

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΙΣΕΡΧΟΜΕΝΗΣ
ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΟΠΤΙΚΗ ΙΝΑ**

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΓΑΛΑΝΗ (ΑΜ:0656)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΗΛΙΑΣ ΑΣΑΡΙΔΗΣ

ΝΑΥΠΑΚΤΟΣ 2014

Αλλά τι είναι το φώς; Είναι κύμα ή βροχή φωτονίων; Είχαμε θέσει ένα παρόμοιο ερώτημα: το φώς είναι κύμα ή βροχή σωματιδίων; Τότε είχαμε λόγους να απορρίψουμε τη σωματιδιακή θεωρία και να δεχτούμε την κυματική, που κάλυπτε όλα τα φαινόμενα. Τώρα όμως το πρόβλημα είναι πολύ πιο πολύπλοκο. Δεν φαίνεται πιθανό πως θα μπορέσει να πετύχει κανείς για τα φωτεινά φαινόμενα μία περιγραφή που να έχει εσωτερική συνοχή, χρησιμοποιώντας αποκλειστικά με τη μία από τις δύο δυνατές γλώσσες. Φαίνεται πως είμαστε υποχρεωμένοι να χρησιμοποιήσουμε μερικές φορές τη μία από αυτές τις θεωρίες, μερικές φορές την άλλη, και καμία φορά μπορούμε να τις χρησιμοποιούμε και τις δύο ταυτόχρονα. Βρισκόμαστε μπροστά σε μία δυσκολία νέου είδους. Έχουμε δύο αντικρουόμενες εικόνες της πραγματικότητας. Χωριστά, καμία τους δεν εξηγεί όλα τα φωτεινά φαινόμενα. Οι δύο μαζί τα εξηγούν!

A. EINSTEIN - L. INFELD
Light Quanta – The evolution of physics (1938)
Μτφρ: Ε. ΜΠΙΣΤΑΚΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	[2]
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	[5]
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	[6]
Α. Τύποι οπτικών ινών και τρόποι μετάδοσης του φωτός.....	[6]
Β. Χαρακτηριστικά οπτικών ινών.....	[11]
Γ. Σημαντικοί τύποι οπτικών ινών.....	[12]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

1.1. Εξασθένιση.....	[14]
1.3. Απώλειες.....	[26]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ.

2.1. Μετρήσεις οπτικών ινών & παράμετροι μέτρησης.....	[35]
2.2. Ανάκλαση Rayleigh backscattering & Fresnel reflection.....	[42]
2.3. Μέτρηση της εξασθένισης σε μία συγκόλληση ή ένα σύνδεσμο.....	[44]
2.4. Νεκρή Ζώνη.....	[45]
2.5. Δυναμική περιοχή.....	[49]

2.6. Αποτελέσματα μετρήσεων.....	[53]
2.6.1. 1 ^η Μέτρηση.....	[53]
2.6.2. 2 ^η Μέτρηση.....	[55]
2.6.3. 3 ^η Μέτρηση.....	[56]
2.6.4. 4 ^η Μέτρηση.....	[57]

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	[59]
Α. Πλεονεκτήματα οπτικών ινών.....	[59]
Β. Μειονεκτήματα οπτικών ινών.....	[62]
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	[64]

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η χρήση των οπτικών ινών έχει προ πολλού εισβάλει στην ζωή μας με αποτέλεσμα να καθιερωθεί ως ένα επιπλέον χρήσιμο εργαλείο στα χέρια του ανθρώπου.

Είναι παγκοίμως γνωστό, ότι κάθε επίτευγμα-ανακάλυψη του ανθρώπου, αναλόγως την χρήση του, τείνει πότε να γίνει ένα χρήσιμο εργαλείο και πότε ως αρνητικό νοούμενο με τις διάφορες επιβλαβείς επιπτώσεις στον άνθρωπο.

Έτσι πάνω σε αυτή την βάση ξεκίνησα να πραγματοποιήσω έρευνα στην οπτική ίνα και να πειραματιστώ πάνω στην εισερχόμενη ισχύ της, ώστε τα συμπεράσματα να προστεθούν σαν μία ψηφίδα στο τεράστιο μωσαϊκό της επιστημονικής έρευνας.

Εν πρώτοις θα πρέπει να ευχαριστήσω τον σεβαστό καθηγητή κ. Ηλία Ασαρίδη για την κατάδειξη του θέματος και που κοπίασε με εμένα την δυσμαθούσα προκειμένου να μου ανοίξει το μυαλό στη σωστή θέα των πειραματικών δεδομένων και στην σωστή αξιολόγηση των κριτηρίων θέασης και αποτίμησης.

Θα ήταν μεγάλη παράλειψη μου να μην ευχαριστούσα και το προσωπικό της βιβλιοθήκης, που επίσης συνέβαλε και έπαιξε καταλυτικό ρόλο στην πραγματοποίηση της πτυχιακής μου εργασίας.

Ναύπακτος 2014

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κύριο ερευνητικό ζήτημα στην παρούσα εργασία είναι η παρατήρηση πειράματος της εισερχόμενης ισχύς σε οπτική ίνα.

Η έρευνα πάνω στις οπτικές ίνες έχει προχωρήσει αρκετά¹ χωρίς να σημαίνει ότι η περαιτέρω έρευνα τους, δεν έχει να δώσει ακόμα σημαντικά στοιχεία.

Σύμφωνα με το παραπάνω η παρούσα εργασία φιλοδοξεί είτε να επιβεβαιώσει τα μέχρι τώρα πορίσματα είτε να φέρει στο φώς κάποιες αθέατες πλευρές του ζητήματος.

Αρχικά όμως θα πρέπει να δούμε τους τύπους των οπτικών ινών και τα χαρακτηριστικά αυτών ώστε να θέσουμε μια κοινή γνωσιολογική πλατφόρμα.

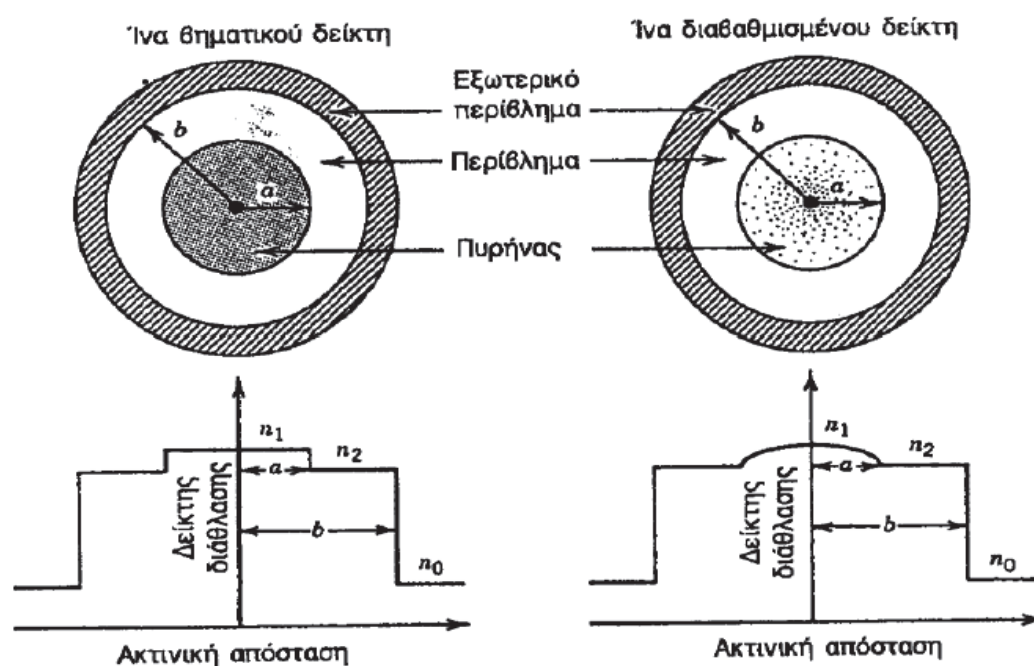
A. Τύποι οπτικών ινών και τρόποι μετάδοσης του φωτός.

Στην πιο απλή μορφή, μια οπτική ίνα αποτελείται από έναν κυλινδρικό πυρήνα από γυαλί πυριτίου, ο οποίος περιβάλλεται από περίβλημα με δείκτη διάθλασης μικρότερο από εκείνον του πυρήνα.

¹ Α. ΜΠΟΓΡΗΣ, *Συμβολή στην μελέτη διατάξεων υποσυστημάτων αμιγώς οπτικής επεξεργασίας σήματος για ευρυζωνικά οπτικά δίκτυα*, Αθήνα 2005. Δ. ΖΩΓΡΑΦΟΠΟΥΛΟΣ, *Οπτικές ίνες φωτονικού κρυστάλλου με συντονιζόμενες ιδιότητες πόλωσης*, Θεσσαλονίκη 2008. Κ. ΤΡΟΥΛΟΣ, *Οπτικές υποδομές δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς: στρατηγικές δημοτικής ανάμειξης*, Αθήνα 2012. Φ. ΚΑΡΙΝΟΥ, *Οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα διασύνδεσης υψηλής φασματικής απόδοσης με πολυπλεξία μήκους κύματος και προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης*, Πάτρα 2012. Χ. ΜΑΡΚΟΥ, *Συντονιζόμενα στοιχεία και κυκλώματα αισθητήρων βασισμένα σε οπτικές ίνες φωτονικών κρυστάλλων*, Πάτρα 2013.

Λόγω της απότομης αλλαγής του δείκτη διάθλασης στην επιφάνεια επαφής πυρήνα περιβλήματος, έχουμε ίνες με διαφορετικό δείκτη. Οι ίνες που ονομάζονται ίνες **βηματικού δείκτη (step index)** και υπάρχει και ένα δεύτερο είδος ίνας, που είναι γνωστή σαν **ίνα διαβαθμισμένου δείκτη (gradual index)**, στην οποία ο δείκτης διάθλασης μειώνεται σταδιακά στο εσωτερικό του πυρήνα.

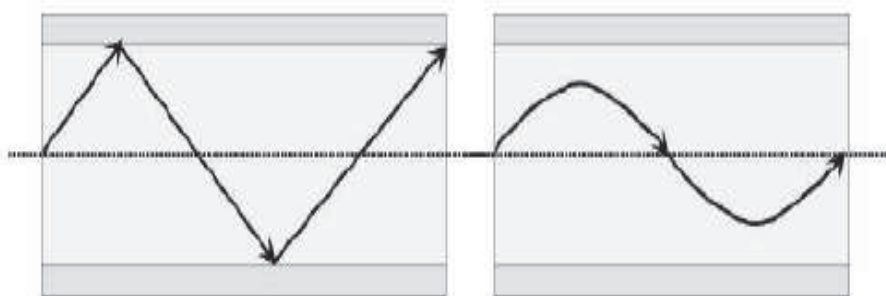
Η περιγραφή της γεωμετρικής οπτικής, παρ' όλο που γίνεται κατά προσέγγιση, ισχύει όταν η ακτίνα του πυρήνα (συμβολίζεται με a στο επόμενο σχήμα) είναι πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του φωτός λ . Όταν οι δύο αυτές παράμετροι γίνονται συγκρίσιμες είναι απαραίτητη η χρήση της θεωρίας μετάδοσης κυμάτων.²



Σχήμα 1: Τομή και προφίλ του δείκτη διάθλασης μίας ίνας βηματικού και μία διαβαθμισμένου δείκτη.

² Ι.ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ , Μελέτη τηλεπικοινωνιακής κίνησης οπτικών δικτύων που χρησιμοποιούν τη πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση οπτικού κώδικα (OCDMA), Πάτρα 2011 σ. 12.

Σαν αποτέλεσμα, στην πρώτη περίπτωση η ανάκλαση όλων των διαδιδόμενων κυμάτων γίνεται στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα – περιβλήματος, ενώ στην δεύτερη η πορεία της ακτίνας είναι καμπυλόγραμμη.

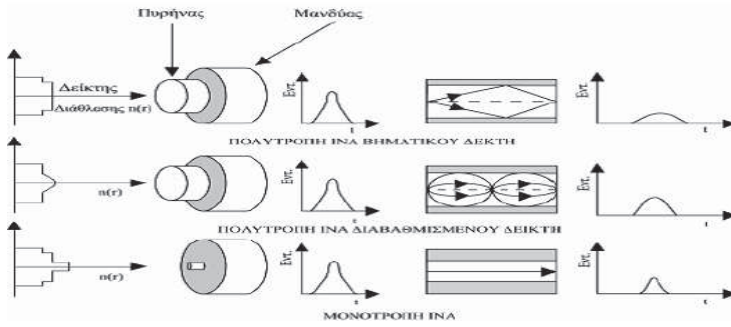


Σχήμα 2: Πορεία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ίνα βηματικού δείκτη (αριστερά) και διαβαθμισμένου δείκτη (δεξιά)

Οι οπτικές ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης ανάλογα με την διάμετρο του πυρήνα διακρίνονται σε μονότροπες (**Single mode-SMF**) και πολύτροπες (**Multi mode-MMF**).

Οι μονότροπες οπτικές ίνες έχουν πολύ μικρή διάμετρο (π.χ. 8-10 μm) και επιτρέπουν μία όδευση για το Η/Μ κύμα που διαδίδεται, έναν τρόπο διάδοσης όπως λέμε. Αντίθετα οι πολύτροπες έχουν πυρήνα μεγαλύτερης διαμέτρου (π.χ. 50-100 μm) και επιτρέπουν πολλαπλές οδεύσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ταυτόχρονα. Εξ ου και ο όρος πολύτροπες, ο οποίος φυσικά αναφέρεται στο γεγονός ότι πολλές ακτίνες φωτός μεταφέρονται συγχρόνως μέσα από την ίνα. Οι τύποι των οπτικών ινών μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη δομή και την λειτουργία τους στις εξής:

1. Πολύτροπες με βηματικό δείκτη (**Multi – mode step index**).
2. Πολύτροπες με διαβαθμισμένο δείκτη (**Multi – mode graded index**).
3. Μονότροπες με βηματικό δείκτη (**Single – mode step index**).



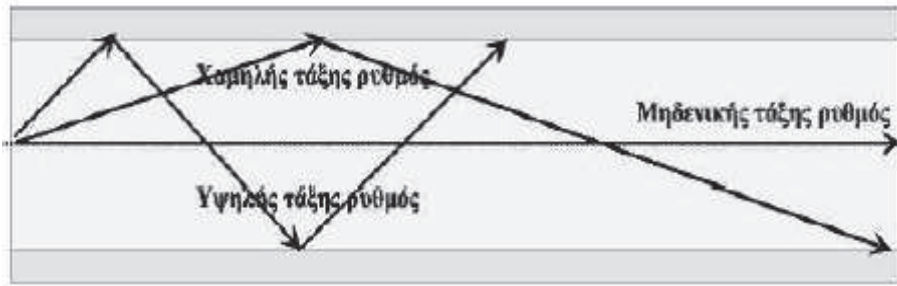
Σχήμα 3: Τύποι και τρόποι μετάδοσης οπτικών ινών.³

³ Σύμφωνα με το σχήμα 3 παρατηρούμε ότι, στην πρώτη στήλη το προφίλ του δείκτη διάθλασης ενώ στην τρίτη και στην πέμπτη οι εισερχόμενοι και οι εξερχόμενοι αντίστοιχα, παλμοί. Είναι φανερή η επίδραση των φαινομένων της εξασθένησης και της διασποράς τα οποία θα μελετηθούν αναλυτικά στη συνέχεια.

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, ανάλογα με την γωνία εισόδου του σε μια οπτική ίνα και το μήκος κύματος του, θα ακολουθήσει διαφορετική πορεία διαδοχικών ανακλάσεων για να διαδοθεί. Κάθε οπτική ίνα, ανάλογα με τις διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά της, μπορεί να υποστηρίξει και κάποιο αριθμό πορειών (τρόπων) διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όμως, οι πολλαπλές ανακλάσεις πολλών διαφορετικών κυμάτων μέσα στην οπτική ίνα μπορούν να δημιουργήσουν συνθήκες συμβολής στο εσωτερικό της ίνας, με επιθυμητή την αποφυγή καταστροφικής συμβολής. Άρα η διάδοση μέσα στην οπτική ίνα δεν θα είναι εφικτή για όλες τις γωνίες εισόδου. Όπως αποδεικνύεται, για να υπάρχει ενισχυτική συμβολή, η γωνία εισόδου θα πρέπει να ικανοποιεί μια σχέση της μορφής:

$$\sin \theta_{in} = \frac{m \cdot \lambda}{4 \cdot n_1 \cdot a}$$

Όπου a η ακτίνα του πυρήνα της οπτικής ίνας και m ακέραιος που αντιστοιχεί στην τάξη του ρυθμού διάδοσης. Η γωνία εισόδου θ_{in} για κάθε m αντιστοιχεί σε μία διαφορετική πορεία μέσα από την οπτική ίνα και καθορίζει ένα διαφορετικό οπτικό τρόπο διάδοσης (*mode*). Για $m=0$ έχουμε τον μηδενικής τάξης ρυθμό που αντιστοιχεί σε ευθεία διάδοση. Για τους ρυθμούς χαμηλής τάξης, η γωνία εισόδου στην ίνα είναι μικρή και η γωνία ανάκλασης στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα - περιβλήματος είναι αρκετά μεγάλη. Αντίθετα όσο αυξάνει το m τόσο αυξάνεται και η γωνία εισόδου στην ίνα, η γωνία ανάκλασης προσεγγίζει την οριακή και αυξάνεται ο αριθμός των ανακλάσεων που απαιτούνται για την διάδοση μέσα από την οπτική ίνα



Σχήμα 4: Πορεία των διαφόρων τάξεων ρυθμών σε μία οπτική ίνα.

Είναι επομένως προφανές ότι ο ρυθμός διάδοσης μέγιστης τάξης που επιτρέπεται σε μια οπτική ίνα θα καθορίζεται από την μέγιστη γωνία εισόδου άρα από το αριθμητικό άνοιγμα. Ταυτόχρονα, οι συνιστώσες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου θα είναι διαφορετικές σε κάθε μία από τους ρυθμούς διάδοσης, με τις συνιστώσες των πεδίων να αντιστοιχούν σε κάθε περίπτωση σε μία συγκεκριμένη λύση της εξίσωσης κύματος και να ικανοποιούν τις κατάλληλες οριακές συνθήκες.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι μία μονότροπη ίνα επιτρέπει συνήθως την διάδοση μόνο του μηδενικής τάξης ρυθμού διάδοσης (ευθεία γραμμή) σε αντίθεση με μία πολύτροπη όπου επιτρέπεται η διάδοση πολλών ρυθμών ταυτόχρονα (έως και χιλιάδες). Με στόχο τη συσχέτιση των χαρακτηριστικών της οπτικής ίνας με τον επιτρεπόμενο αριθμό ρυθμών διάδοσης αλλά και με τα μήκη κύματος που μπορούν να διαδοθούν σε αυτήν έχει οριστεί το μέγεθος κανονικοποιημένη συχνότητα V (ή παράγοντας V) με βάση την εξίσωση:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

όπου a είναι η ακτίνα του πυρήνα της ίνας, n_1 ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα, n_2 ο δείκτης διάθλασης του περιβλήματος και λ το μήκος κύματος. Αποδεικνύεται ότι για πολύτροπες ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης το πλήθος των υποστηριζόμενων ρυθμών είναι $V^2/2$, στις ίνες με διαβαθμισμένο δείκτη διάθλασης $V^2/4$, ενώ στις μονότροπες ίνες η παράμετρος V πρέπει να ικανοποιεί την σχέση $0 < V < 2,4$. Πολύτροπη

διασπορά είναι η διεύρυνση του παλμού στις πολύτροπες ίνες που προκαλείται από τους διάφορους τρόπους μετάδοσης, με διαφορετικές ταχύτητες μέσα στην ίνα. Αυτός ο τύπος διασποράς ονομάζεται μερικές φορές διασπορά στον τρόπο επειδή είναι χαρακτηριστικό μόνο μιας πολύτροπης ίνας.

Η πολύτροπη διασπορά μπορεί να ελαττωθεί χρησιμοποιώντας ίνα μικρότερης διαμέτρου πυρήνα ώστε να ελαττωθούν οι τρόποι μετάδοσης μέσα από την ίνα και με χρήση ίνας διαβαθμισμένου δείκτη. Οι ίνες διαβαθμισμένου δείκτη χρησιμοποιούν διαφορετικούς δείκτες διάθλασης στην ίνα ώστε όλοι οι τρόποι να φτάνουν μαζί⁴.

B. Χαρακτηριστικά οπτικών ινών

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των οπτικών ινών τα εξής:

- Οι μονότροπες ίνες μπορούν να μεταδώσουν φως με μικρή παραμόρφωση σε μεγάλη απόσταση και παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά (παραμόρφωση) του σήματος που προκαλείται από πολλαπλές ακτίνες σε σχέση με τις πολύτροπες.
- Η μονότροπη ίνα παρουσιάζει χαμηλότερη εξασθένηση από τις πολύτροπες.
- Οι μονότροπες μπορούν να κατασκευαστούν μόνο από γυαλί, ενώ οι πολυμερικές ίνες είναι μόνο πολλαπλού ρυθμού.

⁴ Η. ΑΣΑΡΙΔΗΣ -Θ. ΚΑΠΟΥΡΝΙΩΤΗΣ -Σ. ΛΟΥΒΡΟΣ, *Οπτικά Δίκτυα Επικοινωνιών*, Ναύπακτος, σ. 18.

- Οι μονότροπες ίνες παρέχουν μικρό εύρος ζώνης συχνοτήτων και είναι δύσκολες στο χειρισμό τους σε αντίθεση με τις πολύτροπες.
- Οι πολύτροπες ίνες είναι επιπλέον απλούστερες στην κατασκευή τους.
- Ο πυρήνας της πολύτροπης είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν της μονότροπης ίνας, επιτρέποντας εκατοντάδες ακτίνες φωτός να μετακινούνται μέσα από αυτή ταυτόχρονα.
- Η μονότροπη ίνα έχει μειονεκτήματα. Ο πυρήνας μικρότερης διαμέτρου κάνει δύσκολη τη σύζευξη του φωτός στον πυρήνα.

Γ. Σημαντικοί τύποι οπτικών ινών.

- Μονότροπες ίνες: Χρησιμοποιούνται για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και για εφαρμογές σε μεγάλες αποστάσεις.
- 62,5/125 μm : Χρησιμοποιούνται σε μετάδοση δεδομένων και video με χαμηλή και μέτρια ταχύτητα.
- 50/125 μm : Χρησιμοποιείται κυρίως από στρατιωτικούς.
- 100/140 μm : Κάποτε ήταν ένα πολύ δημοφιλές μέγεθος, έχουν απομείνει όμως λίγες εφαρμογές τους.

Ο πρώτος αριθμός αναπαριστά τη διάμετρο του πυρήνα σε μm ενώ ο αριθμός μετά την κάθετο είναι η διάμετρος του περιβλήματος. Αυτή είναι σημαντική διάσταση όταν κάποιος διαλέγει ένα συνδετήρα οπτικής ίνας.

Εφόσον καταστήσαμε με απλότητα και σαφήνεια τα εισαγωγικά στοιχεία ώστε να δημιουργήσουμε μια κοινή γνωσιολογική πλατφόρμα θα προχωρήσουμε στα δύο επόμενα κεφάλαια.

Στο πρώτο θα ασχοληθούμε με τον θεωρητικό προσδιορισμό του πειράματος. Έτσι θα εξετάσουμε την πιθανή εξασθένηση, την κάμψη, την

διασπορά και την απώλεια που θα έχουμε στην ισχύ που θα περάσει από την οπτική ίνα.

Στο δεύτερο θα παρατηρήσουμε το πείραμα και θα καταγράψουμε τα στοιχεία. Θα ασχοληθούμε με το πώς θα επιβεβαιώσουμε τις απώλειες ισχύος εντός οπτικής ίνας πρακτικά. Η ουσία είναι η παράθεση της διαδικασίας των μετρήσεων και η απόδοση των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία αυτή μας παρουσιάζει τον κύριο κόμβο στον οποίο έγιναν οι μετρήσεις, την αναλυτική περιγραφή της συσκευής OTDR, την αναλυτική περιγραφή των αναφορών μέτρησης

Θα ασχοληθούμε με την εξασθένηση και τους εσωτερικούς και εξωτερικούς παράγοντες στους οποίους οφείλεται, με τις απώλειες λόγω κολλήσεων, τις απώλειες που οφείλονται στην ίνα και στις απώλειες που οφείλονται σε συνδετήρες/ κολλήσεις.

Στο τέλος η εργασία κατακλείεται με το αν η επιλογή χρήσης οπτικών ινών είναι η καλύτερη λύση τις περισσότερες φορές αναφέροντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρατηρούμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΜΑΤΟΣ

Η ισχύς που μπαίνει μέσα στην ίνα δεν είναι η ίδια με την ισχύ που βγαίνει έξω. Οι οπτικοί δέκτες χρειάζονται μια συγκεκριμένη ελάχιστη ποσότητας ισχύος για ν' ανακτήσουν σωστά το σήμα, η απόδοση μετάδοσης περιορίζεται εγγενώς από την απώλεια της οπτικής ίνας. Η οπτική απώλεια αποτελεί βασικό περιοριστικό παράγοντα, αφού μειώνει τη μέση ισχύ που φτάνει στο δέκτη.

Η κατασκευή των οπτικών ινών στη δεκαετία του 1970 με χαμηλές απώλειες στην περιοχή του 1μm (μαζί με την επίδειξη *laser* ημιαγωγών που λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου) έκαναν πρακτικά δυνατές της οπτικές επικοινωνίες. Σκοπός είναι να φτάσει όση περισσότερη ποσότητα ισχύος εισέρχεται στην ίνα, στο δέκτη.

Οι απώλειες εξασθένησης είναι μια λογαριθμική σχέση μεταξύ της εξερχόμενης οπτικής ισχύος και της εισερχόμενης οπτικής ισχύος σε ένα σύστημα οπτικής ίνας.⁵

1.1. Εξασθένηση

Η πιο σημαντική διεργασία που λαμβάνεται υπόψη κατά τη διέλευση του φωτός μέσα στην ίνα είναι η εξασθένηση. Όταν περνά μέσα από μία

⁵ G. P. AGRAWAL, *Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες*, Θεσσαλονίκη 2010, σ. 89.

οπτική ίνα μήκους L , η ισχύς του φωτός εξασθενεί. Η ακόλουθη εξίσωση περιγράφει την εξασθένιση:

$$P_L = P_0 e^{-aL}$$

Όπου P_L και P_0 είναι η ισχύς του φωτός μετά από το πέρασμα μέσα από την ίνα μήκους L σε km και η ισχύς στην αρχή της ίνας αντίστοιχα, και a είναι η τιμή της εξασθένισης σε km^{-1} . Επειδή είναι πιο εύκολο να χειριζόμαστε αριθμούς με λογαριθμική κλίμακα, εκφράζουμε την εξασθένιση λογαριθμικά. Έτσι ο παραπάνω τύπος γίνεται :

$$P_L(dB) = P_0(dB) - aL$$

Η εξασθένιση μιας ίνας συνήθως δίνεται από τον κατασκευαστή στο φυλλάδιο προδιαγραφών (σε μορφή πίνακα) και εξαρτάται τόσο από το υλικό της ίνας, όσο και από το μήκος κύματος του φωτός που περνάει από μέσα.

Η εξασθένιση μπορεί να βρεθεί πειραματικά χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα όργανα και μετρώντας την ισχύ του φωτός στην είσοδο και την έξοδο της ίνας (δηλαδή το P_0 και το P_L) και γνωρίζοντας το μήκος του καλωδίου της ίνας. Έτσι η εξασθένιση μπορεί να βρεθεί λύνοντας έναν από τους παραπάνω τύπους ως προς a .

Η εξασθένιση έχει άμεσο αντίκτυπο στην ποιότητα του μεταφερόμενου σήματος μέσα από την ίνα. Η ποιότητα του σήματος που φτάνει στον δέκτη μπορεί να αξιολογηθεί αν μετρήσουμε τον λεγόμενο ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων (BER) δηλ. το ποσοστό των ψηφίων που ανιχνεύονται εσφαλμένα από τα κυκλώματα του δέκτη. Το **BER** δηλ. ορίζεται ως εξής:

$$BER = \frac{\text{ψηφία που ανιχνεύθηκαν λάθος}}{\text{συνολικά ψηφία}}$$

Η μεγάλη εξασθένιση μέσα σε μία ίνα έχει σαν αποτέλεσμα να μεγαλώνει ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων. Συνήθως επιθυμούμε να κρατήσουμε τον ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων κάτω από κάποια συγκεκριμένα όρια έτσι ώστε να διευκολύνουμε την ομαλή μετάδοση δεδομένων ή φωνής σε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης. Η εξασθένιση έχεις επίσης μεγάλη επίδραση στον μεταφερόμενο ρυθμό μετάδοσης εντός του καναλιού.

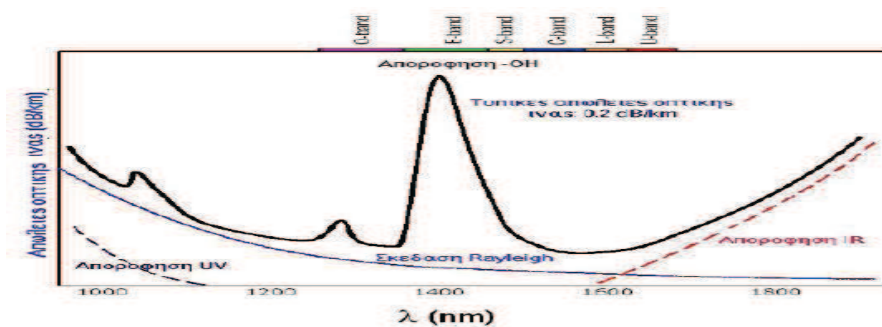
Επομένως όσο μακρύτερα θέλουμε να στείλουμε μια πληροφορία (**L** πολύ μεγάλο) εντός της ίνας, τόσο μικρότερος θα είναι ο διαθέσιμος ρυθμός μετάδοσης (η χωρητικότητα) χωρίς κωδικοποίηση για την διόρθωση σφαλμάτων. ⁶

Η εξασθένιση στην οπτική ίνα προκαλείται από πολλούς εσωτερικούς και εξωτερικούς παράγοντες. Οι δύο εσωτερικοί παράγοντες είναι η **σκέδαση (Scattering)** και η **απορρόφηση (absorption)**.

Στην **απορρόφηση** τα ηλεκτρόνια ξένων προσμείξεων που υπάρχουν στο γυαλί της ίνας απορροφούν μέρος της μεταδιδόμενης οπτικής ισχύος. Ιδιαίτερα τα ιόντα **OH⁻** (νερό), ευθύνονταν για τις μεγάλες απώλειες των οπτικών ινών. Απώλειες απορρόφησης έχουμε ακόμα στην περιοχή του υπεριώδους λόγω του ίδιου του υλικού της ίνας και στο υπέρυθρο λόγω αλληλεπίδρασης των φωτονίων με τα ταλαντούμενα μόρια του πλέγματος του γυαλιού. Επίσης άλλοι εξωγενείς παράγοντες όπως ξένες προσμίξεις, ανομοιογένειες στη κατασκευή της ίνας συμβάλλουν στις απώλειες λόγω απορρόφησης.

⁶ Θ. ΚΑΠΟΥΡΝΙΩΤΗΣ -Σ. ΛΟΥΒΡΟΣ, *Οπτικά Δίκτυα Επικοινωνιών*, Ναύπακτος, σ. 14.

Με τον όρο **σκέδαση** χαρακτηρίζουμε τη διάχυση (σκόρπισμα) που υφίσταται η φωτεινή ακτινοβολία στο μανδύα καθώς διαδίδεται στον πυρήνα της ίνας. Οφείλεται σε ανωμαλίες στη σύνθεση του υλικού της ίνας που μπορεί να είναι είτε ξένες προσμείξεις (**impurities**) είτε κάποια σημειακή ανομοιογένεια του δείκτη διάθλασης. Όταν αυτές οι ανωμαλίες έχουν μέγεθος **r** αρκετά μικρότερο από το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος λ ($r < 0.1\lambda$), η σκέδαση ονομάζεται **Rayleigh**⁷ και έχει ισχυρή εξάρτηση από το μήκος κύματος. Συγκεκριμένα η σκέδαση-εξασθένηση είναι πολύ μεγαλύτερη στα μικρά μήκη κύματος γιατί είναι ανάλογη του $1/\lambda^4$.⁸

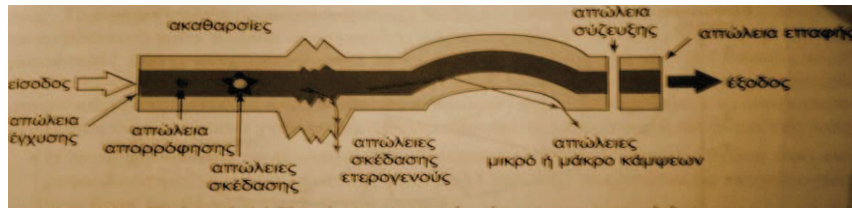


Σχήμα 5: Η ολική εξασθένηση σε μια τυπική οπτική ίνα.⁹

⁷ Η σκέδαση **Rayleigh** αποτελεί ένα βασικό μηχανισμό απώλειας ο οποίος προκαλείται από σημειακές μικροσκοπικές διακυμάνσεις της πυκνότητας. Οι διακυμάνσεις αυτές οδηγούν σε τυχαία διακύμανση του δείκτη διάθλασης, σε κλίμακα μικρότερη του οπτικού μήκους κύματος λ . Η σκέδαση του φωτός σε ένα τέτοιο μέσο είναι γνωστή ως σκέδαση **Rayleigh**. Η ενεργός διατομή της σκέδασης μεταβάλλεται συναρτησί του λ^{-4} . Η σκέδαση κατά **Rayleigh** αυξάνεται σε πολύ μικρά μήκη κύματος, $1/\lambda^4$. Αυτός ο τύπος σκέδασης είναι υπεύθυνος για τις απώλειες στις ίνες αλλά και για το μπλε χρώμα του ουρανού.

⁸ Η. ΑΣΑΡΙΔΗΣ -Θ. ΚΑΠΟΥΡΝΙΩΤΗΣ -Σ. ΛΟΥΒΡΟΣ, *Οπτικά Δίκτυα Επικοινωνιών*, Ναύπακτος, σ. 25.

⁹ Βλέπουμε την εξάρτηση των απωλειών μιας τυπικής οπτικής ίνας σε σχέση με το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος και με τους μηχανισμούς που τις προκαλούν. Φαίνονται οι περιοχές γύρω από τα μήκη κύματος 1.3 μm και 1.5 μm , όπου η οπτική ίνα παρουσιάζει



Σχήμα 6: Παράγοντες απωλειών σε μια οπτική ίνα.

Εξωτερικοί παράγοντες εξασθένησης, περιλαμβάνουν παραγόμενες τάσεις καλωδίων, περιβαλλοντικές επιδράσεις και φυσικές κάμψεις της ίνας, όπως και διάφορες απώλειες λόγω κολλήσεων και συνδετήρων.

Οι φυσικές κάμψεις μιας ίνας χωρίζονται σε δυο κατηγορίες στις :

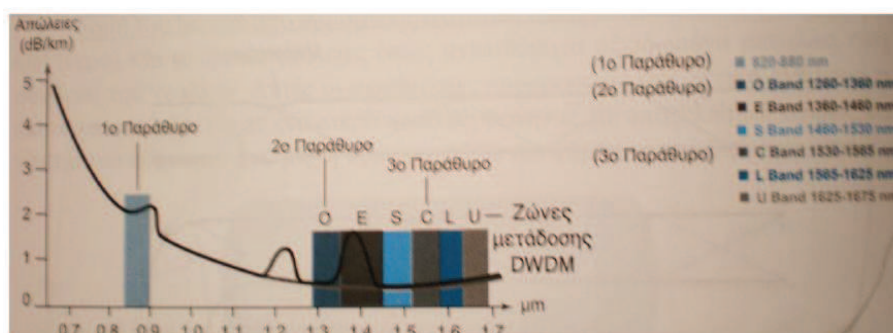
- (α) μικροκάμψεις
- (β) μακροκάμψεις

Οι **μικροκάμψεις** είναι το αποτέλεσμα των μικροσκοπικών ατελειών στη γεωμετρία της ίνας. Αυτές οι ατέλειες μπορεί να είναι περιστροφικές ασυμμετρίες, αλλαγές στη διάμετρο του πυρήνα, ισχυρά εμπόδια μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος, αποτέλεσμα της κατασκευής ή μηχανικής τάσης, πίεσης ή στρόφης.

μικρή εξασθένηση. Οι περιοχές αυτές, γνωστές και σαν «φασματικά παράθυρα» των οπτικών επικοινωνιών χρησιμοποιούνται για την οπτική μετάδοση. Δεν διακρίνεται βέβαια το παράθυρο των 0.8 μm που χρησιμοποιήθηκε αρχικά είναι φανερό όμως η ισχυρή εξάρτηση της σκέδασης από το λ . Τα παράθυρα των 1.3 μm με εύρος περίπου 12 THz και των 1.55 μm με εύρος περίπου 15 THz, χρησιμοποιούνται πλέον στα σημερινά συστήματα, αφού η τεχνολογία επέτρεψε την κατασκευή κατάλληλων φωτοπηγών και φωτοφωρατών. Οι μακροσκοπικές (**macro bending**) και οι μικροσκοπικές (**micro bending**) κάμψεις της οπτικής ίνας αποτελούν εξωγενή αίτια απωλειών.

Οι μακροκάμψεις αφορούν τις κυρτότητες της ίνας με διαμέτρους της τάξης των **cm**. Η απώλεια της οπτικής ισχύος είναι το αποτέλεσμα της διάθλασης αντί ολικής ανάκλασης στο όριο πυρήνα – περιβλήματος. Στις μονότροπες ίνες, ο βασικός τρόπος μετατρέπεται μερικώς σε ένα ατελή τρόπο εξαιτίας των κάμψεων της ίνας

Εξαιτίας της αύξησης στο πεδίο της διαμέτρου με το μήκος κύματος σε μια δεδομένη μονότροπη ίνα, οι απώλειες μακροκάμψεων θα είναι μεγαλύτερες σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Η απώλεια είναι συνήθως αμελητέα αν η ακτίνα της κάμψης είναι μεγαλύτερη από 10 cm. Το ποσό εξασθένησης που προκαλείται από μια οπτική ίνα καθορίζεται από το μήκος της ίνας και το μήκος κύματος φωτός καθώς ταξιδεύει μέσα στην ίνα. Υπάρχουν, επίσης, πολλοί δευτερεύοντες και τριτεύοντες παράγοντες που συνεισφέρουν.



Σχήμα 7: Περιοχές μετάδοσης στις οπτικές ίνες.¹⁰

¹⁰ Το σχήμα 7 μας δείχνει την απώλεια ανά μονάδα μήκους μιας τυπικής ίνας.

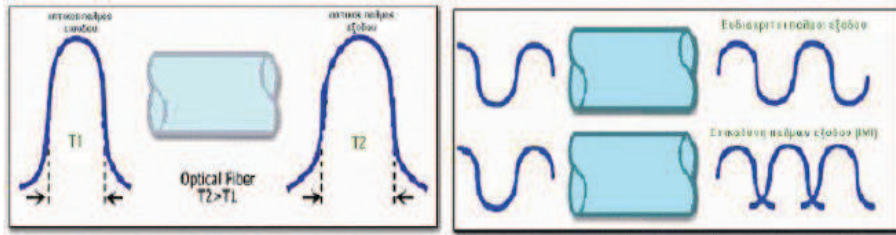
Το σχήμα καλύπτει μήκη κύματος 500 nm – 1900 nm. Σαν σημείο αναφοράς, το ανθρώπινο μάτι βλέπει φως εύρους 380 nm (μπλε), 760 nm (κόκκινο). Οι περισσότερες σύγχρονες μεταδόσεις οπτικής ίνας γίνονται σε μήκη κύματος πέρα από το κόκκινο, στην υπέρυθρη περιοχή. Υπάρχουν τρεις σημαντικές περιοχές μηκών κύματος οπτικών ινών 850 nm, 1300 nm και 1550 nm. Αυτά τα συγκεκριμένα μήκη κύματος επιλέχθηκαν γιατί αντιστοιχούν σε χαμηλότερη απώλεια της ίνας.

- Η περιοχή 850 nm, που ονομάζεται πρώτο παράθυρο, ήταν η πρώτη που εκμεταλλεύτηκε ευρέως εξαιτίας του LED και της ανιχνευτικής τεχνολογίας που ήταν διαθέσιμη εκείνη την εποχή.

Ένας καλός κανόνας είναι ότι η απόδοση και το κόστος αυξάνονται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος. Ένα τέταρτο μήκος κύματος 780nm, χρησιμοποιείται επίσης σε κάποιες ειδικές εφαρμογές.

Το φαινόμενο της διασποράς έχει σαν τελικό αποτέλεσμα τη διεύρυνση του πλάτους των φωτεινών παλμών καθώς αυτοί ταξιδεύουν στην ίνα. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 8 όπου παρατηρούμε ότι καθώς διευρύνεται το πλάτος ενός παλμού, κάποια στιγμή αλληλεπικαλύπτεται με γειτονικούς παλμούς και γίνεται δυσδιάκριτος στο δέκτη (**Intersymbol Interference**). Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση του ρυθμού των λαθών. Έτσι λοιπόν η διασπορά των παλμών του σήματος περιορίζει το ρυθμό διακίνησης πληροφορίας (**Bit Rate**) στην οπτική ίνα, δηλαδή το εύρος ζώνης της ίνας που μπορεί να αξιοποιηθεί. Το μέγεθος τη διασποράς ενός παλμού εξαρτάται επίσης και από την απόσταση που ο παλμός διένυσε στην ίνα.

-
- Η περιοχή 1300 nm, το δεύτερο παράθυρο, είναι πολύ δημοφιλής σήμερα εξαιτίας των πολύ χαμηλών και της χαμηλότερης διασποράς σ' αυτό το μήκος κύματος.
 - Η περιοχή 1550nm, το τρίτο παράθυρο, χρησιμοποιείται γενικά σε εφαρμογές μεγάλων απαιτήσεων ως προς την εξασθένιση και το εύρος ζώνης των επαναληπτών ή σε συνδυασμό με άλλα μήκη κύματος.

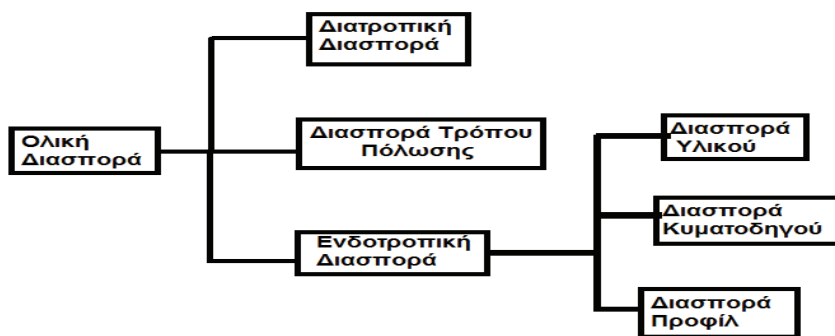


Σχήμα 8: Το φαινόμενο της διασποράς στις οπτικές ίνες.¹¹

Οι πιο σημαντικοί τύποι διασποράς είναι:

- Η διατροπική ή τροπολογική διασπορά (intermodal dispersion)
- Η διασπορά τρόπου πόλωσης (polarization mode dispersion)
- Η χρωματική ή ενδοτροπική διασπορά (intramodal dispersion), που περιλαμβάνει
 - Διασπορά κυματοδηγού, (wave guide dispersion)
 - Διασπορά υλικού, (material dispersion
 - Διασπορά προφίλ, (profile dispersion).

Η διατροπική διασπορά περιγράφει τη διεύρυνση του παλμού στις πολύτροπες ίνες που προκαλείται από τους τρόπους μετάδοσης, με διαφορετικές ταχύτητες μέσα στην ίνα.



Σχήμα 9: Κατηγορίες διασποράς.

¹¹ Η. ΑΣΑΡΙΔΗΣ -Θ. ΚΑΠΟΥΡΝΙΩΤΗΣ -Σ. ΛΟΥΒΡΟΣ, *Οπτικά Δίκτυα Επικοινωνιών*, Ναύπακτος, σ. 26.

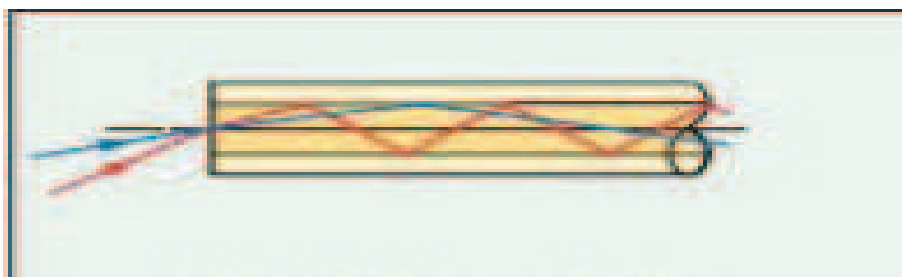
Η διατροπική διασπορά μπορεί να ελαττωθεί με τρεις τρόπους:

Ο πρώτος τρόπος είναι χρησιμοποιώντας ίνα μικρότερης διαμέτρου πυρήνα ώστε να ελαττωθούν οι τρόποι μετάδοσης μέσα από την ίνα.

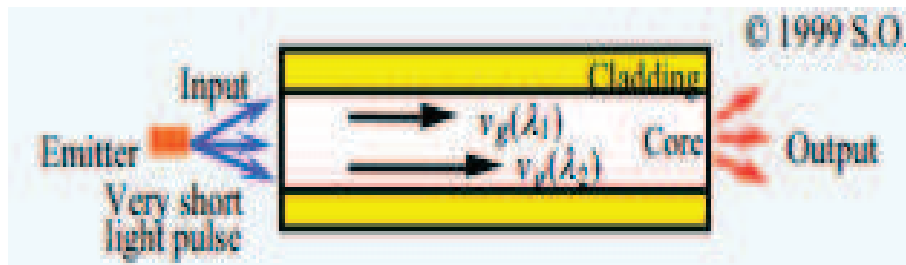
Ο άλλος τρόπος είναι χρησιμοποιώντας ίνα βαθμιαίου δείκτη. Έχει αναφερθεί ότι οι ίνες βαθμιαίου δείκτη χαρακτηρίζονται από βαθμιαία μεταβολή πυρήνα, από τον άξονα προς το περίβλημα, ώστε όλοι οι τρόποι να φτάνουν στο τέλος μαζί.

Τέλος η διατροπική διασπορά ελαττώνεται, χρησιμοποιώντας μονότροπη ίνα. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες αυτή η επιλογή εξαλείφει την διατροπική διασπορά.

Για να τεκμηριώσουμε την τρίτη περίπτωση, για μια τυπική μονότροπη ίνα μήκους κύματος 1300 nm, το μήκος κύματος αποκοπής είναι μεταξύ 1150 και 1200 nm. Σε μήκη κύματος μικρότερα από αυτό το κατώφλι, η ίνα μονότροπης διασποράς γίνεται διπλού τρόπου, μετά τριπλού κ.τ.λ.. Όλο και περισσότερο, η μονότροπη ίνα με πυρήνα των 9 nm χρησιμοποιείται σε μικρού μήκους κύματος Laser στα 780-850 nm. Σ' αυτά τα μήκη κύματος, η ίνα με πυρήνα 9 nm είναι διπλού τρόπου διάδοσης.



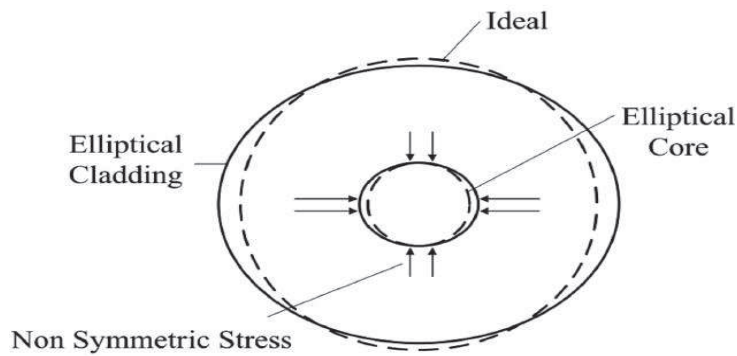
Σχήμα 10: Διατροπική διασπορά



Σχήμα 11: Χρωματική διασπορά

Υπάρχει μια ειδικού μεγέθους μονότροπη ίνα με διάμετρο 5nm, αλλά χρησιμοποιείται σπάνια εξαιτίας του κόστους της και της δυσκολίας σύζευξης με πηγή φωτός σε τέτοιο μικρό πυρήνα. Το συμπέρασμα είναι ότι η διατροπική διασπορά είναι άλλος ένας παράγοντας σε συστήματα μικρού μήκους κύματος που απαιτεί απλή μονότροπη ίνα με διάμετρο πυρήνα 9nm. Όταν παρουσιάζεται διατροπική διασπορά, κυριαρχεί σε τέτοιο σημείο, που οι άλλοι τύποι διασποράς μπορούν τυπικά να αγνοηθούν.

Η διασπορά τρόπου πόλωσης (**Polarization Mode Dispersion - PMD**) οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε τρόπος διάδοσης αποτελείται από δύο καταστάσεις πόλωσης (**State Of Polarizations - SOPs**) κάθετες μεταξύ τους. Υπό ιδανικές συνθήκες ο πυρήνας της ίνας είναι κυκλικός και οι δύο αυτές καταστάσεις πόλωσης διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα. Στην πραγματικότητα όμως λόγω κατασκευής ή λόγω μηχανικών ή ακόμα και θερμικών φορτίων που δέχεται η ίνα, το σχήμα του πυρήνα δεν είναι τέλεια κυκλικό αλλά ελαφρά ελλειπτικό όπως φαίνεται και στην Σχήμα 12. Η ίνα έχει διαφορετικό n σε κάθε άξονα άρα και διαφορετική ταχύτητα διάδοσης. Αυτή η καθυστέρηση έχει ως αποτέλεσμα τη διεύρυνση του παλμού.



Σχήμα 12: Η ίνα λόγω μη συμμετρικών μηχανικών φορτίων αποκτά ένα ελαφρώς ελλειπτικό σχήμα.

Η χρωματική διασπορά ή Ενδοτροπική συναντάται σε όλους τους τύπους των οπτικών ινών. Η χρωματική διασπορά αντιπροσωπεύει το γεγονός ότι διαφορετικά χρώματα ή μήκη κύματος διάδοσης, μεταδίδονται σε διαφορετικές ταχύτητες ακόμα και στον ίδιο τρόπο. Η χρωματική διασπορά περιλαμβάνει την διασπορά υλικού, την διασπορά κυματοδηγού και την διασπορά προφίλ.

Στην περίπτωση μονότροπης ίνας ο μοναδικός τρόπος διάδοσης συμπεριφέρεται ως εξής: Στα μικρά μήκη κύματος περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό μέσα στον πυρήνα, στα μεσαία μήκη κύματος διαχέεται ελαφρά μέσα στο περίβλημα ενώ στα μεγάλα μήκη κύματος διαχέεται σε μεγάλο βαθμό στο περίβλημα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου διάδοσης καθώς το μήκος κύματος αυξάνεται και αυτό γιατί ο δείκτης διάθλασης n του μανδύα είναι μικρότερος από του πυρήνα άρα η ταχύτητα των κυμάτων που διαδίδονται εκεί είναι μεγαλύτερη. Ο μηχανισμός αυτός είναι γνωστός ως διασπορά κυματοδηγού. Η διασπορά κυματοδηγού εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας, και το μήκος κύματος και έχει ως αποτέλεσμα την διαπλάτυνση του διαδιδόμενου σήματος λόγω της διαφορικής χρονικής καθυστέρησης των μηκών κύματος. Η διασπορά κυματοδηγού συμβάλλει στη χρωματική διασπορά. Καθώς όμως εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά

της οπτικής ίνας μπορεί να πάρει ελεγχόμενες τιμές με την κατάλληλη σχεδίαση και μπορεί να αντισταθμίσει την χρωματική διασπορά.

Διαφορετικά μήκη κύματος μεταδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες σε μια ίνα, ακόμα και με τον ίδιο τρόπο. Κάθε μήκος κύματος μεταδίδεται με διαφορετική ταχύτητα μέσα σε ένα υλικό. Αυτό αλλάζει τις τιμές της ταχύτητας του κύματος στο υλικό για κάθε μήκος κύματος. Η διασπορά του προκαλείται από αυτό το φαινόμενο διασπορά υλικού επηρεάζει αρκετά τις μονότροπες ίνες. Στις πολύτροπες ίνες, η διατροπική διασπορά είναι πολύ μεγαλύτερη από τη διασπορά υλικού με αποτέλεσμα η δεύτερη να μην παίζει σημαντικό ρόλο και να μην λαμβάνεται υπόψη.

Ως γνωστών οι δείκτες διάθλασης του πυρήνα και του περιβλήματος επηρεάζουν τη ταχύτητα διάδοσης σε μια ίνα. Οι διαφορές αυτές στους δείκτες συνήθως ονομάζονται ως **Refractive Index Profile** και περιγράφει την τιμή του δείκτη διάθλασης ως συνάρτηση της απόστασης από τον οπτικό άξονα εκπομπής κατά μήκος της διαμέτρου της ίνας. Η διασπορά προφίλ προκαλείται από την διαφορά της συμπεριφοράς του δείκτη διάθλασης του πυρήνα και του περιβλήματος στα διάφορα μήκη κύματος. Οι διαφορές δημιουργούνται λόγω των διαφορών στα υλικά κατασκευής τους. Η παράμετρος αυτή είναι περισσότερο σημαντική σε πολύτροπες ίνες παρά σε μονότροπες στις οποίες μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση του προφίλ τους για ένα μόνο μήκος κύματος¹²

¹² Η. ΑΣΑΡΙΔΗΣ -Θ. ΚΑΠΟΥΡΝΙΩΤΗΣ -Σ. ΛΟΥΒΡΟΣ , *Οπτικά Δίκτυα Επικοινωνιών*, Ναύπακτος, σ. 27.

1.2. Απώλειες

Ένα μεγάλο θέμα είναι οι πιθανές απώλειες λόγω κολλήσεων. Οι απώλειες αυτές χωρίζονται σε δυο κατηγορίες:

- Απώλειες που οφείλονται στην ίνα
- Απώλειες που οφείλονται στα υλικά των κολλήσεων / **connectors**

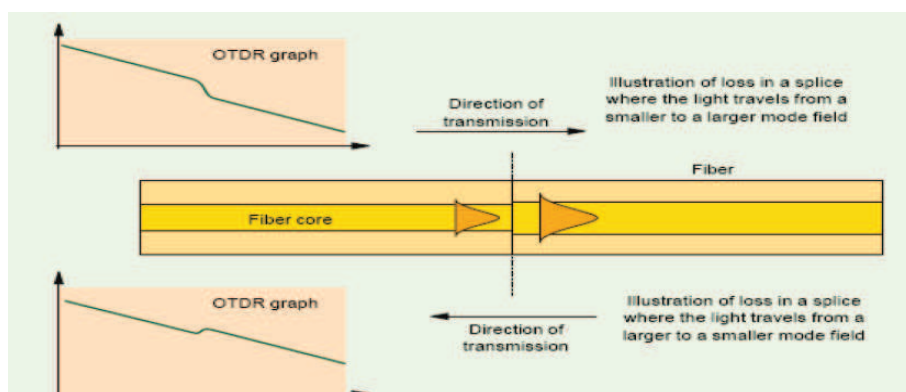
Κατά την κατασκευή οπτικών ινών, επιτρέπονται μικρές αποκλίσεις στις τιμές των παραμέτρων τους, αφού είναι σχεδόν αδύνατο να φτιαχτούν δυο πανομοιότυπες ίνες, Οι αποκλίσεις αυτές είναι της τάξης των 10^{-3} mm, ακόμα όμως και τόσο μικρές αποκλίσεις συμβάλουν στη δημιουργία απωλειών κατά την (**fusion**) κόλληση των ινών. Μία ιδανική ίνα θα παρουσιάζει εξασθένηση κοντά στα 0.16 dB/km θεωρητικά (1500 nm).

Στην πραγματικότητα η εξασθένηση μιας ίνας πολύ καλής ποιότητας πλησιάζει τα 0.20 dB/km στα 1550 nm (λόγω της σκέδασης **Rayleigh** και της **IR** απορρόφησης). Οι απώλειες που οφείλονται στην ίνα προκαλούνται από τους παρακάτω παράγοντες

Διαφορές στον τρόπο πεδίου

- Διαφορετικά αριθμητικά ανοίγματα (NA)
- Διαφορετικές διαμέτροι πυρήνα
- Διαφορετικές διαμέτροι μανδύα
- Μη-κυκλικότητα πυρήνα ή/και μανδύα
- Μη-ομοκεντρικότητα πυρήνα/μανδύα

Αν η διάμετρος του πυρήνα της ίνας μετάδοσης είναι διαφορετική από εκείνη της ίνας του δέκτη, ο τρόπος πεδίου θα γίνει πιο ευρύς ή πιο στενός. Το γεγονός αυτό θα προκαλέσει εξασθένιση του φωτός πολλές φορές διακρίνεται σαν ενίσχυση του σήματος κατά τη μια κατεύθυνση, όταν παίρνουμε μετρήσεις με OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)

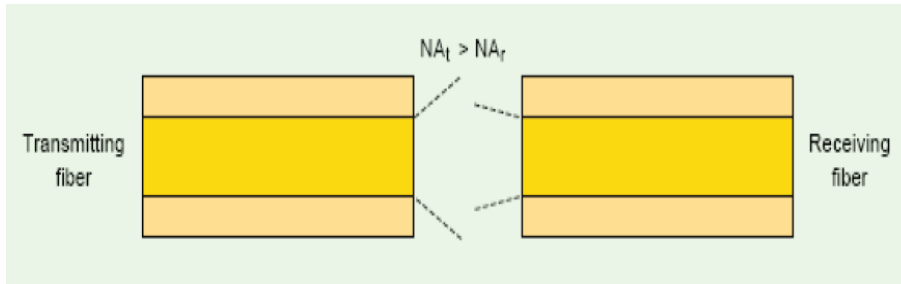


Σχήμα 13: Οι μετρήσεις των απωλειών σε ένα οπτικό δίκτυο – σε κολλήσεις μεταξύ ινών με διαφορετικούς τρόπους πεδίου – μπορεί να έχουν απροσδόκητες τιμές.

Διαφορετικά αριθμητικά ανοίγματα.

Παρουσιάζονται απώλειες όταν το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας μετάδοσης είναι μεγαλύτερο από εκείνο της ίνας του δέκτη. Μέρος του φωτός που διαδίδεται θα χαθεί στο μανδύα της ίνας του δέκτη. Για την παραπάνω περίπτωση ($NA_t > NA_r$), οι απώλειες δίνονται από τον επόμενο τύπο:

$$Attenuation_{NA} = 10 \log_{10} \left(\frac{NA_r}{NA_t} \right)^2$$



Σχήμα 14: Παρουσιάζονται απώλειες όταν $NA_t > NA_r$

Διαφορετικές διαμέτροι πυρήνα.

Όταν η διάμετρος της ίνας μετάδοσης είναι μεγαλύτερη από εκείνη της ίνας του δέκτη, παρουσιάζονται απώλειες, αφού μέρος του φωτός μεταφέρεται στο μανδύα του δέκτη. Οι διαφορετικές διαμέτροι πυρήνα επηρεάζουν και τη διάμετρο του τρόπου πεδίου. Οι απώλειες λόγω της συνάντησης σε μια κόλληση δύο ιών με διαφορετικές διαμέτρους πυρήνα δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$Attenuation_{\phi}(multimode) = -10 \log_{10} \left(\frac{\phi_r}{\phi_t} \right)^2$$

,όπου ϕ_r και ϕ_t είναι οι διαμέτροι των ιών που συνδέονται και

$$Attenuation_{\phi}(single - mode) = -20 \log \left(\frac{2w_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right)$$

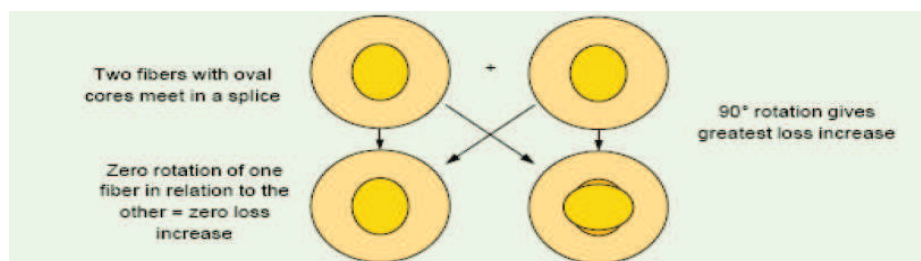
,όπου w_1 και w_2 είναι οι διαμέτροι των τρόπων πεδίου των ιών που συνδέονται.

Διαφορετικές διαμέτροι μανδύα.

Στη βιομηχανία παραγωγής ινών, η ανοχή (σύμφωνα με την **ITU**) για τη διάμετρο του μανδύα μιας ίνας είναι $\pm 2 \mu\text{m}$. Αυτό σημαίνει ότι μια ίνα με διάμετρο $125 \mu\text{m}$ μπορεί να κολληθεί με μια άλλη διαμέτρου $127 \mu\text{m}$. Με τη μέθοδο κόλλησης **fusion** οι ίνες ευθυγραμμίζονται αρκετά καλά. Για μηχανικές και ημι-μόνιμες κολλήσεις, διαφορά διαμέτρων όπως η παραπάνω μπορεί να προκαλέσει δραματική αύξηση των απωλειών (ειδικά στις μονότροπες ίνες). Όσο μεγαλώνει η διαφορά μεταξύ των διαμέτρων τόσο αυξάνονται και οι απώλειες. Με ανοχή $125 \pm 2 \mu\text{m}$ οι μέγιστη απώλεια είναι 1.4 dB . Αν η ανοχή μειωθεί στα $125 \pm 1 \mu\text{m}$ η μέγιστη είναι περίπου 0.7 dB . Όταν συνδέονται καλώδια που περιέχουν μονότροπες ίνες με **connectors**, πραγματοποιούνται αρκετά τεστ ευθυγράμμισης ώστε να μειωθούν όσο το δυνατόν γίνεται οι απώλειες

Μη-κυκλικότητα πυρήνα ή/και μανδύα.

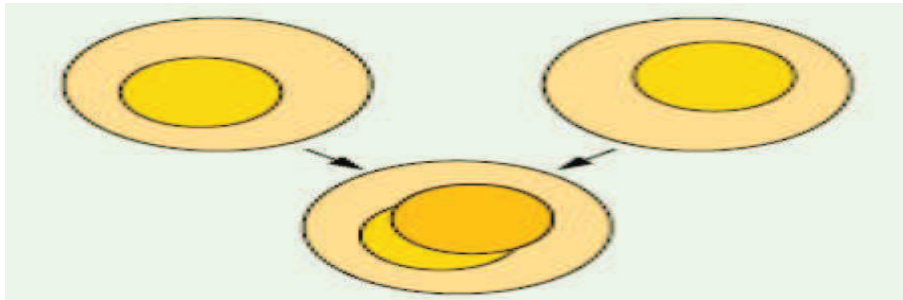
Η μη κυκλικότητα του πυρήνα και του μανδύα έχουν σχεδόν την ίδια επίδραση με τις διαφορές στις διαμέτρους πυρήνα. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές σε ημι-μόνιμες κολλήσεις. Η παρακάτω Σχήμα είναι άκρως κατατοπιστική.



Σχήμα 15: Η μη κυκλικότητα του πυρήνα επηρεάζει τις απώλειες σε μια κόλληση.

Μη - ομοκεντρικότητα πυρήνα / μανδύα.

Ο πυρήνας μιας ίνας πρέπει να βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο της. Η μη ομοκεντρικότητα αυξάνει τις απώλειες σε μια κόλληση.¹³



Σχήμα 16: Παρουσίαση της κόλλησης δυο ιών, των οποίων οι πυρήνες δεν είναι ομόκεντροι

Απώλειες που οφείλονται σε συνδετήρες / κολλήσεις.

Όταν δυο ίνες συνδέονται, η κόλληση θα συνεισφέρει κατά κάποιο τρόπο στην αύξηση της εξασθένισης. Η αύξηση της εξασθένισης λόγω κολλήσεων μειώνεται στο ελάχιστο, όταν οι κολλήσεις πραγματοποιούνται με τη μέθοδο **fusion**, καθορίζονται προσεκτικά και κόβονται με ακρίβεια. Σύγχρονα κολλητήρια όπως το **Ericsson FSU**, **Fujikura** και πολλά άλλα, πετυχαίνουν γωνία κοπής 90° και εξαιρετικό καθαρισμό της ίνας πριν την κόλληση.

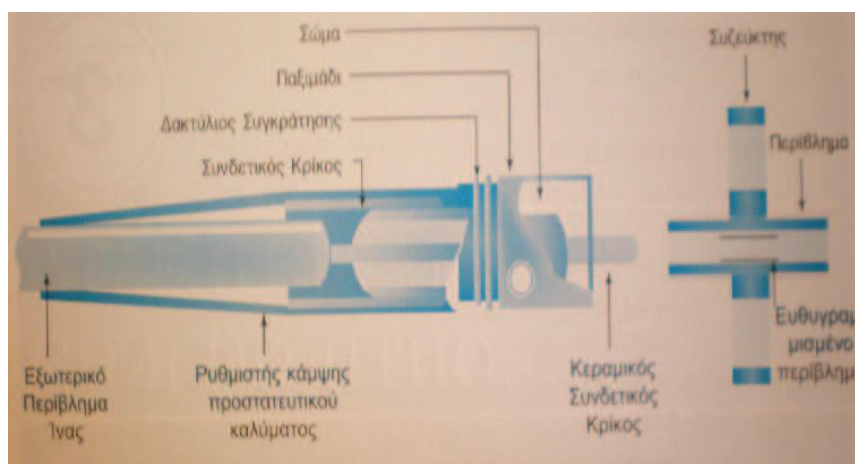
Αν όλες οι παραπάνω παράμετροι είναι τέλειες τότε μία κόλληση **fusion** δεν εισάγει περαιτέρω εξασθένιση στο σύστημα.

¹³ Δ. ΚΩΣΤΑΡΕΛΟΣ, Θεωρητική ανάλυση των φυσικών διαδικασιών απωλειών ισχύος εντός οπτικής ίνας και πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου, Ναύπακτος 2012, σ. 27.

Οι παρακάτω παράγοντες απωλειών που οφείλονται σε **connectors**/κολλήσεις αναφέρονται κυρίως σε ημι-μόνιμες και μηχανικές κολλήσεις (και λιγότερο σε **fusion**).

- Μη-ομοαξονικότητα
- Διάκενο
- Γωνιακή απόκλιση
- Καθαρότητα επιφάνειας κόλλησης (μόνο σε ημι-μόνιμες κολλήσεις)

Για να διευκολύνουμε την κατανόηση των παραπάνω παραγόντων απωλειών παρουσιάζονται στην επόμενη Σχήμα τα βασικά μέρη ενός connector.



Σχήμα 17: Βασικά μέρη ενός συνδετήρα (connector).

Μη- ομοαξονικότητα.

Ένας **connector** πρέπει να κατασκευάζεται με μεγάλη ακρίβεια : η οπή από την οποία θα περάσει η ίνα πρέπει να βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο του συνεκτικού δακτυλίου (**ferrule**). Η οπή αυτή θα πρέπει να έχει την ίδια ακριβώς διάμετρο με την ίνα και ο συνεκτικός δακτύλιος θα

πρέπει να έχει την ίδια διάμετρο με την υποδοχή που θα τοποθετηθεί. Η ακρίβεια πρέπει να είναι της τάξης των 1-2 μm .

Για να μην υπάρχουν διαφορές μεταξύ της ίνας και της παραπάνω οπής, κάθε **connector** θα πρέπει να ελέγχεται σε σχέση με την ίνα που θα χρησιμοποιηθεί. Ο έλεγχος αυτός είναι αρκετά χρονοβόρος αλλά άκρως απαραίτητος. Η ακτινική απόκλιση **RE** εκφράζεται σε συνάρτηση με τη διάμετρο του πυρήνα της ίνας **CD**.

Διάκενο.

Συνήθως το διάκενο μεταξύ των δυο τελειωμάτων των ινών είναι περίπου 1 με 2 μm . Η αύξηση των απωλειών σχετίζεται άμεσα με το κλάσμα του διακενου **LS** προς τη διάμετρο του πυρήνα **CD** και με το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας. Αύξηση του **NA** για σταθερό διάκενο έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών.

Οι σύγχρονοι **connectors** περιέχουν κάποια μορφή ελατηρίου στον συνεκτικό δακτύλιο, έτσι ώστε οι ίνες να συνταιριάζονται άψογα μεταξύ τους, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να υποστούν ζημιές. Το διάκενο επίσης αυξάνει την ανάκλαση **Fresnel** στην επιφάνεια διασύνδεσης. Η ανάκλαση αυτή είναι της τάξης των -14 dB αν υπάρχει διάκενο αέρα μεταξύ των δυο τελειωμάτων. Χρησιμοποιώντας έλαια με δείκτη διάθλασης πολύ κοντά σε εκείνο των τελειωμάτων των ινών, για να γεμίσουμε το διάκενο, η ανάκλαση **Fresnel** μειώνεται δραματικά.

Γωνιακή απόκλιση.

Η γωνιακή απόκλιση μεταξύ των δυο ινών που πρόκειται να συνδεθούν, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους της διαδικασίας κόλλησης. Μετά την κοπή και τον καθαρισμό του

τελειώματος της ίνας, πρέπει να σχηματίζεται γωνία 90° ως προς τον κεντρικό άξονά της. Είναι σημαντικό να παρατηρούμε ότι σχετικά μικρό **NA** αυξάνει τις απώλειες που οφείλονται στη γωνιακή απόκλιση

Καθαρότητα επιφάνειας κόλλησης.

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία καθαρισμού της επιφάνειας κόλλησης είναι να απομακρυνθούν όλα τα υπολείμματα κόλλας και να δοθεί στο τελικό του σχήμα. Στη συνέχεια η επιφάνεια γυαλίζεται ώστε να μην υπάρχουν μικρές γρατζουνιές.

Αν παραμείνουν μικρές ατέλειες στην επιφάνεια μέρος του διαδιδόμενου φωτός θα διασκορπίζεται, με αποτέλεσμα να μη φτάνει στο συνεκτικό δακτύλιο και να αυξάνονται οι απώλειες

Άλλα αίτια απωλειών κόλλησης.

Αν και συνιστάται να χρησιμοποιούνται πανομοιότυπες ίνες για τις κολλήσεις, πολλές φορές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν ίνες από διαφορετικό κατασκευαστή, διαφορετικού τύπου ακόμα και διαφορετικού μεγέθους. Συνήθως αλλαγές τέτοιου τύπου έχουν καταστρεπτικές συνέπειες για το τελικό αποτέλεσμα. Σε περίπτωση τέτοιων αλλαγών θα πρέπει να προσέχουμε παράγοντες όπως το **NA** και η διάμετρος πυρήνα/μανδύα να διαφέρουν το λιγότερο δυνατό¹⁴.

¹⁴ Μ. ΓΑΛΑΝΑΚΗΣ, *Χρήση OTDR & ενίσχυση Raman σε μητροπολιτικές ζεύξεις μονότροπων οπτικών ινών*, Πάτρα 2009, σ. 21.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

2.1. Μετρήσεις οπτικών ινών & παράμετροι.

Όταν αναλύεται ένα καλώδιο οπτικών ινών κατά τη διάρκεια ζωής του, πρέπει να εκτελεστούν κάποιες μετρήσεις προκειμένου να εξασφαλισθεί η ακεραιότητά της ίνας.

Οι τρεις πρώτες μετρήσεις εκτελούνται μόνο μία φορά και εφόσον δεν υπάρχει αλλαγή σε αυτές τις παραμέτρους κατά τη διάρκεια της ζωής της ίνας.

- Μηχανικές μετρήσεις
- Γεωμετρικές μετρήσεις
- Οπτικές μετρήσεις
- Μετρήσεις μετάδοσης

Διάφορες μετρήσεις εκτελούνται στην οπτική ίνα και στα καλώδια οπτικών ινών προκειμένου να χαρακτηριστούν πριν τη χρήση τους στη μετάδοση σημάτων. Προκειμένου να είναι κατάλληλη η χρήση μιας οπτικής ίνας ή ενός συστήματος οπτικής ίνας για μετάδοση, εκτελούνται διάφορες βασικές μετρήσεις.

- Οπτική απώλεια σύνδεσης από άκρη σε άκρη
- Ποσοστό εξασθένησης ανά μονάδα μήκους
- Συμβολή εξασθένησης στις συνδέσεις, συνδετήρες, και συζεύκτες (συμβάντα)

- Μήκος της ίνας ή της απόστασης σε ένα συμβάν
- Γραμμικότητα της απώλειας ίνας ανά μονάδα μήκους (ασυνέχειες εξασθένησης)
- Συντελεστής ανάκλασης ή οπτική απώλεια επιστροφής (ORL)
- Χρωματική διασπορά (CD)
- Διασπορά τρόπου πόλωσης (PMD)
- Καμπύλη εξασθένησης (AP: Attenuation profile) ή (SA: Spectral Attenuation)

Εύρος ζώνης Μερικές μετρήσεις απαιτούν πρόσβαση και στις δύο άκρες της ίνας. Άλλες απαιτούν πρόσβαση μόνο στο ένα άκρο. Οι τεχνικές μέτρησης με απαίτηση πρόσβασης μόνο σε ένα άκρο είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες για τον τομέα εφαρμογών διότι αυτές οι μετρήσεις μειώνουν το χρόνο που ξοδεύεται για το ταξίδι από το ένα άκρο του καλωδίου στο άλλο.

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ	ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ	ΟΠΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ	ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕΤΑΒΟΣΗΣ
έλξη	διάμετρος περιβλήματος	μέγεθος δέσμης	εύρος ζώνης
κάμψη	διάμετρος πυρήνα	αριθμητικό άνοιγμα	οπτική ισχύς
θερμοκρασία	ομοκεντρικότητα	δείκτης διάθλασης	οπτική απώλεια
συστροφή	κυλινδρικότητα		οπτική απώλεια επιστροφής
			χρωματική διασπορά
			εξασθένηση
			ανάκλαση
			διασπορά τρόπου πόλωσης

Σχήμα 18: Μετρήσεις οπτικής ίνας.

Επίπεδα μετρήσεων

Ο έλεγχος των οπτικών καλωδίων απαιτεί μετρήσεις σε τρία επίπεδα:

- Εγκατάσταση
- Συντήρηση
- Αποκατάσταση

Παρακάτω γίνεται μια συνοπτική αναφορά κάποιων μετρήσεων που μπορούν εκτελεσθούν κατά τη διάρκεια κάθε επιπέδου μέτρησης.

Μετρήσεις εγκατάστασης

Πριν από την εγκατάσταση, οι επιθεωρήσεις ινών εκτελούνται για να εξασφαλίσουν ότι τα καλώδια ινών που παραλαμβάνονται από τον κατασκευαστή προσαρμόζονται στις απαραίτητες προδιαγραφές (μήκος, εξασθένιση, κ.λπ.) και ότι δεν ήταν χαλασμένα κατά τη διάρκεια της μεταφοράς ή της τοποθέτησης των καλωδίων.

Κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης, οι μετρήσεις εκτελούνται για να καθορίσουν την ποιότητα των συγκολλήσεων και των τερματισμών των καλωδίων (εξασθένιση, θέση, και συντελεστής ανάκλασης).

Οι μετρήσεις εκτελούνται επίσης για να καθορίσουν ότι το ολοκληρωμένο υποσύστημα καλωδίων είναι κατάλληλο για το προοριζόμενο σύστημα μετάδοσης (από άκρη σε άκρη απώλεια και σύστημα οπτικών απωλειών επιστροφής). Όλες αυτές οι μετρήσεις παρέχουν ένα πλήρες σύνολο τεκμηρίωσης της σύνδεσης των καλωδίων για λόγους συντήρησης.

Μετρήσεις συντήρησης

Η μέτρηση συντήρησης περιλαμβάνει την περιοδική αξιολόγηση του συστήματος για να εξασφαλισθεί ότι δεν έχει εμφανιστεί καμία υποβάθμιση του καλωδίου, στις συγκολλήσεις ή στις συνδέσεις.

Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν την εξασθένηση των καλωδίων καθώς επίσης και την εξασθένηση και την ανάκλαση των συγκολλήσεων και των τερματισμών των καλωδίων.

Σε μερικά συστήματα, μετρήσεις συντήρησης μπορούν να εκτελεστούν κάθε λίγους μήνες και συγκρίνονται με αποτελέσματα άλλων μετρήσεων για να παρέχετε η έγκαιρη προειδοποίηση για σημάδια υποβάθμισης.

Σε συστήματα με πολύ υψηλή χωρητικότητα ή κρίσιμα συστήματα, αυτοματοποιημένες συσκευές μέτρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξετάσουν την ακεραιότητα του συστήματος κάθε λίγα λεπτά και να δώσουν την άμεση προειδοποίηση υποβάθμισης ή διακοπής λειτουργίας.

Αποκατάσταση λαθών

Κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης καλωδίων, η μέτρηση εκτελείται αρχικά για να προσδιορίσει τα αίτια διακοπής λειτουργίας (πομπός, δέκτης, καλώδιο, ή συνδετήρας) και για να εντοπίσει το ελάττωμα στο καλώδιο εάν η διακοπή λειτουργίας προκλήθηκε από το καλώδιο.

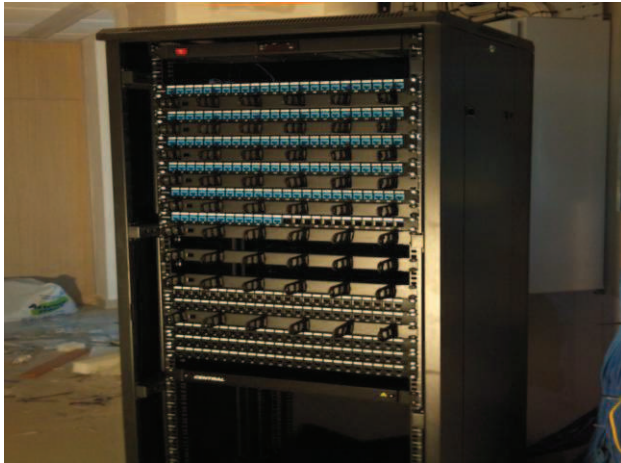
Κατόπιν εκτελείτε μέτρηση για να αξιολογήσει την ποιότητα του επισκευασμένου συστήματος (μόνιμες συνδέσεις). Αυτή μέτρηση είναι παρόμοια με την μέτρηση που εκτελείται στο τέλος της εγκατάστασης καλωδίων.

Κύριος κόμβος – Περιβάλλοντας χώρος μετρήσεων

Κύριο σημείο διασύνδεσης αγωγών και καλωδίων του περιφερειακού ιστού για κάλυψη των συναθροισμένων επικοινωνιακών αναγκών ενός μεγάλου δήμου ή μιας ευρύτερης αλλά πλέον αραιοκατοικημένης περιοχής ή μέρους ενός μεγάλου αστικού κέντρου. Για λόγους διαθεσιμότητας της υποδομής, επιδιώκεται κάθε κόμβος να είναι άμεσα συνδεδεμένος με παραπάνω του ενός ομότιμους κύριους κόμβους. Στους κύριους κόμβους εγκαθίσταται ενεργός εξοπλισμός οπτικών ινών και προβλέπεται συν-εγκατάσταση ή πρόσβαση διαχειριστών και παρόχων υπηρεσιών και εφαρμογών.

Απαιτήσεις : Ο απαιτούμενος χώρος για τον κύριο κόμβο (όπου θα υπάρχει σημείο παρουσίας ενός ή πολλών παρόχων) πρέπει να εξασφαλίζει την ικανοποίηση ιδιαίτερων λειτουργικών απαιτήσεων. Το μέγεθος του χώρου πρέπει να είναι ικανό να φιλοξενήσει όλες τις διατάξεις για συγκόλληση ινών, διασύνδεση ινών, μικτονόμηση ινών και σύνδεση ενεργού εξοπλισμού μετάδοσης από διαφορετικούς (ανταγωνιστικούς ή μη) παρόχους. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει χώρος για μελλοντική επέκταση.

Ο χώρος πρέπει να είναι εφοδιασμένος με διατάξεις κλιματισμού, μηχανική προστασία από κλοπή, κοινή διάταξη αδιάλειπτης ηλεκτρικής παροχής με χρόνο αυτόνομης κάλυψης τουλάχιστον 30 λεπτά. Παράλληλα, εάν δεν υπάρχει, πρέπει να μπει στο σχεδιασμό και να υλοποιηθεί δευτερεύουσα πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (ηλεκτρο-παραγωγό ζεύγος).



Σχήμα 19: Τηλεπικοινωνιακό Rack

Συσκευή μετρήσεων οπτικών ινών – O.T.D.R (Optical Time Domain Reflectometer)

(Όργανο Μέτρησης Ανακλάσεων Οπτικής Ισχύος στο πεδίο του χρόνου)

Το **OTDR** είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο ποιότητας εγκατεστημένων ή προς εγκατάσταση καλωδίων και τον ευρύτερο χαρακτηρισμό τους όσον αφορά τις απώλειες που εμφανίζουν κατά το μήκος τους. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην διαδικασία εύρεσης σημείων που προκαλούν τη διακοπή μιας ζεύξης ή την υπερβολική υποβάθμισή της από πλευρά ισχύος.



Σχήμα 20: OTDR

Συγκεκριμένα η χρησιμότητά τους αναδεικνύεται σε μια σειρά από μετρήσεις όπως:

- Μέτρηση αποστάσεων
- Μέτρηση εξασθένησης οπτικών ινών, οπτικών ζεύξεων, συγκολλήσεων και συνδέσεων
- Ανίχνευση τοπικών διαταραχών εξασθένησης
- Μέτρηση ανακλάσεων σε συνδέσεις ή στο τέλος μιας οπτικής ζεύξης

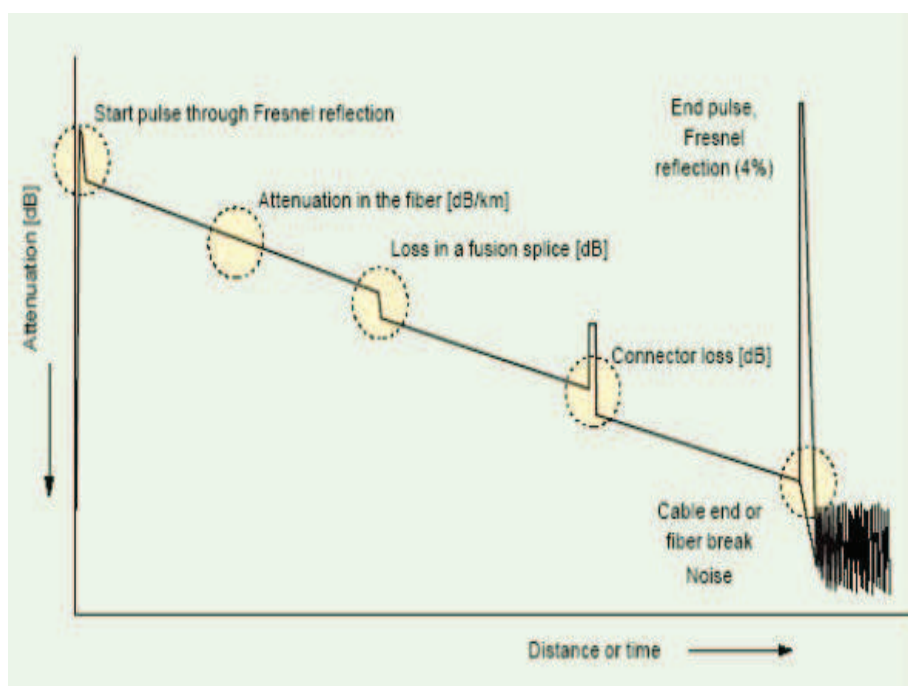
Όπως φαίνεται από το όνομα του οργάνου, το **OTDR** λειτουργεί με βάση τη διάδοση του φωτός σε οπτική ίνα κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος.

Μια γεννήτρια σχετικά στενών ηλεκτρικών παλμών (π.χ. 0,01μs έως 0,1μs) παράγει τους παλμούς αυτούς ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Οι παλμοί αυτοί οδηγούν μια πηγή Laser, η οποία παράγει μια διαμορφωμένη δέσμη φωτός που στέλνεται μέσω ενός κατευθυντικού συζεύκτη στην οπτική ίνα.

Λόγω των εγγενών ανωμαλιών που χαρακτηρίζουν την οπτική ίνα αλλά και λόγω ασυνεχειών (συνδετήρες, συγκολλήσεις, τέλος μια ζεύξης) κατά τη διάδοση συγκεκριμένη ποσότητα φωτός θα επιστρέψει στο όργανο μέσω σκέδασης **Rayleigh** ή ανακλάσεων. Η επιστρεφόμενη δέσμη θα ανιχνευθεί από μια φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (**Avalanche Photodiode, APD**) και το ηλεκτρικό σήμα που θα παραχθεί από αυτή ενισχύεται από ενισχυτική βαθμίδα και γίνεται πολλές φορές αντικείμενο επεξεργασίας από εσωτερικό μικροϋπολογιστή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές φορές και έτσι τα αποτελέσματα που προβάλλονται στην οθόνη του οργάνου προκύπτουν από στατιστική επεξεργασία.

Η ισχύς του σήματος απεικονίζεται στον κάθετο άξονα του οργάνου και η απόσταση, που έχει υπολογισθεί από το χρόνο διάδοσης στον οριζόντιο.

Το σύστημα συντεταγμένων απεικονίζεται μαζί με άλλα χρήσιμα στοιχεία στην οθόνη του οργάνου. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται ένα πρότυπο της μέτρησης που διενεργεί το **OTDR**¹⁵.



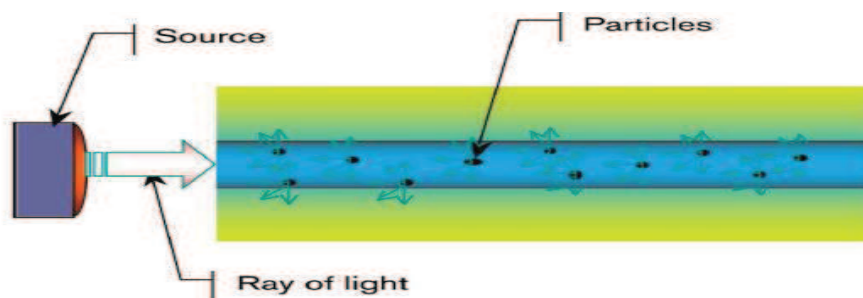
Σχήμα 21: Απλοποιημένο διάγραμμα από OTDR

2.1. Ανάκλαση Rayleigh backscattering και Fresnel reflection

Όπως αναφέραμε νωρίτερα το **OTDR** παρέχει μια εικόνα του δικτύου μετρώντας το ποσοστό του φωτός που επιστρέφεται από τον παλμό που στέλνει.

¹⁵ Δ. ΣΥΒΡΙΔΗΣ, *Οπτικές ίνες και οπτικά δίκτυα*, Αθήνα 2004, σ. 2.

Σημειώνεται ότι υπάρχουν δυο είδη οπτικής ανάκλασης : μια συνεχόμενη χαμηλής έντασης που προκαλείται από την ίδια την ίνα και ονομάζεται **“Rayleigh backscattering”**¹⁶ και μια υψηλής έντασης που δημιουργείται στα σημεία σύνδεσης και ονομάζεται **“Fresnel reflection”**.¹⁷

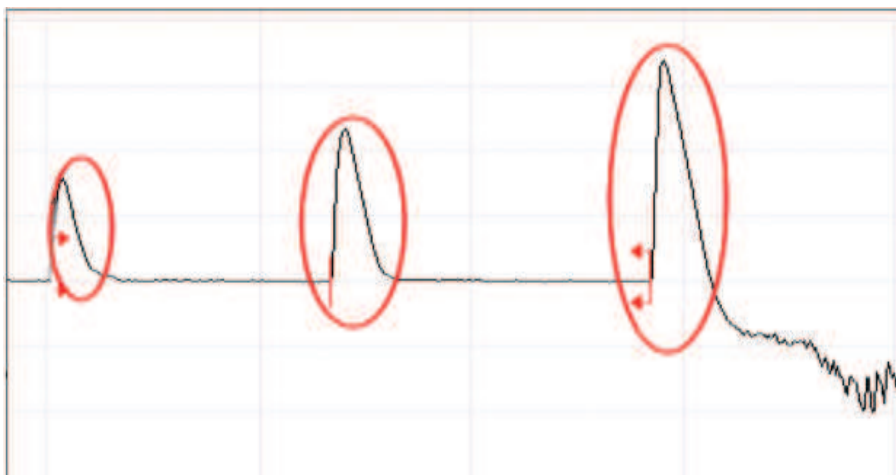


Σχήμα 22: Rayleigh

¹⁶ Η ανάκλαση **Rayleigh** χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξασθένησης της ίνας σαν συνάρτηση της απόστασης (εκφράζεται σε dB/km) και φαίνεται σαν μια φθίνουσα ευθεία στο γράφημα του **OTDR**. Αυτό το φαινόμενο προέρχεται από την φυσική ανάκλαση και την εξασθένηση λόγω κάποιων ξένων σωματιδίων που εμπεριέχονται στο γυαλί. Όταν το φως χτυπήσει σε ένα τέτοιο σωματίδιο συμβαίνει ανάκλαση προς διάφορες κατευθύνσεις προκαλώντας εξασθένηση του σήματος. Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος εξασθενούν λιγότερο σε σχέση με τα μικρότερα άρα απαιτούν λιγότερη ενέργεια για να ταξιδέψουν την ίδια απόσταση σε μια ίνα.

¹⁷ Το δεύτερο είδος ανάκλασης που χρησιμοποιείται από ένα **OTDR (Fresnel)** εντοπίζει φυσικά γεγονότα κατά μήκος της ίνας. Όταν φως χτυπήσει σε ένα τέτοιο σημείο (π.χ. κόλληση), ένα μεγάλο ποσοστό επιστρέφει πίσω δημιουργώντας την ανάκλαση **Fresnel** η οποία μπορεί να είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την **Rayleigh**. Η ανάκλαση **Fresnel** διακρίνεται από αιχμές στην κυματομορφή του **OTDR**. Για παράδειγμα τέτοιες ανακλάσεις συμβαίνουν σε κοννέκτορες, μηχανικές συνδέσεις, σπασίματα ή ατερομάτιστες ίνες.

Το σχήμα που φαίνεται παρακάτω παρουσιάζει μερικές τέτοιες περιπτώσεις.

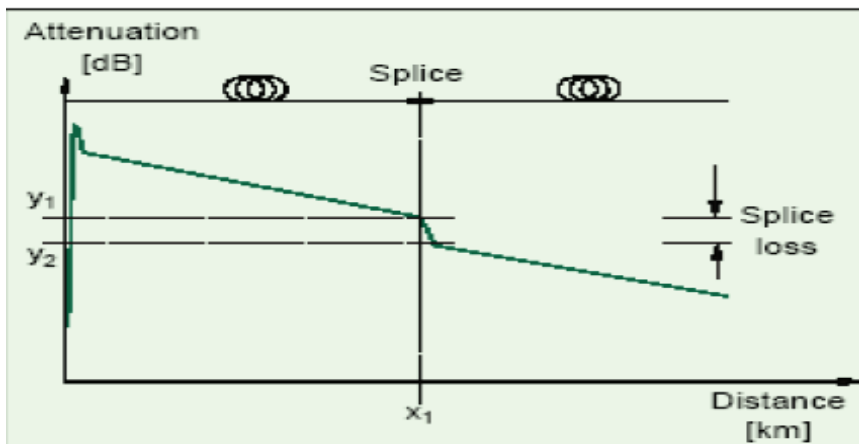


Σχήμα 23: Ανακλάσεις Fresnel που προκαλούνται από μηχανικές συνδέσεις, κοννέκτορες κτλ.

2.3. Μέτρηση της Εξασθένησης σε μία συγκόλληση ή ένα συνδετήρα

Όπως φαίνεται στα προηγούμενα σχήματα στην οθόνη του **OTDR** φαίνεται πως εξασθενεί η ισχύς σε ένα τμήμα οπτικής ζεύξης. Αν η ζεύξη περιέχει συγκολλήσεις ή συνδέσεις, αυτές θα εμφανιστούν σαν «γόνατα» στην καμπύλη, όπως και στο σχήμα. Η απώλεια της συγκόλλησης ή της σύνδεσης μπορεί να προσδιοριστεί μετρώντας την υποβάθμιση της ισχύος στα 2 σημεία του «γονάτου».

$$A(\text{συγκόλλησης}) = y_1 - y_2$$



Σχήμα 24: Μέθοδος δύο σημείων για τον υπολογισμό απωλειών σε συγκόλληση.

2.4. «Νεκρή Ζώνη»

Οι ανακλάσεις **Fresnel** εισάγουν ένα σημαντικό χαρακτηριστικό το οποίο ονομάζεται 'νεκρή ζώνη'. Υπάρχουν δυο ειδών νεκρές ζώνες : γεγονόςτος και εξασθένισης. Και οι δυο δημιουργούνται από τις ανακλάσεις **Fresnel** και εκφράζονται σε απόσταση (μέτρα) η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με την ισχύ αυτών των ανακλάσεων.

Σαν νεκρή ζώνη ορίζεται η απόσταση κατά την οποία ο ανιχνευτής του **OTDR** τυφλώνεται προσωρινά από την μεγάλη ποσότητα ανακλώμενου φωτός – φαντάσου ότι οδηγάς το βράδυ και συναντάς ένα αμάξι από την αντίθετη κατεύθυνση: τα μάτια σου τυφλώνονται για ένα μικρό διάστημα.

Στον κόσμο των **OTDR** ο χρόνος μεταφράζεται σε απόσταση, άρα περισσότερη ανάκλαση σημαίνει περισσότερο χρόνο για να ανακάμψει ο ανιχνευτής δηλαδή μεγαλύτερη 'νεκρή ζώνη'.

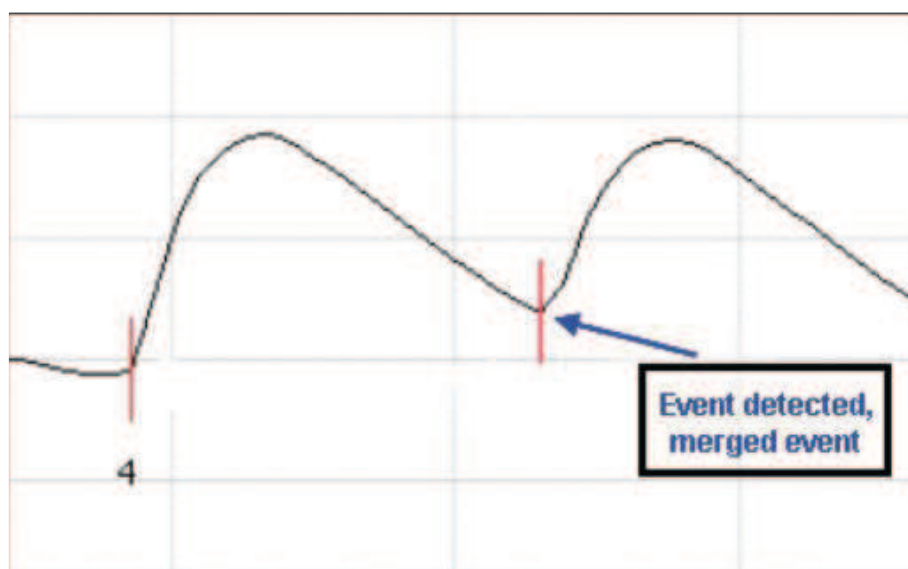
Οι περισσότεροι κατασκευαστές αναφέρουν στα χαρακτηριστικά τους τις 'νεκρές ζώνες' με το μικρότερο δυνατό παλμό λειτουργίας και στα -45dB για τις μονότροπες και -35dB για τις πολύτροπες ίνες.

Γι' αυτό τον λόγο είναι πολύ σημαντικό να διαβάζονται πολύ προσεκτικά τα χαρακτηριστικά ενός OTDR μια και κάθε κατασκευαστής χρησιμοποιεί διαφορετικές συνθήκες μέτρησης των «νεκρών ζωνών».

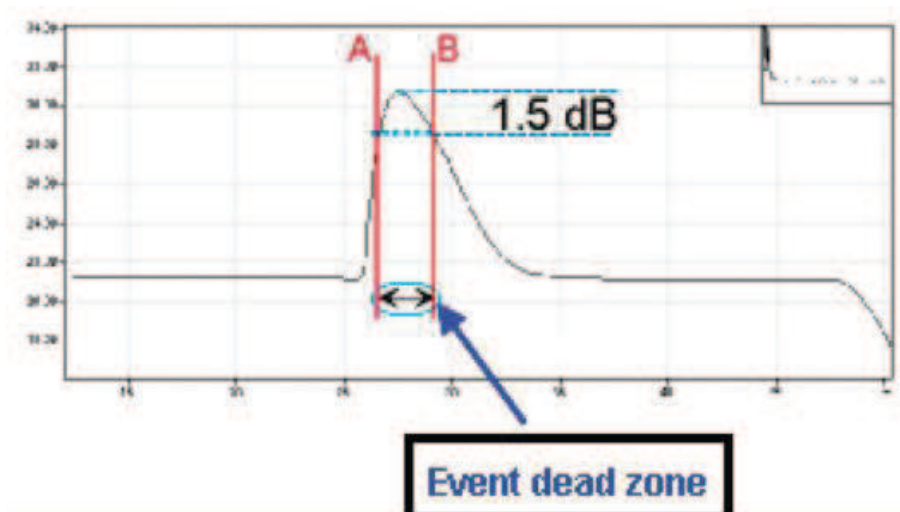
Η νεκρή ζώνη γεγονόςτος είναι η ελάχιστη απόσταση που χρειάζεται ένα **OTDR** να ανιχνεύσει ένα γεγονός μετά από μια ανάκλαση **Fresnel**. Με άλλα λόγια είναι το ελάχιστο μήκος της ίνας που απαιτείται για δυο συνεχόμενα γεγονότα.

Χρησιμοποιώντας το παράδειγμα του αυτοκινήτου που αναφέρθηκε παραπάνω, όταν τα μάτια τυφλωθούν από ένα άλλο αυτοκίνητο χρειάζονται μερικά δευτερόλεπτα για να αναγνωρίσεις ένα αντικείμενο που ακολουθεί.

Στην περίπτωση του **OTDR** ένα γεγονός που ακολουθεί ανιχνεύεται αλλά δεν μπορεί να υπολογιστεί η απώλεια του (όπως φαίνεται στην Σχήμα 25). Το **OTDR** συγχωνεύει όλα τα επαναλαμβανόμενα γεγονότα σε ένα και επιστρέφει την συνολική ανάκλαση και απώλεια τους. Οι κατασκευαστές των **OTDR** έχουν καθιερώσει έναν κοινό τρόπο μέτρησης αυτού του χαρακτηριστικού υπολογίζοντας την απόσταση μεταξύ των -1.5dB σημείων μιας αιχμής



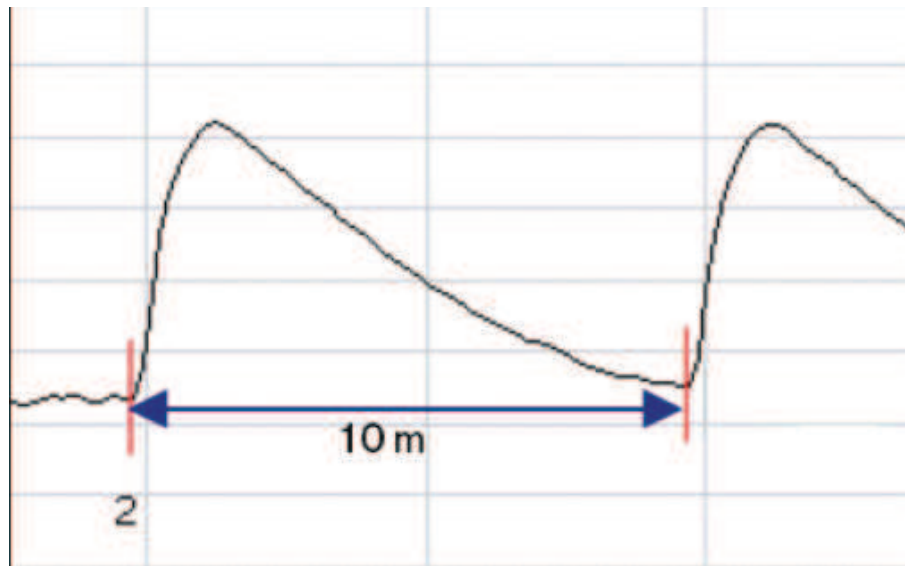
Σχήμα 25: Γεγονότα που έχουν συγχωνευτεί εξαιτίας μεγάλης «νεκρής ζώνης».



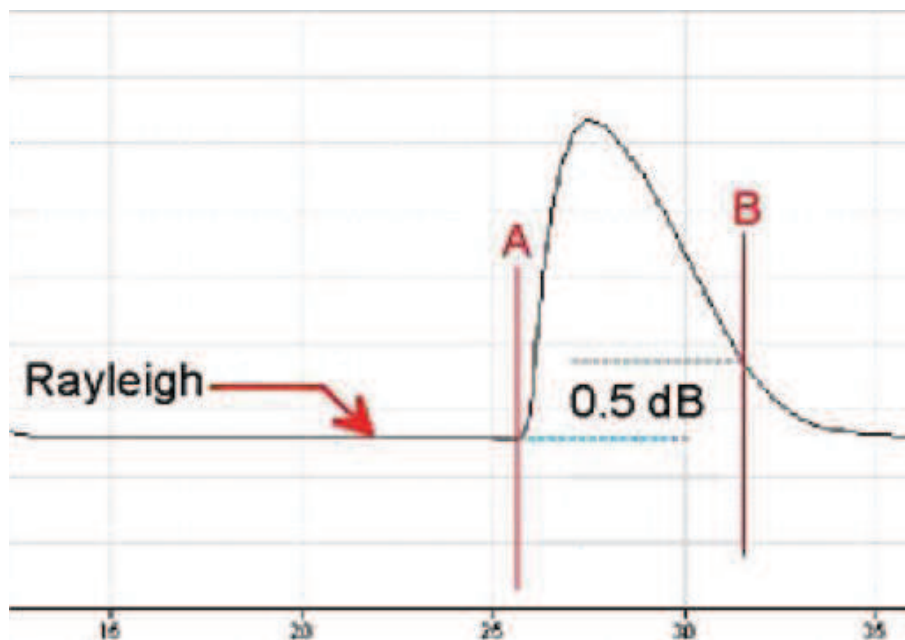
Σχήμα 26: Μετρώντας την «νεκρή ζώνη».

Η «νεκρή ζώνη» εξασθένισης είναι η ελάχιστη απόσταση που χρειάζεται ένα OTDR για να μετρήσει την απώλεια ενός γεγονότος που ακολουθεί ένα άλλο.

Επιστρέφοντας στο παράδειγμα του αυτοκινήτου που αναφέρθηκε νωρίτερα μετά από αρκετό χρόνο τα μάτια θα έχουν επανέλθει σε φυσιολογική κατάσταση έτσι ώστε θα μπορούν να αναγνωρίσουν ένα αντικείμενο στο δρόμο. Όπως φαίνεται στη παρακάτω Σχήμα 27 ο ανιχνευτής του OTDR χρειάζεται αρκετό χρόνο για να εντοπίσει και να μετρήσει την απώλεια ενός γεγονότος που ακολουθεί. Η ελάχιστη αυτή απόσταση μετριέται από την αρχή ενός γεγονότος μέχρι η ανάκλαση να πέσει στο 0.5dB του φυσιολογικού της επιπέδου όπως φαίνεται στην Σχήμα 28



Σχήμα 27: «Νεκρή ζώνη» εξασθένησης.



Σχήμα 28: Μέτρηση της «Νεκρής ζώνης» εξασθένησης.

Οι μικρές νεκρές ζώνες επιτρέπουν σε ένα **OTDR** όχι μόνο να εντοπίσει κοντινά γεγονότα αλλά και να μετρήσει την απώλεια τους. Για παράδειγμα η απώλεια ενός κοντού **patchcord** γίνεται γνωστή με αποτέλεσμα αυτό να βοηθάει τους τεχνικούς να έχουν μια ξεκάθαρη εικόνα για το τι συμβαίνει σε ένα δίκτυο. Οι 'νεκρές ζώνες' επηρεάζονται από άλλον ένα παράγοντα που είναι το εύρος του παλμού.

Στα τεχνικά χαρακτηριστικά των κατασκευαστών δίδεται το ελάχιστο μήκος 'νεκρής ζώνης' επειδή χρησιμοποιείται ο μικρότερος δυνατός παλμός. Όμως οι 'νεκρές ζώνες' δεν έχουν πάντα το ίδιο σταθερό μήκος αλλά φαρδαίνουν καθώς μεγαλώνει το εύρος του παλμού. Χρησιμοποιώντας το μέγιστο δυνατό εύρος παλμού έχει σαν αποτέλεσμα αρκετά μεγάλο μήκος 'νεκρής ζώνης'.

2.5. Η δυναμική περιοχή

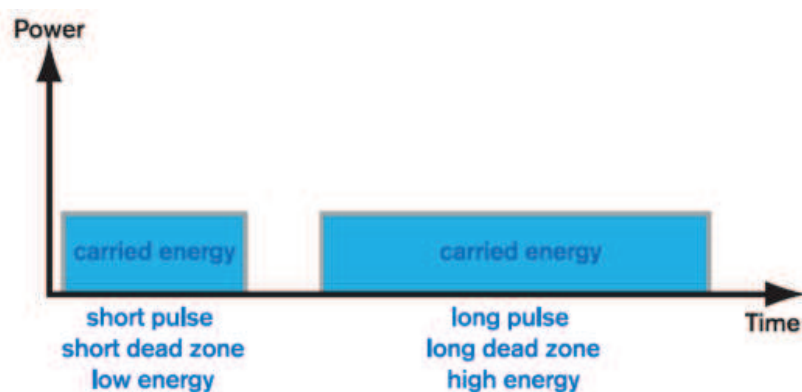
Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των OTDR είναι η δυναμική περιοχή. Αυτή η παράμετρος φανερώνει την μέγιστη οπτική εξασθένιση που μπορεί να μετρήσει ένα OTDR μέχρι ένα συγκεκριμένο επίπεδο θορύβου. Με άλλα λόγια είναι το μέγιστο μήκος της ίνας στο οποίο μπορεί να φτάσει ένας παλμός με το μέγιστο δυνατό εύρος. Άρα μεγάλη δυναμική περιοχή (σε dB) σημαίνει ότι μπορούν να μετρηθούν και μεγάλες αποστάσεις. Στη πραγματικότητα η μέγιστη απόσταση αλλάζει από περίπτωση σε περίπτωση αφού η εξασθένιση κάθε δικτύου είναι διαφορετική.

Συνδετήρες, κολλήσεις και διαχωριστές είναι μερικοί από τους παράγοντες που μειώνουν το μέγιστο μήκος που μπορεί να μετρήσει ένα OTDR. Τις περισσότερες φορές στα τεχνικά χαρακτηριστικά των κατασκευαστών η δυναμική περιοχή δίδεται χρησιμοποιώντας το μέγιστο δυνατό παλμό και παίρνοντας τον μέσο όρο των μετρήσεων που γίνονται για χρονικό διάστημα τριών λεπτών.¹⁸

¹⁸ Δ. ΣΥΒΡΙΔΗΣ, *Οπτικές ίνες και οπτικά δίκτυα*, Αθήνα 2004, σ. 6.

Το μήκος του παλμού

Το μήκος του παλμού είναι στην πραγματικότητα ο χρόνος όπου το laser είναι σε λειτουργία. Όπως ξέρουμε ο χρόνος στην περίπτωση των OTDR μετατρέπεται σε απόσταση άρα το μήκος παλμού φανερώνει απόσταση. Ένας παλμός μεταφέρει ενέργεια για να δημιουργηθούν οι ανακλάσεις και με αυτόν τον τρόπο να μετρηθεί ένα δίκτυο. Ένας μικρός παλμός μεταφέρει ελάχιστη ενέργεια και άρα ταξιδεύει σε μικρότερες αποστάσεις εξαιτίας της απώλειας που υπάρχει κατά μήκος μιας ίνας (συνδετήρες, κολλήσεις κτλ). Ένας μεγάλος παλμός έχει περισσότερη ενέργεια με αποτέλεσμα να ταξιδεύει σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Η Σχήμα 29 παρακάτω παρουσιάζει το μήκος του παλμού σε σχέση με τον χρόνο.



Σχήμα 29: Μικρός και μεγάλος παλμός.

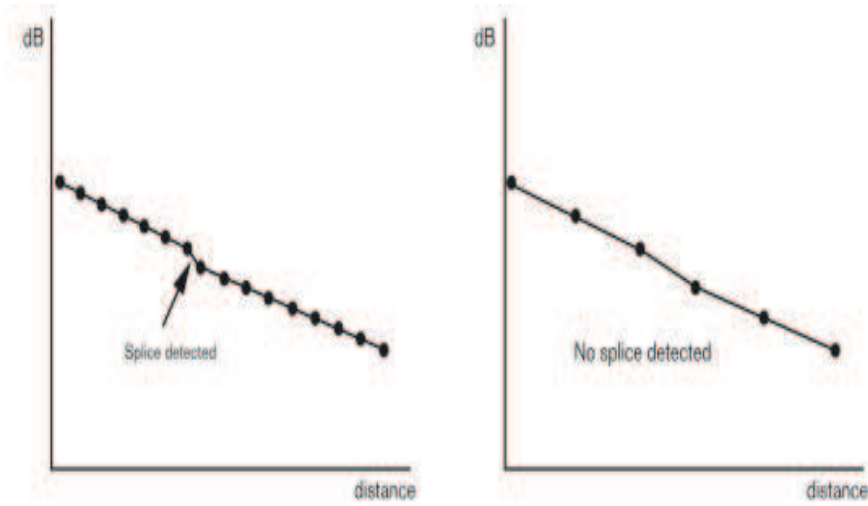
Αν ο παλμός είναι πολύ μικρός (σε χρονική διάρκεια) τότε χάνει την ενέργεια του πριν φτάσει στο τέλος της ίνας με αποτέλεσμα η ανάκλαση να είναι τόσο ασθενής ώστε να χάνεται στο θόρυβο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορεί να μετρηθεί η ίνα ολόκληρη από άκρη σε άκρη μιας και το φαινομενικό της μήκος είναι μικρότερο από το πραγματικό. Επίσης όταν η καμπύλη γίνεται πολύ θορυβώδης κοντά στο

τέρμα της ίνας το OTDR δεν μπορεί πλέον να αναλύσει σωστά το σήμα και παρουσιάζει λανθασμένες μετρήσεις.

Ανάλυση δειγματοληψίας

Η ικανότητα ενός OTDR να υπολογίζει την σωστή απόσταση ενός γεγονότος εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους ανάμεσα στις οποίες είναι η ανάλυση της δειγματοληψίας καθώς και τα σημεία που συμβαίνει η δειγματοληψία. Η ανάλυση της δειγματοληψίας ορίζεται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο σημείων δειγματοληψίας. Η παράμετρος αυτή είναι πολύ σημαντική γιατί φανερώνει την ακρίβεια με την οποία μετράει τις αποστάσεις ένα OTDR αλλά και την ικανότητα του να βρίσκει λάθη πάνω στο δίκτυο. Ανάλογα με το εύρος του παλμού που χρησιμοποιείται και την απόσταση η τιμή της ανάλυσης αυτής κυμαίνεται από 4cm έως μερικά μέτρα. Επίσης θα πρέπει να υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός σημείων δειγματοληψίας κατά την διάρκεια μιας μέτρησης έτσι ώστε να διατηρείται η καλύτερη δυνατή ανάλυση. Στην Σχήμα 30 φαίνεται ο ρόλος της υψηλής ανάλυσης στην ανίχνευση ενός λάθους¹⁹.

¹⁹Μ. ΓΑΛΑΝΑΚΗΣ, *Χρήση OTDR και ενίσχυση Raman σε μητροπολιτικές ζεύξεις μονότροπων οπτικών ινών*, Πάτρα 2009, σ. 31.



Σχήμα 30: Η ανάλυση όταν χρησιμοποιείται α) δειγματοληψία ανά 5 μέτρα και β) ανά 15 μέτρα. Όπως φαίνεται παραπάνω χρησιμοποιώντας μεγάλο αριθμό σημείων δειγματοληψίας έχει σαν αποτέλεσμα καλύτερη ανάλυση.

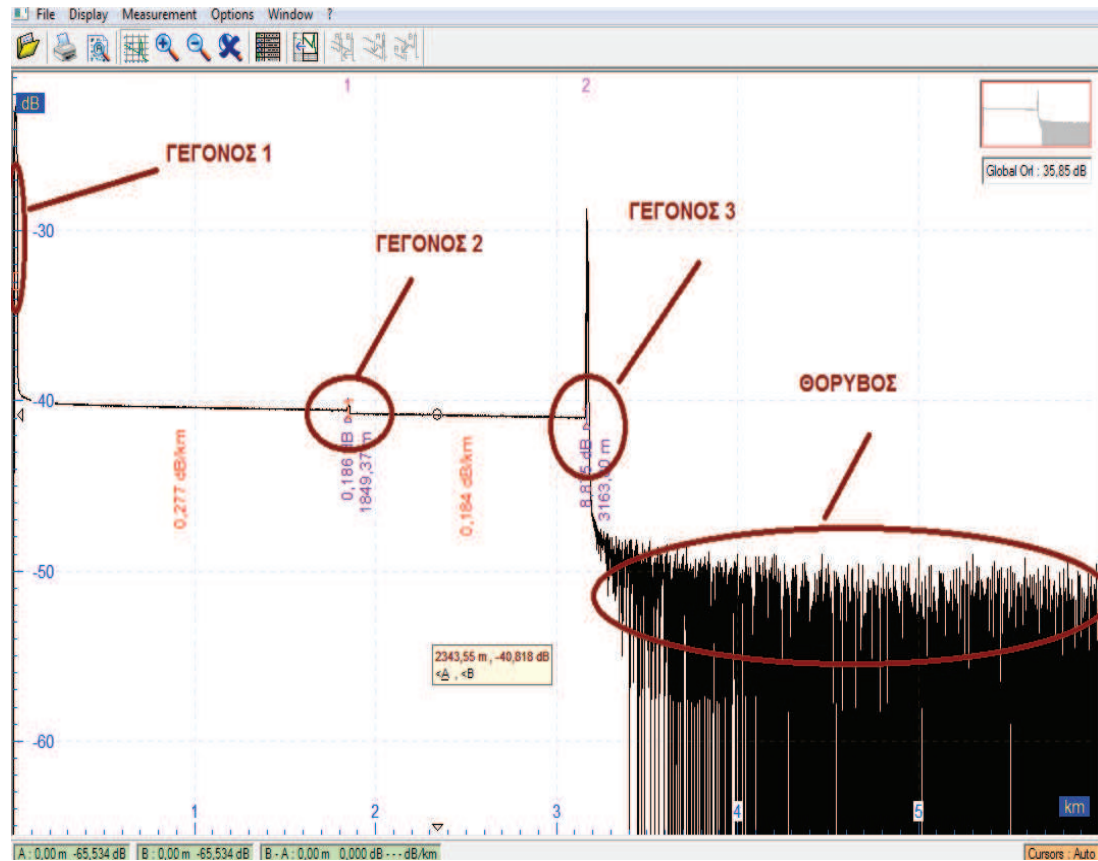


Σχήμα 31: Μέτρηση με OTDR

2.6. Αποτελέσματα μετρήσεων

Οι παρακάτω μετρήσεις έγιναν στην πόλη Χ και σε μια απόσταση περίπου 64,5 χιλιομέτρων. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν σε 4 ίνες και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα

2.6.1. Πρώτη Μέτρηση- αναλυτική περιγραφή



Διάγραμμα 1: Πρώτη μέτρηση

Παρατηρώντας το διάγραμμα βλέπουμε ότι μετράμε μία ίνα μήκους **3,16380 km**, παρατηρούμε ότι στον κάθετο άξονα απεικονίζεται η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος σε dB και στον οριζόντιο το μήκος της ίνας σε Km, πάνω στην οποία γίνεται η διεξαγωγή της μέτρησης.

Έτσι παρατηρούμε ότι από τα **-35 dB** μέχρι και τα **-40 dB** περίπου έχουμε μια κατακόρυφη απώλεια ισχύος στα πρώτα μέτρα της ίνας.

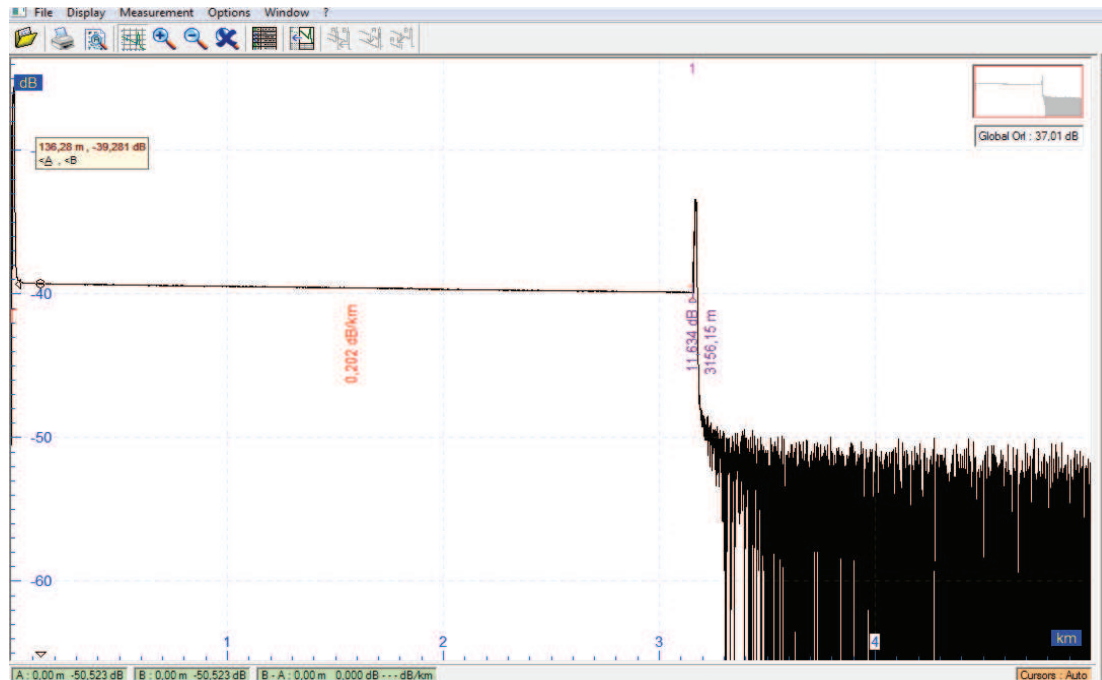
Αυτό συμβαίνει γιατί σε εκείνο το σημείο παρουσιάζεται το φαινόμενο “**Fresnel reflection**”, επειδή έχουμε σύνδεση της ίνας με τη πηγή. Ουσιαστικά το OTDR στέλνει φως, το οποίο χτυπά στο σημείο εκείνο έτσι ένα μεγάλο ποσοστό επιστρέφει πίσω δημιουργώντας το φαινόμενο Fresnel.

Βλέπουμε ότι ο συντελεστής απωλειών είναι **0,277 dB/km**. Στο **1,84937 km** βλέπουμε ότι λαμβάνει πάλι χώρα το φαινόμενο Fresnel και η ισχύς στο σημείο αυτό είναι 0,186 dB. Οι πιθανότερες αιτίες που δημιουργούν το φαινόμενο σε αυτό το σημείο είναι είτε κάποια κόλληση είτε ένας συνδετήρας είναι λερωμένος ή όχι σωστά συνδεδεμένος οπότε πρέπει να αντικαταστήσουμε το αρχικό καλώδιο (launch cable) και να ξανακάνουμε τη σύνδεση με το σωστό τρόπο.

Μετά από το φαινόμενο αυτό βλέπουμε ότι οι συνολικές απώλειες μειώνονται στις **0,184dB/km**.

Ύστερα βλέπουμε στο **3,1638 km** ότι έχουμε σύνδεση της ίνας με το δέκτη, λόγος ύπαρξης της σύνδεσης και άρα εξασθένησης. Πέρα από εκεί έχουμε τη δημιουργία θορύβου, όπως φαίνεται στο γράφημα με μια κυματοειδή μορφή.

2.6.2. Δεύτερη Μέτρηση- αναλυτική περιγραφή



Διάγραμμα 2: Δεύτερη μέτρηση

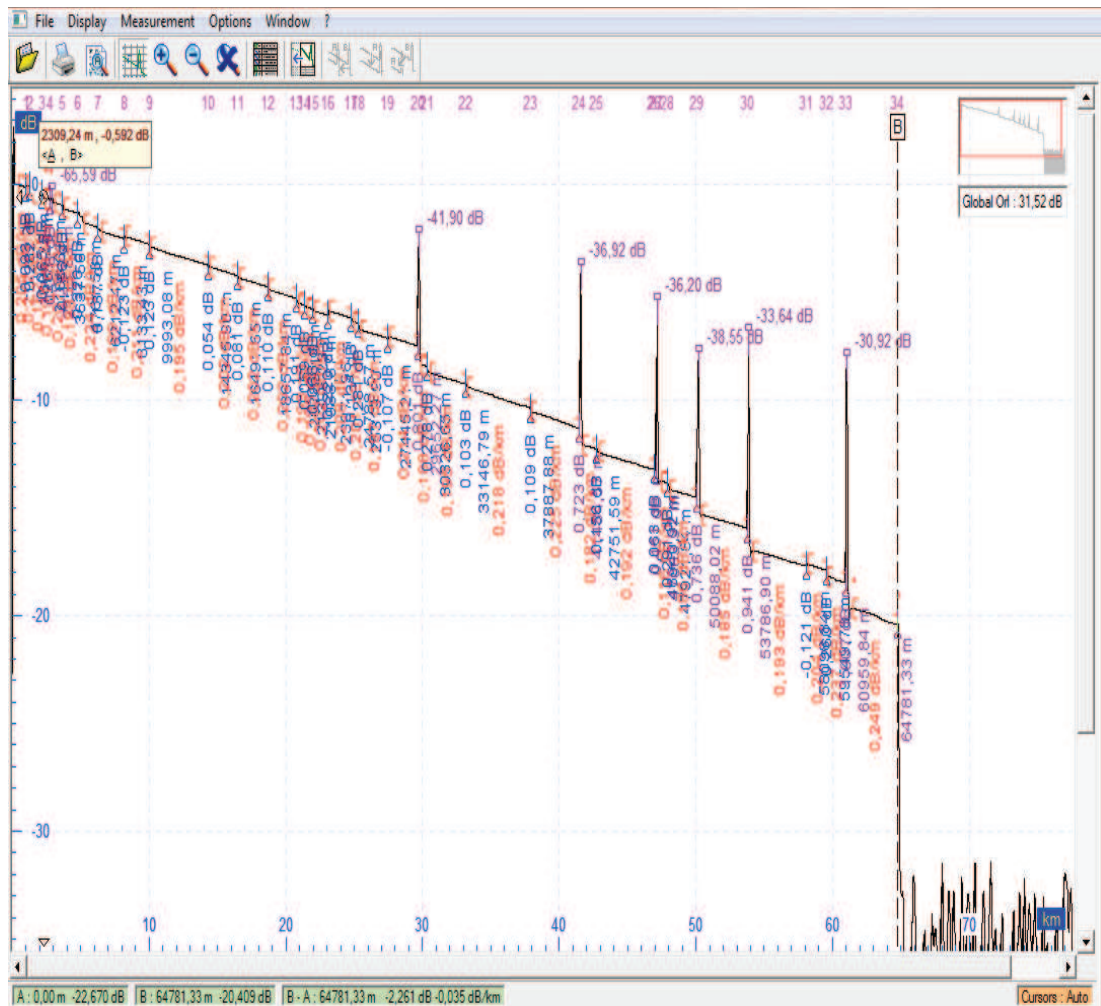
Σε αυτή τη μέτρηση έχουμε μία ίνα των **3,15615 km**, παρατηρούμε ότι από τα **-35 dB** μέχρι και **τα - 40 dB** περίπου έχουμε μια κατακόρυφη απώλεια ισχύος στα πρώτα μέτρα της ίνας.

Αυτό συμβαίνει γιατί σε εκείνο το σημείο παρουσιάζεται το φαινόμενο **“Fresnel reflection”**, επειδή έχουμε σύνδεση της ίνας με τη πηγή. Ουσιαστικά το OTDR στέλνει φως, το οποίο χτυπά στο σημείο εκείνο έτσι ένα μεγάλο ποσοστό επιστρέφει πίσω δημιουργώντας το φαινόμενο Fresnel.

Βλέπουμε ότι ο συντελεστής απωλειών είναι **0.202 dB/km**. Εδώ βλέπουμε ότι έχουμε μια τέλεια μέτρηση της ίνας.

Υστερα βλέπουμε στο **3,15615 km** ότι έχουμε σύνδεση της ίνας με το δέκτη, λόγος ύπαρξης της σύνδεσης και άρα εξασθένησης. Πέρα από εκεί έχουμε τη δημιουργία θορύβου, όπως φαίνεται στο γράφημα με μια κυματοειδή μορφή.

2.6.3. Τρίτη Μέτρηση- αναλυτική περιγραφή



Διάγραμμα 3: Τρίτη μέτρηση.

Σε αυτή τη μέτρηση έχουμε μία ίνα των **64,78133 km**. Εδώ βλέπουμε ότι λαμβάνουν χώρα πολλά γεγονότα όπως το φαινόμενο του “Rayleigh backscattering”.

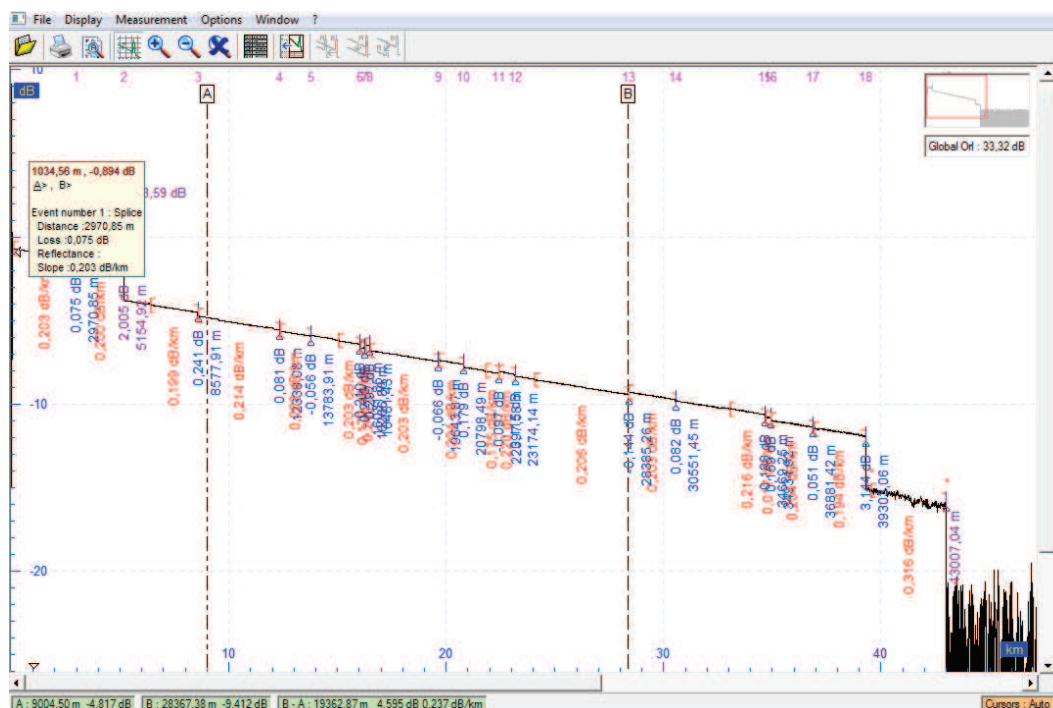
Η ανάκλαση “Rayleigh” χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξασθένισης της ίνας σαν συνάρτηση της απόστασης (εκφράζεται σε dB/km) και φαίνεται σαν μια φθίνουσα ευθεία. Αυτό το φαινόμενο προέρχεται από την φυσική ανάκλαση και την εξασθένιση λόγω κάποιων σωματιδίων που εμπεριέχονται στο γυαλί. Όταν το φως χτυπήσει σε ένα τέτοιο σωματίδιο συμβαίνει ανάκλαση προς διάφορες κατευθύνσεις

προκαλώντας εξασθένιση του σήματος. Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος εξασθενούν λιγότερο σε σχέση με τα μικρότερα, άρα απαιτούν λιγότερη ενέργεια για να ταξιδέψουν την ίδια απόσταση σε μία ίνα.

Όμως αυτά τα φαινόμενα σε αυτή τη μέτρηση θεωρούνται αμελητέα. Αξιοσημείωτο όμως είναι στο **27,44521 km** παρουσιάζεται το φαινόμενο “Fresnel”, βλέπουμε ότι οι συνολικές απώλειες πριν το φαινόμενο “Fresnel” είναι **0,214 dB/km** και με το πέρας του φαινομένου είναι **0,188 dB/km**. Το φαινόμενο αυτό το βλέπουμε άλλες 5 φορές σε αυτή τη μέτρηση.

Υστερα βλέπουμε στο **64,78133 km** ότι έχουμε σύνδεση της ίνας με το δέκτη, λόγος ύπαρξης της σύνδεσης και άρα εξασθένησης. Πέρα από εκεί έχουμε τη δημιουργία θορύβου, όπως φαίνεται στο γράφημα με μια κυματοειδή μορφή.

2.6.4. Τέταρτη Μέτρηση- αναλυτική περιγραφή



Διάγραμμα 4: Τέταρτη μέτρηση.

Σε αυτή τη μέτρηση έχουμε μία ίνα των **43,00704 km**. Εδώ βλέπουμε πάλι γεγονότα όπως αναλύσαμε και στις προηγούμενες μετρήσεις. Σε αυτή τη μέτρηση επιπλέον όμως βλέπουμε στο **39,30106 km** έχουμε έντονα πολλά γεγονότα από αυτό συμπεραίνουμε ότι η ίνα είναι χαλασμένη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είναι σαφές, ότι η επιλογή των οπτικών ινών τις περισσότερες φορές είναι η καλύτερη επιλογή. Άλλωστε όπως θα διαπιστωθεί παρακάτω οι οπτικές ίνες έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα από ότι τα μειονεκτήματα. Στη συνέχεια παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των οπτικών ινών

A. Πλεονεκτήματα οπτικών ινών

Τα συστήματα μετάδοσης οπτικών ινών παρουσιάζουν ένα μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων σε σύγκριση με τα συμβατικά ηλεκτρικά/ηλεκτρονικά συστήματα. Μία πρώτη σύγκριση οδηγεί στα παρακάτω σημεία:

(α) Τεράστιο εύρος ζώνης. Οι οπτικές ίνες διαθέτουν μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, που με πολυπλεξία, φθάνουν ακόμη και τα 128 Gbit/s. Συνήθεις ταχύτητες μετάδοσης είναι αυτές των 2 και 10 Gbps, ενώ έχουν επίσης αναπτυχθεί συστήματα των 20,40 και 50 Gbps. Σε κάθε περίπτωση πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος, οι ταχύτητες φθάνουν στα Tbps. Το εύρος ζώνης του οπτικού φέροντος (10^{14} Hz ή 100000 GHz) είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από αυτό των χάλκινων ομοαξονικών καλωδίων που γενικά δεν ξεπερνά τα 500 MHz ή των μιλιμετρικών ραδιοκυμάτων. Είναι φανερό ότι ακόμα και με τη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε συστήματα οπτικών ινών αρκετά GHz διαμόρφωση μπορούν να μεταδοθούν σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων χωρίς την παρέμβαση ενδιάμεσων ηλεκτρονικών αναμεταδοτών. Από την άλλη πλευρά σε ομοαξονικά καλώδια δεν πρέπει κανείς να περιμένει αποστάσεις μεγαλύτερες των μερικών χιλιομέτρων για ένα εύρος ζώνης

που θα ξεπερνά τα 100 MHz. Φυσικά το εύρος ζώνης σε ένα σύστημα οπτικών ινών μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο με την πολυπλεξία στο μήκος κύματος. Στην περίπτωση αυτή μία και μόνη ίνα μπορεί να φέρει περισσότερα από ένα (μερικές δεκάδες σήμερα) διαφορετικά μήκη κύματος καθένα από τα οποία είναι διαμορφωμένο σε αρκετά GHz. Άρα βγαίνει αβίαστα το συμπέρασμα ότι σε κάθε περίπτωση ένα σύστημα οπτικών ινών προσφέρει τουλάχιστον μερικές τάξεις μεγέθους (4-5) βελτίωση στο διαθέσιμο εύρος ζώνης σε σχέση με οποιοδήποτε τύπο χάλκινου καλωδίου ή ραδιοκυμάτων.

(β) Μικρό μέγεθος και βάρος. Η διάμετρος των οπτικών ινών είναι μερικά (ή μερικές δεκάδες) μικρόμετρα. Ακόμα και εάν κανείς συνεκτιμήσει τα διάφορα προστατευτικά στρώματα και πάλι διαπιστώνει ότι το βάρος και το μέγεθος ενός οπτικού καλωδίου είναι πολύ μικρότερα από αυτά ενός χάλκινου. Για παράδειγμα, χάλκινο καλώδιο με εύρος ζώνης 50 MHz και μήκος 500 μέτρων ζυγίζει περίπου 4 τόνους (4000 κιλά), ενώ το αντίστοιχο οπτικό καλώδιο ζυγίζει λιγότερο από 45 κιλά.

(γ) Ηλεκτρική απομόνωση. Το οπτικό κύμα οδηγείται από μία γυάλινη ίνα, άρα ένα διηλεκτρικό. Δεν υπάρχουν βρόχοι γης, τόξα, βραχυκυκλώματα κτλ. Άρα η οπτική ίνα, μπορεί να περάσει άφοβα από κάποιο 'ηλεκτρικά επικίνδυνο' περιβάλλον. Η οπτική ίνα είναι ιδανικό μέσον για την εγκατάσταση σε χώρους με υψηλά δυναμικά.

(δ) Ατρωσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η μετάδοση του οπτικού κύματος μέσα στο διηλεκτρικό κυματοδηγό (ίνα) είναι απαλλαγμένη από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) καθώς και από μεταβατικά φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικών παλμών.. Αυτό σημαίνει ότι η οπτική ίνα μπορεί να βρίσκεται σε ένα περιβάλλον ηλεκτρομαγνητικού θορύβου χωρίς να χρειάζεται να ληφθούν μέτρα για την ηλεκτρομαγνητική της θωράκιση. Για το λόγο αυτό βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε περιβάλλοντα υψηλού ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Ούτε

βέβαια περιμένει κανείς οπτική παρεμβολή ανάμεσα σε ίνες που γειτνιάζουν.

(ε) Ασφάλεια. Το οπτικό σήμα μέσα στην ίνα περιορίζεται κυρίως στον πυρήνα της και δεν ακτινοβολεί. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να υποκλαπεί, παρά μόνο στην περίπτωση που κάποιος μπορεί να έχει πρόσβαση στο φως που οδηγείται από τον πυρήνα. Το παραπάνω είναι απίθανο να συμβεί χωρίς να διακοπεί η συνέχεια της ίνας, πράγμα το οποίο γίνεται εύκολα αντιληπτό. Αυτό σημαίνει ότι η ασφάλεια που προσφέρουν τα συστήματα οπτικών ινών είναι ιδιαίτερα αυξημένη, καθώς είναι σχεδόν αδύνατη η εξωτερική επέμβαση για την υποκλοπή ή την παρεμβολή των μεταφερόμενων σημάτων.

(στ) Πολύ χαμηλές απώλειες μετάδοσης. Η εξέλιξη των οπτικών ινών έχει οδηγήσει σε ίνες με ιδιαίτερα χαμηλές απώλειες. Τυπική τιμή απωλειών τα 0.2 dB/km, τιμή η οποία είναι εξαιρετικά χαμηλότερη αυτών που αναμένονται ακόμα και στους καλύτερους χάλκινους αγωγούς. Οι ιδιαίτερα χαμηλές τιμές απωλειών στις ίνες οδηγούν σε συστήματα επικοινωνιών όπου οι ηλεκτρονικοί αναμεταδότες τοποθετούνται σε μακρινές αποστάσεις που μπορεί να είναι και μεγαλύτερες από 200 χιλιόμετρα, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση του κόστους καθώς και της πολυπλοκότητας του συστήματος.

(ζ) Ευελιξία και αντοχή. Οι οπτικές ίνες παρά το γεγονός ότι είναι κατασκευασμένες από γυαλί χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό καθώς και ευκαμψία. Ταυτόχρονα δεν επηρεάζονται από την υγρασία, σε αντίθεση με τα χάλκινα καλώδια που η έκθεση τους σε υγρασία μπορεί να προκαλέσει βραχυκύκλωμα ή το φαινόμενο της διαφωνίας. Σε συνδυασμό με το μικρό βάρος και όγκο εμφανίζονται γενικά πλεονεκτικότερες σε ότι αφορά στην αποθήκευση, μεταφορά και εγκατάσταση σε σχέση με τα χάλκινα καλώδια. Τέλος η αντοχή καθώς

και η διάρκεια ζωής τους είναι τουλάχιστον συγκρίσιμες με τα προηγούμενα.

(η) Αξιοπιστία και ευκολία συντήρησης. Λόγω των μικρών απωλειών ο αριθμός ηλεκτρονικών αναμεταδοτών είναι αρκετά περιορισμένος. Αυτό σημαίνει αυξημένη αξιοπιστία του συστήματος. Παράλληλα η ίδια η αξιοπιστία των οπτικών εξαρτημάτων και διατάξεων έχει αυξηθεί σημαντικά με αποτέλεσμα η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής να είναι 20 μέχρι 30 χρόνια.

(θ) Εν δυνάμει χαμηλό κόστος. Το κόστος των οπτικών ινών (καλωδίων) έχει μειωθεί σημαντικά προσεγγίζοντας αυτό των μεταλλικών καλωδίων. Αυτό που συνεχίζει να έχει υψηλό κόστος είναι άλλα οπτικά εξαρτήματα, όπως οι οπτικές πηγές, ανιχνευτές κτλ. Είναι πάντως φανερό ότι εάν κανείς συνεκτιμήσει και το τεράστιο διαθέσιμο εύρος ζώνης τότε αντιλαμβάνεται ότι οι επικοινωνίες οπτικών ινών προσφέρουν τον πιο αποτελεσματικό και οικονομικό τρόπο για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων σε σημαντικές αποστάσεις.

(ι) Το error rate ή αλλιώς ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων σε καλώδια οπτικών ινών είναι σε χαμηλά επίπεδα. Μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι είναι ο καλύτερος από τα ενσύρματα μέσα μετάδοσης κατά 3 τάξεις μεγέθους.

B. Μειονεκτήματα οπτικών ινών

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα, που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες, είναι η δυσκολία σύνδεσης των οπτικών ινών με άλλα εξαρτήματα, επειδή απαιτείται υψηλή προσαρμογή και ευθυγράμμιση της φωτεινής πηγής, για να μην υπάρχει διασπορά και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. Είναι χαρακτηριστικό ότι και μικρές ακόμη αποκλίσεις στην

ευθυγράμμιση αυτή μπορούν να προξενήσουν μεγάλη απώλεια του φωτεινού σήματος.

Όμως, η πρόοδος της τεχνολογίας, που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην περιοχή των οπτικών ινών, αντιμετώπισε με επιτυχία την παραπάνω δυσκολία, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση τους και για συνδέσεις σημείου προς πολλά σημεία. Παρόλα αυτά, η χρήση τους σε τέτοιες συνδέσεις δεν έχει ακόμη ευρέως εξαπλωθεί, ιδιαίτερα λόγω του αυξημένου κόστους, που παρουσιάζουν τέτοια συστήματα.

Επίσης αν και τα υλικά κατασκευής των οπτικών ινών είναι φθηνά, η διαδικασία παραγωγής τους παραμένει ακριβή αυξάνοντας το κόστος των οπτικών καλωδίων σε σχέση με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά. Επειδή οι γυμνές οπτικές ίνες είναι εύθραυστες απαιτούν προσεκτικό χειρισμό και ειδικές τεχνικές τερματισμού και συνδέσεων με εποξικές κόλλες και ηλεκτρική συγκόλληση.

Αν και οι οπτικές ίνες παρέχουν ένα αξιόλογο μέσο μετάδοσης απαιτούν πάντα τη μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος σε οπτικό και αντίθετα αυξάνοντας το κόστος του συστήματος λόγω των οπτοηλεκτρονικών πομποδεκτών. Οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν εκ κατασκευής μικρή εξασθένηση μόνο σε επιλεγμένα μήκη κύματος και όχι σε όλο το οπτικό φάσμα γεγονός που κάνει απαραίτητη την ανάπτυξη και κατασκευή οπτικών πομποδεκτών στα συγκεκριμένα μήκη κύματος.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες είναι:

- Αυξημένο κόστος
- Ειδικούς συνδετήρες
- Ειδικό χειρισμό
- Κόστος πομποδεκτών

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. Ελληνόγλωσση

1. GOVIND P. AGRAWAL, *Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες*, Εκδ. Τζιόλα, 2010.
2. P. ΝΙΣΟΠΟΛΙΤΙΔΗΣ-Μ. Σ. ΟΒΑΙΔΑΤ-Γ. Ι. ΠΑΡΑΔΙΜΙΤΡΙΟΥ-Α. Σ. ΡΟΜΠΟΡΤΣΙΣ, *Ασύρματα δίκτυα*, Εκδ. Κλειδάριθμος, 2010.
- 3 PAUL E. GREEN, *Δίκτυα οπτικών ινών*, Εκδ. Παπασωτηρίου, 1993.
4. Η. ΑΣΑΡΙΔΗΣ -Θ. ΚΑΠΟΥΡΝΙΩΤΗΣ -Σ. ΛΟΥΒΡΟΣ, *Οπτικά δίκτυα επικοινωνιών*, (Σημειώσεις εργαστηριακές), Ναύπακτος.
5. Θ. ΚΑΠΟΥΡΝΙΩΤΗΣ -Σ. ΛΟΥΒΡΟΣ, *Οπτικά δίκτυα επικοινωνιών*, (Σημειώσεις εργαστηριακές), Ναύπακτος.
6. Α. ΑΝΑΓΝΩΣΤΑΚΗ, *Τα Βασικά Δομικά Στοιχεία Ανάπτυξης της Τεχνικής Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM) στις Οπτικές Επικοινωνίες*, Λάρισα 2011.

B. Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία-Links

1. ΓΚΟΤΣΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ- ΠΟΥΛΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΑΝΝΗΣ, *Αξιολόγηση Τμήματος Μητροπολιτικού Δικτύου Οπτικών Ινών Πελοποννήσου, Μοντελοποίηση και Προτάσεις για Τυχόν Βελτιώσεις του*, Κρήτη 2010.
<http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/epp/2010/GkotsisStauros,PouloupoulosGiannis/attached-document-1266825675-584102-8088/Gotsis2010.pdf>

2. Π. ΚΡΑΝΙΤΗΣ, *Διαδικασίες ελέγχου και εφαρμογές διαχείρισης δικτύων οπτικών ινών*, Κρήτη 2009.

<http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/hlk/2009/KranitisPanagiotis/attached-document/2009kranitis.pdf>

3. Η. ΑΒΡΑΜΟΠΟΥΛΟΣ, *Συστήματα Μετάδοσης & Δίκτυα Οπτικών Ινών*

http://www.photonics.ece.ntua.gr/Diafaneies_Susthmata_metadoshs/Enotita_1a_OptikaSustimataMetadosis.pdf

4. Η. ΑΒΡΑΜΟΠΟΥΛΟΣ, *Συστήματα Μετάδοσης & Δίκτυα Οπτικών Ινών*

http://www.photonics.ntua.gr/Diafaneies_Susthmata_metadoshs/Enotita_2_DiadosiSelnes.pdf

5. Η. ΑΒΡΑΜΟΠΟΥΛΟΣ, *Φωτονική τεχνολογία για τηλεπικοινωνίες-Κυματοδότηση*.

http://www.photonics.ece.ntua.gr/phononiki_diafaneies_2008_2009/mathima02-kimatodigisi.pdf

6. Η. ΑΒΡΑΜΟΠΟΥΛΟΣ, *Φωτονική τεχνολογία για τηλεπικοινωνίες-Κυματοδότηση, Διασπορά II*.

http://www.photonics.ntua.gr/phononiki_diafaneies_2008_2009/mathima04_diasporaII.pdf

7. Η. ΑΒΡΑΜΟΠΟΥΛΟΣ, *Φωτονική τεχνολογία για τηλεπικοινωνίες-Κυματοδότηση, Διασπορά I*.

http://www.photonics.ece.ntua.gr/phononiki_diafaneies_2008_2009/mathima03_diasporaI.pdf

8. http://www.teiser.gr/icd/staff/chilas/files/Lab_DI/FO_FOA_forSite.pdf
9. http://www.eng.ucy.ac.cy/gellinas/LECTURE03_Greek.pdf
10. http://www.hep.upatras.gr/class/download/met_pli/optikes_ines.pdf
11. Μ. ΓΑΛΑΝΑΚΗΣ, *Χρήση OTDR & ενίσχυση Raman σε μητροπολιτικές ζεύξεις μονότροπων οπτικών ινών*, Πάτρα 2010.
http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/2566/3/Nimertis_Galanaki_s%28ele%29.pdf
12. Ε. ΖΕΚΟΥ,-ΙΩΑΝΝΗΣ ΒΑΜΒΑΚΑΣ- ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΗΤΣΟΥ, *Εφαρμογές οπτικών ινών: Εισαγωγή στις οπτικές τηλεπικοινωνίες, απλή ζεύξη πομπού-δέκτη με τη χρήση λογισμικού*.
http://physics.teiath.gr/physics/opto_lab_1a/pdf%20files/Optical%20Telecommunications.pdf
13. Α. ΤΣΙΡΙΤΑΣ, *Σύζευξη οπτικών ινών, σύστημα πολλαπλής ακτινοβολήσης για τη φωτοδυναμική κυκλοκαταστροφή*, Ηράκλειο 2005.
http://www.optics-vision.gr/files/items/2/29/tsiritas_antonios_2005.pdf
14. Ν. ΒΑΓΕΝΑΣ, *Μελέτη της επίδρασης διάφορων τύπων διαταραχών στην διάδοση οπτικών σολιτονίων*, Πάτρα 2010.
http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/3981/1/Nimertis_Vagenas.pdf
15. Χ. ΕΥΘΥΜΙΟΥ, *Εισαγωγή στις οπτικές επικοινωνίες*, Σέρρες 2011.
<https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCoQFjAA&url=http%3A%2F%2Fteiserron.gr%2Findex.php%3Faction%3Ddl>

attach%3Btopic%3D8699.0%3Battach%3D5380&ei=V2ArU4n-I-K47QakroHYDA&usg=AFQjCNHI2yWTAUnblbsHSJZ_M3xCI5hCLA&sig2=dx35ECLi3rq9YBxAkqI9cA

16. Κ. ΤΣΟΥΚΑΣ, *Μετρήσεις και προσομοίωση σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων*, Θεσσαλονίκη 2010.

<http://vivliothmyy.ee.auth.gr/682/1/%CE%94%CE%95-SONET-SDH.pdf>

17. Ι. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ, *Μελέτη Τηλεπικοινωνιακής κίνησης οπτικών δικτύων που χρησιμοποιούν τη πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση οπτικού κώδικα (OCDMA)*, Πατρα 2011.

[http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/4851/1/%CE%94%CE%99%CE%A0%CE%9B%CE%A9%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%97%20FINAL\(2\).pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/4851/1/%CE%94%CE%99%CE%A0%CE%9B%CE%A9%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%97%20FINAL(2).pdf)

18. Π. ΠΑΠΟΥΛΙΔΗΣ, *Fiber& Optics*.

<http://dide.flo.sch.gr/Seminars/Hmerida4-Ptol-Sept2006/Papoulidis.pdf>

19. Γ. ΨΩΜΑΔΕΛΛΗΣ, *Σχεδιασμός και ανάπτυξη συστήματος για την τεχνοοικονομική ανάλυση αυτόνομων γνωσιακών συστημάτων (οπτικών δικτύων)*, Πειραιάς 2011.

<http://digilib.lib.unipi.gr/dspace/bitstream/unipi/4104/1/Psomadellis.pdf>

20. Δ. ΣΥΒΡΙΔΗΣ, *Οπτικές επικοινωνίες και οπτικά OTDR Fusion Splicer*, Αθήνα 2004.

http://dsyvrdis.dep.di.uoa.gr/notes/OTDR_Fusion_Splicer.pdf