

Οπτικές Επικοινωνίες



Ανάπτυξη παντού. Ανάπτυξη για όλους.

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ

ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



Η ΠΑΙΔΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ
Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Εκπαίδευσης και Αρχικής
Επαγγελματικής Κατάρτισης

Οπτικές Επικοινωνίες – 1

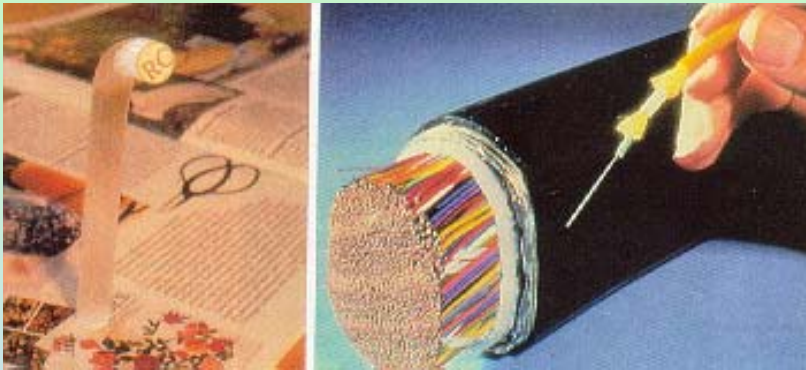
Ιστορική αναδρομή - 1

- Οι αρχαιότερες μέθοδοι διάδοσης μιας οπτικής πληροφορίας **σήματα καπνού, το άναμμα των πυρσών.**
- **Φρυκτωρίες:** με το άναμμα πυρσών από φρυκτωρία σε φρυκτωρία έφθανε η πληροφορία κινδύνου στην ενδοχώρα.
- Περιγραφή του Αισχύλου για την αναγγελία της νίκης στην Τροία
- Το οπτικό αυτό σύστημα βελτιώθηκε αργότερα (2^ο πΧ αιώνα) με την κατασκευή ενός οπτικού τηλεγράφου με τον οποίο μπορούσε να σταλεί ένα σύνθετο μήνυμα χωρίς προσυνηννόηση.
- Samuel Morse (1854) και Graham Bell (1876) έθεσαν τα θεμέλια για τις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες.
- Δεκαετία του '50 αρχίζει να εμφανίζεται η ηλεκτρονική επεξεργασία της πληροφορίας, που θα οδηγήσει στις μέρες μας στην ψηφιακή μετάδοση δεδομένων.

Οπτικές Επικοινωνίες – 2

Ιστορική αναδρομή - 2

Η μετάδοση δεδομένων στηρίζεται σε τεχνικές, που χαρακτήρισαν την «εποχή».



Εποχή του χαλκού:

Χρήση χάλκινων καλωδίων για την μεταφορά διαμορφωμένων ηλεκτρικών σημάτων.

Χρησιμοποιούμε πλήθος χάλκινων καλωδίων, εξ αιτίας της περιορισμένης ικανότητας μετάδοσης της πληροφορίας από κάθε καλώδιο.

Εποχή των ασύρματων επικοινωνιών:

Στη μετάδοση ΗΜ κυμάτων στον ελεύθερο χώρο (ραδιοφωνικά κύματα, κινητή τηλεφωνία).

Εποχή των ημιαγωγών:

Αντικατάσταση των δαπανηρών και βαρέων χάλκινων καλωδίων με οπτικές ίνες, που κοστίζουν ελάχιστα, διαθέτουν πολύ μεγάλη χωρητικότητα για μετάδοση των πληροφοριών, επηρεάζονται ελάχιστα από εξωτερικές παρεμβολές και επιτυγχάνουν σημαντικές εμβέλειες.

Το πλεονέκτημα των ψηφιακών επικοινωνιών στηρίζεται στην ικανότητα υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (μέχρι $4 \cdot 10^{10}$ bit/s) με υπερταχείς φωτεινούς παλμούς διάρκειας μερικών ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$).

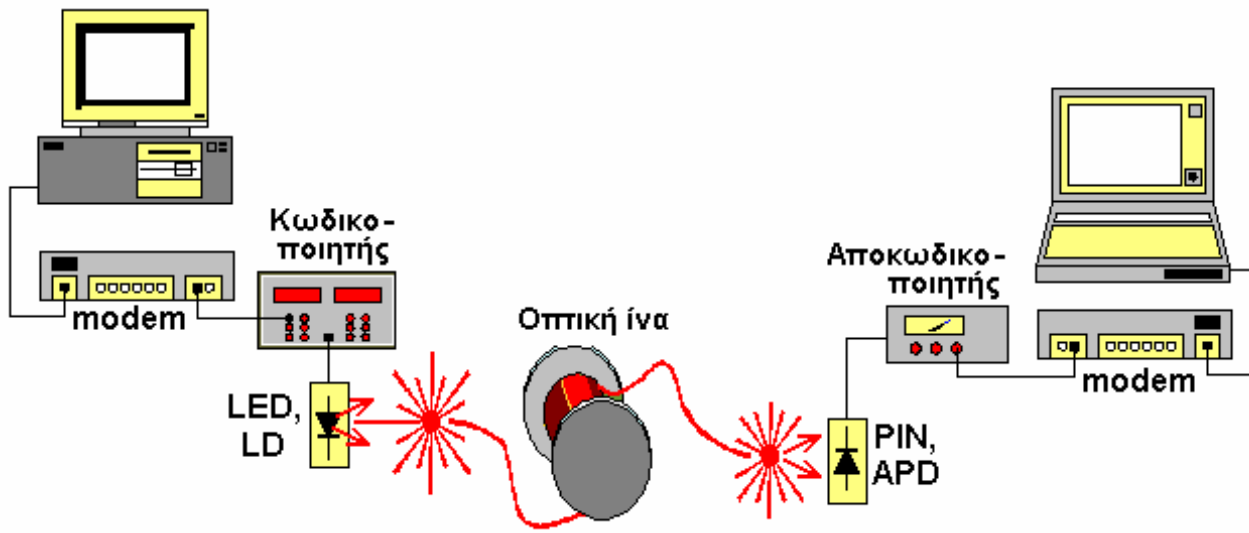
Οπτικές Επικοινωνίες – 3

Τεχνική μετάδοσης της πληροφορίας - 1

Η τεχνική μετάδοσης μιας πληροφορίας αποτελείται από τα εξής μέρη:

1. πομπός που μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα (πληροφορία) σε φωτεινό σήμα. Η πληροφορία διαμορφώνεται συνήθως σε ψηφιακή μορφή, δηλαδή σε ακολουθία εκατομμυρίων παλμών,
2. οπτική ίνα με ενδεχομένως ενδιάμεσους αναμεταδότες,
3. δέκτης που αποκαθιστά στο σταθμό λήψης το ηλεκτρικό σήμα.

Με μια τέτοια διάταξη μπορούμε να αποκαταστήσουμε επικοινωνία μεταξύ δυο μονάδων ηλεκτρονικών υπολογιστών.

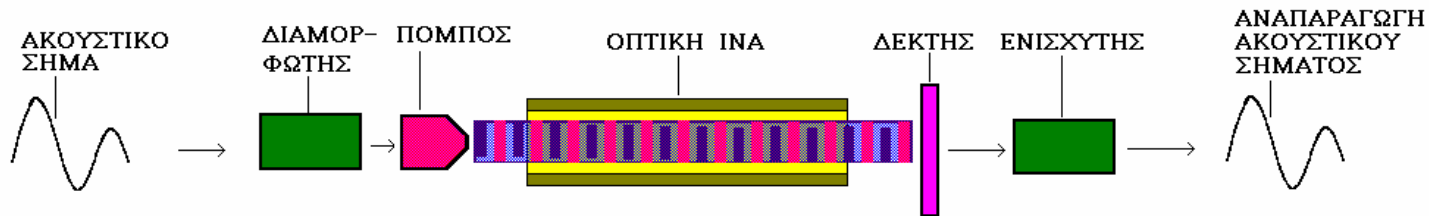


Οι συσκευές modem αντιστοιχούν στο ηλεκτρικό interface μεταξύ των Η/Υ και της οπτικής διάταξης. Σαν πομποί χρησιμοποιούνται δίοδοι φωτοεκπομπής (LED) ή ημιαγωγικά λέιζερ (LD) και σαν φωτοανιχνευτές, δίοδοι τύπου PIN ή δίοδοι χιονοστιβάδας (APD).

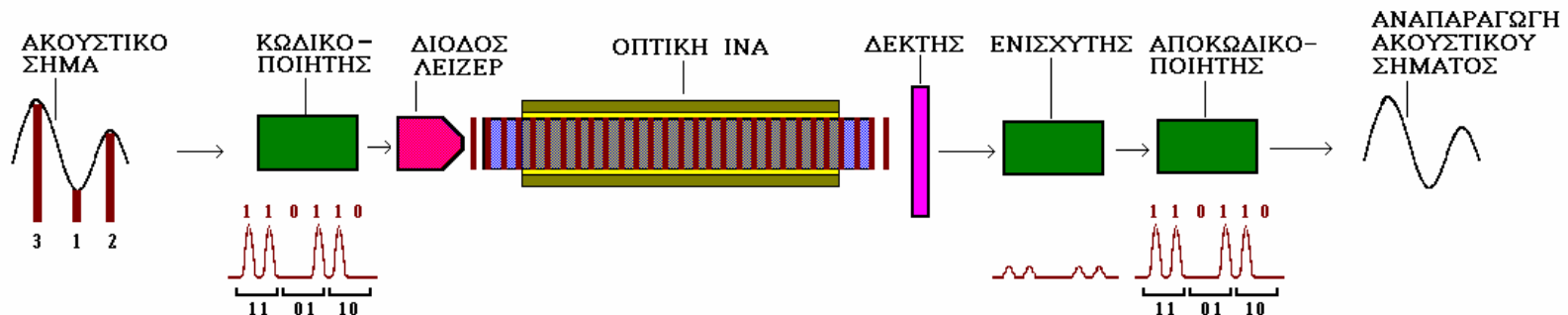
Οπτικές Επικοινωνίες – 4

Τεχνική μετάδοσης της πληροφορίας - 2

ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ



ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ



ΓΙΑ ΜΙΑ ΠΙΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΠΡΕΠΕΙ Ο ΡΥΘΜΟΣ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΤΟΥΛΑΧΙΣΤΟΝ Ο ΔΙΠΛΑΣΙΟΣ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ.

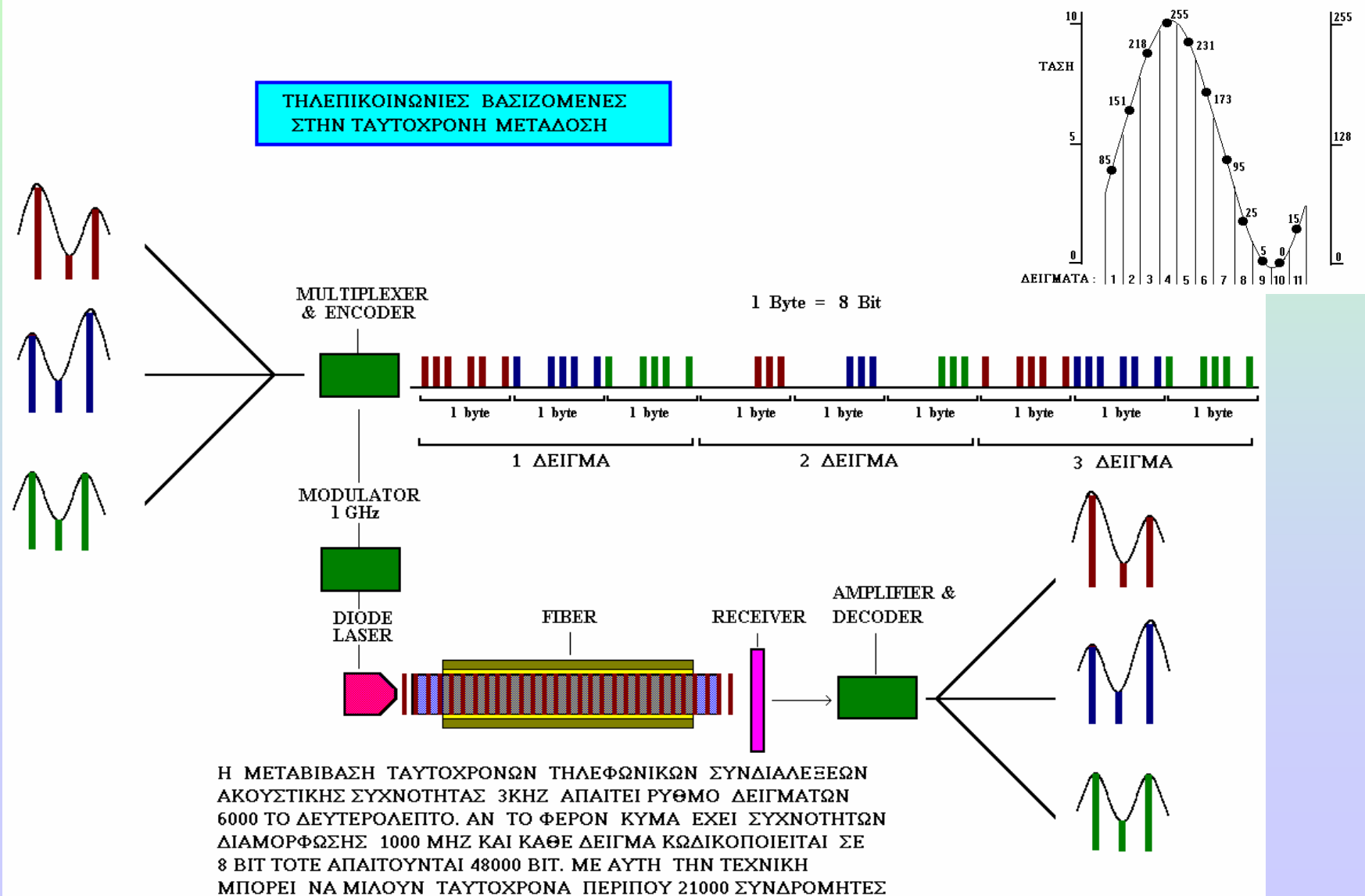
ΑΝ ΤΟ ΣΗΜΑ ΕΧΕΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ 4000 Ηz ΘΑ ΠΡΕΠΕΙ Ο ΡΥΘΜΟΣ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΝΑ ΕΙΝΑΙ 8000 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΔΕΥΤΕΡΟΛΕΠΤΟ. Η ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ (ΣΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ 1, 2, 3) ΓΙΝΕΤΑΙ ΨΗΦΙΑΚΑ ΜΕΤΑΤΡΕΠΟΝΤΑΣ ΤΟ ΔΕΚΑΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΕ ΔΥΑΔΙΚΟ 1=01 2=10 3=11.

ΣΕ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΦΩΝΗΣ ΜΠΟΡΕΙ ΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΝΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΙ ΜΕ ΑΡΙΘΜΟΥΣ ΑΠΟ 0 - 255 ΠΟΥ ΣΤΟ ΔΥΑΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΕ 8 BIT ΑΝΑ ΑΡΙΘΜΟ. ΚΑΘΕ BIT ΕΙΝΑΙ ΚΑΙ ΕΝΑΣ ΠΑΛΜΟΣ ΛΕΙΖΕΡ. ΣΤΟ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΥΤΟ ΣΗΜΑΙΝΕΙ $8000 \times 8 = 64000$ BIT ΔΗΛΑΔΗ 64000 ΠΑΛΜΟΙ / ΔΕΥΤ.

Ο ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΤΟ ΣΗΜΑ ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΑΣΘΕΝΕΣ, ΤΟ ΕΝΙΣΧΥΕΙ ΚΑΙ ΤΟ ΣΤΕΑΝΕΙ ΜΕΤΑ ΣΤΟΝ ΑΠΟΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΤΗ ΠΟΥ ΜΕΤΑΤΡΕΠΕΙ ΤΗΝ ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΟΡΦΗ ΣΕ ΔΕΚΑΔΙΚΗ ΑΠΟΔΙΔΟΝΤΑΣ ΤΕΛΙΚΑ ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟ ΣΗΜΑ.

Οπτικές Επικοινωνίες – 5

Τεχνική μετάδοσης της πληροφορίας - 3



Οπτικές Επικοινωνίες – 6

Φαινόμενα Παλμοδιεύρυνσης - 1

Κατά τη διάδοση φωτεινού παλμού σε οπτική ίνα, παρατηρείται στην έξοδο

- μείωση στην έντασή του (εξ αιτίας της απορρόφησης)
- αλλοίωση της μορφή του παλμού.

Η αιτία αυτής της παλμοδιεύρυνσης εξηγείται βάσει του φαινομένου της διασποράς

Ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης, υπάρχουν εκατοντάδες ή χιλιάδες διαφορετικοί τρόποι (ή ρυθμοί) με τους οποίους μπορεί το φως να διαδοθεί μέσα στον πυρήνα. Κάθε διαφορετικός τρόπος μετάδοσης αντιστοιχεί και σε ελαφρώς διαφορετική πορεία με διαφορετικό χρόνο διάδοσης.

Θεώρημα του Fourier: σε φάσμα συχνοτήτων $\Delta\nu$ αντιστοιχεί χρονικό διάστημα $\Delta t \approx 1/\Delta\nu$, που σημαίνει πώς όσο μικρότερο είναι το φασματικό εύρος ($\Delta\nu$), τόσο ο παλμός έχει μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Το συλλογισμό αυτόν εφαρμόζουμε στη διάδοση ενός παλμού μέσα στην ίνα όπου ένας παλμός χρονικής διάρκειας Δt μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από άπειρο αριθμό μονοχρωματικών κυμάτων

συχνότητας $\nu = c/\lambda$ μέσα στο φάσμα συχνοτήτων $\nu_0 \pm \frac{\Delta\nu}{2}$, όπου $\Delta\nu \approx 1/\Delta t$.

Το φαινόμενο της διασποράς προκαλεί την εξάρτηση του δ.δ. από τη συχνότητα της ακτινοβολίας.

Η φασική ταχύτητα $\left(u_{\text{ph}} = \frac{c}{n(\nu)} \right)$ κάθε συμμετέχοντος τρόπου θα είναι διαφορετική και θα εξαρτάται

από τη συχνότητα. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στη διεύρυνση του πλάτους των παλμών.

Οπτικές Επικοινωνίες – 7

Φαινόμενα Παλμοδιεύρυνσης - 2

Η αλλοίωση των παλμών μπορεί να περιορισθεί ή να αποφευχθεί ως εξής:

- Χρησιμοποιώντας μονοτροπική ίνα διαμέτρου 3-5 μm . Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, αυτή η επιλογή εξαλείφει πλήρως την παλμοδιεύρυνση.
- Χρησιμοποιώντας πολυτροπική ίνα με βαθμιαία κατανομή του δ.δ. (graded-index fiber).

Μαθηματική περιγραφή

Στη μελέτη του φαινομένου της διασποράς, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν δύο παράμετροι:

η ομαδική ταχύτητα u_g και η μεταβολή της $\frac{du_g}{dk}$

Η u_g συνδέεται με την ταχύτητα διάδοσης του παλμού: $u_g = u_{\text{Ph}} + k \frac{du_{\text{Ph}}}{dk} = \frac{c}{n' + \omega \cdot \frac{dn'}{d\omega}}$
ενώ η μεταβολή της u_g με τη διεύρυνσή του.

Ο παρονομαστής μετασχηματίζεται $n' + \omega \cdot \frac{dn'}{d\omega} = n' + \frac{2\pi c}{\lambda} \cdot \frac{dn'}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{d\omega} = n' + \frac{2\pi c}{\lambda} \cdot \frac{dn'}{d\lambda} \left(-\frac{\lambda^2}{2\pi c} \right) \rightarrow$

$$n' + \omega \cdot \frac{dn'}{d\omega} = n' - \lambda \cdot \frac{dn'}{d\lambda}, \text{ επειδή } \omega = 2\pi \frac{c}{\lambda} \text{ και } d\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} d\lambda$$

Με αντικατάσταση προκύπτει: $u_g = \frac{c}{n' - \lambda \cdot \frac{dn'}{d\lambda}}$

Οπτικές Επικοινωνίες – 8

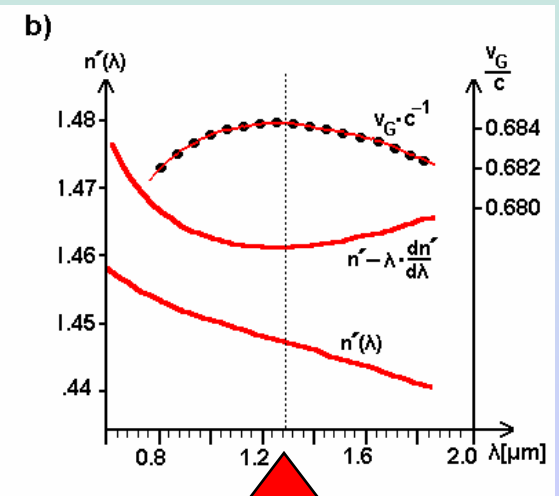
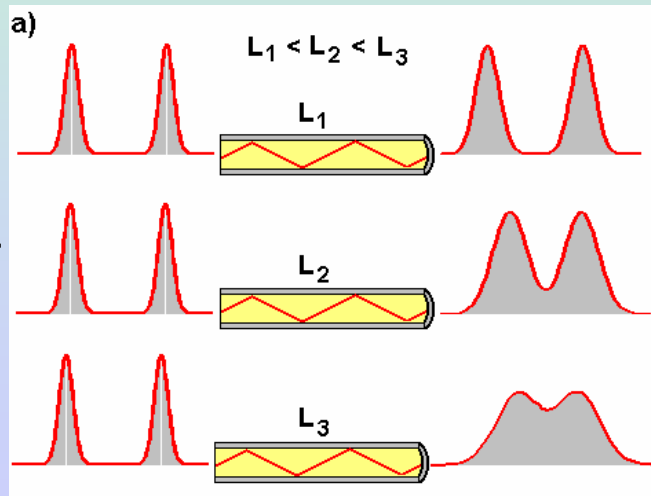
Φαινόμενα Παλμοδιεύρυνσης - 3

Συμπεράσματα από τη σχέση:
$$u_g = \frac{c}{n' - \lambda \cdot \frac{dn'}{d\lambda}}$$

- ο παρονομαστής είναι ένα αδιάστατο μέγεθος
- ο παρονομαστής παίζει το ρόλο του δ.δ. για την ομαδική ταχύτητα
- η εξάρτηση του όρου αυτού από το μήκος κύματος φαίνεται στο σχήμα b)
- η ομαδική ταχύτητα λαμβάνει μέγιστη τιμή για $\lambda \approx 1.3 \mu\text{m}$ (ο παρονομαστής γίνεται ελάχιστος και ο

όρος της διασποράς τείνει $\frac{dn'}{d\lambda} \rightarrow 0$ (διάδοση φωτεινού κύματος χωρίς ουσιώδη διεύρυνση)

Το μήκος κύματος $\lambda \approx 1.3 \mu\text{m}$ κείται στη 2^η ζώνη διέλευσης και πλεονεκτεί συγκριτικά με τη 3^η ζώνη διέλευσης επειδή παρουσιάζει την ελάχιστη διασπορά (μειονεκτεί όμως στην εξασθένηση).



Συμπέρασμα:

η επιλογή του κατάλληλου μήκους κύματος, ως φορέα μετάδοσης της πληροφορίας, θα πρέπει να είναι ένας συγκερασμός μεταξύ των παραμέτρων, της διασποράς και του συντελεστή εξασθένησης

$\lambda \approx 1.3 \mu\text{m}$

Οπτικές Επικοινωνίες – 9

Φαινόμενα Παλμοδιεύρυνσης - 4

Παράδειγμα

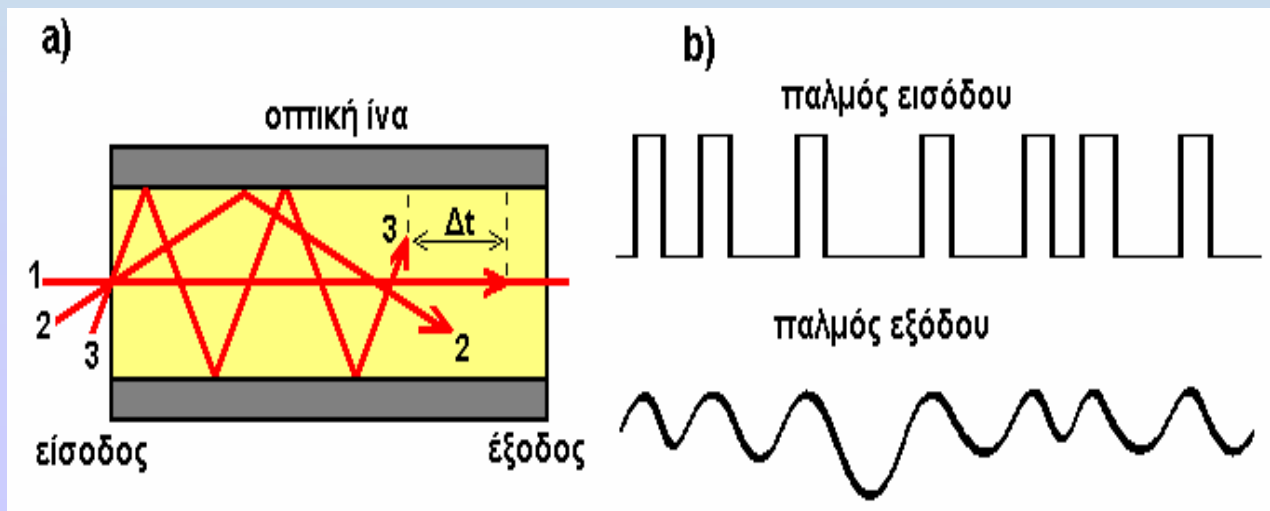
Ας θεωρήσουμε μια πολυτροπική οπτική ίνα βηματικής κατανομής (step-index fiber) με $n_{cl}=1.495$, $n_{co}=1.500$, εντός της οποίας εισέρχεται ένας παλμός λέιζερ διάρκειας 10ns. Να υπολογιστεί η διαπλάτυνση του παλμού στην έξοδο της ίνας.

Λύση: λαμβάνομε υπόψη δύο ακραίους τρόπους διάδοσης. Η ακτίνα 1 διαδίδεται αξονικά, ενώ η ακτίνα 3 οριακά, προκαλώντας τη μεγαλύτερη καθυστέρηση $\Delta t=t_2-t_1$.

Ακτίνα 1: $t_1 = \frac{L}{u_{co}} = \frac{L}{c/n_{co}} = \frac{Ln_{co}}{c}$. Αν η οριακή πορεία (ακτίνα 3) ίση προς $D=2r_{co}$ * $r_{co} = Ln_{co}/n_{cl}$ ($D=L/\cos\beta$ και $\cos\beta=n_{cl}/n_{co}$), τότε: $t_2 = \frac{2r_{co}}{u_{co}} = \frac{Ln_{co}/n_{cl}}{c/n_{co}} = \frac{Ln_{co}^2}{cn_{cl}} \rightarrow \Delta t = \frac{Ln_{co}}{c} \left(\frac{n_{co}}{n_{cl}} - 1 \right)$.

Η διαπλάτυνση του παλμού είναι $\frac{\Delta t}{L} = \frac{n_{co}}{c} \left(\frac{n_{co}}{n_{cl}} - 1 \right) = 37 \text{ ns/km}$.

Αν το μήκος του οπτικού καλωδίου είναι $L=1000\text{m}$, τότε στην έξοδο του καλωδίου ο παλμός λέιζερ θα έχει πλάτος $10\text{ns}+37\text{ns}=47\text{ns}$. Επειδή η ταχύτητα διάδοσης είναι σταθερή, σημαίνει ότι η καθυστέρηση των 37ns θα προκαλεί διαφορά δρόμου 7.3m.



Οπτικές Επικοινωνίες – 10

Σολιτόνια - 1

Χρήση νέων τεχνικών για τη μείωση της αλλοίωσης του παλμού (διεύρυνση ή συμπίεση).

Εφαρμογή **μη γραμμικών φαινομένων** (π.χ. αλλαγή φάσης κύματος για έντονη ακτινοβολία) για την **παραγωγή παλμών χρονικά αμετάβλητων** (σολιτόνια).

Στα σολιτόνια, ο δ.δ. του υλικού δεν εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της ακτινοβολίας, αλλά και

από τη φωτεινή έντασή της : $n'(\omega, I) = n_1(\omega) + n_2 \cdot I(t)$

Θεωρούμε υλικό εντός του οποίου διαδίδεται ένας παλμός $I(t)$ με κεντρική κυκλική συχνότητα ω_0 .

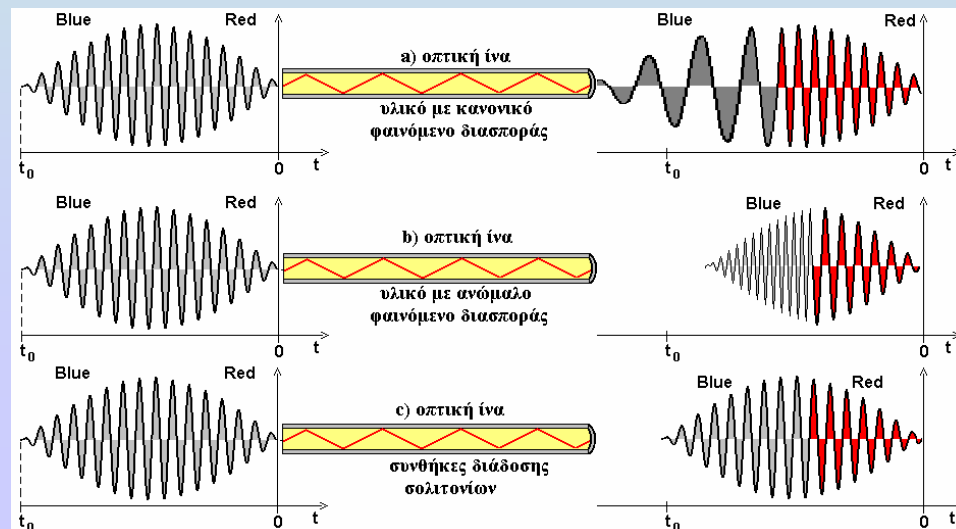
Σε βάθος z του υλικού παρατηρείται μετατόπιση φάσης των επιμέρους i -μονοχρωματικών κυμάτων:

$$\phi_1(t) = \omega t - kz = \omega t - \frac{2\pi z}{(\lambda/n')} = \omega t - \frac{\omega n' z}{c} \rightarrow \phi_1(t) = \omega \left(t - \frac{n_1(\omega) z}{c} \right) - \left(\frac{n_2 \omega z}{c} \right) \cdot I(t)$$

Η φάση μετατοπίζεται (λόγω εξάρτησης από τη φωτεινή ένταση) καθώς και η κυκλική συχνότητα:

$$\omega_i = \frac{d\phi_1}{dt} = \omega_0 - \left(\frac{n_2 \omega_0 z}{c} \right) \cdot \frac{dI}{dt}$$

Αυτή η μεταβολή συχνοτήτων μέσα στον ίδιο παλμό εκφράζεται ως **frequency chirping**.

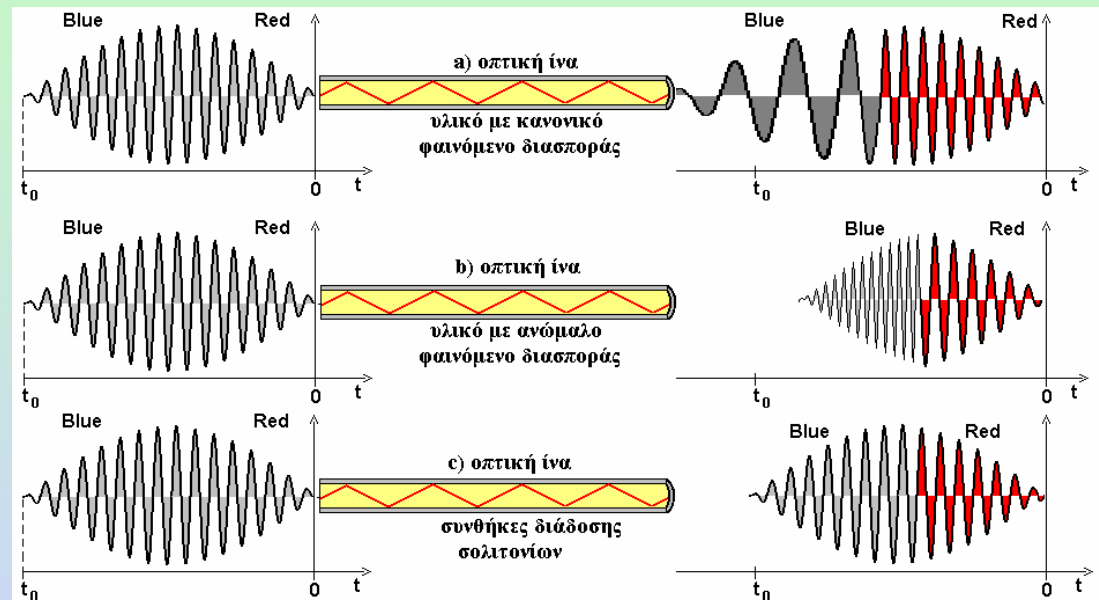


Οπτικές Επικοινωνίες – 11

Σολιτόνια - 2

Το φαινόμενο frequency chirping οδηγεί σε αλλοίωση της αρχικής μορφής του παλμού.

- Υλικά, που παρουσιάζουν κανονικό φαινόμενο διασποράς (τμήματα χαμηλών συχνοτήτων (Red) διαδίδονται ταχύτερα, ενώ τμήματα υψηλών συχνοτήτων (Blue) διαδίδονται με αργότερο ρυθμό).
- Σε υλικά με ανώμαλη συμπεριφορά στη διασπορά συμβαίνει το αντίθετο.
- Με κατάλληλη επιλογή των δυο παραμέτρων (έντασης ακτινοβολίας και φαινομένου διασποράς) μπορούμε να εξουδετερώσουμε φαινόμενα chirping έτσι, ώστε οι παλμοί να διαδίδονται μέσα σε οπτικές ίνες χωρίς να υφίστανται αλλοίωση.



Συμπεράσματα

Με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων της διασποράς και της φωτεινής έντασης, μπορούμε, τα δυο αντιθέτως διαδιδόμενα φαινόμενα, να εξουδετερώσουμε έτσι ώστε ο παλμός χρονικά να μην αλλοιώνεται.

Πιστεύεται, ότι τα σολιτόνια θα ανοίξουν νέους ορίζοντες στις οπτικές επικοινωνίες. Θα διακρίνονται για τις μικρές τους απώλειες, σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και τους εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσής τους.

Οπτικές Επικοινωνίες – 12

Σολιτόνια - 3

Μαθηματική ερμηνεία του φαινομένου

κατά το χρόνο ανόδου του παλμού $\left(\frac{dI}{dt} > 0\right)$

(περιοχή του κανονικού φαινομένου διασποράς)

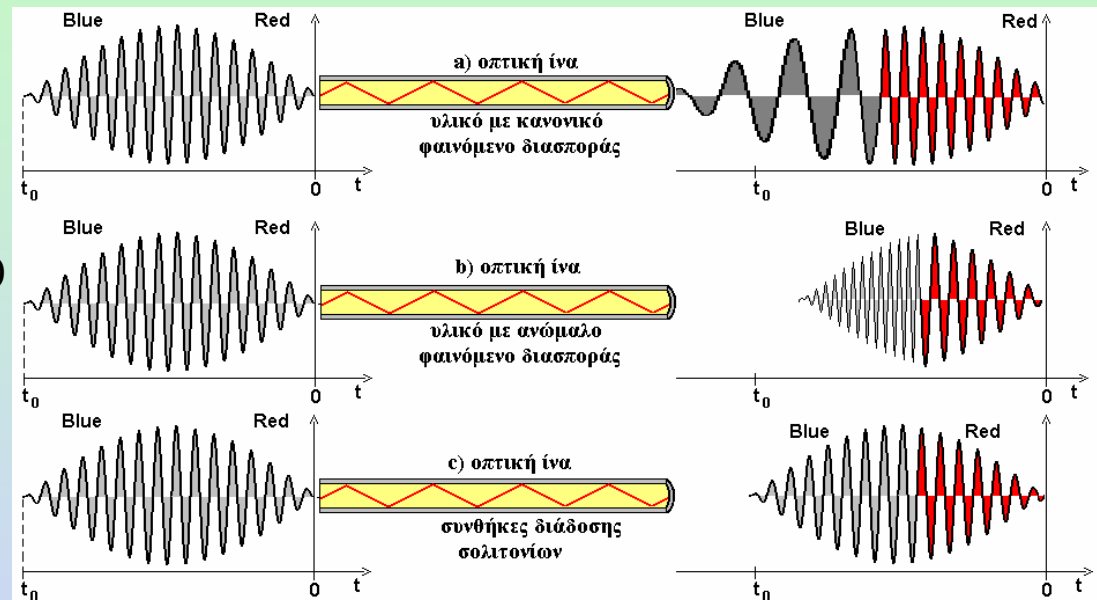
- Επιλογή μήκους κύματος λ , ώστε $\frac{dn'}{d\lambda} < 0$

Από τη σχέση $\omega_i = \omega_0 - \left(\frac{n_2 \omega_0 z}{c}\right) \cdot \frac{dI}{dt}$

προκύπτει ότι $\omega_i < \omega_0$ ή $(\lambda_i > \lambda_0)$.

Αυτό σημαίνει ότι οι μετατοπίσεις συχνότητας λαμβάνουν χώρα στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων (μετατόπιση ερυθρού). Επομένως, ένας παλμός θα υφίσταται διεύρυνση επειδή τα τμήματα των χαμηλών συχνοτήτων θα τρέχουν γρηγορότερα από τα τμήματα των υψηλών συχνοτήτων.

Το φαινόμενο frequency chirping οδηγεί σε αλλοίωση της αρχικής μορφής του παλμού.



(περιοχή του ανώμαλου φαινομένου διασποράς) $\frac{dn'}{d\lambda} > 0$

Από την ίδια σχέση προκύπτει ότι $\omega_i > \omega_0$ (ή $\lambda_i < \lambda_0$), που σημαίνει ότι οι μετατοπίσεις συχνότητας αντιστρέφονται. Ένας παλμός θα υφίσταται συμπίεση επειδή τα τμήματα των υψηλών συχνοτήτων θα διαδίδονται γρηγορότερα από τα τμήματα των χαμηλών συχνοτήτων.

Οπτικές Επικοινωνίες – 13

Φωτονικές ολοκληρωμένες λύσεις - 1

Η χρήση οπτικών διατάξεων σε ηλεκτρονικά κυκλώματα έχει σαν σκοπό:

την παραγωγή, επεξεργασία και μεταφορά μιας φωτεινής δέσμης μέσα σε ημιαγωγική δομή.

Στην κατηγορία των εφαρμογών εντάσσονται:

- οι οπτικοί διακόπτες (π.χ. με χρόνους αντίδρασης $< 1\text{ns}$),
- οι οπτικοί ενισχυτές (π.χ. ενισχυτές με ίνα προσμείξεων ιόντων ερβίου),
- οι διαμορφωτές της φωτεινής ακτινοβολίας,
- οι φωτονικοί μεταγωγείς (photonic switching),
- οι συζεύκτες των οπτικών ινών.

Integrated optics

ενσωματωμένες μικροδιατάξεις (compact subdevices), όπου όλες οι οπτικοηλεκτρονικές μονάδες, δηλαδή ο πομπός ακτινοβολίας (συνήθως ένα ημιαγωγικό λέιζερ μαζί με την ηλεκτρονική βαθμίδα του ηλεκτροοπτικού διαμορφωτή), τα οπτικά απεικόνισμα (φακοί, πρίσματα, οπτικές ίνες και συζεύκτες) είναι συναρμολογημένες και έτοιμες προς χρήση.

Φωτονική

