



Συστήματα Μετάδοσης & Δίκτυα Οπτικών Ινών

www.telecom.ntua.gr/photonics

Ηρακλής Αβραμόπουλος

Photonics Communications Research Laboratory



ΘΕΜΑΤΙΚΕΣ ΕΝΟΤΗΤΕΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

- 1) Εισαγωγή – Περιγραφή συστήματος μετάδοσης, Πολυπλεξία, Χαρακτηρισμός επίδοσης συστήματος
- 2) Παραμορφώσεις διάδοσης
Εξασθένηση, Διασπορά, Μη γραμμικά φαινόμενα
- 3) Παραμορφώσεις από Ενεργά Στοιχεία: Οπτικές πηγές, Φωτοδίοδος, Οπτική ενίσχυση, EDFA, Αλυσίδες ενισχυτών
- 4) Οπτική διαμόρφωση, Σχήματα διαμόρφωσης
- 5) Οπτικά δίκτυα
Υποθαλάσσιες ζεύξεις, WAN, MAN, Δίκτυα πρόσβασης
- 6) Ερευνητικές περιοχές – επίσκεψη στο εργαστήριο



ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ 1^{ης} ΕΝΟΤΗΤΑΣ

- 1) Ιστορική αναδρομή – Διείσδυση φωτονικής τεχνολογίας
- 2) Γενική δομή οπτικού συστήματος μετάδοσης
- 3) Πολυπλεξία
- 4) Εισαγωγή στον τρόπο διαμόρφωσης στα οπτικά συστήματα μετάδοσης
- 5) Χαρακτηρισμός της ποιότητας οπτικού σήματος
Διαγράμματα οφθαλμού – μετρήσεις BER



ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1910 Ανάλυση διηλεκτρικού κυματοδηγού (Debye, Χόνδρος)

1955 Ανακάλυψη οπτικής ίνας

1962 Ανακάλυψη laser ημιαγωγού

1965 Πρώτη χρήση οπτικής ίνας στις οπτικές τηλεπ/νίες με μεγάλη απώλεια ($>20\text{dB/Km}$)

1972 Η Corning κατασκευάζει οπτική ίνα με απώλεια 4 dB/Km

1977 Πρώτο σύστημα οπτικών τηλεπικοινωνιών (Σικάγο, Η.Π.Α.)

1980 Η Bell Telephone Systems ανακοινώνει σχέδια για την κατασκευή του TAT-8 (Του πρώτου δι-ατλαντικού δικτύου)

1987 Επιδεικνύονται ενισχυτές ίνας ερβίου (EDFA)



Δεκαετία '90

Η ανάγκη να αυξηθεί η χωρητικότητα στην ίνα, οδηγεί στην εξέταση τεχνικών για πολυπλεξία κατά μήκος κύματος

1990

Οι ενισχυτές ίνας ερβίου (EDFA) γίνονται εμπορικά διαθέσιμοι

1996 – 1999

Σχεδιάζονται και υλοποιούνται δια-ατλαντικά οπτικά δίκτυα (TAT 12/13, TAT 14, FlagAtlantic-1)

Η διέλευση του FlagAtlantic-1 φτάνει τα 5 Tbit/s και περιλαμβάνει 297 επαναλήπτες



2000

Ανακοινώνεται η έναρξη του FlagPacific-1, που θα μεταφέρει συνολικά 10.24 Tbit/s δεδομένα σε ένα μήκος 24000 Km αποτελούμενο από 447 επαναλήπτες.

2001

Ανακοινώνεται η έναρξη του έργου Apollo. Θα έχει μήκος 13000 Km και θα ενώνει ΗΠΑ, Αγγλία και Γαλλία μεταφέροντας 3.2 Tbit/s. Είναι WDM δίκτυο και χρησιμοποιεί 80 κανάλια των 10 Gbit/s

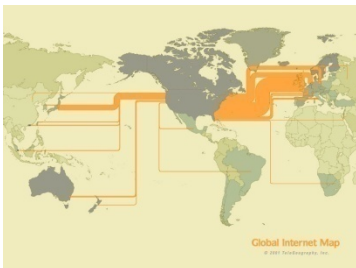
2002

Το FlagPacific-1 και το Apollo είναι εμπορικά διαθέσιμα



ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Δίκτυο TAT-8



Πρώτο δίκτυο οπτικών ινών
(μόνο μετάδοση στα 560 Mbit/s)

Δίκτυο FLAG Atlantic-1



WDM (5 Tbit/s)

χρόνος

1987

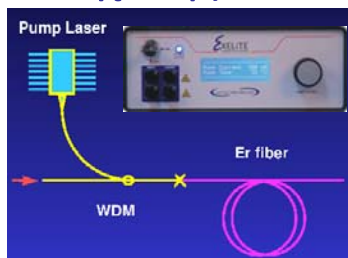
1988

1996

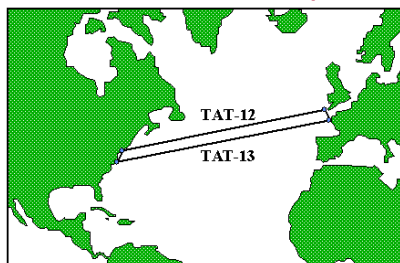
2000

2005

Ενισχυτής EDFA

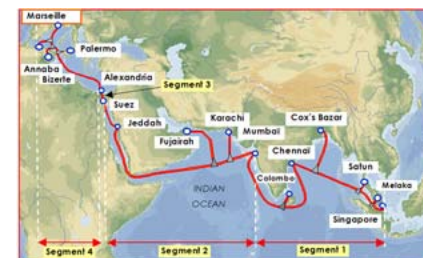


Δίκτυο TAT-12/13



Πρώτη χρήση οπτικών ενισχυτών.
Μετάδοση στα 10 Gbit/s

SEA ME WE 4



DWDM, 1,28 Tb/s



ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1. Η υλοποίηση δικτύων χωρητικότητας Tbps που θα λύσουν το πρόβλημα εύρους ζώνης για τις επόμενες δεκαετίες
2. Η χρησιμοποίηση τους σε επικοινωνίες:
Μεγάλης απόστασης (WAN) - Μητροπολιτικών δικτύων (MAN)
Δικτύων πρόσβασης (Access networks) - Τοπικών δικτύων (LAN)
Αλλά και μέσα στους υπολογιστές (interconnections)



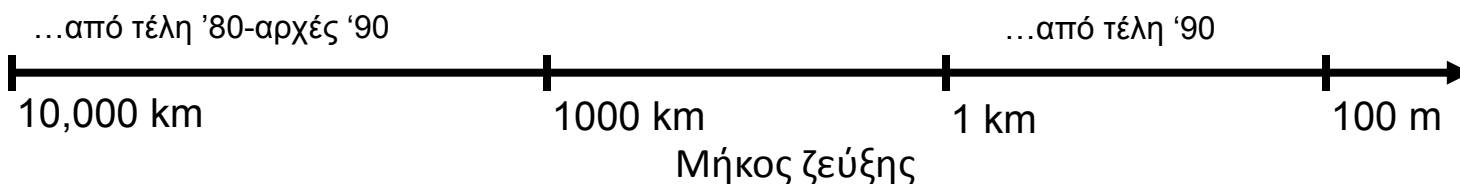
Wide Area Networks



Campus networks



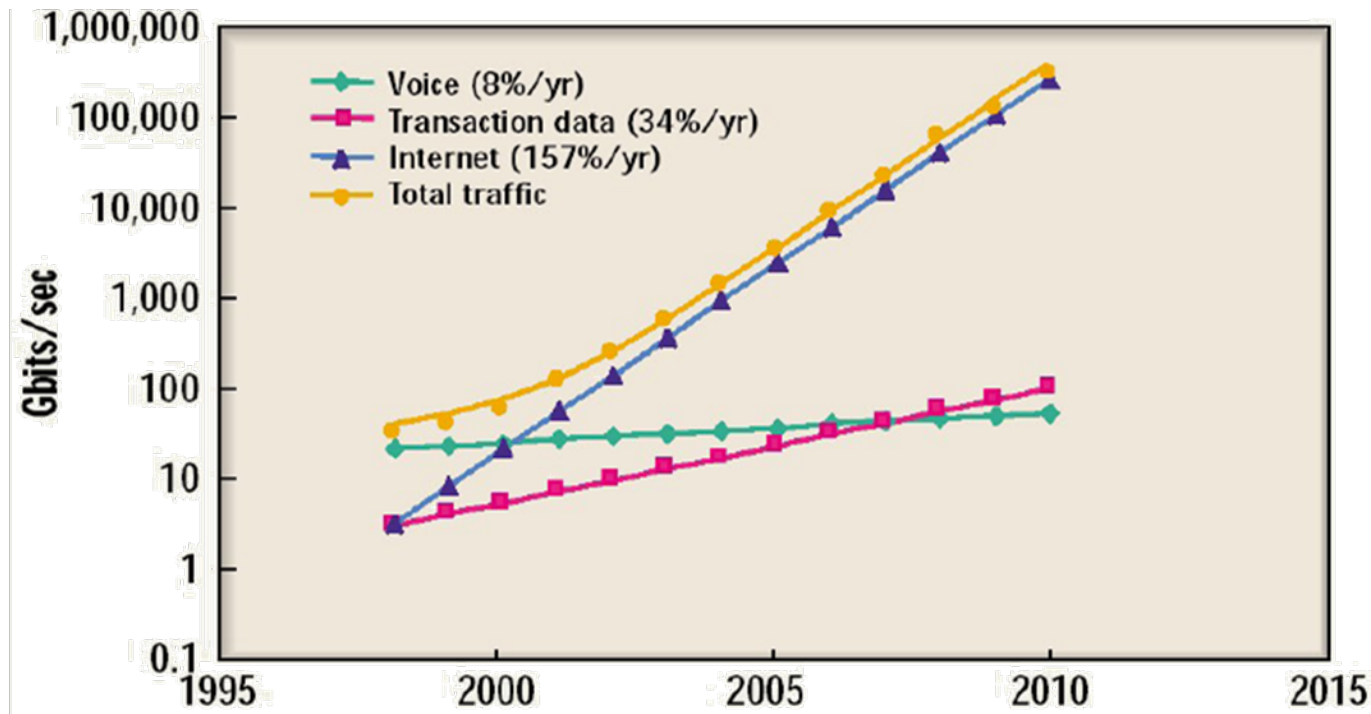
LANs





ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ ΥΨΗΛΟΤΕΡΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Η συνεχής αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης υποδεικνύει την ανάγκη για δίκτυα υψηλότερων ταχυτήτων & μεγαλύτερης εμβέλειας

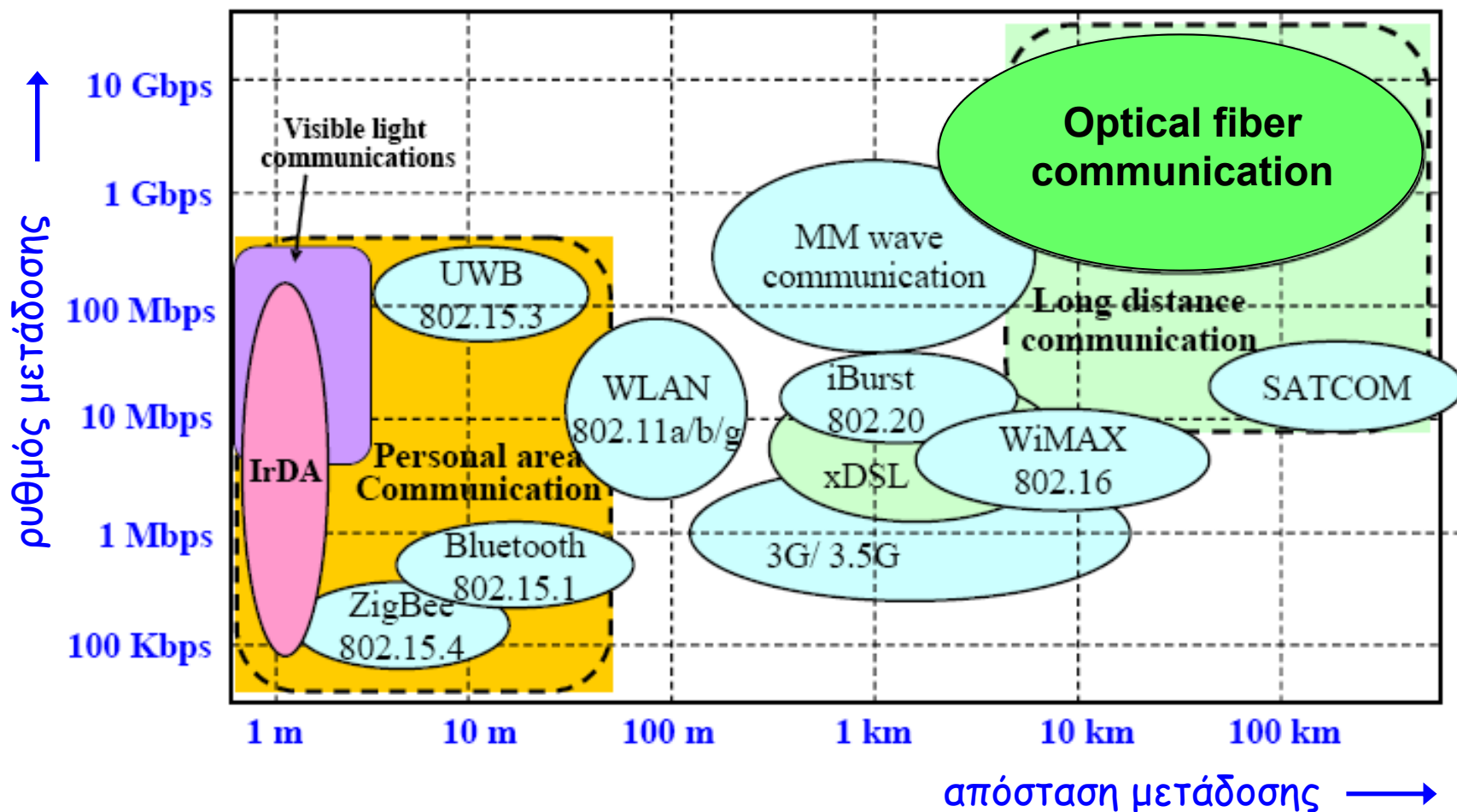


πηγή: Corning International Network Traffic Model



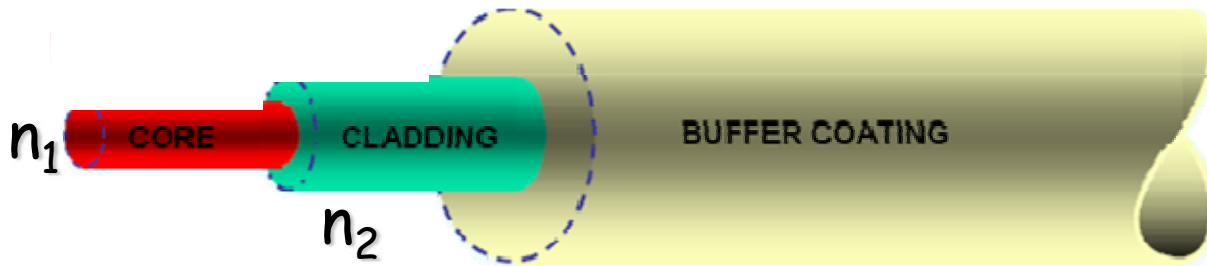
ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Μέγιστο γινόμενο: (Ρυθμός μετάδοσης) x (Απόσταση μετάδοσης)



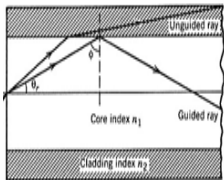


ΔΟΜΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ



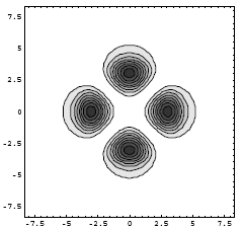
Κυλινδρικός πυρήνας με δείκτη διάθλασης περιβάλλεται από μανδύα με οριακά μικρότερη τιμή δείκτη διάθλασης ($n_2 < n_1$). Η ίνα τοποθετείται σε επιπλέον προστατευτικό περίβλημα.

Ακτινική θεώρηση του φωτός (Ray Optics)



Το φως συγκρατείται στον πυρήνα λόγω του φαινομένου της ολικής ανάκλασης στη διεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα.

Κυματική θεώρηση του φωτός (εξ. Maxwell)

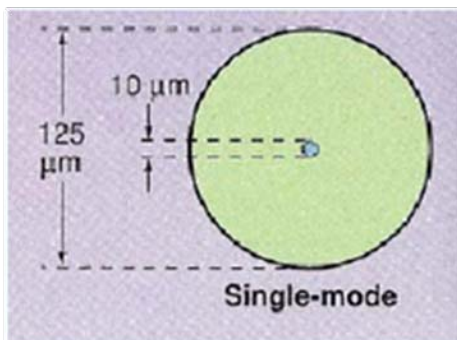


Το κύμα (φως) κυματοδηγείται με συγκεκριμένες εγκάρσιες κατανομές (ρυθμοί). Ο αριθμός τους εξαρτάται από τη συχνότητα του κύματος και τις φυσικές παραμέτρους της ίνας.

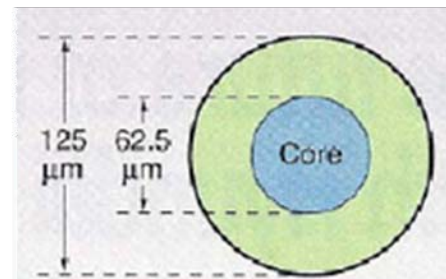


ΔΟΜΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ

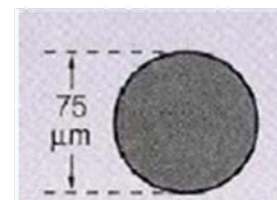
Μονότροπη ίνα



Πολύτροπη ίνα



Ανθρώπινη τρίχα →



Διάμετρος:

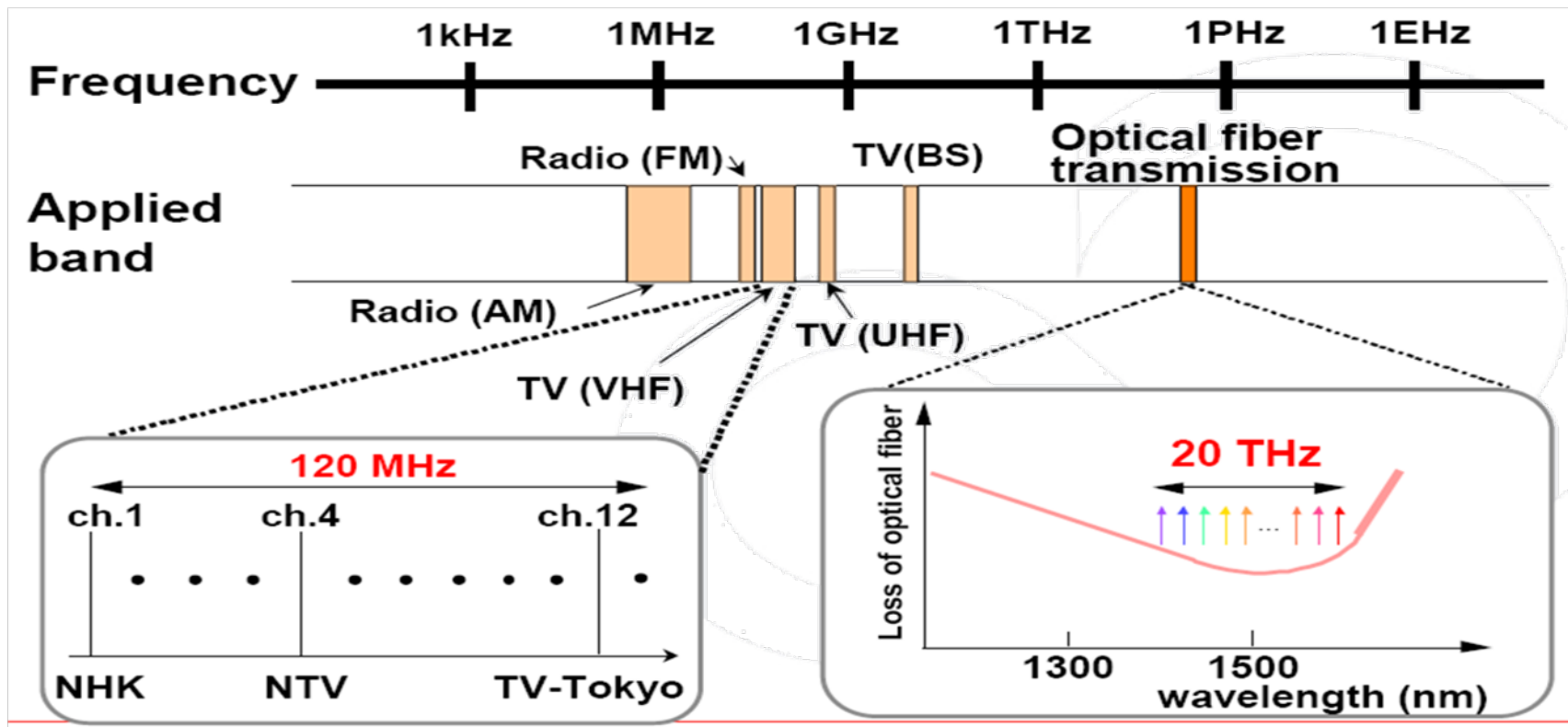
Μονότροπη ίνα: 8 μm πυρήνας, 125 μm μανδύας.

Πολύτροπη ίνα: 50, 62.5 μm πυρήνας, 125 μm μανδύας.



ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ ΙΝΑΣ ΩΣ ΦΥΣΙΚΟ ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Μικρή απώλεια διάδοσης μέσα σε ένα τεράστιο εύρος ζώνης (~ 25 THz) στην φασματική περιοχή γύρω από τα 1550 nm.





Αν το εύρος ζώνης συστήματος μετάδοσης είναι μικρότερο από το συχνοτικό εύρος του μεταδιδόμενου σήματος, ορισμένες συχνότητες του σήματος «κόβονται» και αλλοιώνεται η μορφή του.

Ο μετασχηματισμός Fourier...

$$\tilde{E}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \exp(-i\omega t) dt$$

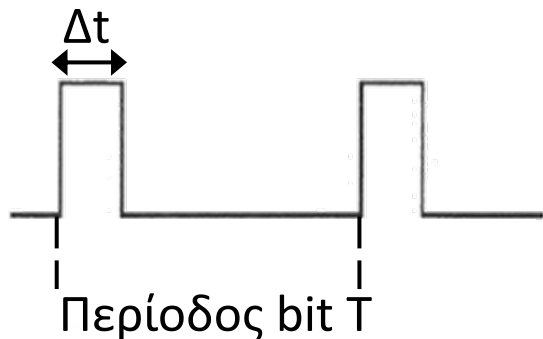
... και ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier

$$E(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(\omega) \exp(+i\omega t) d\omega$$

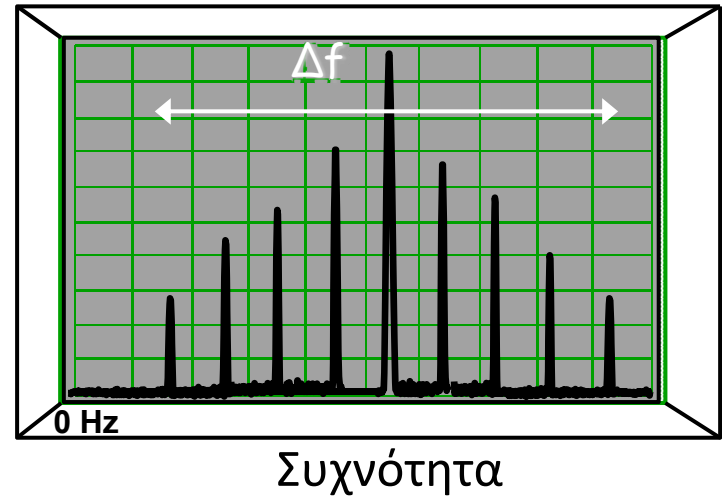


ΣΧΕΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Συσχετισμός χρόνου και συχνότητας: απλή ανάλυση-
όχι διασπορά, όχι τρίλισμα



Fourier



Υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης

Μικρότερη χρονική περίοδο bits

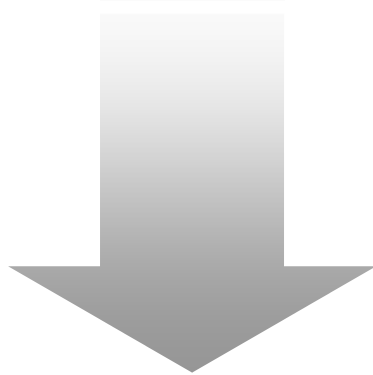
Μικρότερη χρονική διάρκεια παλμών bit

Μεγαλύτερο φασματικό εύρος σήματος





ΣΧΕΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ



Περιορισμένο εύρος ζώνης μετάδοσης (B)

Μεταδίδεται λιγότερο φάσμα σήματος

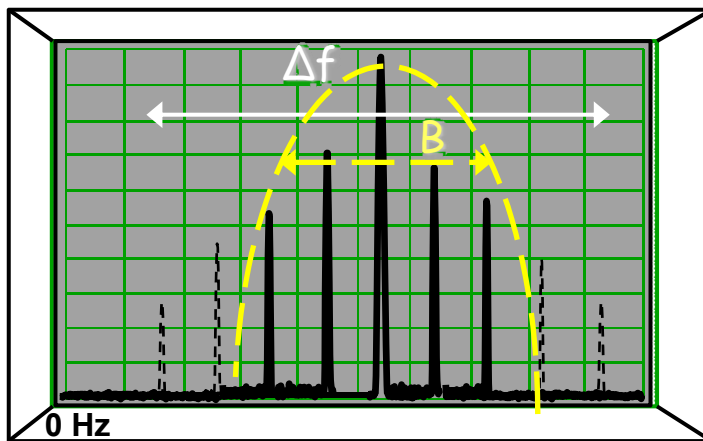
Αυξάνει η χρονική διάρκεια παλμών bit

Περιορίζεται η μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα μετάδοσης



*αντίστροφος
Fourier*

Έστω σύστημα μετάδοσης με εύρος ζώνης $B < \Delta f$, τότε:



Αντίστροφος
Fourier



Συχνότητα



ΣΧΕΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Bits: 0 1 0 0 0 0 1 0 0

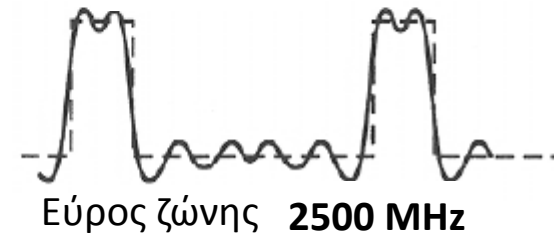
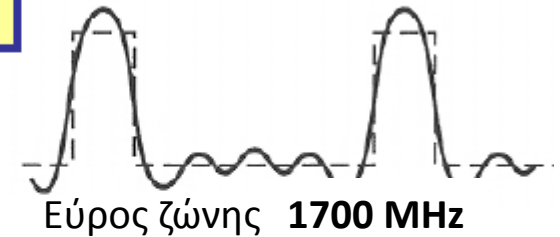
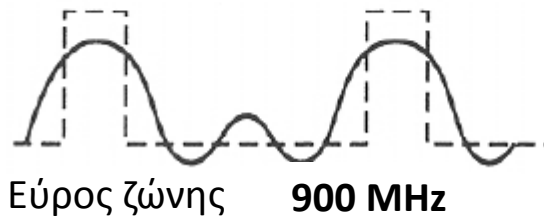
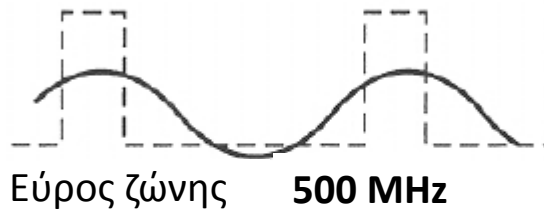


Παλμός πριν τη μετάδοση

Παλμός μετά τη μετάδοση

Σύστημα μετάδοσης
περιορισμένου εύρους ζώνης
(π.χ. ζεύγος καλωδίων)

... μετά τη μετάδοση





Το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας μπορεί να υποστηρίξει μετάδοση αρκετών Tbit/s

Τα ηλεκτρονικά συστήματα δεν έχουν ταχύτητα λειτουργίας μεγαλύτερη από μερικές δεκάδες Gbit/s

Τρεις είναι οι βασικές τεχνικές πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται:

Ηλεκτρονική πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (ETDM)

Ροές δεδομένων χαμηλότερης ταχύτητας πολυπλέκονται σε ένα ταχύτερο ηλεκτρικό σήμα και διαμορφώνουν οπτικό φέρον

Οπτική πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (OTDM)

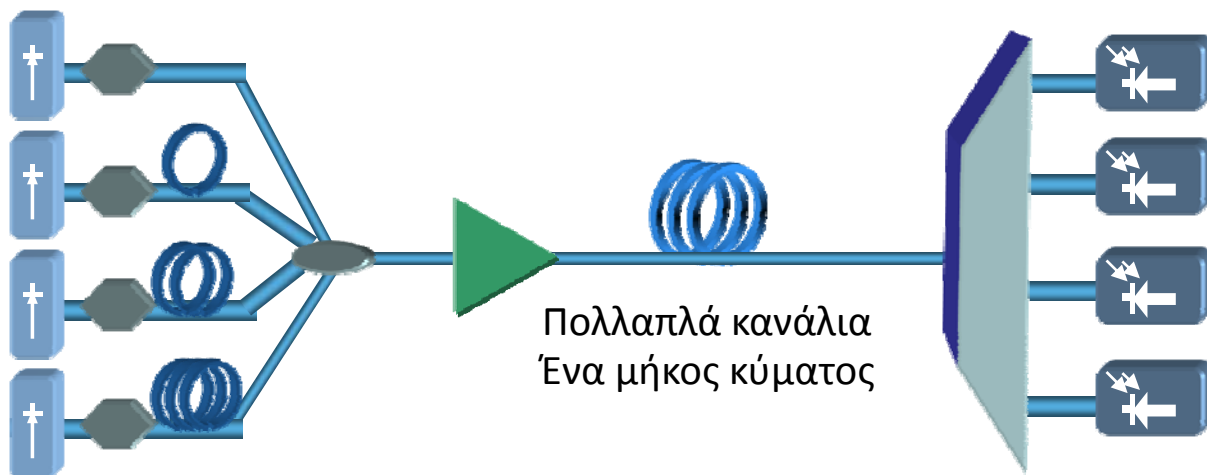
Οπτικά σήματα χαμηλότερης ταχύτητας πολυπλέκονται σε ένα ταχύτερο οπτικό σήμα

Οπτική πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM)

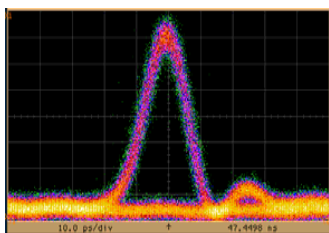
Ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων με χρήση πολλαπλών οπτικών φερόντων



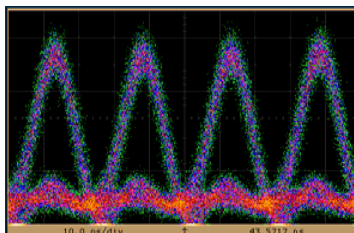
ΟΠΤΙΚΗ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ (OTDM)



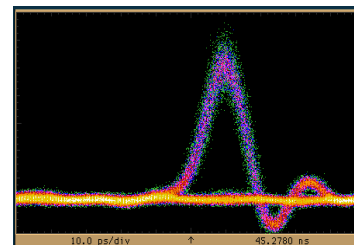
Ψηφιακός
παλμογράφος



10Gbit/s



4x10Gbit/s = 40 Gbit/s

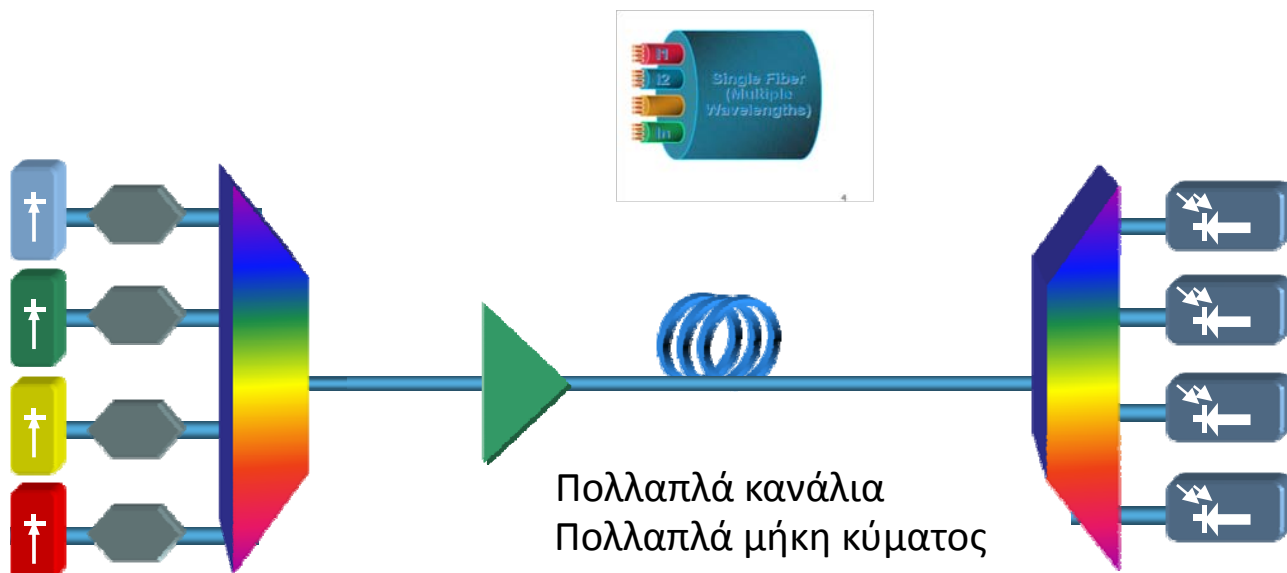


Demux 1x10Gbit/s

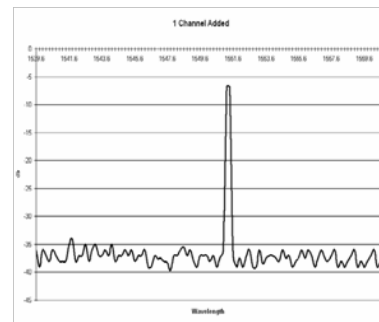
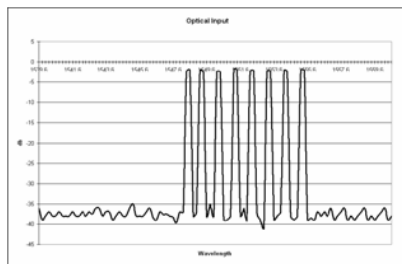
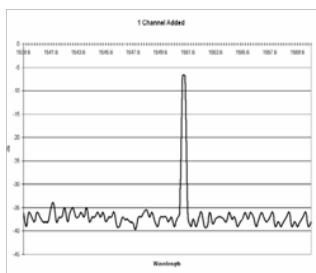
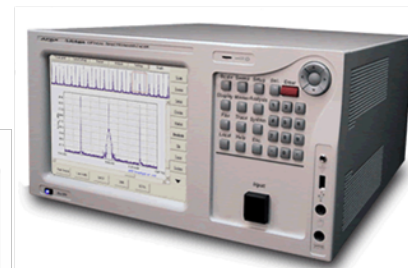
Επίτευξη ρυθμού μετάδοσης 640 Gbit/s – Χρονική διάρκεια bit = 1.5625 ps



ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (WDM)



Αναλυτής
οπτικού
φάσματος



Επίτευξη σε εργαστηριακό επίπεδο WDM μετάδοσης με συνολικό ρυθμό μεγαλύτερο από 10 Tbit/s



CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)

Ορισμένο με standard ITU-T G694.2

Μέχρι 18 κανάλια με φασματική απόσταση 20 nm

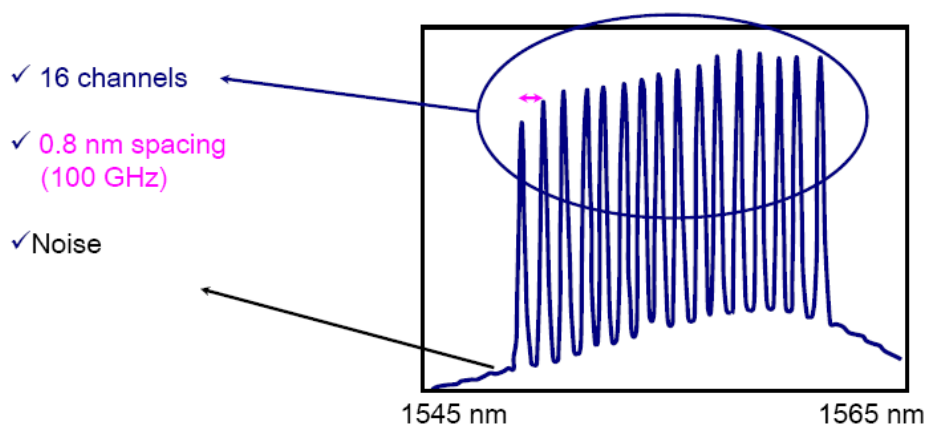
Καλύπτει μετάδοση από 40 km έως 100 km

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

Αποστάσεις καναλιών 200, 100, 50 or 25 GHz

Περισσότερα από 32 κανάλια

Καλύπτει μετάδοση μεγαλύτερη από 600km





WDM πρώτης γενιάς (τέλος δεκαετίας '80)

Δύο μήκη κύματος με μεγάλη φασματική απόσταση (1310, 1550 nm)

WDM δεύτερης γενιάς (αρχές δεκαετίας '90)

Δύο έως οκτώ κανάλια στο φασματικό παράθυρο των 1550 nm

Φασματική απόσταση >400 GHz

Σημερινά συστήματα DWDM

16 έως 40 κανάλια στο φασματικό παράθυρο των 1550 nm

Φασματική απόσταση 100 έως 200 GHz

Χρήση σχημάτων αυτόματης εξίσωσης ισχύος μεταξύ των καναλιών

Συστήματα υβριδικής πολυπλεξίας DWDM/TDM.

Επόμενη γενιά συστημάτων DWDM

64 έως 160 κανάλια στο φασματικό παράθυρο των 1550 nm

Φασματική απόσταση 25 έως 50 GHz



Πολυπλεξία τρόπων πόλωσης (PM)

Χρήση των δύο ορθογωνικών καταστάσεων της πόλωσης για τη μετάδοση ανεξάρτητων ροών δεδομένων

Πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα (OCDM)

Πολυπλεξία που βασίζεται στη μίξη των χρήσιμων καναλιών με ορθογωνικές ψευδοτυχαίες ακολουθίες (χρησιμοποιείται κυρίως στις ασύρματες επικοινωνίες, π.χ. στα δίκτυα κινητών 3^{ης} γενιάς)

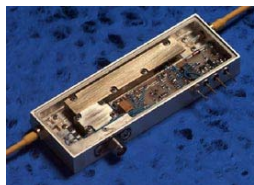
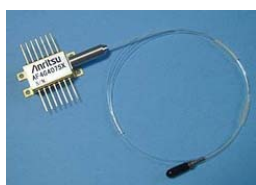
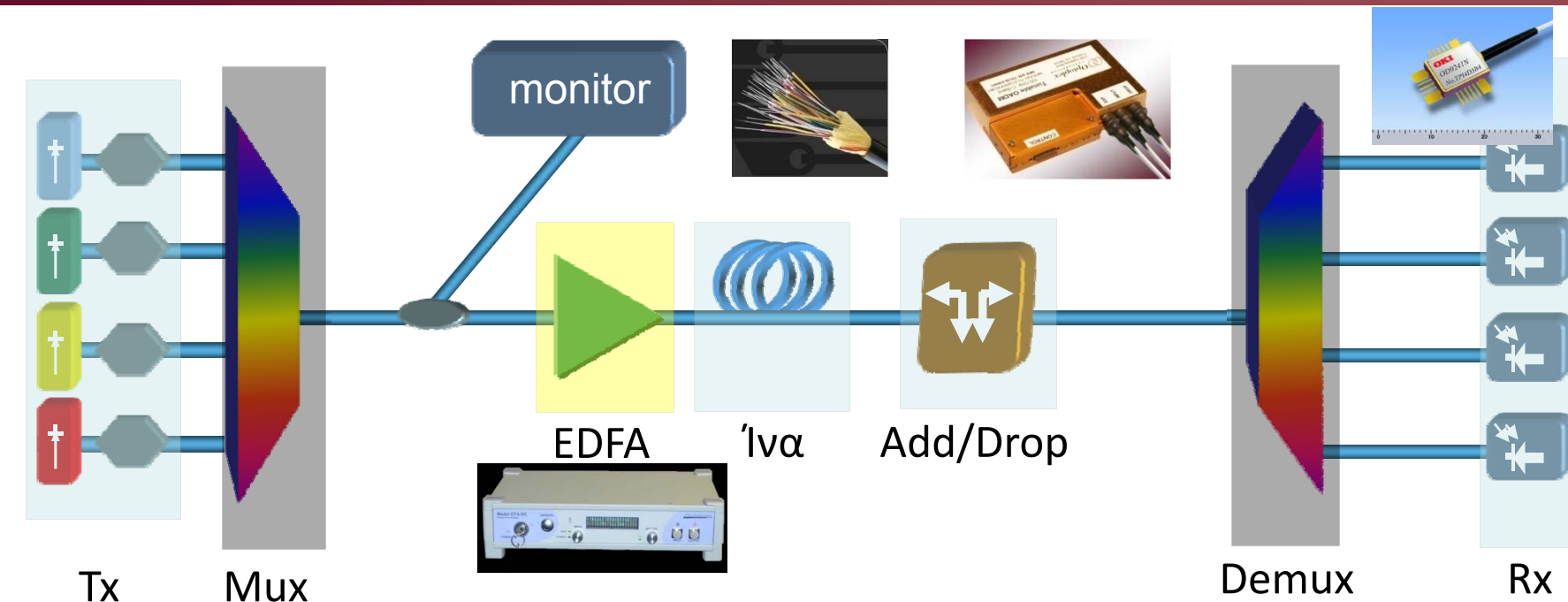
Πολυπλεξία τρόπων διάδοσης

Διαφορετικοί ρυθμοί διάδοσης (modes) ή ομάδες ρυθμών διάδοσης μεταδίδουν διαφορετικά σήματα σε πολυρυθμικές ίνες. Αποτελεί το οπτικό ανάλογο των συστημάτων MIMO (multiple input – multiple output) που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ασύρματα δίκτυα

Με χρήση πολυπλεξίας PM επιτεύχθηκε συνολικός ρυθμός μετάδοσης σε σύστημα OTDM 1.28 Tbit/s



ΟΠΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ



Γέννηση και διαμόρφωση οπτικού σήματος (Tx)

Ενίσχυση– Φαινόμενα κατά τη διάδοση στην ίνα

Λήψη και ανίχνευση του οπτικού σήματος

Χαρακτηρισμός και αξιολόγηση του οπτικού σήματος



ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΠΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

Για να μεταδοθεί πληροφορία θα πρέπει να διαμορφωθεί η έξοδος μίας οπτικής πηγής, σύμφωνα με το ηλεκτρικό σήμα των δεδομένων

ΠΟΜΠΟΣ ΟΠΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Περιλαμβάνει: **Ηλεκτρονικό κύκλωμα πολυπλεξίας (ETDM)**

Οπτική πηγή

LED, laser συνεχούς κύματος (CW)
ή παλμικό laser (π.χ. Mode-locked laser – MLL)

Διάταξη διαμόρφωσης

Απ' ευθείας διαμόρφωση ή χρήση εξωτερικού διαμορφωτή (ηλεκτροοπτικοί Mach-Zehnder, ηλεκτροαπορρόφησης)

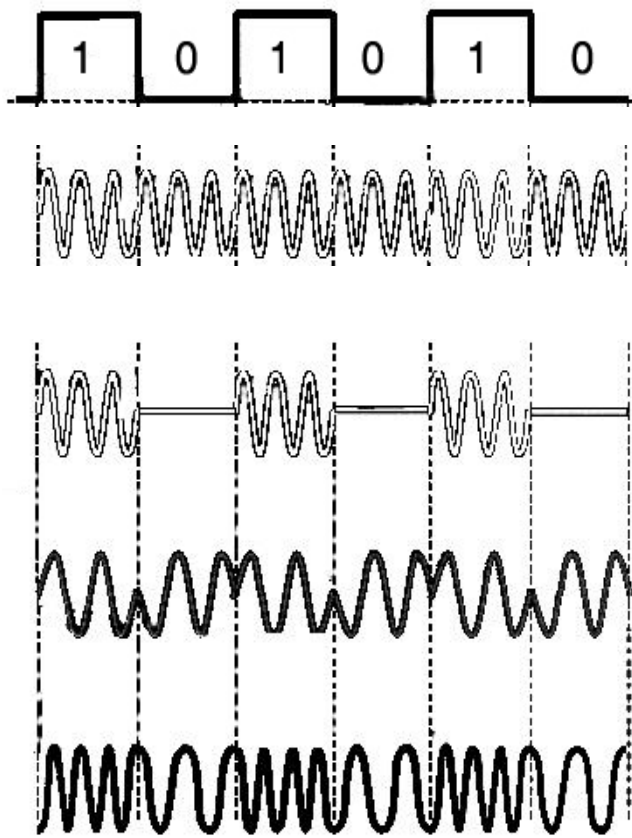
Το είδος των πηγών και των διατάξεων διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται εξαρτάται από το επιλεγόμενο σχήμα διαμόρφωσης (modulation format)



ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΠΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

Το οπτικό (ηλεκτρομαγνητικό) σήμα μετά τη διαμόρφωση θα είναι της μορφής:

$$E(t) = A(t) \cdot \cos[\omega(t)t + \varphi(t)]$$



Έξοδος ηλεκτρονικού κυκλώματος
Ψηφιακό σήμα δεδομένων

Έξοδος οπτικής πηγής
Οπτικό φέρον

Έξοδος διαμορφωτή

Διαμόρφωση πλάτους $A(t)$

Διαμόρφωση φάσης $\varphi(t)$

Διαμόρφωση γωνίας $\omega(t)$



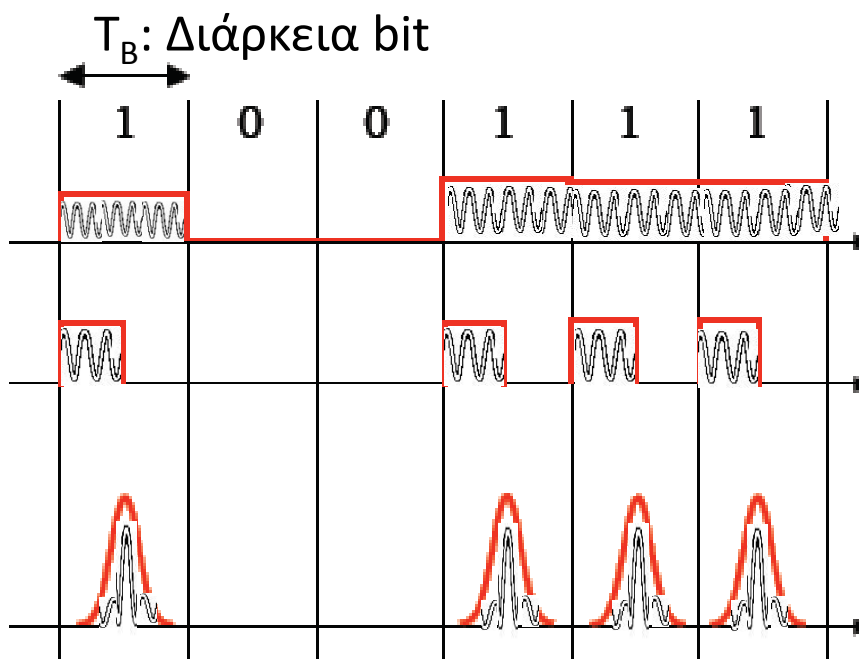
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΠΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

Η ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος κωδικοποίησης, λόγω της ευκολίας τόσο στην παραγωγή όσο και την ανίχνευση του οπτικού σήματος

Non-Return to Zero NRZ

Return to Zero RZ
DC=50%

Παλμικό Return to Zero RZ
DC<50%

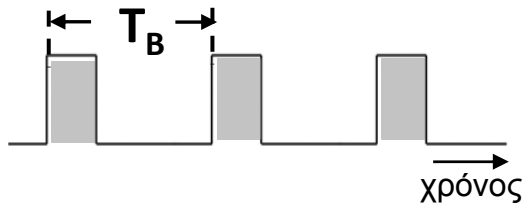


Σε επόμενη διάλεξη θα παρουσιαστούν τα κυριότερα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στα οπτικά συστήματα μετάδοσης

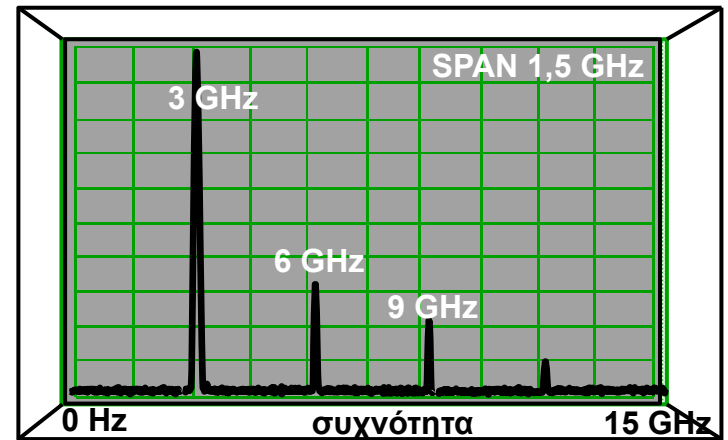


ΦΑΣΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

Τα ηλεκτρικά σήματα είναι σήματα βασικής ζώνης (base-band)



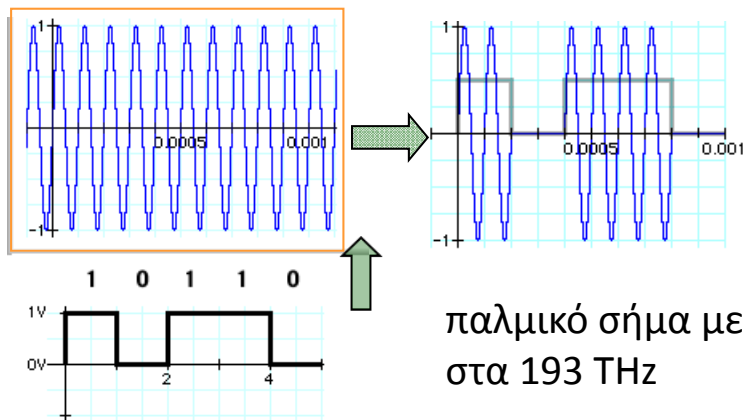
Σήμα ρολογιού με $f = 1/T_B = 3 \text{ GHz}$



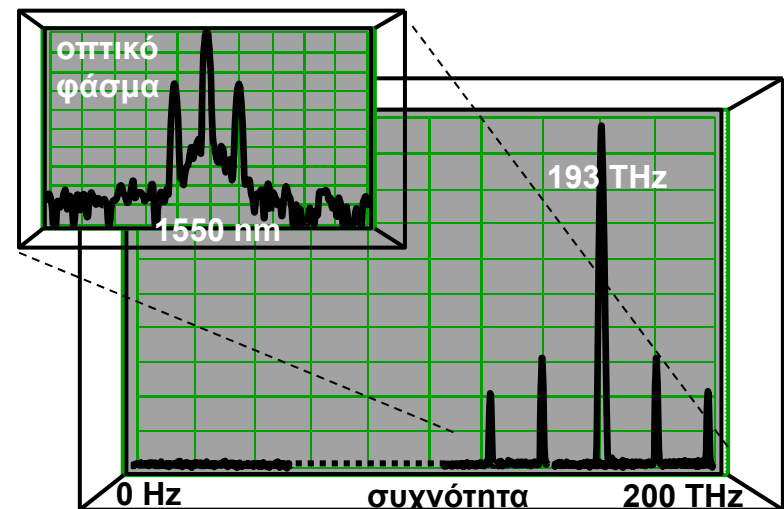
Φάσμα

Οπτικά σήματα (bandpass)

CW (ημίτονο) στα 193 THz



παλμικό σήμα με φέρον στα 193 THz



Φάσμα



Αίτια παραμόρφωσης οπτικού σήματος κατά τη μετάδοση

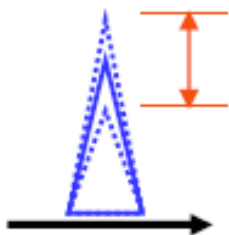
Γραμμικά και μη γραμμικά φαινόμενα μέσα στην ίνα

Συσσώρευση οπτικού θορύβου από την αλυσίδα των EDFA

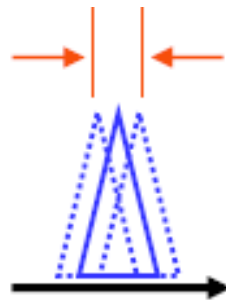
Διαφωνία (crosstalk) μεταξύ των WDM καναλιών

Αλυσίδα φίλτρων (filter concatenation)

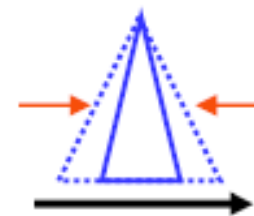
Αποτελέσματα



Διακυμάνσεις ισχύος



Χρονική ολίσθηση



Χρονική διαπλάτυνση

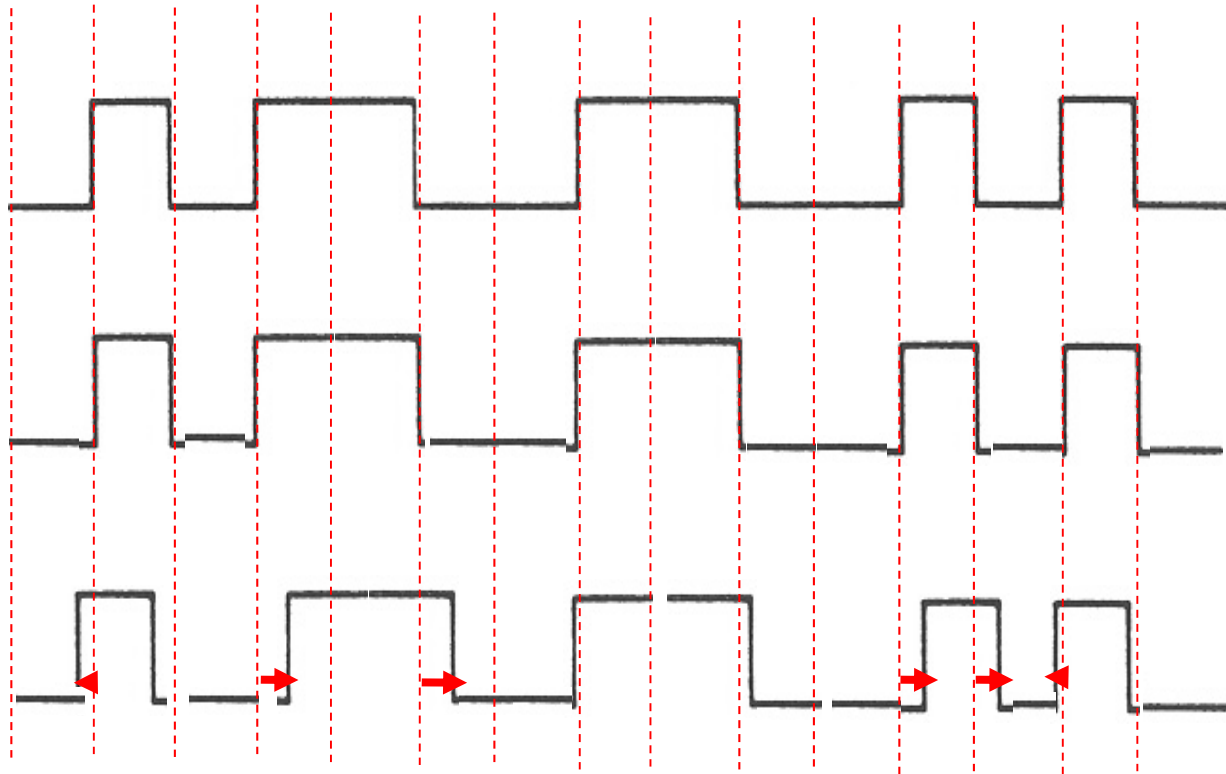


ΧΡΟΝΙΚΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗ (TIMING JITTER)

Αρχικό
σήμα

Χωρίς
jitter

Με
jitter



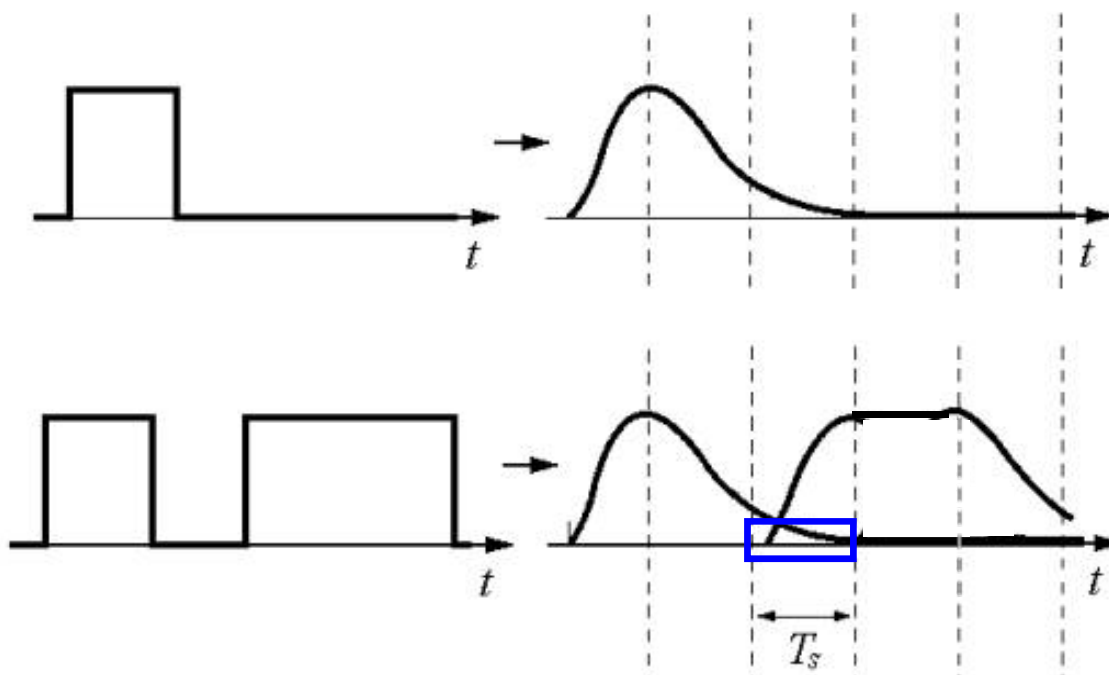
η χρονική “θέση” ορισμένων παλμών αποκλίνει από την ιδανική (στο σχήμα φαίνεται ως μετατόπιση των παλμών από τις διακεκομμένες γραμμές)



ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΠΛΑΤΥΝΣΗ

Η χρονική διαπλάτυνση των παλμών προκαλεί διασυμβολική παρεμβολή (ISI – intersymbol interference)

δηλ. στο χρονικό παράθυρο ενός bit παρεισφρύουν γειτονικά bits



Επικάλυψη των bits – λάθος λήψη



Κάθε σύστημα μετάδοσης αλλοιώνει σε κάποιο βαθμό την ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος

Η ποιότητα των οπτικών σημάτων αξιολογείται με δύο κυρίως τρόπους:

Εποπτικά με την παρατήρηση διαγραμμάτων οφθαλμού (eye-diagrams)

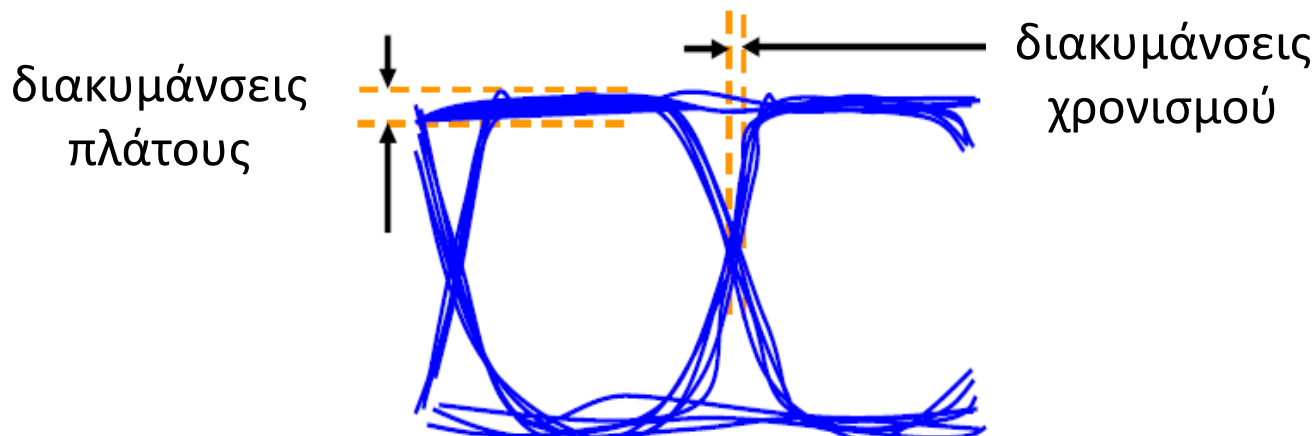
Με μετρήσεις ρυθμού λαθών (BER) που λαμβάνει ο δέκτης



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΦΘΑΛΜΟΥ (eye-diagram)

Το σχήμα που προκύπτει από την υπέρθεση των bits σε χρονικό παράθυρο ίσο με την περίοδο του bit «μοιάζει» με το ανθρώπινο μάτι

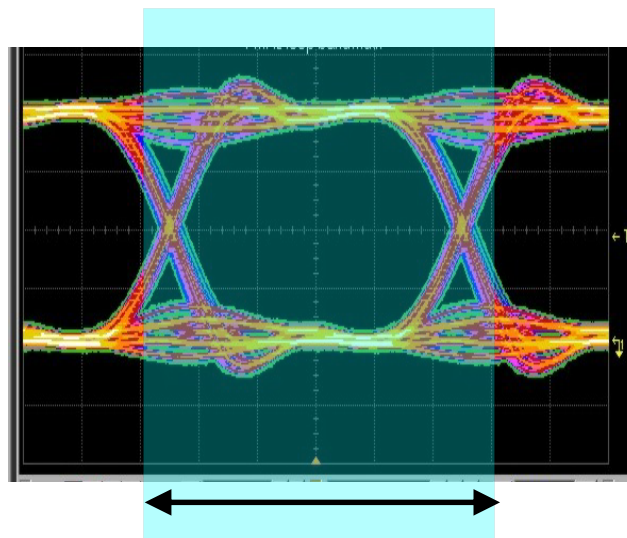
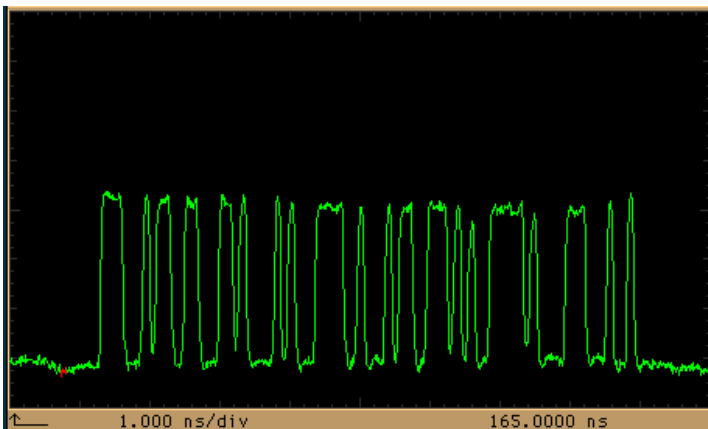
Ακολουθία bits λαμβανόμενου σήματος





ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΦΘΑΛΜΟΥ (eye-diagram)

Απεικόνιση κυματομορφής και διαγράμματος οφθαλμού σε ψηφιακό παλμογράφο



Παράθυρο δειγματοληψίας

Ρυθμός δειγματοληψίας = trigger rate

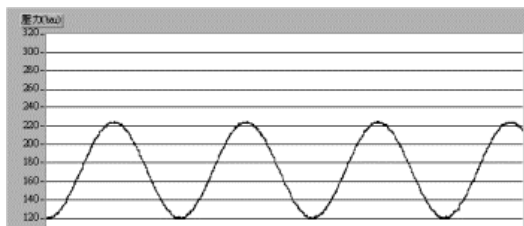
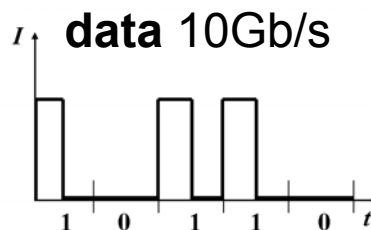




ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΦΘΑΛΜΟΥ (eye-diagram)

Ψηφιακός
παλμογράφος

Pulse Pattern Generator



Trigger (ημίτονο 10 GHz)



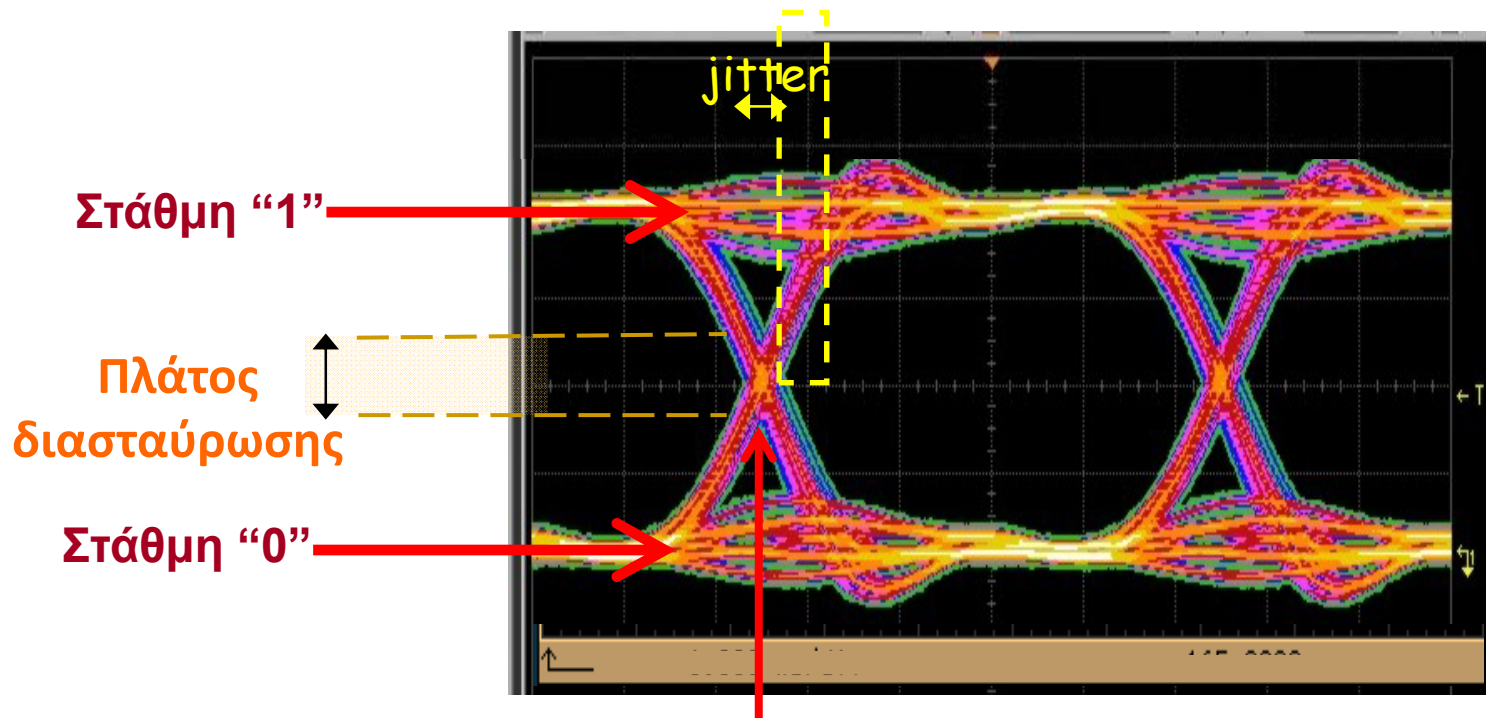


ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΦΘΑΛΜΟΥ

Timing jitter Εύρος πλαϊνών γραμμών “αρχής” και “τέλους” του διαγράμματος ματιού

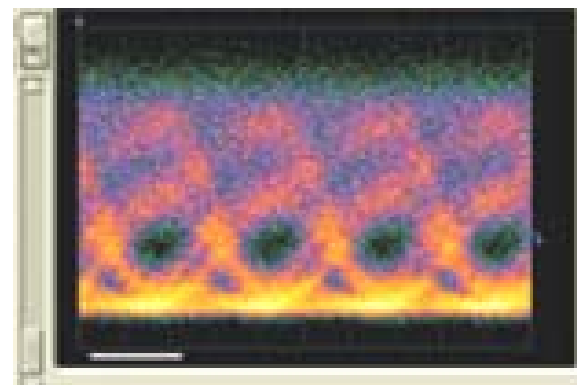
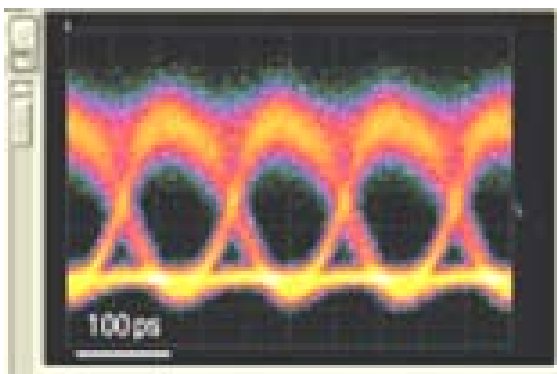
Θόρυβος στο '0' Εύρος γραμμής της στάθμης του λογικού “0”

Θόρυβος στο '1' Εύρος γραμμής της στάθμης του λογικού “1”



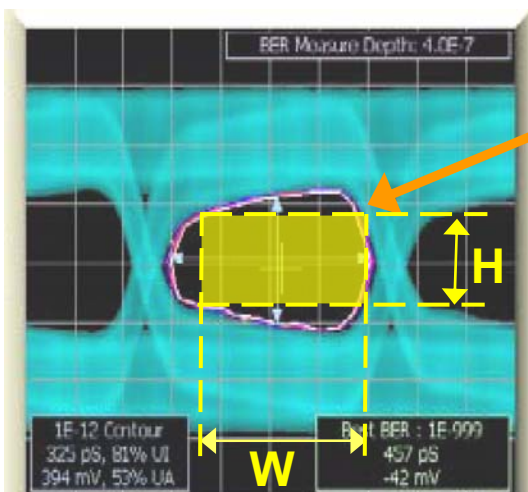


ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΦΘΑΛΜΟΥ

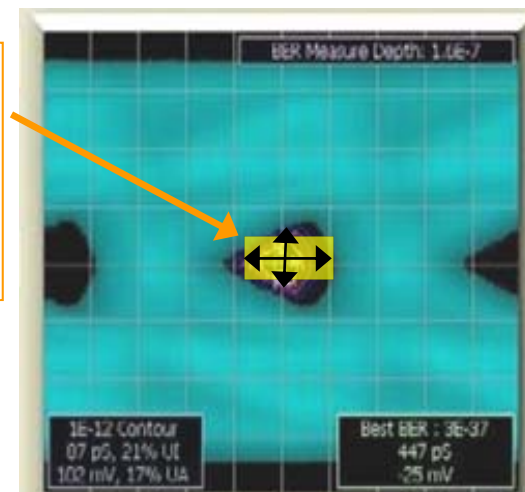


Το jitter αποτυπώνεται στο εύρος των πλαϊνών γραμμών

Ο θόρυβος κυρίως στο εύρος των δύο οριζόντιων γραμμών ("0" και "1")

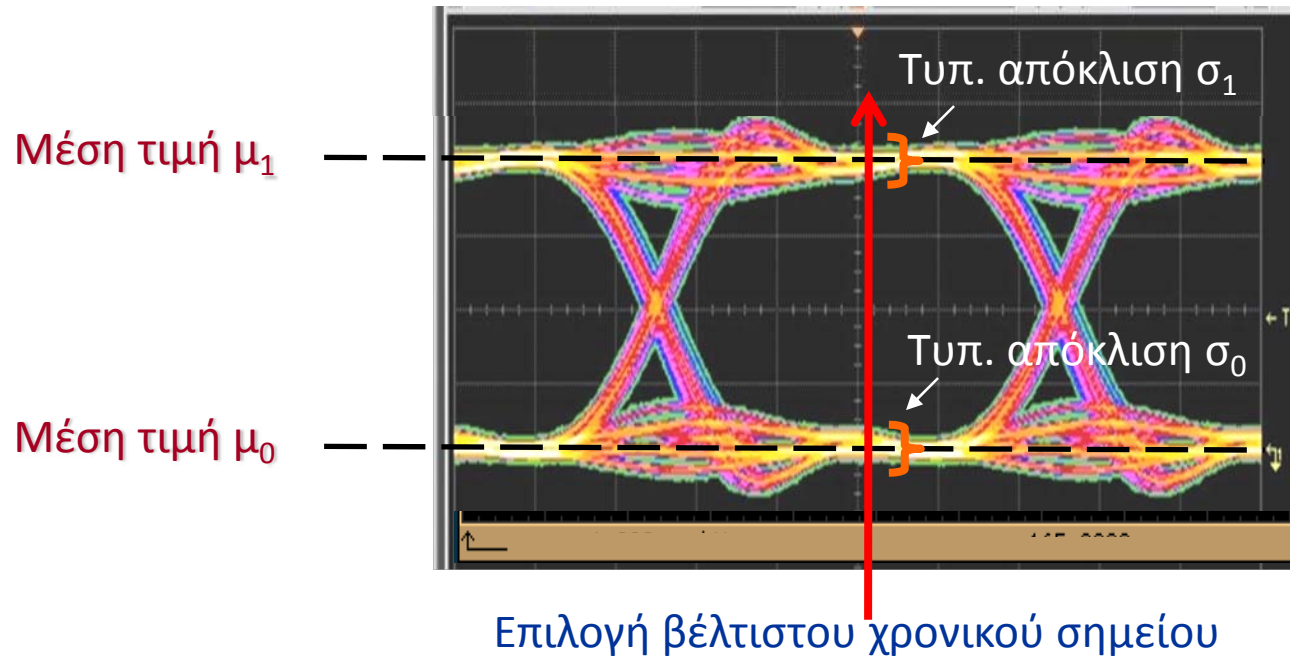


το άνοιγμα "ματιού"
ενδεικτικό της
ποιότητας σήματος





ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΦΘΑΛΜΟΥ



Μελέτη των κατανομών στη στάθμη των '1' και των '0' για το χρονικό σημείο που επιλέχθηκε

Λόγος σβέσης (Extinction Ratio) $EX = 10 \cdot \log \left(\frac{\mu_1}{\mu_0} \right)$

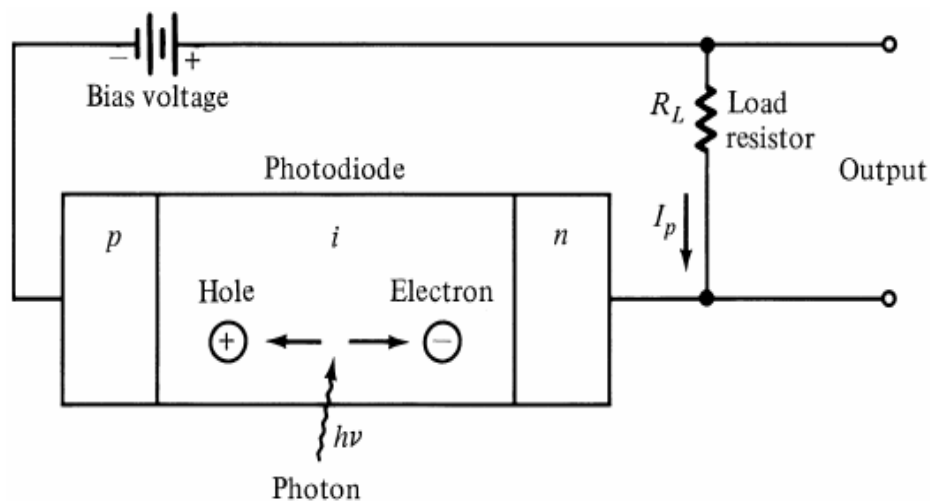
Παράγοντας ποιότητας (Q-factor) $Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$



ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ – ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΔΥΦΙΩΝ

Το οπτικό σήμα ανιχνεύεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα με την πρόσπτωσή του σε μία φωτοδίοδο.

Τα προσπίπτοντα φωτόνια δημιουργούν ζευγάρια ηλεκτρονίων – οπών τα οποία συλλέγονται από εξωτερικό κύκλωμα και αντιστοιχίζονται σε ηλεκτρικό σήμα τάσης.

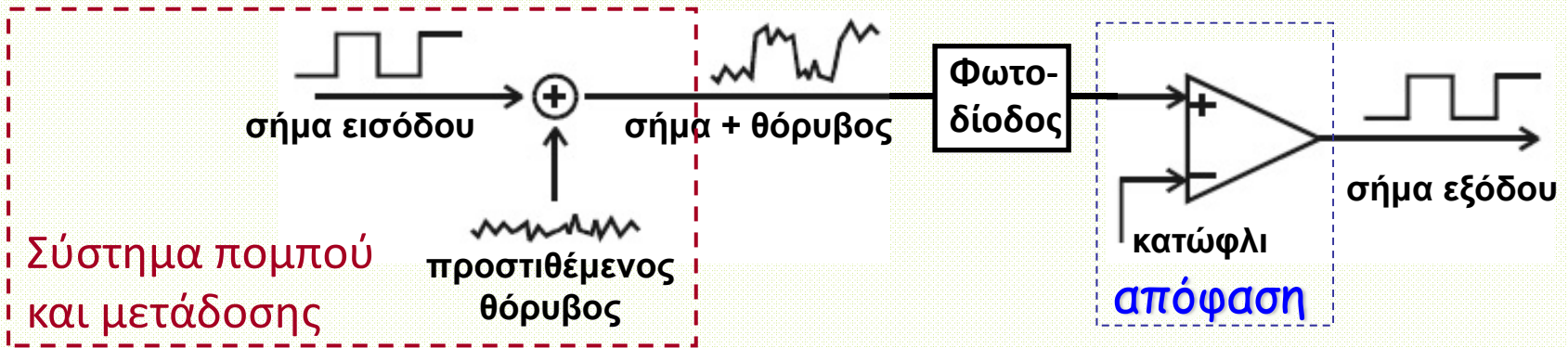


Το σήμα αυτό ενισχύεται και εισάγεται σε διάταξη απόφασης έτσι ώστε να αναγνωριστεί η πρόσληψη '0' ή '1'.



ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ – ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΔΥΦΙΩΝ

Διάγραμμα δέκτη:



Ο δέκτης καλείται να αποφασίσει για δύο πράγματα:

Πότε να πάρει δείγμα από το λαμβανόμενο σήμα
(χρονισμός του δέκτη με το εισερχόμενο σήμα)

Αν η ισχύς του δείγματος αντιστοιχεί σε λογικό 1 ή σε λογικό 0:
Συγκρίνει την εισερχόμενη ισχύ με μία στάθμη αναφοράς (κατώφλι)



ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΘΜΟΥ ΛΑΘΩΝ

Ο ρυθμός λήψης λαθών (BER) ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο αναγνωρίζονται λανθασμένα τα λαμβανόμενα δυφία από τον δέκτη

$$BER = n_0 p(0 | 1) + n_1 p(1 | 0)$$

Όπου n_0 και n_1 είναι το ποσοστό των '0' και '1' που έχουν μεταδοθεί

Αντίστοιχα $p(0 | 1)$ και $p(1 | 0)$ είναι οι δεσμευμένες πιθανότητες

Να αναγνωρίσει ο δέκτης '0' (ή '1') ενώ έχει μεταδοθεί '1' (ή '0')

Αν σταλούν ίσοι αριθμοί '1' και '0', δηλ. $n_1 = n_0 = \frac{1}{2}$, τότε

$$BER = \frac{1}{2} [p(0 | 1) + p(1 | 0)]$$

Στα σημερινά συστήματα μετάδοσης απαιτείται $BER \sim 10^{-12}$

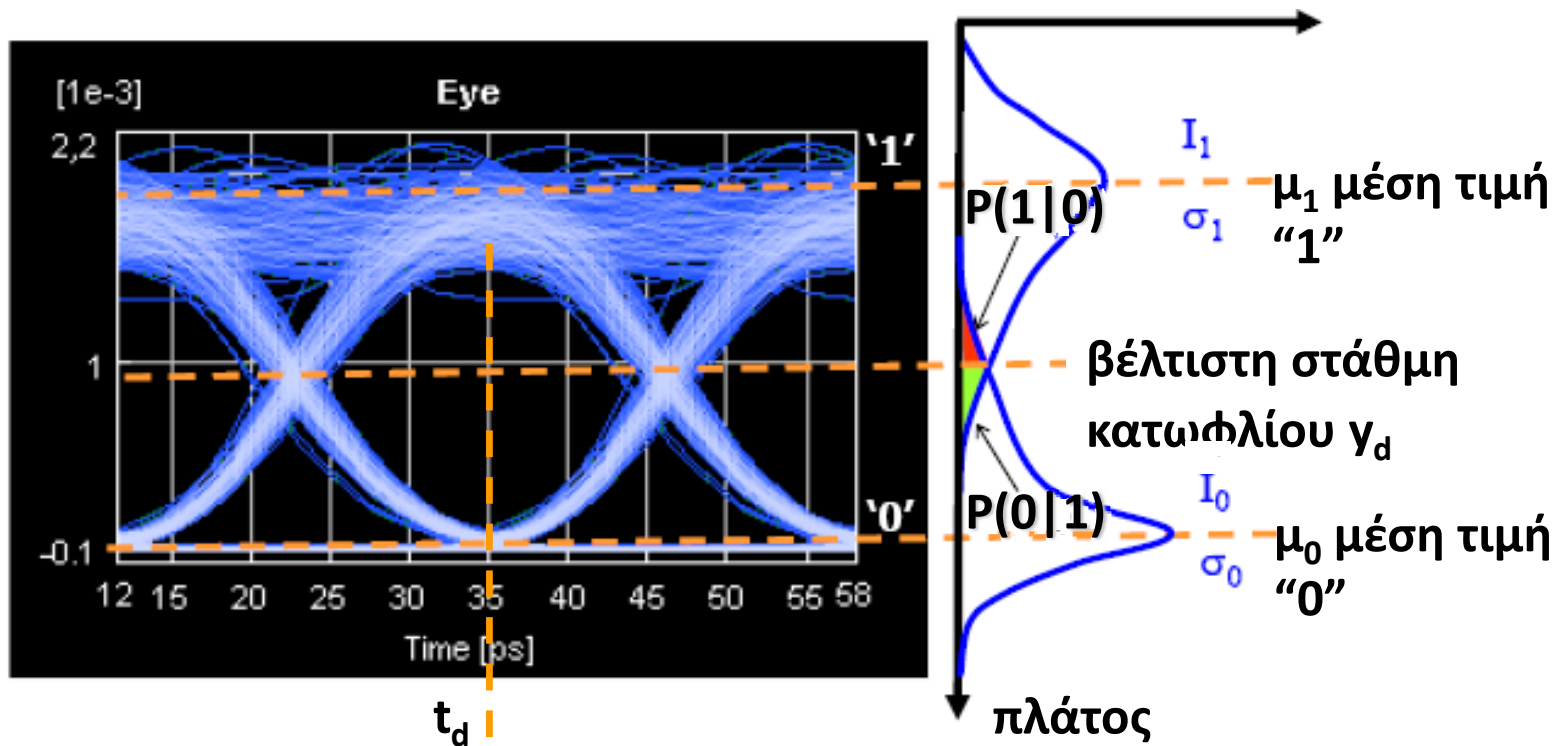
(Για να μετρήσω 10 σφάλματα @ 10 Gb/s (100ps) \sim 20 λεπτά)



ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΘΜΟΥ ΛΑΘΩΝ

Τα σφάλματα στα bits είναι αποτέλεσμα λανθασμένων αποφάσεων του δέκτη για το αν το bit είναι '1' ή '0'

Διαισθητικά φταίνε οι "ουρές" των κατανομών που επικαλύπτονται



Λήψη δείγματος



ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΘΜΟΥ ΛΑΘΩΝ

Η βέλτιστη τιμή κατωφλίου y_d είναι αυτή για την οποία η πιθανότητα να αναγνωριστεί λανθασμένα ένα μεταδιδόμενο '0' ίσους με την πιθανότητα να αναγνωριστεί λανθασμένα ένας μεταδιδόμενος '1'.

Μία αρκετά καλή προσέγγιση είναι:

$$P(1|0) = P(0|1) \Rightarrow y_d = \frac{\sigma_0 \mu_1 + \sigma_1 \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$$

Το BER σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi} Q} \exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right)$$

όπου:

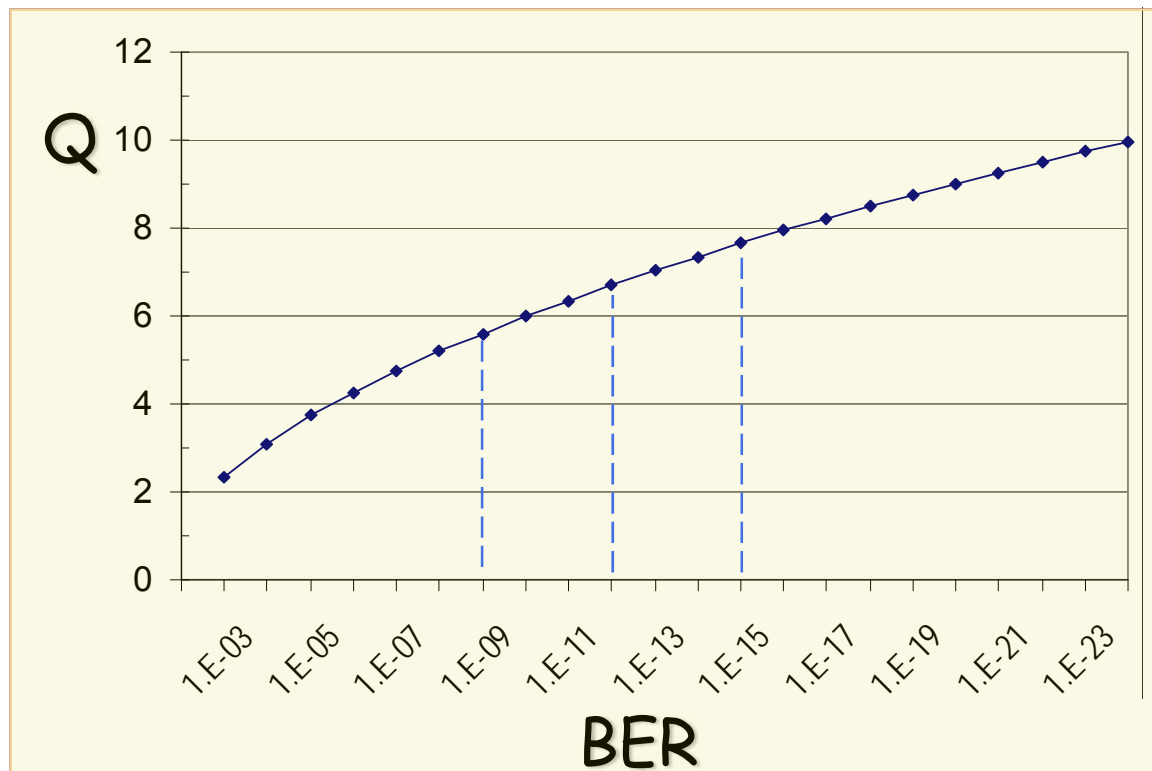
$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$$



ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΘΜΟΥ ΛΑΘΩΝ

Η ποσότητα Q ορίζεται ακόμα και αν ο θόρυβος δεν είναι Gauss
Στην περίπτωση όμως που είναι Gauss, καθορίζει πλήρως το BER

$$BER \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} \exp\left(\frac{-Q^2}{2}\right)$$



Q	BER
6.0	10^{-9}
7.0	10^{-12}
7.9	10^{-15}



ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΘΜΟΥ ΛΑΘΩΝ

Δυστυχώς, το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται στο δέκτη, ΔΕΝ είναι πιστή αναπαράσταση του προσπίπτοντος οπτικού σήματος.

Ο δέκτης προσθέτει θόρυβο ο οποίος είναι της μορφής:

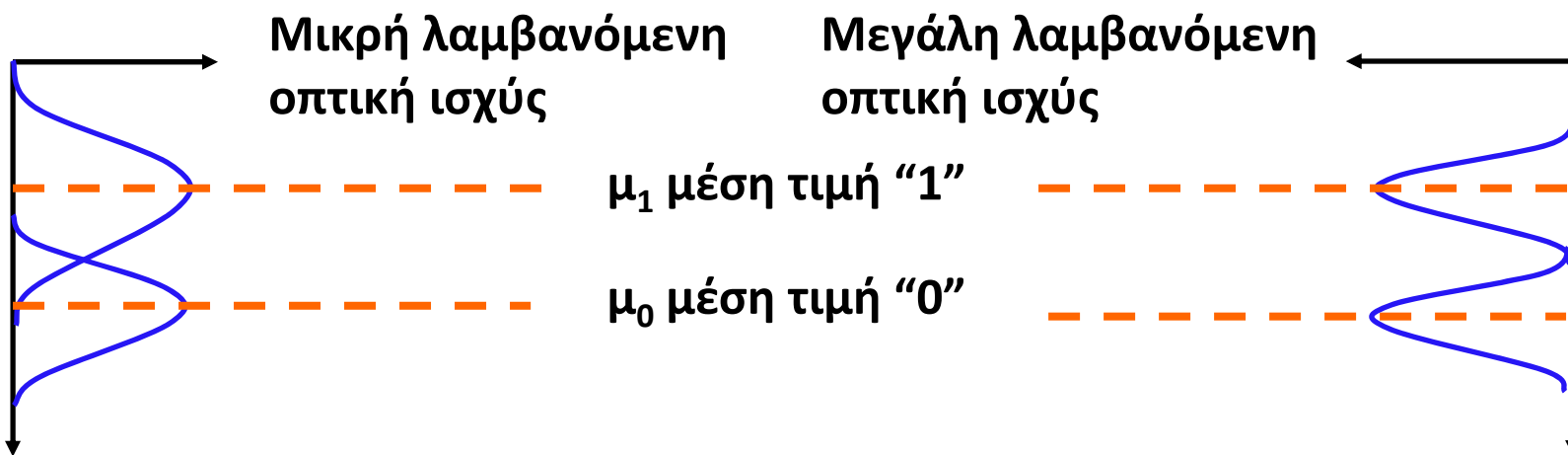
Θερμικός θόρυβος

Θόρυβος ηλεκτρονικού ενισχυτή

Θόρυβος σκότους

Θόρυβος βολής

Η επίδραση του θορύβου μεγαλώνει όσο η προσπίπτουσα οπτική ισχύ μειώνεται. Η αύξηση της επίδραση ισοδυναμεί με "μεγάλωμα" των ουρών

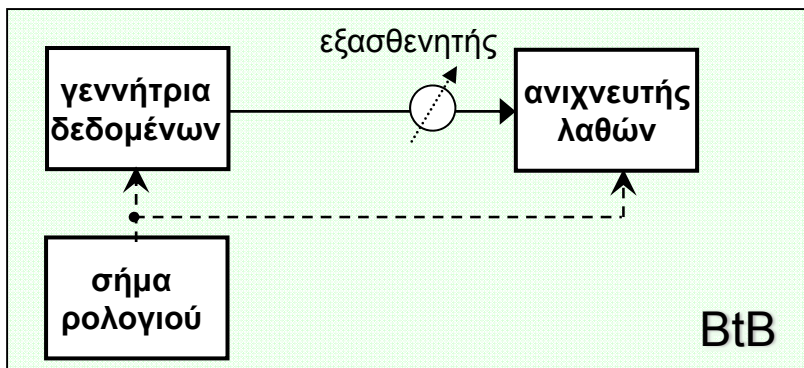




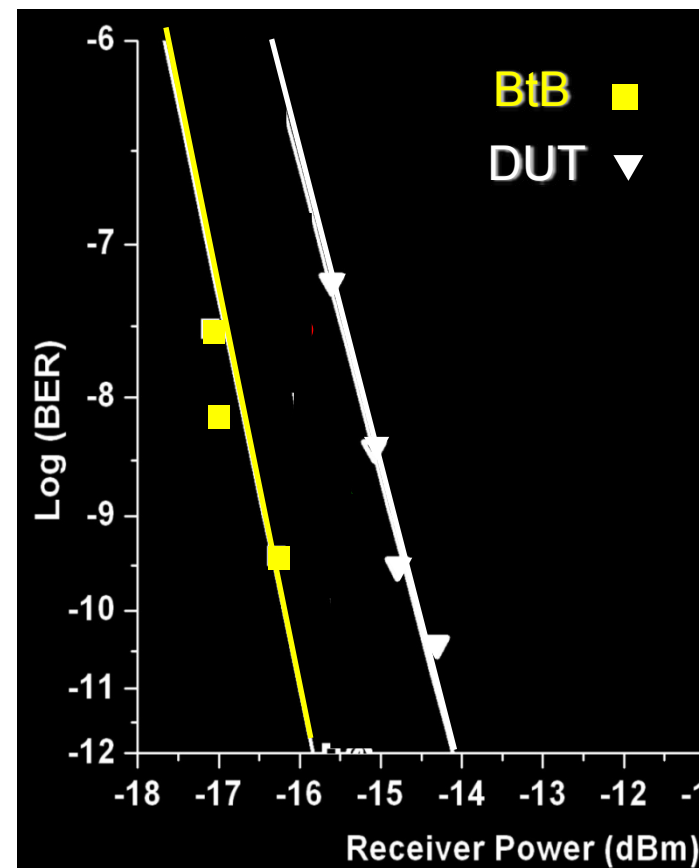
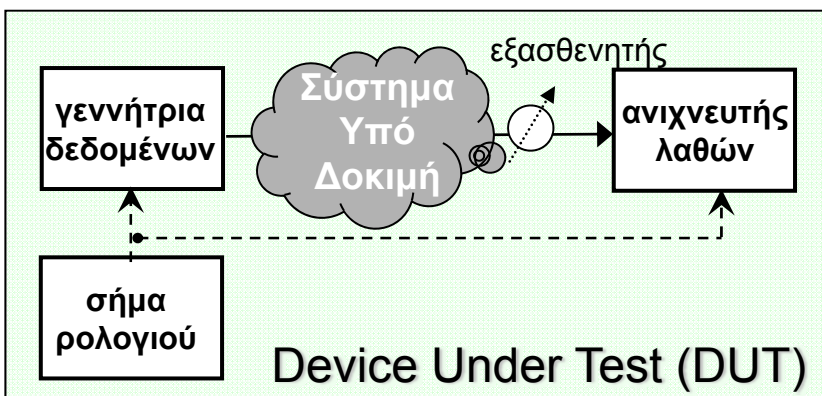
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΘΜΟΥ ΛΑΘΩΝ

Back-to-Back μετρήσεις

Μετράμε BER vs ισχύ σήματος για απευθείας σύνδεση πομπού-δέκτη



Χαρακτηρισμός συστήματος Παρεμβολή του συστήματος

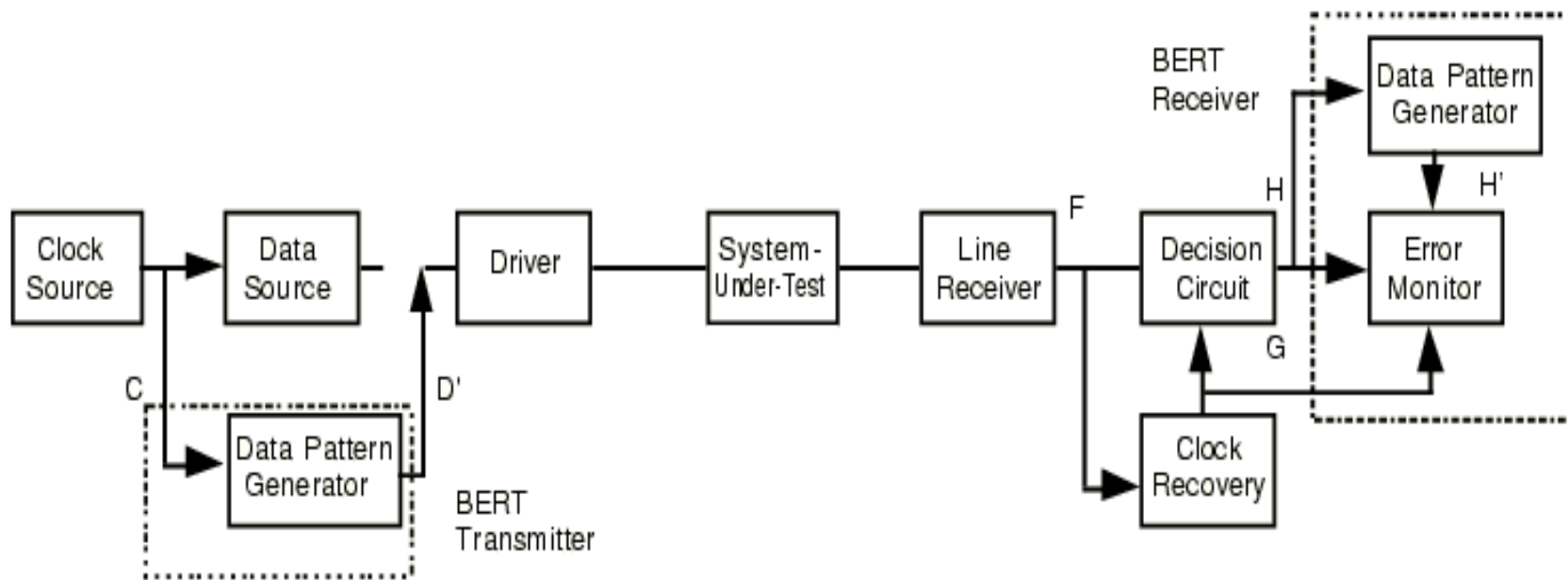


Καμπύλες BER



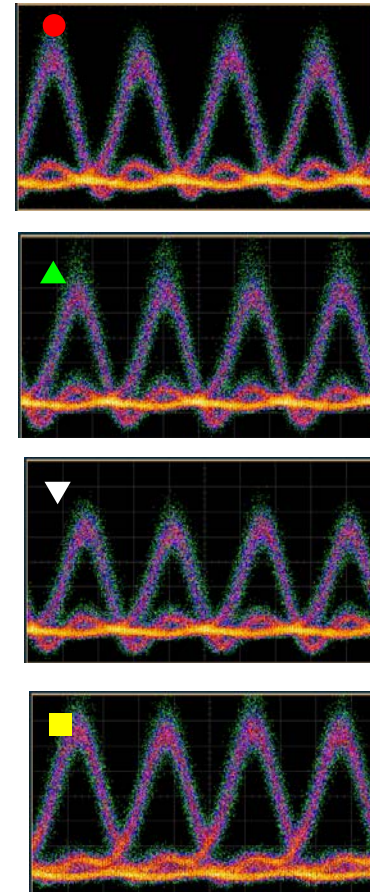
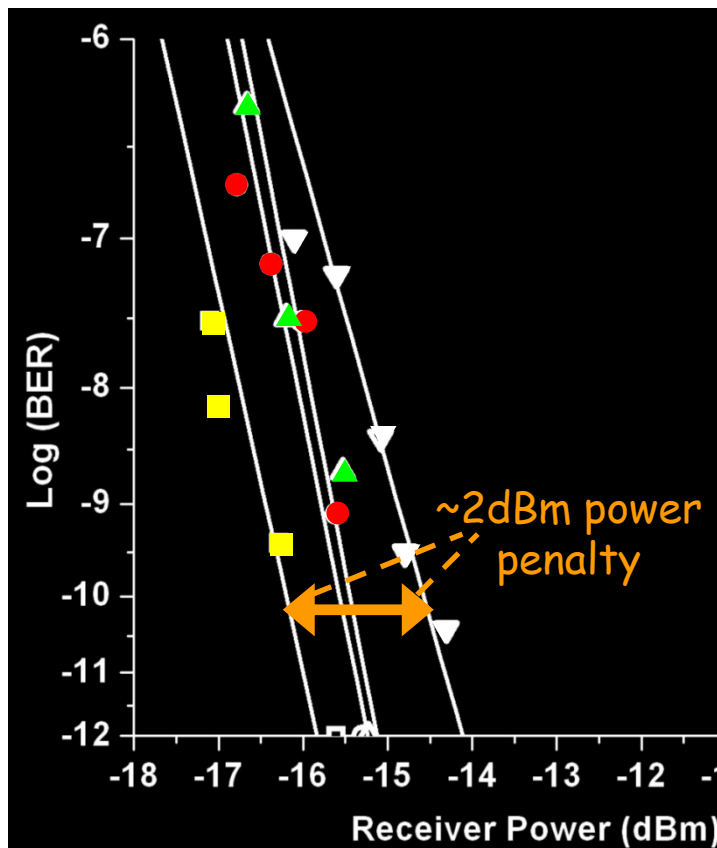
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΘΜΟΥ ΛΑΘΩΝ

Διάταξη για μέτρηση ρυθμού λαθών





ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΘΜΟΥ ΛΑΘΩΝ



Power penalty: κριτήριο της παραμόρφωσης σήματος που εισάγει ένα σύστημα μετάδοσης. Είναι στην ουσία η αύξηση στην ισχύ του σήματος στο δέκτη που απαιτείται ώστε να επιτευχθεί BER ίδιο με την περίπτωση όπου δεν υπήρχε παραμόρφωση.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

“Nonlinear Fiber Optics”, G.P. Agrawal, Academic Press Publications

“Fiber Optic Communications”, J. Palais, Prentice Hall

“Δίκτυα Οπτικών Ινών”, Paul Green, Μεταφρ. Καρούμπαλου, Εκδόσεις Παπασωτηρίου

“Optical Communication System”, John Gowar, Prentice Hall Publications

“Single Mode Fiber Optics”, Jeunhomme, Dekker

“Optical Networks”, Rajin Ramaswami and Kumar N. Sivarajan, Morgan Kaufmann Publications

“Optical Fiber Telecommunication”, Edited by S.E. Miller and I.P. Kaminow, Academic Press Publications

“Optical Fiber Communication”, Second Edition, J. Senior, Prentice Hall Publications

“Τηλεπικοινωνίες Οπτικών Ινών”, Ν. Ουζούνογλου