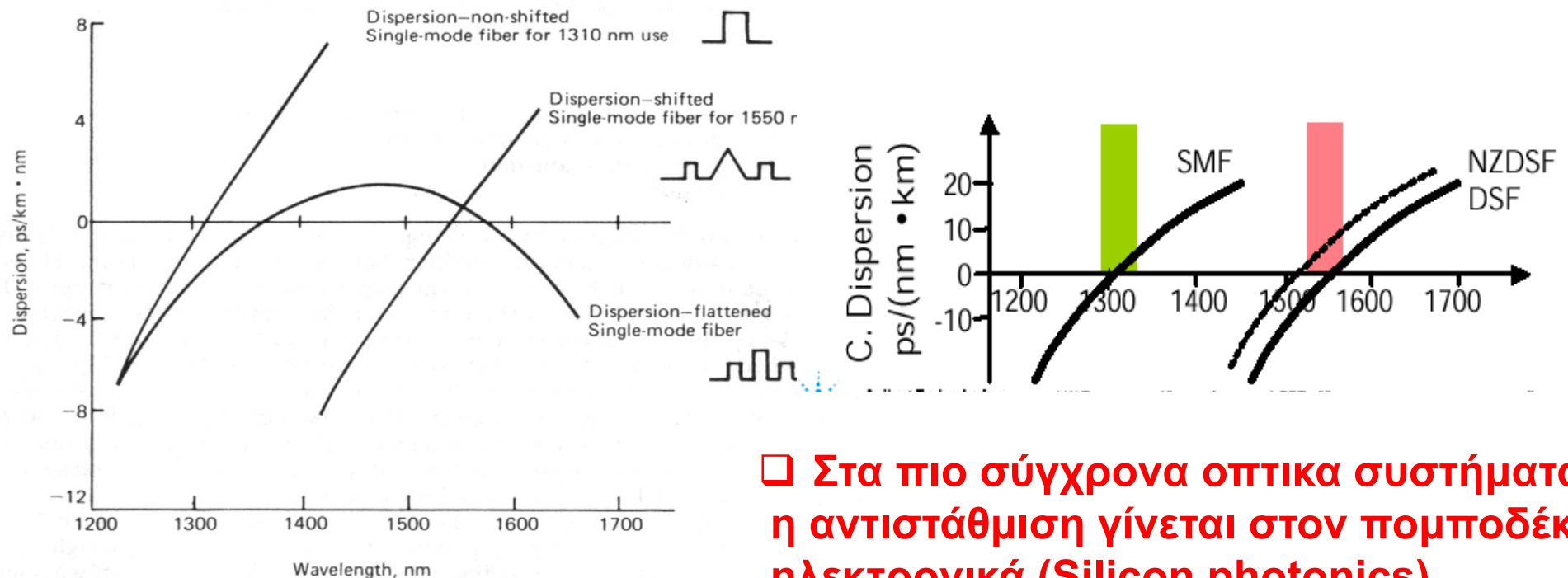
Για ποινή (penalty) 1 dB  $\varepsilon=0.306$

Για ποινή (penalty) 2 dB  $\varepsilon=0.491$



# ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ

- ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΟΧΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ
- ΕΙΔΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ
- Προσθήκη ινών αντιστάθμισης



❑ Στα πιο σύγχρονα οπτικά συστήματα η αντιστάθμιση γίνεται στον πομποδέκτη ηλεκτρονικά (Silicon photonics)



# Παράδειγμα

- Δίνεται μονότροπη ίνα με συντελεστή διασποράς  $D_{ch} = -15 \text{ ps/nmkm}$ .  
Να βρεθεί το μέγιστο μήκος ζεύξης με την οποία μπορεί να μεταδοθεί  
ρυθμός  $R = 100 \text{ Mb/s}$ . [φασματικό εύρος εκπομπής  $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$ ]

**Χρωματική Διασπορά**  $\rightarrow$  **Χρονική διεύρυνση**:  $\Delta T = D_{ch} \Delta\lambda L$

Θα πρέπει όμως η χρονική διεύρυνση να είναι μικρότερη από την  
διάρκεια των *bit* ( $T_B = 1/R$ ,  $\epsilon = 1$ )

$$\Delta T < \epsilon 1/R \rightarrow R \Delta T < 1 \rightarrow D_{ch} \Delta\lambda L < 1/R \rightarrow L_{\max} = 1 / [D_{ch} \Delta\lambda R] \rightarrow$$

$$L_{\max} = 1 / (15 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \cdot 10 \text{ nm} \cdot 100 \text{ Mb/s}) = 66,6 \text{ km}$$

$$\text{Για } \epsilon = 0,306 \text{ (και penalty 1dB): } L_{\max} = 19,8 \text{ km}$$



# Άσκηση-16

- Έστω ζεύξη  $L=20\text{Km}$  μονότροπης ίνας με συντελεστή διασποράς  $\delta(\lambda)=-20$  ps/nmkm με πηγή **μονοχρωματικό** laser που εκπέμπει στα 1550nm. Μέχρι ποιο ρυθμό μπορώ να μεταδώσω, αν υποθεθεί διαμόρφωση ΟΟΚ με εύρος ζώνης  $BW=2R_b$ . Υποθέστε ότι η ευαισθησία του δέκτη επαρκεί για αρκετά μεγάλη αύξηση ρυθμού λόγω της μικρού σχετικά μήκους ζεύξης. (Στην πραγματικότητα  $P_R=P_R(R_b)$ )

Ισχύει:  $\Delta t = D_{ch} \Delta \lambda L$  και επειδή  $\Delta t < 1/R \rightarrow D_{ch} \Delta \lambda L = 1/R_b \max$  (1)

Θεωρούμε ότι όλο το  $\Delta \lambda$  οφείλεται στη διαμόρφωση αφού το laser εκπομπής είναι μονοχρωματικό. Επιπλέον ισχύει:

$$\lambda = c/f \rightarrow \Delta \lambda = (c/f^2)\Delta f \rightarrow \Delta \lambda = (\lambda^2/c)\Delta f \rightarrow \Delta \lambda = (\lambda^2/c) BW$$
 (2)

όπου  $BW$  είναι το εύρος ζώνης που οφείλεται όπως είπαμε στη διαμόρφωση και θεωρείται  $=2R_b$ . Άρα η (1) λαμβάνοντας υπ'όψιν την (2) γίνεται ( $\epsilon=1$ ):

$$D_{ch} (\lambda^2/c) 2R_b L = 1/R_b \rightarrow (R_b)^2 = c/(2L D_{ch} \lambda^2) \rightarrow R_b = [c/(2L D_{ch} \lambda^2)]^{1/2}$$
 και με αντικατάσταση προκύπτει: (προσοχή  $\lambda^2 \rightarrow \text{nm}^2$ )

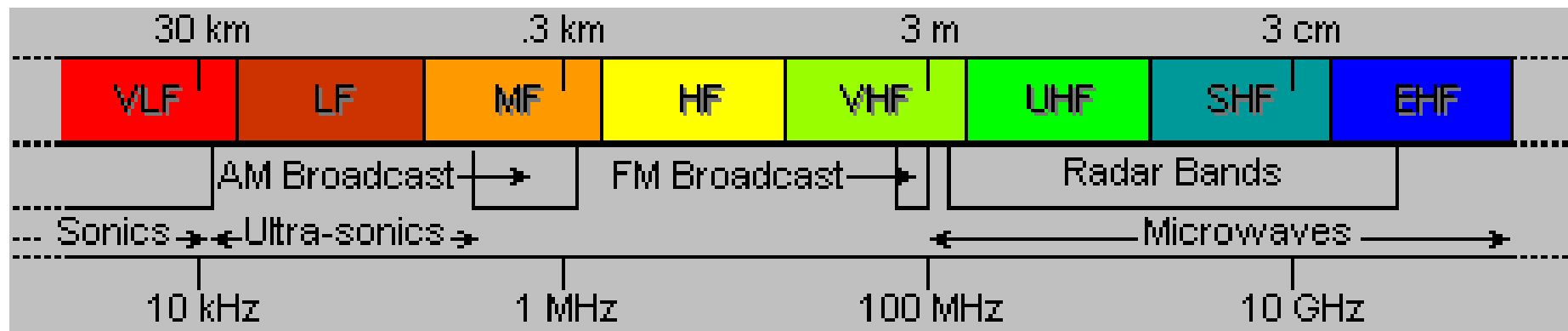
(Βλέπε και Δ59)

$$R_b = 12.5 \text{ Gb/s}$$



# Ασύρματα μέσα μετάδοσης

- Διάδοση στον «ελεύθερο χώρο» με τη βοήθεια ΗΛΜ κυμάτων και τη χρήση του «ραδιοφάσματος»
- Το ραδιοφάσμα είναι εθνικός πόρος και υπόκειται σε περιορισμούς που τίθενται από εθνικούς και διεθνείς οργανισμούς (IFRB, CCIR)
- Η κατανομή του φασματος παγκοσμίως ρυθμίζεται από την International Telecommunications Union-R







# Εφαρμογές Wireless

- **Very Low Frequency (VLF) 3 to 300 kHz**
  - Submarine
- **Medium Frequency (MF) 0.3 to 3 MHz**
  - AM Radio Broadcast
- **High Frequency (HF) 3 to 30 MHz**
  - Ionospheric long distance communications
- **Very High Frequency (VHF) 30 to 300 MHz**
  - Land mobile
  - Television Broadcast
- **Ultra High Frequency (UHF) 300 MHz to 3 GHz**
  - UHF television channels 14-82, PCS, mobile
- **Μικροκύματα - Microwaves: 3GHz – 30GHz**
  - Fixed wireless, Δορυφορικές επικοινωνίες και Radar
- **Χιλιοστομετρικά (mm waves) :>30GHz**
  - ραδιοτηλεσκόπια, τηλεπισκόπηση (remote sensing), οπτικά συστήματα, ανιχνευτές/συστήματα ασφαλείας

| Ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα | Παραδείγματα χρησιμοποίησης                          | Συχνότητες                                      |
|----------------------------|--|---|
| Κοσμικές ακτίνες           | Φυσική, αστρονομία                                   | $10^{14}$ GHz και πάνω                          |
| Ακτίνες γ                  | Θεραπεία καρκίνου                                    | $10^{10}$ - $10^{13}$ GHz                       |
| Ακτίνες X                  | Εξετάσεις με ακτίνες X                               | $10^8$ - $10^9$ GHz                             |
| Υπεριώδεις ακτίνες         | Αποστείρωση  | $10^6$ - $10^8$ GHz                             |
| Ορατό φως                  | Ανθρώπινη όραση                                      | $10^5$ - $10^6$ GHz                             |
| Υπέρυθρη ακτινοβολία       | Φωτογράφιση  | $10^3$ - $10^4$ GHz                             |
| Μικροκύματα                | Ραντάρ, επικοινωνίες με δορυφόρους                   | 3-300 GHz                                       |
| Ραδιοκύματα                | Τηλεόραση UHF<br>Τηλεόραση VHF, Ράδιο FM<br>Ράδιο AM | 470 – 806 MHz<br>54 – 216 MHz<br>535 – 1605 kHz |

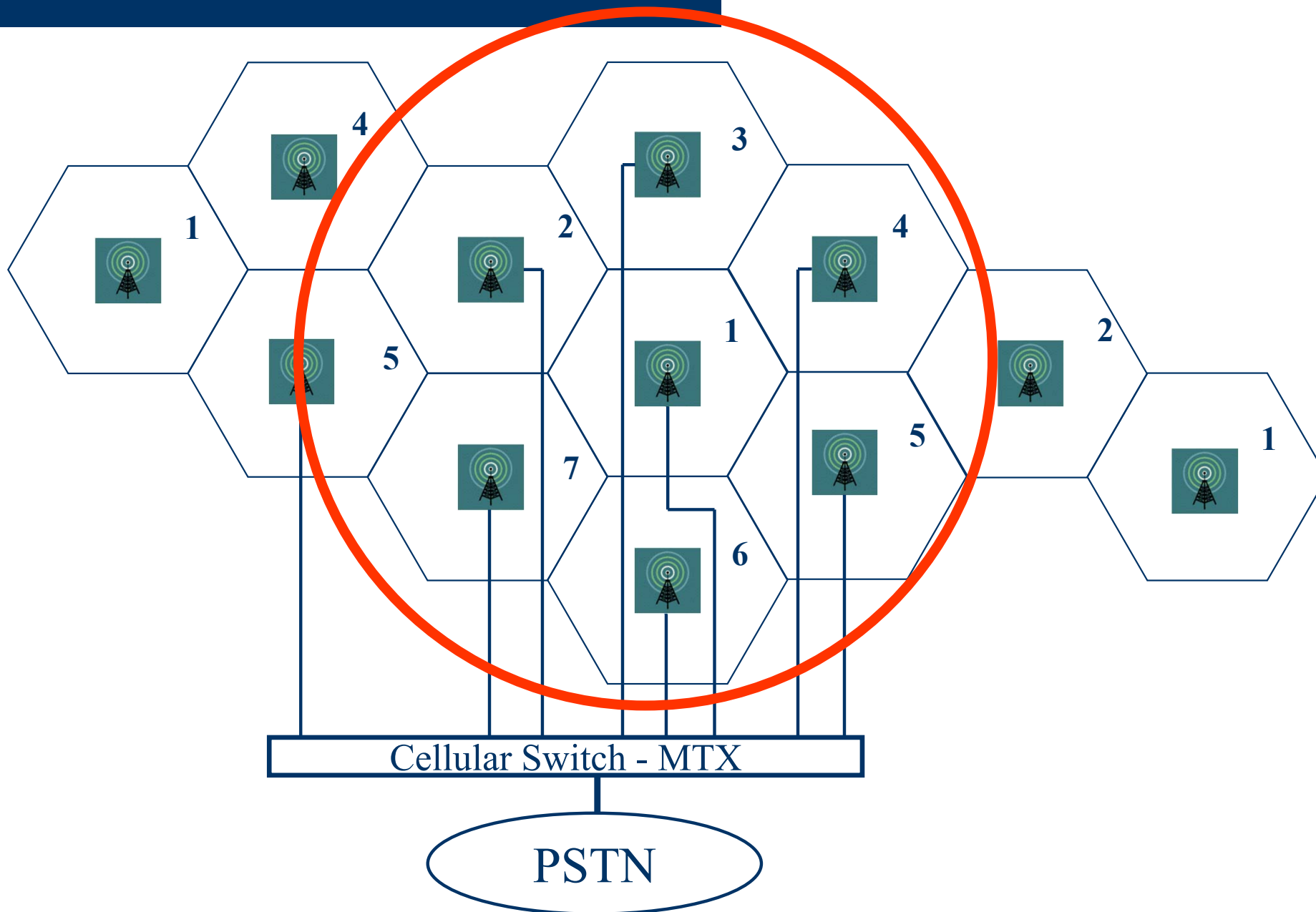


# Τύποι ασυρματικών ζεύξεων

- Frequency range:
  - 30 MHz to 2,5 GHz: κατευθυντικές και Μη εφαρμογές
  - 2,5 GHz to 40 GHz: Ραδιοζεύξεις λίαν κατευθυντικές (line of sight- LOS):
  - **infrared spectrum**; used for point to point and multiple point application(FSO) (line of sight)
- Εφαρμογές:
  - Επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις – long haul για τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες (εναλλακτικές στα coaxial or optical fiber), Back-haul
  - Propagation via towers located without blockage from trees, etc (towers less than 80 km apart)
- Περιορισμοί
  - Το φάσμα συχνοτήτων είναι εθνικός πόρος
  - The radio channel is a shared channel



# Frequency Re-Use





# Το πρόβλημα των ασυρμάτων

- Το φάσμα συχνοτήτων είναι περιορισμένος πόρος
- Λύσεις:

- Ψηφιοποίηση Υπηρεσιών (TV-radio)

- Γνωστικά ραδιοδίκτυα:

- transceiver architecture that can intelligently detect which communication channels are in use and which are not, and instantly move into empty channels to use them to transmit data.

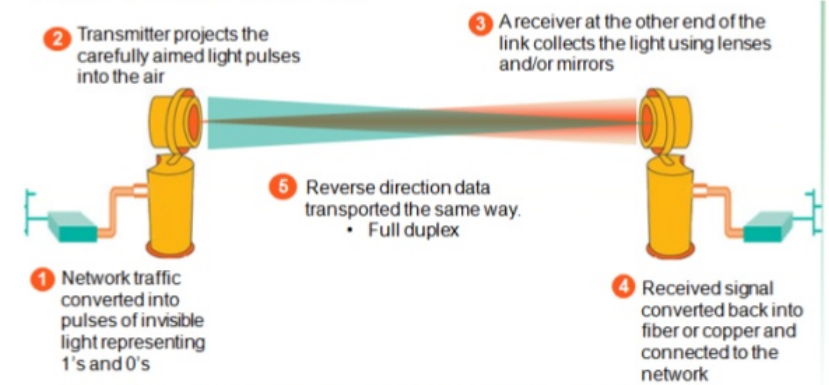
- Μετακίνηση στις οπτικές συχνότητες

- FSO

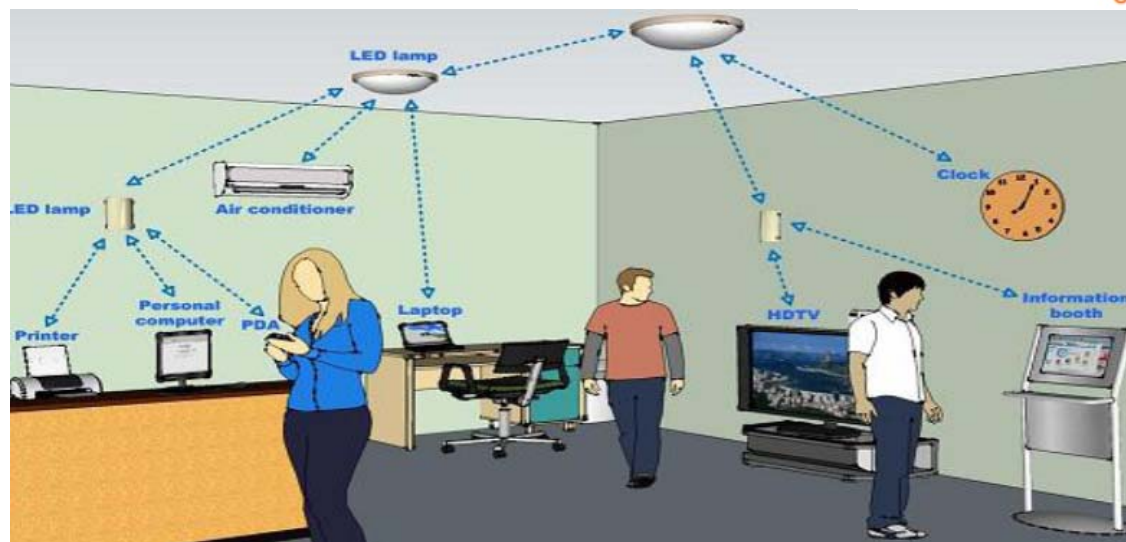
- VLC

Why Free Space Optics? [6]

How FSO Works



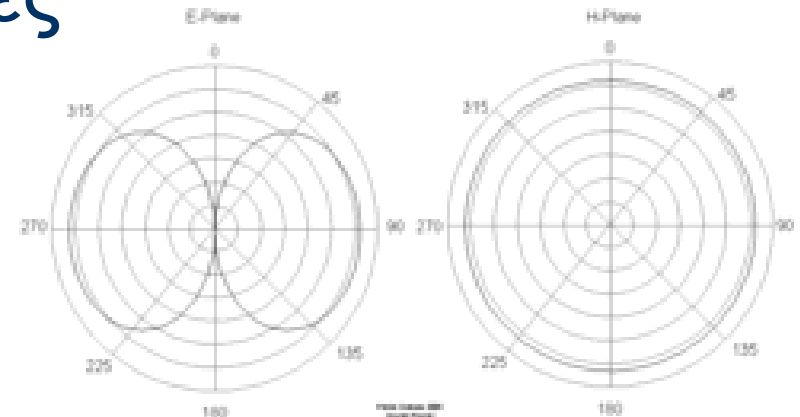
Anything that can be done in fiber can be done with FSO





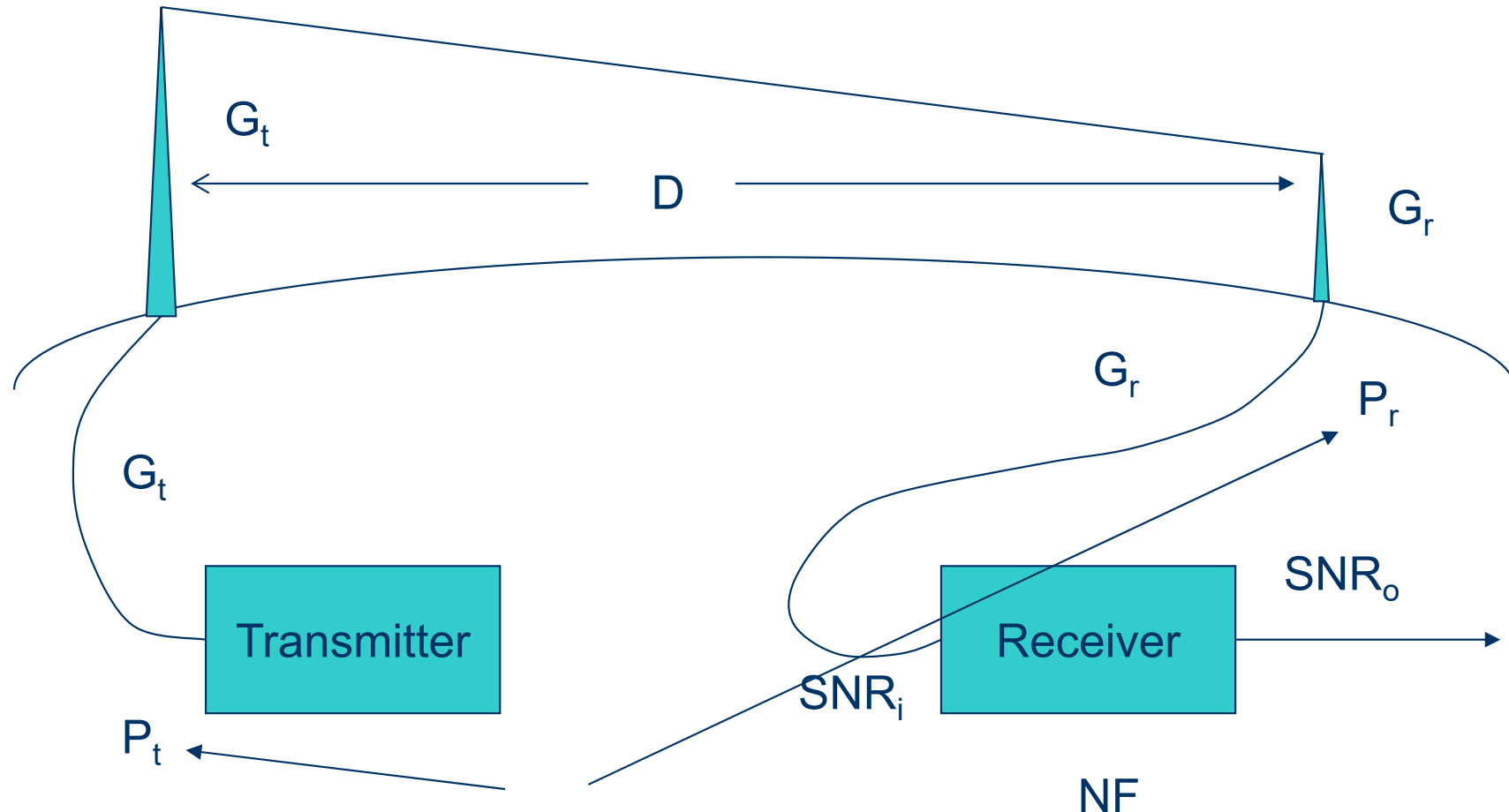
# Κεραίες - Antennas

- Κεραίες: Διατάξεις για την εκπομπή και λήψη σήματος στον/από ελεύθερο χώρο με τη μορφή ΗΛΜ κυμάτων
- Μετατροπείς (Transducers) ενέργειας  $(V, I) \leftrightarrow$  Ενέργεια ΗΛΜ πεδίου
- Απλές και σύνθετες κεραίες
- Παθητικές διατάξεις
  - Gain  $G$
  - Εύρος ζώνης
  - Διάγραμμα ακτινοβολίας
  - Μέγεθος ( $\sim \lambda$  μήκος κύματος λειτουργίας)





# Διάδοση στον ελεύθερο χώρο ΙΙ



- $EIRP = P_t G_t$

Ισχύς που αποδίδεται στον πομπό (t) / δέκτη (r)



# Απώλειες ελεύθερου χώρου

$$P_r = P_t G_t G_r \left[ \frac{\lambda}{4\pi D} \right]^2$$

Friis  
Equation

**D = the distance between receiver and transmitter**

**$\lambda$  = free space wavelength =  $c/f$**

**c = speed of light ( $3 \times 10^8$  m/s)**

**f = frequency (Hz)**

**$P_r$  = received power**

**$P_t$  = transmitted power**

**$G_t$  = transmitter antenna gain**

**$G_r$  = receiver antenna gain**

$$\text{Path losses} = L = 20 \log 4\pi D / \lambda = 32.4 + 20 \log f_{[\text{MHz}]} + 20 \log D_{[\text{km}]}$$



# Διαθέσιμη ισχύς στο δέκτη

$$P_a = P_t + G_t + G_r - L - FM$$

**where:**

**$P_a$  = Available Power**

**$P_t$  = transmitted power**

**$G_t$  = transmitter antenna gain**

**$G_r$  = receiver antenna gain**

**$L$  = Loss at Transmitter, Receiver, transmission**

**$FM$  = Fade Margin**

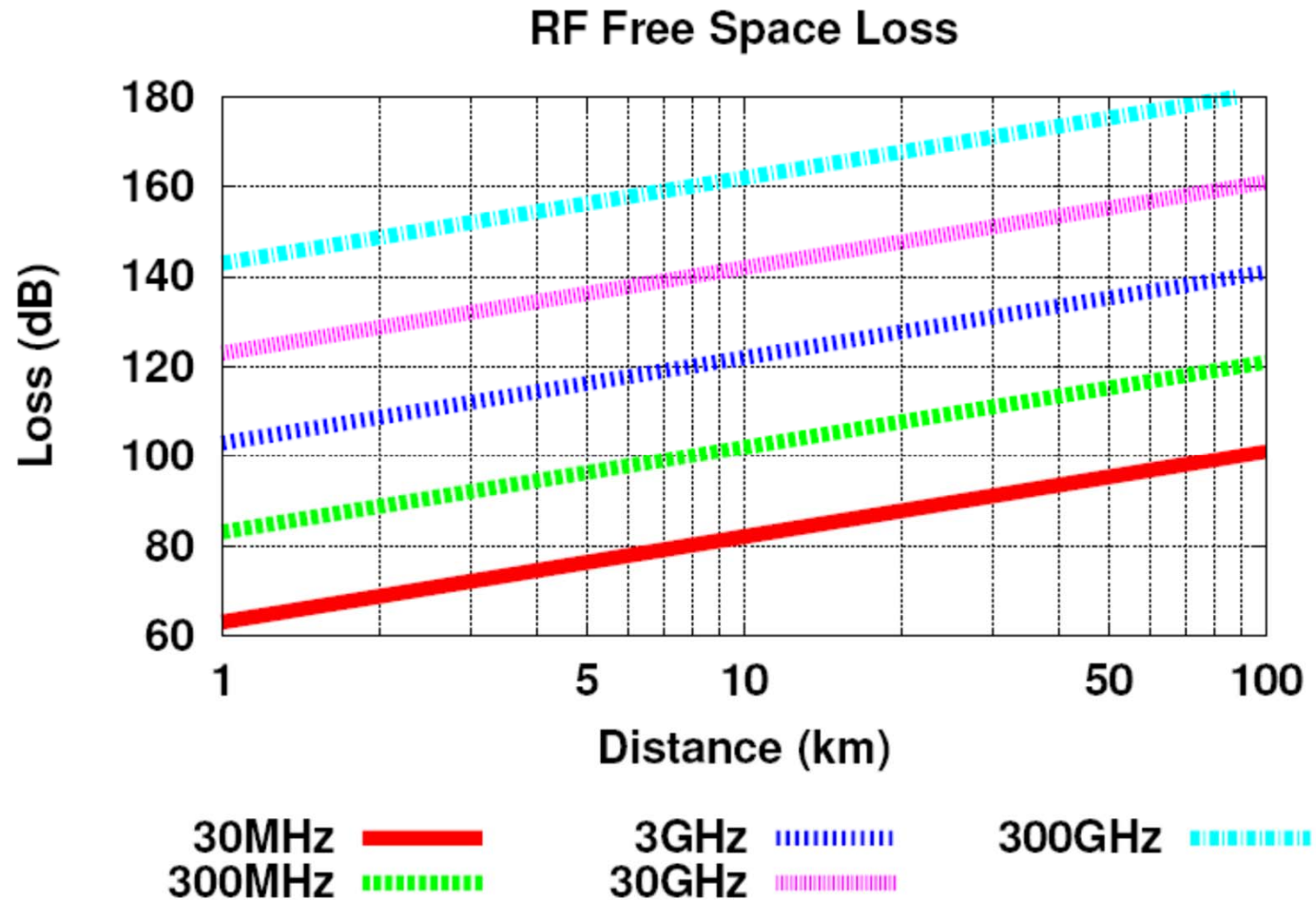
**$P_a = S$  signal power**





# Απώλειες ελεύθερου χώρου L

$$L = \frac{\lambda^2}{16\pi^2 D^2}$$



Ωστόσο.....

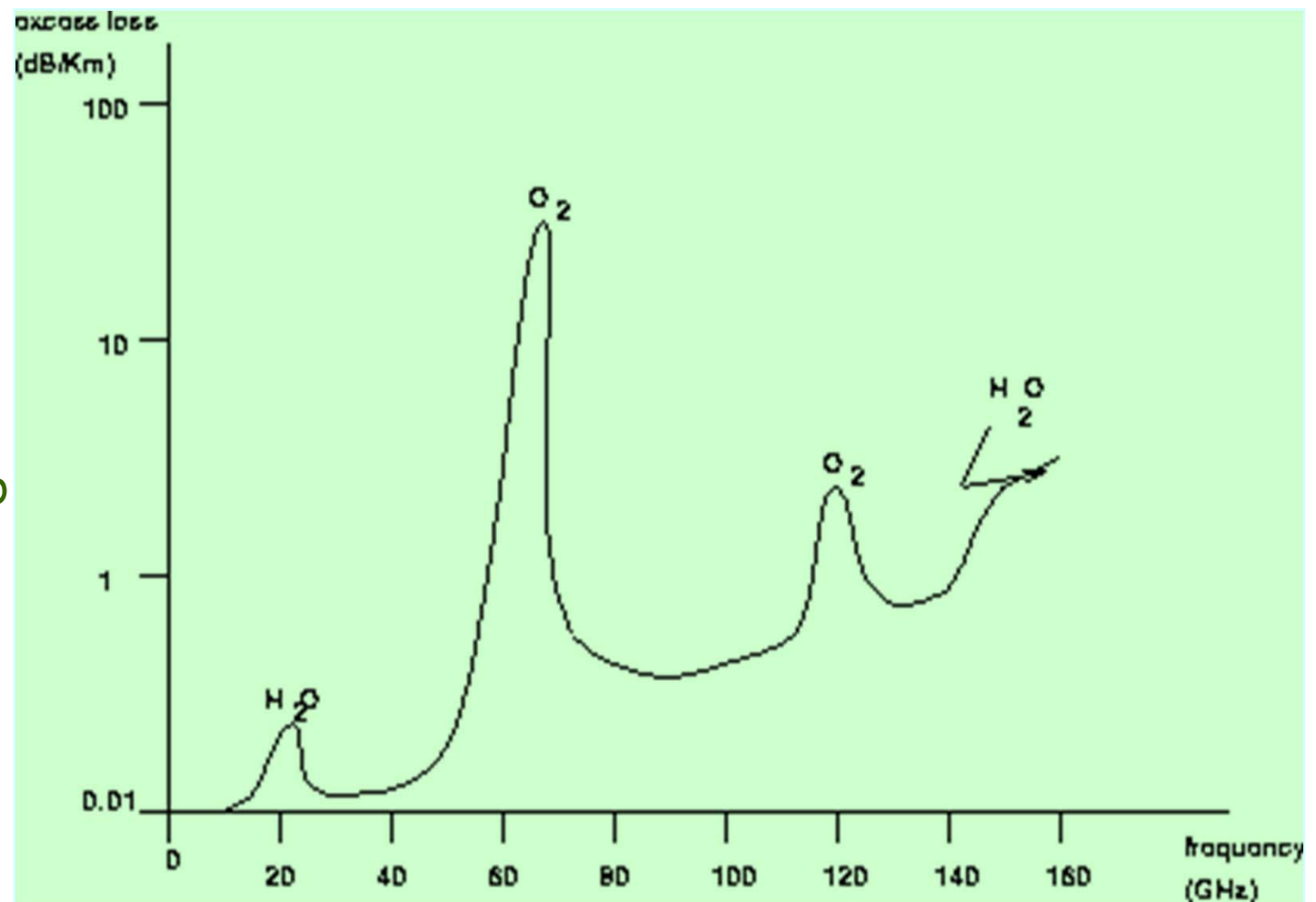
Η διάδοση πάνω από το έδαφος είναι τελείως διαφορετική...



# Ατμοσφαιρική διάδοση

- Η διάδοση στον ελεύθερο χώρο γίνεται με σφαιρικά κύματα
- Η πυκνότητα ισχύος του σήματος (για όλες τις συχνότητες) μειώνεται ανάλογα με το  $D^2$ , όπου  $D$  η απόσταση από την πηγή: **Free space Loss**

- ✓ Για  $f < 10$  GHz η ατμόσφαιρα έχει ελάχιστη επίδραση
- ✓ Σε μεγαλύτερες συχνότητες η ατμόσφαιρα ωστόσο συμβάλει στην εξασθένιση του σήματος





# Επίδραση του περιβάλλοντος στη διάδοση

- **Ανάκλαση - Reflection**

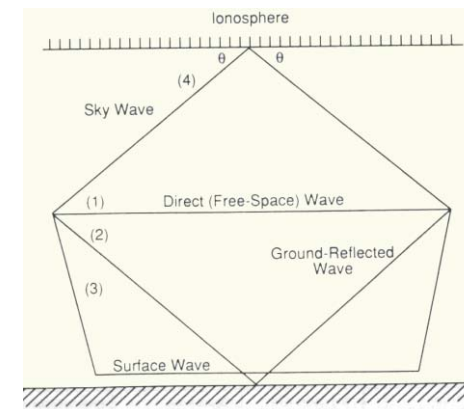
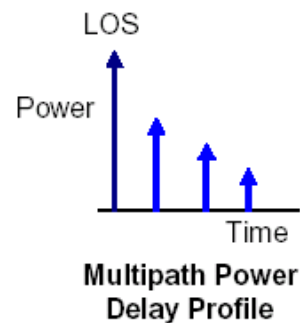
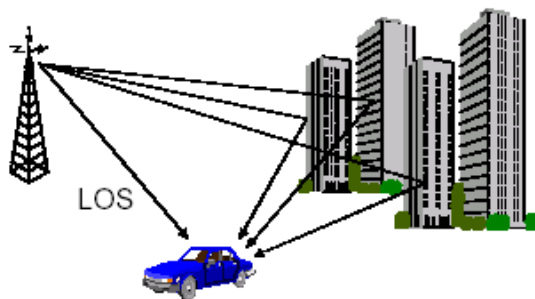
Το ΗΛΜ κύμα προσπίπτει σε λεία επιφάνεια με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες από το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος  $\lambda$

- **Περίθλαση - Diffraction (Shadowing)**

Η διαδρομή του ΗΛΜ κύματος μπλοκάρεται από εμπόδια με διαστάσεις μεγαλύτερες του μήκους κύματος με οξείες ακμές (ασυνέχειες): Διάδοση δευτερογενών κυμάτων

- **Σκέδαση - Scattering**

Το ΗΛΜ κύμα προσπίπτει σε εμπόδιο με διαστάσεις της τάξεως του μήκους κύματος ή μικρότερες και σκορπίζει σε διάφορες διευθύνσεις

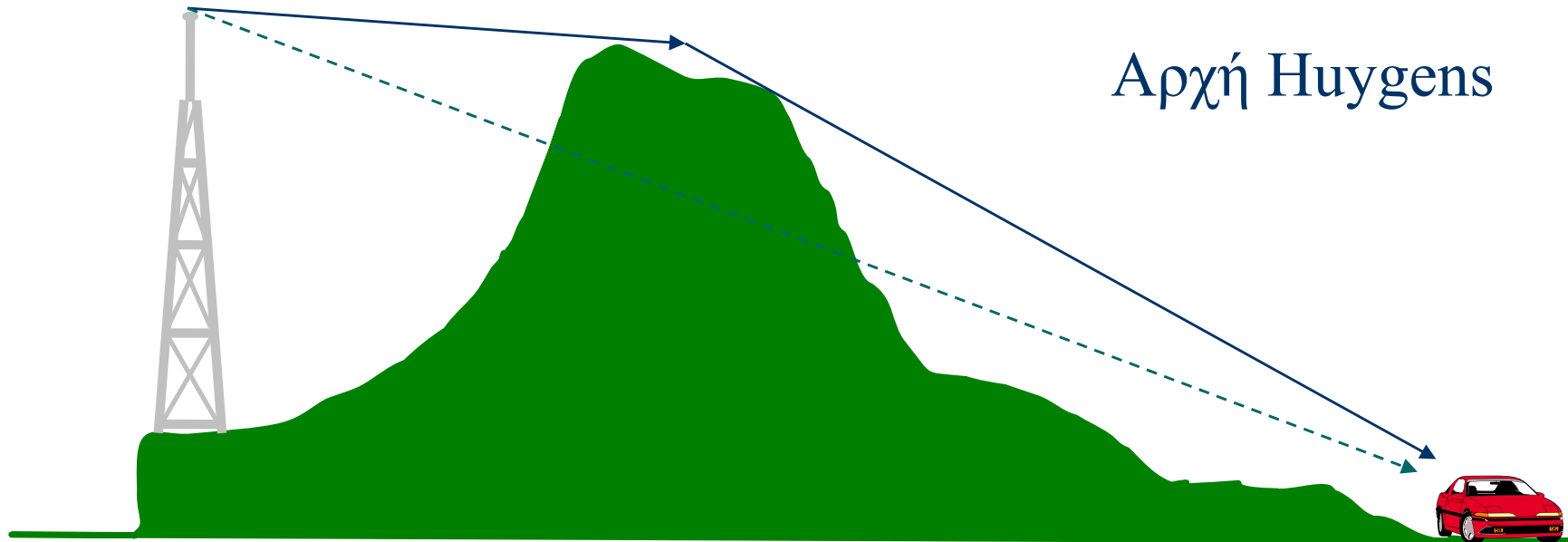




# Διάδοση χωρίς οπτική επαφή Out-of-Sight

Απώλειες λόγω περίθλασης

Αρχή Huygens





# Ευαισθησία δέκτη - Receiver Sensitivity

- Ευαισθησία δέκτη:
- ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ
  - Η ελάχιστη ισχύς στο δέκτη ώστε να επιτυγχάνεται Signal-to-Noise Ratio (SNR) > ( τιμή κατωφλίου που εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενο σχήμα μετάδοσης)
- ΨΗΦΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ
  - Η ελάχιστη ισχύς στο δέκτη ώστε να επιτυγχάνεται το απαιτούμενο BER ( η τιμή του Q θα εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενο σχήμα μετάδοσης)
- The SNR at the receiver output is  $1/N_F$  times the SNR at the input, where  $N_F$  is the Noise Figure of the receiver.

$$SNR_{out} \text{ (dB)} = SNR_{in} - NF$$



# Παράδειγμα

- ένα σύστημα WLAN με συχνότητα  $f_c=900$  MHz, ακτίνα εκπομπής 10m και μη κατευθυντικές κεραίες. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο το μοντέλο free-space path loss, υπολογίστε την ισχύ εκπομπής στο access point, ώστε όλα τα τερματικά να λαμβάνουν στάθμη ισχύος τουλάχιστον  $10\mu\text{W}$

$$P_r = P_t G_t G_r \lambda^2 / 16\pi^2 D^2$$

$$D = 10\text{m}$$

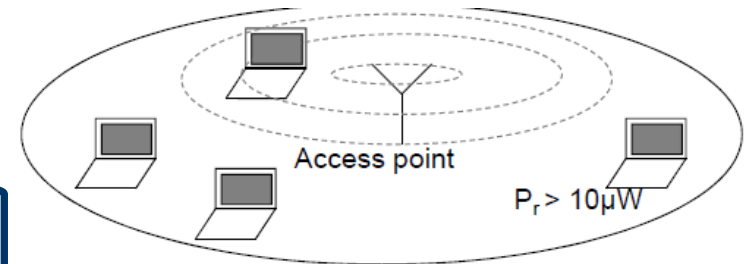
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{9 \cdot 10^8} = 0.333\text{m}$$

$$P_r = 10^{-5}\text{W}$$

$$P_t = ?$$

$$G_t = 1 \text{ ή } 0 \text{ dB (transmitter antenna gain)}$$

$$G_r = 1 \text{ ή } 0 \text{ dB (receiver antenna gain)}$$



$$P_t = 1,45 \text{ w} = 1,4 \text{ dBw}$$

$$\text{Path losses} = L = 20 \log 4\pi D / \lambda = 32.4 + 20 \log f_{[\text{MHz}]} + 20 \log D_{[\text{km}]}$$



# Προβλήματα των RF συστημάτων

- ένα wireless signal διαδομένο στον αέρα

## υφίσταται:

- Reflection, Scattering, Diffraction
- Normal Fading (Διαλείψεις)
- Multipath Delay (καθυστέρηση πολλαπλής διαδρομής)
- Interference – παρεμβολές, θόρυβος (θερμικός, κοσμικός, ατμοσφαιρικός)
- Απώλειες διαδρομής

ο ρυθμός των σφαλμάτων που εμφανίζεται στο σύστημα αυξάνεται με τέτοιο τρόπο που ακόμα και πιθανή αύξηση της ισχύος του σήματος δεν βελτιώνει την επίδοσή του.

- Τα ανωτέρω προβλήματα αντιμετωπίζονται με διαφορες τεχνικές:

- Diversity (time, space, code, etc.) - Διαφορική λήψη
- Spread Spectrum (particularly good at combating small-scale fading)
- Frequency Hopping (also combats small-scale fading)
- Power Control (reduces interference for others)
- Discontinuous Transmission (also reduces interference for others)
- Smart Antennas (focuses on the desired signal and avoids interference)
- Channel Allocation Strategies
- AMC (Adaptive Modulation & Coding) - κώδικες διόρθωσης λαθών,
- ❑ ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM),



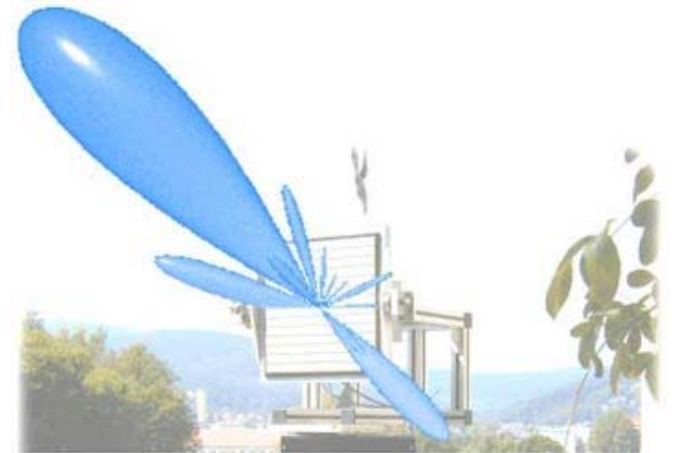
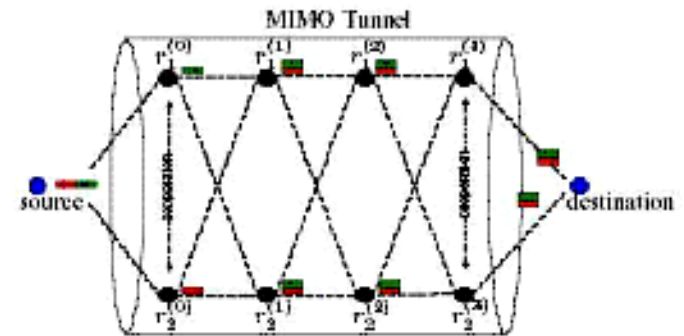
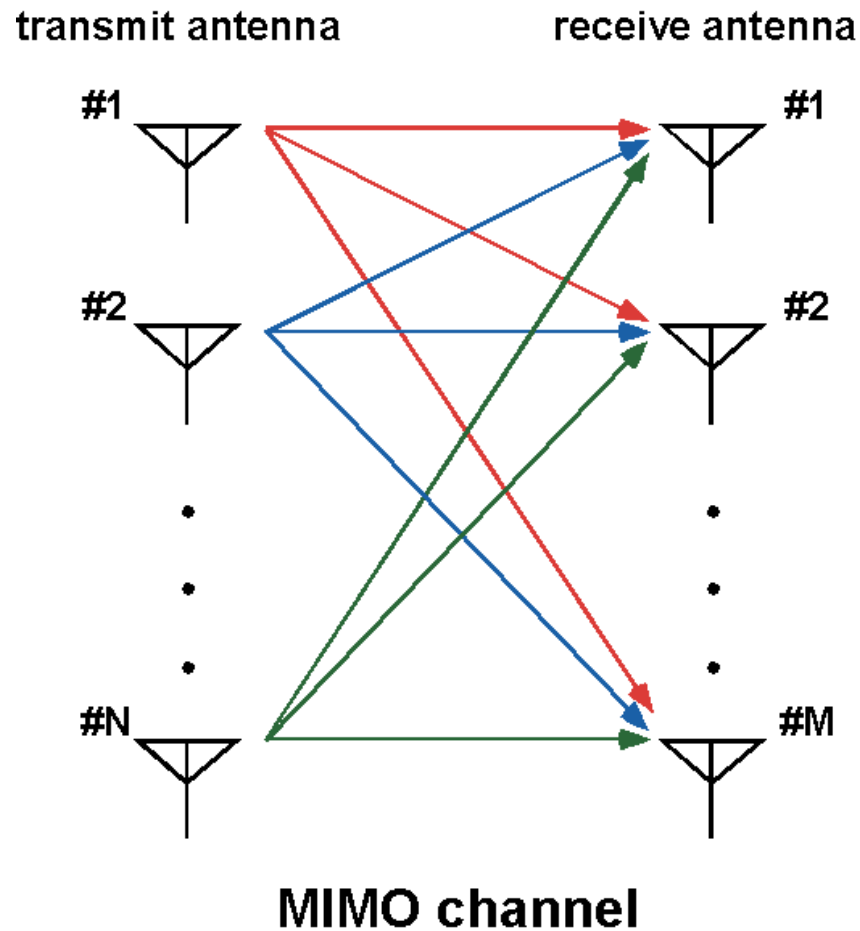
# Συστήματα πολλαπλών εισόδων/εξόδων (ΜΙΜΟ)







# Συστήματα πολλαπλών εισόδων/εξόδων (ΜΙΜΟ)





# Ανασκόπηση

