

Τ.Ε.Ι Μεσολογγίου
Παράρτημα Ναυπάκτου
Τμήμα Τηλεπικοινωνιακών
Συστημάτων & Δικτύων

Θεωρητική Ανάλυση & Πραγματικές Μετρήσεις Σε Δίκτυο Οπτικής Μετάδοσης



Σπουδάστρια: Βραδέλη Ευδοκία
Εισηγητής: Λούβρος Σπύρος
Τ.Ε.Ι Μεσολογγίου Παράρτημα
Ναυπάκτου Τμήμα Τηλεπικοινωνιακών
Συστημάτων & Δικτύων

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	3
Γενικά για τις ίνες.....	3
1.1 Ιστορικά	3
1.2 Οπτικές ίνες.....	4
1.3 Λειτουργία οπτικών ινών:.....	6
1.5 Χαρακτηριστικά μεγέθη οπτικών ινών:	9
1.6 Είδη οπτικών ινών	11
1.7 Καλώδια οπτικών ινών.....	11
Κεφάλαιο 2	15
Μετάδοση πληροφορίας στην ίνα	15
2.1 Αρχές μετάδοσης μέσω των οπτικών ινών:	15
2.2 Βασική εξίσωση μετάδοσης.....	18
Κεφάλαιο 3	21
Λόγοι εξασθένησης στην ίνα	21
3.1 Απώλειες στις οπτικές ίνες:.....	21
3.2 Εξασθένηση:.....	23
3.3 Σκέδαση	27
3.4 Απορρόφηση.....	28
3.5 Διασπορά.....	29
Κεφάλαιο 4	42
Συνδέσεις οπτικών ινών-OTDR	42
4.1 Συνδέσεις	42
4.2 Συγκολλήσεις ινών:.....	43
4.3 Μέθοδος μετρήσεων:.....	48
4.4 Όργανο μετρήσεων OTDR.....	49
4.5 Αρχή λειτουργίας του OTDR.....	50
4.6 Ρυθμίσεις ενός OTDR.....	53
Κεφάλαιο 5	56
Περιγραφή –Διαδικασία Μετρήσεων	56
Κεφάλαιο 6	71
Μετρήσεις Οπτικών Ινών.....	71
Κεφάλαιο 7	90
Συμπεράσματα.....	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	91

Ευχαριστίες

Η πτυχιακή αυτή εργασία μου έδωσε την δυνατότητα να διευρύνω τους ορίζοντες μου στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών.

Θέλω να ευχαριστήσω για αυτήν την ευκαιρία τον κύριο Λούβρο Σπύρο , καθηγητή του τμήματος Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων Και Δικτύων που δέχτηκε την εποπτεία της πτυχιακής εργασίας μου διαθέτοντας τον χρόνο του και προσφέροντας μου τις γνώσεις του.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, προπάντων, για την δυνατότητα που μου προσέφεραν να πραγματοποιήσω τις σπουδές μου με κάθε πολυτέλεια και τη συμπαράσταση που μου έδειξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας.

Από τις ευχαριστίες δεν θα μπορούσα να παραλείψω τα άτομα του φιλικού μου περιβάλλοντος, οι οποίοι με στήριξαν ψυχολογικά και ανέχτηκαν την απουσία μου για αξιόλογο χρονικό διάστημα.

Κεφάλαιο 1

Γενικά για τις ίνες

1.1 Ιστορικά

Η υψηλή συχνότητα του φωτός που χρησιμοποιείται στις οπτικές επικοινωνίες παρέχει τη δυνατότητα ενός τεράστιου εύρους συχνοτήτων. Το αποτέλεσμα είναι η μεταφορά πολλών χιλιάδων φορέων περισσότερης πληροφορίας σε σύγκριση με αυτή που διαβιβάζεται στα συμβατικά συστήματα που μας προσφέρει το ηλεκτρικό ρεύμα.

Για πολλούς αιώνες οι επικοινωνίες για μεγάλες αποστάσεις γινόταν διαβιβάζοντας οπτικά σήματα με φωτιές λαμπτήρες και αναλαμπές κατόπτρων. Το 1854 ο Άγγλος φυσικός John Tydall διατύπωσε την αρχή της ολικής εσωτερικής ανάκλασης σύμφωνα με την οποία το φως που διαδίδεται μέσα σε ένα πυκνό οπτικό μέσο δεν είναι δυνατόν να διαφύγει προς ένα λιγότερο πυκνό μέσο αν οι γωνίες προσέγγισης των ακτινών στη διαχωριστική επιφάνεια των μέσων είναι αρκετά μικρές. Με τα εκτεταμένα πειράματά του απέδειξε πως σύμφωνα με την αρχή της ολικής εσωτερικής ανάκλασης οι εισερχόμενες φωτεινές ακτίνες διαδίδονται με ανακλάσεις στα όρια δυο υλικών (νερό-αέρας) ως την άλλη άκρη του οπτικού αγωγού.

Ο Alexander Graham Bell το 1880 μελέτησε τη δυνατότητα μεταφοράς της φωνής πάνω σε μια ακτίνα φωτός με μια συσκευή την οποία ονόμασε φωτο-τηλέφωνο.

Κατά τη διάρκεια του 1950 οι Van Heel, Hopkins και Karany ανέπτυξαν το ευέλικτο οπτοσκόπιο με οπτική φίβρα. Την ίδια εποχή ο Karany ανέπτυξε μια πρακτική γυάλινη φίβρα με ένα είδος επιχρίσματος και ο όρος fiber optics χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά. Στη συνέχεια άρχισε μια εκτεταμένη έρευνα πάνω στις οπτικές ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης και το 1966 οι K.K.Kao και Hockman ερευνητές στην εταιρία Standard Telecommunications Laboratories της Αγγλίας πρότειναν πως

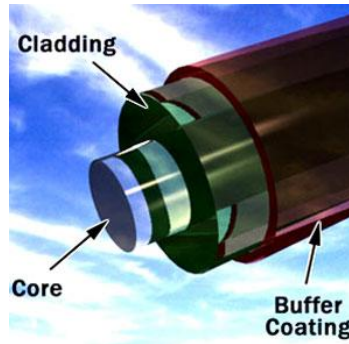
αυτός ο τύπος οπτικής ίνας θα ήταν δυνατό να αποτελέσει τη βάση ενός νέου τηλεπικοινωνιακού μέσου. Το 1960 έγινε η εισαγωγή του laser έγινε η έναρξη για την έρευνα μια συνεχούς έρευνας στις οπτικές επικοινωνίες. Με τη χρήση του laser δημιουργήθηκε μεγάλο εμπόδιο λόγω του ότι υπήρχε μεγάλη εξασθένιση που εμφανιζόταν στη φασματική περιοχή του ορατού και του υπέρυθρου όπου είναι και ο φυσιολογικός χώρος του laser. Όσον αφορά τη διάδοση φωτός μέσω κυματοδηγικής διάταξης που είναι η οπτική ίνα σαν ιδέα δεν ήταν καθόλου προσβάσιμη καθώς οι απώλειες ήταν πολύ μεγάλες (1000 db/Km).

1.2 Οπτικές ίνες

Οι οπτικές ίνες είναι εξαιρετικά πολύ λεπτά νήματα και κατασκευάζονται από μεγάλης καθαρότητας είδος γυαλί το Οξειδίο του πυριτίου (SiO_2). Η οπτική ίνα είναι ένα κυλινδρικός κυματοδηγός από γυαλί ή πλαστικό μέσα στο οποίο διαδίδεται φως σε αντίθεση με τους κοινούς μεταλλικούς αγωγούς όπου διαδίδονται ηλεκτρόνια. Το φως είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παρόμοια με τα ραδιοκύματα με τη διαφορά ότι έχει υψηλότερη συχνότητα. Σκοπός των οπτικών ινών είναι να μεταφέρουν το φως από τον πομπό στο δέκτη. Τα σήματα φωτός αντιπροσωπεύουν τα ηλεκτρικά σήματα τα οποία εμπεριέχουν βίντεο, ήχο και πληροφορίες δεδομένων σε συνδυασμούς.

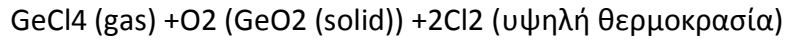
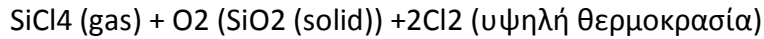
Η ίνα αποτελείται από τρεις περιοχές. Τον πυρήνα, το περίβλημα και τον μανδύα ή απομονωτή. Ο πυρήνας βρίσκεται στο κέντρο της ίνας και είναι και η περιοχή η οποία μεταφέρει το φως. Η διάμετρος της κυμαίνεται από τα 9 έως τα 100 μικρόμετρα το περίβλημα είναι το τμήμα εκείνο που περιβάλλει τον πυρήνα. Έχει διάμετρο 125 ή 140 μικρόμετρα.

Σχεδιαστικό χαρακτηριστικό της οπτικής ίνας είναι ότι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι υψηλότερος από το δείκτη διάθλασης του περιβλήματος. Και ο πυρήνας και το περίβλημα είναι μίγματα από υλικά γυαλιού.



Υπάρχουν είδη οπτικών ινών που ενσωματώνουν και χαλαζία ή καθαρή τιγμένη σιλικόνη και πλαστικό που όμως δεν χρησιμοποιούνται στις υψηλής ποιότητας εφαρμογές. Η εξωτερική περιοχή της ίνας είναι ο μανδύας ή απομονωτής. Ο μανδύας είναι ένα πλαστικό υλικό το οποίο προστατεύει και διατηρεί την αντοχή του γυαλιού της ίνας. Ο μανδύας τυπικά έχει διάμετρο 250,500 και 900 μικρόμετρα. Έτσι προστατεύεται από ατυχήματα όπως κοψίματα ή γρατζουνιές που μπορούν να δημιουργηθούν στη επιφάνεια του πυρήνα με αποτέλεσμα το φως να διαφεύγει από τα σημεία αυτά και επιφανειακές μολύνσεις όπως από λίπος. Το λίπος έχει δείκτη διάθλασης παρόμοιο με αυτό του γυαλιού. Συνέπεια αυτού είναι να δημιουργούνται μικρές και τυχαίες διασκορπισμένες επιφάνειες που εμφανίζονται σαν προέκταση του πυρήνα προκαλώντας σκέδαση του φωτός στα συγκεκριμένα σημεία. Το περίβλημα έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα της οπτικής ίνας. Όταν το φως διαδίδεται σε κάποιο μέσο δεν είναι δυνατόν να διαφύγει σε μέσο που είναι λιγότερο πυκνό εφόσον η γωνία πρόσπτωσης στη διαχωριστική τους επιφάνεια είναι αρκετά μεγάλη. Η γωνία πρόσπτωσης ορίζεται η γωνία μεταξύ της φωτεινής ακτίνας και της καθέτου στην επιφάνεια που διαχωρίζει τον πυρήνα από το περίβλημα. Η γωνία πρόσπτωσης θα πρέπει να είναι πιο μεγάλη από την κρίσιμη γωνία. Έτσι η κάθε ακτίνα που εισέρχεται στον πυρήνα της ίνας και συναντάει τη διαχωριστική επιφάνεια με γωνία μεγαλύτερη από αυτή της κρίσιμης γωνίας θα εξέρχεται από την οπτική ίνα μόνο όταν φτάνει στο άλλο άκρο της. Η διάδοση του φωτός μέσα στην ίνα επιτυγχάνεται με διαδοχικές ανακλάσεις στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα περιβλήματος της ίνας.

Η βασική χημική αντίδραση από την οποία παράγεται το οπτικό γυαλί είναι:



1.3 Λειτουργία οπτικών ινών:

Κατά την επινόηση των καλωδίων οπτικών ινών οι κατασκευαστές τους είχαν ένα σημαντικό στόχο. Να μην υπάρχει διαρροή φωτός στο εξωτερικό ενός καλωδίου κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια δεδομένων και πολλά ακόμη προβλήματα. Για το λόγο αυτό έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος ώστε όλη η φωτεινή ενέργεια να παραμένει στο εσωτερικό του καλωδίου και να φτάνει δίχως εξασθένιση στον προορισμό της. Η αρχή λειτουργίας ενός οπτικού καλωδίου είναι η ολική εσωτερική αντανάκλαση και βασίζεται στο γεγονός ότι όταν το φως αντανακλάται εξ' ολοκλήρου σε έναν κλειστό εσωτερικό χώρο μπορεί να ταξιδέψει σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να μειωθεί η ένταση του.

Ως εκ τούτου σε ένα οπτικό καλώδιο η δεσμίδα των οπτικών ινών περικλείεται σε ειδικό υλικό που αντανακλά εσωτερικά όλο το φως εξασφαλίζοντας έτσι δύο πράγματα.

α) την ολική εσωτερική αντανάκλαση, που θα επιτρέψει στην πληροφορία να φτάσει αναλλοίωτη σε μεγάλες αποστάσεις

β) την αποφυγή διαρροής φωτός στο εξωτερικό του καλωδίου.

Για το λόγο αυτό το φως διοχετεύεται στο εσωτερικό της οπτικής ίνας υπό συγκεκριμένη γωνία ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη αντανάκλαση που θα αποτρέψει τη διαρροή φωτεινής ενέργειας. Μέχρι να φτάσει στον προορισμό της η φωτεινή δέσμη συνήθως πραγματοποιεί χιλιάδες ή και εκατομμύρια αντανακλάσεις στο εσωτερικό της οπτικής ίνας.

Πάντως οι απώλειες ισχύος της φωτεινής ενέργειας, είναι σε κάθε περίπτωση αναπόφευκτες ακόμη και κατά την ολική εσωτερική αντανάκλαση του φωτός και παρατηρούνται κυρίως κατά τη μετάδοση των δεδομένων σε αποστάσεις πολλών

χιλιομέτρων. Αυτό οφείλεται σε μικρές απώλειες του μέσου μεταφοράς που δεν είναι άλλο από το γυαλί. Η καθαρότητα του τελευταίου δεν φτάνει ποτέ το 100% με αποτέλεσμα η ισχύς του φωτός να εξασθενεί. Ανάλογα με το πάχος του καλωδίου οι απώλειες μπορούν να φτάσουν ακόμη και το 20% ανά χιλιόμετρο, ωστόσο με κάποια σύγχρονα καλώδια έχουν μειωθεί στο 5-10%.

1.4 Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα οπτικών ινών:

Η υψηλή διεύθυνση της τεχνολογίας των οπτικών ινών στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες δεν είναι τυχαία, αλλά αντίθετα οφείλεται στο μεγάλο αριθμό των πλεονεκτημάτων της, τα οποία συνοψίζονται στα εξής:

- 1) Χαμηλό κόστος: η δημιουργία ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά σε σχέση με ένα χάλκινο καλώδιο ίδιας απόστασης και δυνατοτήτων. Αυτό ωφελεί αρχικά τους παρόχους υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών οι οποίοι με μικρότερο κόστος παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες. Τελικά αυτό μειώνει και τις ανάγκες απόσβεσης εξόδων των παρόχων επομένως ωφελεί και τον καταναλωτή που επιβαρύνεται με μικρότερες χρεώσεις για τις υπηρεσίες που χρησιμοποιεί.
- 2) Υψηλό bandwidth: το οποίο ξεπερνά κατά εκατοντάδες φορές αυτό του κοινού καλωδίου. Οι υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων εξασφαλίζουν ταχύτητες της τάξεως των Gbps που με της σειρά τους προσφέρουν αστραπιαία διαμεταγωγή δεδομένων και αξιόπιστες υπηρεσίες τηλεφωνίας μέσω πρωτοκόλλου IP.
- 3) Μικρή εξασθένηση του σήματος, χάρη στην υψηλή ποιότητα του γυαλιού που χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης. Ακόμα και αν υπάρξει εξασθένηση σήματος αυτό ενισχύεται πολύ εύκολα μέσω των κατάλληλων ενισχυτών.
- 4) Μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια: αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές απώλειες σήματος καθώς και στον τρόπο μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή με τη χρήση φωτεινής δέσμης που απαιτεί πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με το ηλεκτρικό σήμα.

- 5) Αμιγώς ψηφιακό σήμα που εξασφαλίζει υψηλότερη ποιότητα επικοινωνίας και αποφυγή προβλημάτων που θα προέκυπταν σε μία αναλογική μετάδοση. Στον κόσμο της ψηφιακής πληροφορίας τα δεδομένα αναπαρίστανται από τους αριθμούς 0 και 1 οι οποίοι ονομάζονται bits. Το 0 ισοδυναμεί με την κατάσταση κλειστό και το 1 με την κατάσταση ανοιχτό. Μια ακολουθία 8 bits σχηματίζουν ψηφιακή λέξη η οποία λέγεται byte ή octet. Οι οπτικές ίνες μεταδίδουν τις φωτεινές αναλαμπές με υψηλή αξιοπιστία μεταφέροντας τα bytes με πολύ μικρότερες αλλοιώσεις σε σχέση με αυτές ενός κοινού καλωδίου δικτύου ή μιας ασύρματης σύνδεσης δεδομένων.
- 6) Υψηλή διαθεσιμότητα: που οφείλεται κυρίως στην ανθεκτική κατασκευή των σύγχρονων οπτικών καλωδίων που μειώνει στο ελάχιστο το ενδεχόμενο εξωτερικής ζημιάς.
- 7) Μικρές διαστάσεις και βάρος, καθώς ένα μικρό και ελαφρύ καλώδιο οπτικών ινών μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα από ένα μεγάλο και βαρύ χάλκινο καλώδιο. Έτσι απαιτείται πολύ λιγότερος χώρος για την υλοποίηση ενός δικτύου οπτικών ινών.
- 8) Είναι ανεπηρέαστες από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία και ως εκ τούτου συνίσταται η χρήση τους σε βιομηχανικούς χώρους με υψηλό περιβάλλον θορύβου.
- 9) Χαμηλός ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων
- 10) Επειδή δεν μεταφέρει ηλεκτρικό σήμα προτιμάται σε περιοχές υψηλού κινδύνου εκρήξεων από σπινθήρες (χώροι καυσίμων, εύφλεκτων αερίων, κτλ)
- 11) Είναι ασφαλές μέσο καθώς είναι πολύ δύσκολο κάποιος να παρέμβει για να αποβλέψει ή να παρεμβάλλει την πληροφορία.

Στα μειονεκτήματα των οπτικών ινών καταλογίζονται κύρια το υψηλό κόστος τους αλλά και οι δύσκολοι τρόποι σύνδεσης προσαρμογής και ευθυγράμμισης της κάθε οπτικής ίνας ούτως ώστε το φως σαν φορέας μετάδοσης της πληροφορίας να μην αποκλίνει γιατί ακόμα και πολύ μικρές αποκλίσεις των βυσμάτων σύνδεσης

προξενούν διασπορά και απώλεια σήματος. Ακόμα παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ευαισθησία σε μηχανικές καταπονήσεις (τραντάγματα, κρούσεις, τραβήγματα).

1.5 Χαρακτηριστικά μεγέθη οπτικών ινών

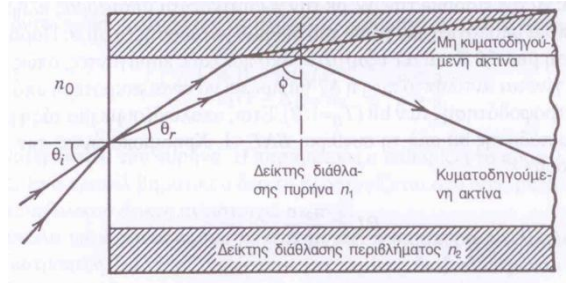
Στα χαρακτηριστικά μεγέθη μιας οπτικής ίνας εμπεριέχονται η διάμετρος του πυρήνα, το πάχος του πυρήνα και του περιβλήματος, η γωνία και ο κώνος αποδοχής, το αριθμητικό άνοιγμα (NA) καθώς επίσης και ο αριθμός των ρυθμών μετάδοσης του φωτός. Η διάμετρος πυρήνα για ίνα κατασκευασμένη από γυαλί είναι 0,4 μm έως 6,25 μm . Οι πιο συνηθισμένες τιμές διαμέτρων είναι 6,25 μm και 125 μm . Η διάμετρος των πλαστικών ινών είναι συνήθως 1 μm . Το πάχος του περιβλήματος μπορεί να είναι από μερικά έως μερικές εκατοντάδες μm , μπορεί να αποτελείται από γυαλί ή από κάποιο είδος σιλικόνης βασική προϋπόθεση όμως είναι να έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από το δείκτη του πυρήνα. Η γωνία και ο κώνος αποδοχής καθορίζουν μαζί με το αριθμητικό άνοιγμα την ικανότητα συλλογής οπτικής ισχύος από την ίνα. Σαν γωνία αποδοχής ορίζουμε οποιαδήποτε γωνία μετρούμενη από τη διαμήκη κεντρική γραμμή έως την πιο ακραία ακτίνα πρόσπτωσης που είναι ικανή και αποδεκτή για μετάδοση πληροφοριών μέσα στην ίνα. Κώνος αποδοχής είναι ο κώνος του οποίου η γωνία είναι ίση με το διπλάσιο της γωνίας αποδοχής. Το αριθμητικό άνοιγμα (NA) εκφράζει την ικανότητα της συλλογής οπτικής ισχύος από την οπτική ίνα. Αυτή παράμετρος ορίζεται από την σχέση:

$$NA = \sin\theta \quad , \text{ όπου } \theta \text{ είναι η γωνία αποδοχής}$$

Ακτίνες με γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη από αυτή της γωνίας αποδοχής δεν διαδίδονται μέσα στην οπτική ίνα. Εφόσον πολλές πηγές φωτός εκπέμπουν σε μία πλατιά τάξη γωνιών συμπεραίνουμε πως ίνες με μεγαλύτερο αριθμητικό άνοιγμα NA συλλέγουν και μεγαλύτερο τμήμα αυτού του φωτός. Γενικότερα το φως που εισέρχεται από μια φωτεινή πηγή μέσα σε μία οπτική ίνα εξαρτάται από το λόγο των διαμέτρων της πηγής της οπτικής ίνας. Η σχέση που μας δίνει το αριθμητικό άνοιγμα για ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης είναι:

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

Όπου n_1 n_2 είναι οι δείκτες διάθλασης του πυρήνα και του περιβλήματος αντίστοιχα.



Το φως μπορεί να μεταδοθεί μέσα στην οπτική ίνα κατά μήκος με ένα πλήθος διαφορετικών διαδρομών οι οποίες ξεκινούν από μια που είναι παράλληλη με τον άξονα της ίνας μέχρι εκείνες που μεταδίδονται με γωνίες πολύ κοντά στην κρίσιμη γωνία και με πολλές άλλες διαδρομές μεταξύ των δύο ακραίων αυτών τιμών. Ωστόσο όπως θα περίμενε κανείς για άπειρους ρυθμούς η αλήθεια είναι ότι είναι πεπερασμένοι και μπορούν να εξηγηθούν με βάση τη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Κάθε διαδρομή διαφορετικής γωνίας ονομάζεται ρυθμός μετάδοσης. Είναι φανερό πως μια ακτίνα φωτός που εισέρχεται στην ίνα με γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη από αυτή της κρίσιμης εξέρχεται από αυτήν πολύ γρηγορότερα από μία ακτίνα φωτός με γωνία πρόσπτωσης που είναι κοντά στην κρίσιμη γωνία. Έτσι ένας μικρός παλμός φωτός που αποτελείται ταυτόχρονα από πολλούς ρυθμούς θα φτάσει στην έξοδο διασκορπισμένος σε μία εκτεταμένη χρονικά περίοδο. Συνέπεια αυτού είναι τα μεταδιδόμενα σήματα να λαμβάνονται στην έξοδο σε μη διακριτή μορφή και με μειωμένο πλάτος λόγω της εξάπλωσης που υφίσταται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ενδορυθμική διασπορά και είναι ανεπιθύμητη στις τηλεπικοινωνίες. Μπορεί να επιλυθεί με χρήση οπτικών ινών βαθμιαίου δείκτη διάθλασης. Ο αριθμός των ρυθμών μετάδοσης που είναι επιτρεπτοί σχετίζεται με το αριθμητικό άνοιγμα NA της ίνας τη διάμετρο d του πυρήνα και το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου φωτός λ .

1.6 Είδη οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες κατηγοριοποιούνται ως προς:

- α) το υλικό κατασκευής του πυρήνα και του μανδύα
- β) τη μεταβολή του δείκτη διάθλασης
- γ) το πλήθος των τρόπων μετάδοσης που υποστηρίζουν

Όσον αφορά το υλικό κατασκευής οι οπτικές ίνες έχουν τις εξής κατηγορίες:

Εξ ολοκλήρου γυάλινες οπτικές ίνες: αποτελούν το περισσότερο διαδεδομένο είδος οπτικών ινών. Τόσο ο πυρήνας όσο και ο μανδύας είναι φτιαγμένα από γυαλί όπου εμπορική ονομασία είναι quartz, το οποίο γυαλί είναι υψηλής καθαρότητας σε διοξείδιο του πυριτίου στο οποίο έχουν γίνει οι κατάλληλες προσμίξεις ώστε να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη διαφορά στο συντελεστή διάθλασης πυρήνα και μανδύα. Οι τύποι προσμίξεων είναι οι εξής: το γερμάνιο και ο φώσφορος που βρίσκονται στον πυρήνα με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο συντελεστής διάθλασης του γυαλιού αλλά και το βόριο και το φθόριο που χρησιμοποιούνται κυρίως στο μανδύα μειώνοντας το συντελεστή διάθλασης του γυαλιού.

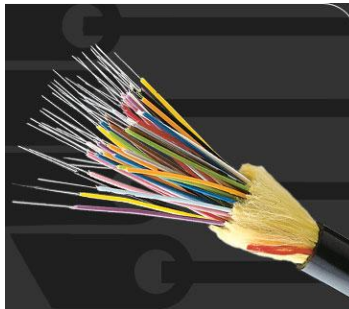
Ίνες γυάλινου πυρήνα και πλαστικού μανδύα: χρησιμοποιούνται κυρίως για μεταφορά φωτός και εικόνας σε μικρές αποστάσεις σε εξειδικευμένες εφαρμογές.

Εξ ολοκλήρου πλαστικές ίνες: σε σύγκριση με τα άλλα είδη ινών εμφανίζουν κατώτερες επιδόσεις ως προς την ελάχιστη εξασθένιση (0,15 db/m στα 650nm) και το διαθέσιμο εύρος ζώνης καθώς και μεγάλη ευαισθησία σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Η εφαρμογή τους εκτείνεται σε τοπικά δίκτυα και εσωτερικές καλωδιώσεις κτιρίων.

1.7 Καλώδια οπτικών ινών

Ως καλώδιο εννοούμε την δομή που περικλείει μια ή περισσότερες οπτικές ίνες ώστε να διασφαλιστούν οι λειτουργικές επιδόσεις τους στο περιβάλλον λειτουργίας

τους όσο το δυνατόν περισσότερο. Τα καλώδια θα πρέπει να αντέχουν σε όλες τις πιθανές συνθήκες που θα προκύψουν κατά την αποθήκευσή τους, την εγκατάστασή τους, τη λειτουργία τους καθώς είναι πολύ πιθανό να εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες από ηλιακή ακτινοβολία έως ψύχος βροχή και υγρασία. Επίσης κατά την εγκατάστασή τους υφίσταται κάμψη, στρέψη και εφελκυσμό. Όταν γίνει η εγκατάσταση και προκύψει η χαλάρωση των τάσεων του καλωδίου, η δομή του δέχεται ακόμα τις επιδράσεις της υγρασίας της θερμοκρασιακής κύκλωσης, των περιβαλλοντικών μεταβολών αλλά και επιθέσεις από μύκητες και αρουραίους. Έτσι οι ίνες που βρίσκονται μέσα στο καλώδιο θα πρέπει να παραμείνουν άθικτες και προστατευμένες για να συνεχίσουν την ομαλή λειτουργία τους χωρίς να υπάρξει κάμψη της επίδοσής τους. Γενικότερα, τα καλώδια των οπτικών ινών χωρίζονται στις εξής δύο κατηγορίες: καλώδια χαλαρής δομής και καλώδια σφικτής δομής. Οι όροι χαλαρή και σφικτή αναφέρονται στη δομή του σωλήνα όπου μέσα τοποθετείται η οπτική ίνα για να προστατεύεται.



Καλώδια χαλαρής δομής: σε αυτά τα καλώδια οι ίνες τοποθετούνται χαλαρά μέσα στο σωλήνα. Κάθε σωλήνας έχει εξωτερική διάμετρο από 2-3 mm και μπορεί να έχει από 2 έως και 12 οπτικές ίνες, σε χαλαρή διάταξη. Ο σωλήνας εσωτερικά έχει μια μορφή gel για να εμποδίζεται η εισροή νερού που μπορεί είτε παγώνοντας να προκαλέσει μικροκάμψεις είτε να ελευθερωθεί υδρογόνο, και έτσι να προκύψει βαθμιαία αύξηση των απωλειών στην ίνα. Ο σωλήνας χαλαρής δομής απομονώνει τις οπτικές ίνες από την επίδραση των εξωτερικών μηχανικών τάσεων που ασκούνται στο καλώδιο. Το μήκος των οπτικών ινών μέσα στο σωλήνα είναι μεγαλύτερο του μήκους του καλωδίου για το λόγω του ότι το καλώδιο και οι σωλήνες του να υφίστανται εφελκυσμό κατά την εγκατάστασή τους κυρίως σε

υπόγειες σωληνώσεις χωρίς να ασκείται κάποιο φορτίο πάνω στις ίνες. Η διαφορά αυτή σε μήκος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη διάρκεια μετρήσεων με OTDR ώστε να καθοριστεί το ακριβές μήκος του καλωδίου.

Καλώδια σφικτής δομής: τα καλώδια σφικτής δομής περιλαμβάνουν ένα αριθμό από ίνες σε ανεξάρτητους σωλήνες γύρω από ένα κεντρικό στοιχείο μηχανικής ενίσχυσης και ένα συνολικό προστατευτικό μανδύα. Κάθε σωλήνας έχει εξωτερική διάμετρο 900μm και περιβάλλει σφικτά την οπτική ίνα που καλύπτεται με μια διάμετρο της τάξεως των 250 μm. Ο σωλήνας προστατεύει την οπτική ίνα από τους εξωτερικούς παράγοντες που υπάρχουν στο περιβάλλον. Λόγω της σφικτής δομής επιτρέπει τον άμεσο τερματισμό της οπτικής ίνας σε κατάλληλο σύνδεσμο, χωρίς να υπάρχει προϋπόθεση για σύνδεση με προ-τερματισμένη ουρά του καλωδίου για συνένωση. Για εσωτερική χρήση η πρακτική αυτή μπορεί να ελαττώσει το κόστος εγκατάστασης όσο και τις απώλειες που προκύπτουν από τις συγκολλήσεις οπτικών ινών. Λόγω όμως της σφικτής δομής στο σωλήνα το καλώδιο είναι πιο ευαίσθητο σε φορτίο εφελκυσμού και σε απώλειες από μικροκάμψεις. Τα καλώδια σφικτής δομής είναι πιο εύκαμπτα και επιτρέπουν μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας από τα αντίστοιχα αυτά της χαλαρής δομής. Η διατομή τους είναι πιο μεγάλη από τα αντίστοιχα καλώδια χαλαρής δομής, και η χωρητικότητά τους σε σπάνιες περιπτώσεις ξεπερνά τις 24 ίνες.

Υλικά καλωδίων: ο εξωτερικός μανδύας έχει πάχος μεγαλύτερο των 2 mm και σκοπός του είναι να προστατεύει τον καλωδιακό πυρήνα από εξωτερικές επιδράσεις. Μπορεί να είναι από πολυαιθυλένιο, πολυουρεθάνη, χλωριούχο πολιβινυλιοέχοντας ατσάλινη θωράκιση ή σπλισμό χαλύβδινου πτυχωτού σωλήνα ίνες αραμίδης και άλλα υλικά ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για χρήση σε εξωτερικό χώρο. Σε περίπτωση εσωτερικής χρήσης ο εξωτερικός μανδύας πρέπει να είναι από βραδύκαυστο υλικό χαμηλού καπνού και να μην περιλαμβάνει αλογόνα.

Κατάταξη των καλωδίων ανάλογα με το είδος της εφαρμογής: ανάλογα με το είδος της εφαρμογής τα ινοοπτικά καλώδια κατατάσσονται σε: εναέρια, υπόγεια άμεσης ταφής, υπόγεια σωληνώσεως, υποβρύχια και εσωτερικής χρήσης.

Εναέρια: καλώδια που κρέμονται από τηλεφωνικούς στύλους και αποτελούν λύση χαμηλού κόστους.

Υπόγεια άμεσης ταφής: καλώδια που θάβονται κατευθείαν στο έδαφος.

Υπόγεια σωληνώσεως: καλώδια που τοποθετούνται σε πλαστικές σωληνώσεις με εφελκυσμό ή τεχνική εμφύσησης αέρα.

Υποβρύχια: χρησιμοποιούνται για υποθαλάσσιες ζεύξεις.

Εσωτερικής χρήσης: για χρήση σε τηλεπικοινωνιακά ή εμπορικά κτίρια. Φέρουν εξωτερικό μανδύα από υλικό βραδύκαυστο χαμηλής εκπομπής καπνού και χωρίς αλογόνα. Για εσωτερική καλωδίωση χρησιμοποιούνται καλώδια με καλωδιακό πυρήνα σφικτής δομής.

Ανάλογα με το είδος του οπλισμού τους τα ινοοπτικά καλώδια κατατάσσονται σε:

Εξ' ολοκλήρου διηλεκτρικά. Δεν φέρουν μεταλλικά στοιχεία και χρησιμοποιούνται σε κεραυνόπληκτες περιοχές ή σε διαδρομές που είναι παράλληλες με γραμμές υψηλής τάσης σε μεγάλο μήκος.

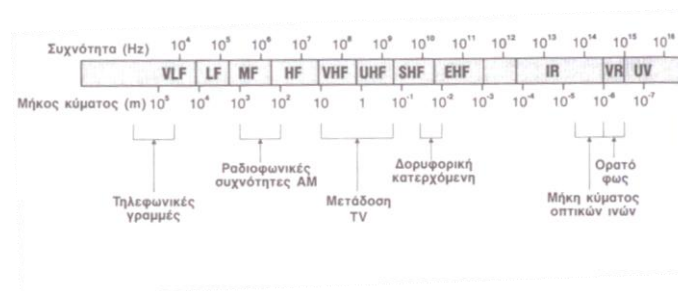
Θωρακισμένα. Φέρουν μεταλλικό οπλισμό που ανάλογα με το είδος της εφαρμογής μπορεί να είναι ταινία αλουμινίου πτυχωτός χαλύβδινος μανδύας, ένα ή περισσότερα πλέγματα από ατσάλοσυρμα. Η μεταλλική θωράκιση πρέπει πάντα να γειώνεται ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να διασφαλίζεται η συνέχεια της σε όλη τη διαδρομή.

Κεφάλαιο 2

Μετάδοση πληροφορίας στην ίνα

2.1 Αρχές μετάδοσης μέσω των οπτικών ινών

Τα εξαρτήματα των οπτικών ινών μεταφέρουν πληροφορία μετατρέποντας τα ηλεκτρονικά σήματα σε φως. Το φως αφορά το μεγαλύτερο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος το οποίο είναι ορατό στο ανθρώπινο μάτι. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αποτελείται από το ορατό και το κοντινό υπέρυθρο φως όπως αυτό μεταδίδεται από την ίνα και όλα τα άλλα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση σημάτων.



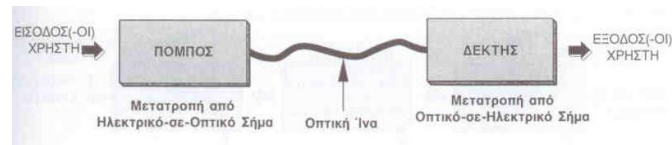
Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Με τον όρο μήκος κύματος εννοούμε την αναφορά στο κύμα σαν ιδιότητα του φωτός ως δηλαδή ένα χαρακτηριστικό που συμμετέχει σε όλα τα είδη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αναφέροντας την έννοια μήκος κύματος εννοούμε την μέτρηση της απόστασης που καλύπτει σε ένα και μόνο κύκλο το ηλεκτρομαγνητικό κύμα καθώς ταξιδεύει σε ένα πλήρη κύκλο.

Για τις οπτικές ίνες το μήκος κύματος μετριέται σε nm., και χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: το κοντινό υπέρυθρο και το ορατό φως. Το ορατό φως όπως προσδιορίζεται από το ανθρώπινο μάτι είναι από 400 έως 700nm, αλλά έχει πολύ περιορισμένες χρήσεις έως και καθόλου στις εφαρμογές των οπτικών ινών καθώς υπάρχει μεγάλη οπτική απώλεια. Τα μήκη του κοντινού υπέρυθρου κοντινού

κυμαίνονται από τα 700 έως τα 2000nm, και είναι τα μήκη κύματος τα οποία χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντα στα συστήματα οπτικών ινών.

Οι συνδέσεις των οπτικών ινών περιέχουν τρία βασικά στοιχεία: τον πομπό, ο οποίος επιτρέπει την είσοδο και την έξοδο των δεδομένων ενός οπτικού σήματος, την οπτική ίνα η οποία μεταφέρει τα δεδομένα και τέλος ο δέκτης που αποκωδικοποιεί το οπτικό σήμα καθώς εξάγονται τα δεδομένα.



Τα στοιχεία ενός συστήματος οπτικών ινών

Αναλυτικότερα για τα τρία αυτά στοιχεία για τις συνδέσεις των οπτικών ινών.

Ο πομπός χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενδοεπικοινωνία (βίντεο, ήχο, δεδομένα) είτε άλλους τύπους ηλεκτρικών εισόδων για να κωδικοποιήσουν τις πληροφορίες του χρήστη μέσω της διαδικασίας της διαμόρφωσης. Τα τρία είδη της διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται είναι η διαμόρφωση κατά πλάτος, η διαμόρφωση συχνότητας και η ψηφιακή διαμόρφωση. Η ηλεκτρική έξοδος του διαμορφωτή μετατρέπεται σε φως ή από μια δίοδο εκπομπής φωτός ή από μια δίοδο laser. Ο προσδιορισμός για τα μήκη κύματος για τις συγκεκριμένες πηγές φωτός είναι από 660 έως 1550nm.



Πομπός οπτικών ινών

Ο δέκτης αποκωδικοποιεί τα σήματα φωτός σε ηλεκτρικά σήματα. Οι δύο ανιχνευτές φωτός που χρησιμοποιούνται είναι η φωτοδίοδος PIN και η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (APD) που κατασκευάζονται από πυρίτιο (Si), ίνδιο, γάλλιο αρσενικό (InGaAs) ή γερμάνιο (Ge). Τα ηλεκτρικά σήματα που ανιχνεύονται και είναι ενισχυμένα στέλνονται μέσω ενός αποκωδικοποιητή δεδομένων ή από-διαμορφωτή ο οποίος μετατρέπει τα ηλεκτρικά σήματα σε βίντεο ή ακουστικά δεδομένα ή σε άλλες μορφές εξόδου που επιλέγει ο χρήστης.



Δέκτης οπτικών ινών

Όσον αφορά την οπτική ίνα η σημασία της είναι πολύ σημαντική. Ο λόγος είναι ότι παρέχει ένα χαρακτηριστικό αγωγό δεδομένων ο οποίος έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει πολύ μεγάλη ποσότητα δεδομένων. Άλλες λύσεις βέβαια εκτός της οπτικής ίνας είναι η εναέρια εκπομπή αλλά και σκληρά καλώδια χαλκού τα οποία μεταφέρουν ηλεκτρόνια.

Υπάρχουν δύο τεχνικές για τη μεταφορά πληροφορίας μεταξύ δύο τοποθεσιών.

Η πρώτη είναι ένας μεταλλικός πομπός ο οποίος χρησιμοποιεί ένα χάλκινο η ομοαξονικό καλώδιο για να μεταφέρει τα διαμορφωμένα ηλεκτρικά σήματα που περιέχουν τις πληροφορίες. Μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει έναν απεριόριστο αριθμό ιδιωτικών καναλιών όμως κάθε καλώδιο έχει περιορισμένη ικανότητα μετάδοσης της πληροφορίας λόγω των κατασκευαστικών προδιαγραφών και χαρακτηριστικών του χάλκινου καλωδίου.

Η δεύτερη τεχνική είναι η ελεύθερη μετάδοση στο χώρο. Μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι παρέχεται ένα μεγάλο εύρος ζώνης όπως και μεγάλη και ικανή απόσταση αλλά δεν παρέχεται ένα χαρακτηριστικό κανάλι. Ο ελεύθερος χώρος επίσης δεν

είναι δυνατόν να παρέχει τις εκατομμύρια υψηλές ταχύτητες επικοινωνιών. Η οπτική ίνα προσφέρει την καλύτερη μετάδοση και από τις δύο ειδών μεταδόσεις.

Η μετάδοση πληροφορίας γίνεται με παλμούς φωτός. Η παρουσία φωτός μετατρέπεται σε λογικό 1 ενώ η απουσία σε λογικό 0. Το φως μεταδίδεται προς μία πάντα κατεύθυνση μέσα στον πυρήνα της οπτικής ίνας ο οποίος είναι από γυαλί ή πλαστικό. Ο πυρήνας περιβάλλεται από μια μονωτική επικάλυψη και αυτή με τη σειρά της από ειδικό προστατευτικό περίβλημα. Το φως μέσα στον πυρήνα μεταδίδεται δημιουργώντας ανακλάσεις. Όμως επειδή πρόκειται για διάφανο υλικό και όπου ανάκλαση υπάρχει και διάθλαση θα πρέπει για αποφυγή της διάθλασης, ο δείκτης διάθλασης του φωτός στον πυρήνα να είναι μεγαλύτερος κατά 10% από το δείκτη διάθλασης της επικάλυψης. Υπάρχουν οι πολύτροπες και οι μονότροπες οπτικές ίνες. Οι μονότροπες είναι πιο λεπτές με συνέπεια το φως να μεταδίδεται σχεδόν ευθεία άρα σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως για μεγάλες αποστάσεις. Είναι πολύ πιο ακριβό από μια πολύτροπη οπτική ίνα, η οποία χρησιμοποιείται για κοντινότερες αποστάσεις και είναι πιο φτηνή από την μονότροπη. Γενικώς παρέχει μεγάλη ασφάλεια (δύσκολα υποκλέπτεται), είναι ελαφριά, έχει μεγάλο εύρος ζώνης, μπορεί να φτάσει και το 2 Gbps σε ρυθμό μετάδοσης, μπορεί να αντέξει μεγάλο φόρτο εργασίας. Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι θέλει εξειδικευμένες γνώσεις για να επεξεργαστεί μια οπτική ίνα και δεν είναι από τα πιο φτηνά μέσα μετάδοσης.

2.2 Βασική εξίσωση μετάδοσης

Κάθε συνιστώσα συχνότητας του οπτικού πεδίου διαδίδεται στο εσωτερικό μιας μονότροπης ίνας ως εξής:

$$\ddot{E}(r,\omega) = xF(x,y)B(0,\omega)\exp(i\beta z) \quad (\text{εξίσωση 1})$$

Όπου x το μοναδιαίο διάνυσμα πόλωσης, $B(0,\omega)$ είναι το αρχικό πλάτος και β η σταθερά μετάδοσης. Η $F(x,y)$ είναι η κατανομή πεδίου του βασικού τρόπου μετάδοσης στην ίνα που μπορούμε να κάνουμε μία προσέγγιση με μια Γκαουσιανή κατανομή. Γενικά η $F(x,y)$ εξαρτάται ακόμη και από την ω αλλά μπορούμε να μην δώσουμε σημασία σε αυτήν την εξάρτηση για τους παλμούς εκείνους των οποίων

το φασματικό εύρος $\Delta\omega \ll \omega_0$ συνθήκη που γενικότερα ικανοποιείται και στην πράξη. Εδώ η ω_0 είναι η συχνότητα στην οποία συγκεντρώνεται το φάσμα του παλμού. Την ονομάζουμε κεντρική συχνότητα ή φέρουσα συχνότητα. Οι διαφορετικές φασματικές συνιστώσες στο εσωτερικό της ίνας υπολογίζονται από την κάτωθι σχέση:

$$B(z,\omega) = B(0,\omega) \exp(i\beta z) \quad (\text{εξίσωση 2})$$

Μπορούμε να βρούμε το πλάτος στο πεδίο του χρόνου αν πάρουμε τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier. Το πλάτος δίνεται από τη σχέση :

$$B(z,t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} B(z,\omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (\text{εξίσωση 3})$$

Το αρχικό φασματικό πλάτος $B(0,\omega)$ είναι απλώς ο μετασχηματισμός Fourier του πλάτους εισόδου $B(0,t)$.

Η διεύρυνση του παλμού είναι αποτέλεσμα της εξάρτησης της β από τη συχνότητα. Για τους μονοχρωματικούς παλμούς με $\Delta\omega \ll \omega_0$ χρειάζεται να αναπτύξουμε την $\beta(\omega)$ σε μία σειρά Taylor γύρω από τη φέρουσα συχνότητα ω_0 και να διατηρήσουμε τους όρους σε επίπεδο τρίτου βαθμού. Ειδικότερα:

$$\beta(\omega) = n(\omega)\omega/c \approx \beta_0 + \beta_1 (\Delta\omega) + 1/2\beta_2 (\Delta\omega)^2 + 1/6\beta_3 (\Delta\omega)^3 \quad (\text{εξίσωση 4})$$

Όπου $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ και $\beta_m = (d^m \beta / d\omega^m)_{\omega_0}$. Από την εξίσωση 1 παίρνουμε $\beta_1 = 1/v_g$ όπου v_g είναι η ταχύτητα ομάδας. Ο συντελεστής β_2 της GVD σχετίζεται με την παράμετρο διασποράς D μέσω της εξίσωσης:

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$$

ενώ η β_3 σχετίζεται με την κλίση διασποράς S μέσω της εξίσωσης $S = (2\pi c/\lambda^2)^2 \beta_3 + (4\pi c/\lambda^3) \beta_2$.

Αντικαθιστούμε τις εξισώσεις 2 και 4 στην εξίσωση 3 και εισάγουμε ένα αργά μεταβαλλόμενο πλάτος $A(z,t)$ της περιβάλλουσας του παλμού με τη κάτωθι σχέση:

$$B(z, t) = A(z, t) \exp [i (\beta_0 z - \omega_0 t)] \quad (\text{εξίσωση 5})$$

Το πλάτος $A(z,t)$ δίνεται από την εξής σχέση:

$$A(z, t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} d(\Delta\omega) A(0, \Delta\omega) \exp [i\beta_1 z \Delta\omega + 1/2\beta_2 z (\Delta\omega)^2 + 1/6\beta_3 z (\Delta\omega)^3 - i\Delta\omega t] \quad (\text{εξίσωση 6})$$

Όπου $A(0, \Delta\omega) = G(0, \omega - \omega_0)$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier της $A(0,t)$.

Με τον υπολογισμό του $\partial A/\partial z$ και την αντικατάσταση της $\Delta\omega$ με $i(\partial A/\partial t)$ στο χρονικό πεδίο η εξίσωση 6 μπορεί να γραφεί και ως:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = 0 \quad (\text{εξίσωση 7})$$

Αυτή είναι η βασική εξίσωση μετάδοσης που διέπει την παλμική εξέλιξη στο εσωτερικό μιας μονότροπης ίνας. Όταν δεν υπάρχει διασπορά δηλαδή όταν $\beta_2 = \beta_3 = 0$ ο οπτικός παλμός μεταδίδεται χωρίς να μεταβάλλεται η μορφή του έτσι ώστε $A(z,t) = A(0, t - \beta_1 z)$. Κάνοντας τη μετατροπή σε ένα πλαίσιο αναφοράς που κινείται ανάλογα με τον παλμό και εισάγει καινούριες συντεταγμένες $t' = t - \beta_1 z$ και $z' = z$ η εξίσωση μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\frac{\partial A}{\partial z'} + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t'^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t'^3} = 0 \quad (\text{εξίσωση 8})$$

Κεφάλαιο 3

Λόγοι εξασθένισης στην ίνα

3.1 Απώλειες στις οπτικές ίνες:

Η ποσότητα του φωτός που λαμβάνεται στη έξοδο της ίνας είναι πάντα μικρότερη από την ποσότητα που εισέρχεται σε αυτήν λόγω των απωλειών που συμβαίνουν κατά μήκος της. Η απώλεια αυτή εξαρτάται από το μήκος της ίνας και παράγει μια εκθετική απόσβεση που περιγράφεται από την εξής σχέση:

$$\text{Απώλειες} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

όπου P_{out} και P_{in} οι οπτικές ισχύεις εξόδου και εισόδου αντίστοιχα.

Η οπτική απώλεια στην ίνα αποτελεί έναν βασικό παράγοντα περιορισμού, λόγω του ότι μειώνει τη μέση ισχύ που φτάνει στο δέκτη. Όταν οι οπτικοί δέκτες χρειάζονται μία ελάχιστη συγκεκριμένη όμως ποσότητα ισχύος για να ανακτήσουν το σήμα σωστά η απόσταση μετάδοσης περιορίζεται από την απώλεια της οπτικής ίνας.

Γενικά οι απώλειες προκαλούνται από διασκόρπιση ή από απορρόφηση στον πυρήνα και από ατελείς ανακλάσεις στην οπτική επιφάνεια διαχωρισμού. Οι συνολικές απώλειες είναι το άθροισμα των εξής απωλειών που μπορεί να είναι:

Απώλειες σκέδασης Rayleigh: οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από τη σύνθεση του υλικού και τη μεταβατική θερμοκρασία του γυαλιού. Οφείλονται σε μεταβολές του δείκτη διάθλασης μέσα στο υλικό.

Η σκέδαση Rayleigh αποτελεί έναν βασικό μηχανισμό απώλειας ο οποίος προκαλείται από κατά τόπους μικροσκοπικές διακυμάνσεις της πυκνότητας. Τα μόρια που περιέχονται στο πυρίτιο κινούνται τυχαία σε κατάσταση τήξης και σταθεροποιούνται κατά τη διάρκεια κατασκευής της οπτικής ίνας. Οι διακυμάνσεις της πυκνότητας οδηγούν σε τυχαία διακύμανση του δείκτη διάθλασης σε κλίμακα μικρότερη από αυτή του οπτικού κύματος λ . Η σκέδαση του φωτός σε ένα τέτοιο μέσο είναι γνωστή σαν σκέδαση Rayleigh. Η ενεργός διατομή της σκέδασης

μεταβάλλει συναρτήσεις λ^{-4} . Αποτέλεσμα είναι η εγγενής απώλεια της οπτικής ίνας πυριτίου λόγω της σκέδασης Rayleigh και μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\alpha_R = C/\lambda^4 \quad (\text{εξίσωση 9})$$

όπου C είναι η σταθερά και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,7-0,9 (dB/km)- μm^4 και αυτό αναλόγως τα συστατικά του πυρήνα της οπτικής ίνας. Οι τιμές αυτές της σταθεράς C αντιστοιχούν σε $\alpha_R = 0.12-0.16$ dB/km σε $\lambda=1,55$ - μm . Η σκέδαση Rayleigh μπορεί να μειωθεί σε επίπεδο κάτω από 0,01 dB/km για μήκος κύματος μεγαλύτερο των 3 μm . Οι οπτικές ίνες πυριτίου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτή την περιοχή μήκους κύματος αφού από την τιμή των 1,6 μm και πάνω η οπτική απώλεια αρχίζει να χαρακτηρίζεται από υπέρυθη απορρόφηση. Έχουν γίνει πολλές έρευνες και προσπάθειες για οπτικές ίνες με άλλα κατάλληλα υλικά με χαμηλό επίπεδο απορρόφησης πέρα από τα 2 μm . Οι οπτικές ίνες ζirkονίου-φθορίου (ZrF₄) έχουν απορρόφηση υλικού της τάξης των 0,01 dB/km στα 2,55 μm κι έχουν τη δυνατότητα να παρουσιάζουν απώλεια τέτοια που είναι πού μικρότερη από εκείνη των οπτικών ινών πυριτίου. Όμως οι τεχνικά εξελιγμένες οπτικές ίνες φθορίου παρουσιάζουν απώλεια της τάξης του 1 dB/km και αυτό λόγω της εξωγενούς απώλειας. Οι χαλκογενείς και πολυκρυσταλλικές οπτικές ίνες παρουσιάζουν ελάχιστη απώλεια της οπτικής ίνας για τις ίνες αυτές η τιμή είναι κάτω από 10^{-3} dB/km λόγω της περιορισμένης σκέδασης Rayleigh. Ωστόσο τα πρακτικά επίπεδα απώλειας παραμένουν μεγαλύτερα σε σχέση με εκείνα των οπτικών ινών πυριτίου.

Απώλειες που αποδίδονται σε ζώνες απορρόφησης υδροξυλίου. Μια πηγή της μόλυνσης με OH⁻ αποδίδεται στη θερμική διάχυση από τον αρχικό σωλήνα στα εναποτιθέμενα στρώματα γυαλιού.

Απώλειες λόγω ανάκλασης Fresnel: οι απώλειες αυτές οφείλονται στο φαινόμενο κατά το οποίο ένα μικρό μέρος του προσπίπτοντος φωτός ανακλάται πίσω ακόμα και όταν οι επιφάνειες εισόδου και εξόδου είναι λείες και κάθετες στον άξονα της ίνας. Το φαινόμενο αυτό καλείται ανάκλαση Fresnel και σχετίζεται με τη βηματική αλλαγή του δείκτη διάθλασης.

Απώλειες απορρόφησης υπεριώδους ακτινοβολίας: οι απώλειες αυτές αφορούν το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) το οποίο είναι εμποτισμένο με διοξείδιο του γερμανίου (GeO_2).

Απώλειες που οφείλονται στις προσμίξεις και στο άκρο της IR απορρόφησης. Η απορρόφηση του υπέρυθρου προκύπτει από τους ρυθμούς δόνησης του πυριτίου – οξυγόνου και των κατιόντων οξυγόνου.

Απώλειες που οφείλονται σε ατέλειες του κυματοδηγού ή στη διαδικασία κατασκευής του οπτικού καλωδίου.

Απώλειες λόγω ρυθμού που σχετίζεται με δομές πολλαπλών διηλεκτρικών και αποκοπή λόγω ρυθμού.

3.2 Εξασθένιση

Ως εξασθένιση ορίζεται η απώλεια της οπτικής ισχύος κατά την κυματοδότηση και ανέρχεται στα 150 db/km για τις πλαστικές ίνες ενώ μόνο 0,21 db/km στις μονότροπες ίνες. Εκτός από το υλικό κατασκευής της ίνας η εξασθένιση εξαρτάται και από το μήκος κύματος της κυματοδηγούμενης ακτινοβολίας. Στις γυάλινες ίνες η εξασθένιση είναι μικρότερη στο υπέρυθρο μέρος του οπτικού φάσματος ($\lambda > 800$ nm) στην περιοχή από 1200 έως 1600 nm ενώ σε πλαστικές ίνες η εξασθένιση είναι μικρότερη στην ορατή περιοχή του φάσματος γύρω στα 650 nm.

Η εξασθένιση περιγράφεται από τη σχέση:

$$P(z) = P(0)e^{-az}$$

Όπου a είναι ο συντελεστής εξασθένισης

$$az = -10 \log(P(z) / P(0))$$

P(z)/P(0)	100%	80%	50%	10%	1%
Εξασθένιση σε dB	0dB	1 dB	3 dB	10 dB	20 dB

Η εξασθένιση σε μία οπτική ίνα δίνεται από το συντελεστή εξασθένισης. Η πιο συνηθισμένη μονάδα είναι το dB/km.

Ο συντελεστής εξασθένισης εξαρτάται από το μήκος κύματος τον τύπο της ίνας και την επίδραση περιβάλλοντος και μηχανικής καταπόνησης.

Ο συντελεστής εξασθένισης είναι ο εξής:

$$\alpha = \frac{A}{\lambda^4} + B(\lambda)$$

όπου A,B σταθερές, λ το μήκος κύματος, $\frac{A}{\lambda^4}$ η σκέδαση κατά Rayleigh και οφείλεται στις συνθήκες κατασκευής του γυαλιού B(λ) οι απώλειες κάμψεων.

Σε μονότροπες ίνες η μεταβολή εξασθένισης σαν συνάρτηση του μήκους κύματος όπως διαμορφώνεται από την επίδραση μηχανισμών σκέδασης και απορρόφησης ορίζει δύο περιοχές στα 1300 και 1550 nm με την απόσβεση να έχει τιμές στα 0,35 και 0,21 db αντίστοιχα. Η αύξηση της εξασθένισης που παρατηρείται στα 1400 nm διαχωρίζοντας αυτές τις δύο περιοχές οφείλεται σε απορρόφηση από ιόντα OH- που δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν πλήρως ακόμα και σε γυαλί με πολύ υψηλή καθαρότητα. Οι φασματικές περιοχές που αντιστοιχούν στα ελάχιστα της εξασθένισης είναι γνωστές και σαν «παράθυρα» λειτουργίας. Στο δεύτερο παράθυρο υπονοείται μήκος κύματος στα 1300 nm και στο τρίτο παράθυρο 1550 nm. Σαν πρώτο παράθυρο εννοείται η περιοχή της τάξης των 850 nm με εξασθένιση περίπου 2,5 db/km αλλά πλέον δεν χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες.

Οι οπτικές ίνες σχεδιάζονται έτσι ώστε να διατηρούν τις επιδόσεις τους και μετά την εγκατάστασή τους όσον αφορά την εξασθένιση. Οι επιδόσεις όμως αυτές μπορούν να επιδεινωθούν από εξωτερικούς παράγοντες όπως είναι η κάμψη της ίνας με την εγκατάσταση του οπτικού καλωδίου καθώς και η έκθεση της ίνας σε περιβάλλοντα

υδρογόνου και πυρηνικής ραδιενέργειας. Οι φυσικές κάμψεις μιας ίνας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στις μικροκάμψεις και στις μακροκάμψεις. Η μικροκάμψη είναι το αποτέλεσμα των πολύ μικρών ατελειών που υπάρχουν 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 που είναι αποτέλεσμα από την κατασκευή ή μηχανική τάση, πίεση ή στροφή. Οι μακροκάμψεις αφορούν τις κυρτότητες της ίνας με διαμέτρους της τάξεως των cm. Αν και οι ίνες αποθηκεύονται τυλιγμένες σε στροφέια υπάρχει μια ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας όπου η οπτική ίνα σπάει.

Οι κάμψεις έχουν δύο βασικές επιπτώσεις στις μονότροπες οπτικές ίνες.

A) μικρή αύξηση των απωλειών: οφείλεται γιατί το μέρος της ενέργειας που κυματοδειγείται στο περίβλημα της ίνας πρέπει να κινηθεί στο εξωτερικό μέρος της καμπυλότητας, με ταχύτητα μεγαλύτερη αυτής της ταχύτητας του φωτός στο συγκεκριμένο υλικό προκειμένου να καλύψει τη μεγαλύτερη διαδρομή που προκύπτει. Το τελικό αποτέλεσμα είναι να το μέρος αυτής της ενέργειας ακτινοβολείται με σύζευξη σε τρόπο ακτινοβολήσης προκαλώντας μικρή αύξηση των απωλειών. Για μη-καλωδιωμένη ίνα η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας είναι τα 30 mm ενώ για ίνες καλωδιωμένες η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας του καλωδίου είναι πενταπλάσια της διαμέτρου του καλωδίου. Για μια δεδομένη ακτίνα καμπυλότητας η απώλεια από κάμψη εξαρτάται από το μήκος κύματος και αυξάνει για μακρύτερα μήκη κύματος ,λόγω αύξησης του ποσοστού οπτικής ισχύος που κυματοδειγείται στον μανδύα.

B) μείωση της αντοχής της ίνας σε εφελκυσμό: σε καλώδια που υφίστανται εφελκυσμό η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας πρέπει να είναι δεκαπλάσια της διαμέτρου του καλωδίου.

Η επίδραση του υδρογόνου: Το υδρογόνο εμφανίζεται λόγω της υγρασίας στο εσωτερικό του καλωδίου. Το υδρογόνο εκλύεται είτε από χημική αποσύνθεση των υλικών του μανδύα είτε από την ηλεκτρολυτική επίδραση της υγρασίας στην μεταλλική θωράκιση του καλωδίου. Η έκθεση της οπτικής ίνας σε υδρογόνο προκαλεί τη διάχυση του υδρογόνου στο υλικό του γυαλιού μεταβάλλοντας έτσι τη

χαρακτηριστική καμπύλη εξασθένησης της ίνας και αυξάνοντας τις απώλειες. Η πρόσθετη εξασθένηση εμφανίζεται σωρευτικά και είναι της τάξης των 0,15 db/km για μήκος κύματος που αντιστοιχεί στα 1550 nm και θερμοκρασία 25^o C. Οι επιπτώσεις του φαινομένου αυτού είναι πιο σημαντικές σε υποβρύχιες ζεύξεις όπου το νερό μπορεί πολύ πιο εύκολα να εισχωρήσει σε μεγάλο μήκος του καλωδίου και να προκαλέσει έτσι καταστροφική για την ζεύξη αύξηση της συνολικής εξασθένησης.

Όσον αφορά την επίδραση της ραδιενέργειας οι τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις μπορούν να εκτεθούν σε ραδιενέργεια κατά τη διέγερση ενός πυρηνικού ατυχήματος ή πολεμικής σύγκρουσης. Σε πιο περιορισμένη κλίμακα η έκθεση αυτή μπορεί να γίνει στον εσωτερικό ή περιβάλλοντα χώρο ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ή σε χώρο νοσοκομείου όπου ραδιενεργές πηγές χρησιμοποιούνται για θεραπευτικούς σκοπούς η ραδιενέργεια επιδρά στη μοριακή στη μοριακή δομή του υλικού της οπτικής ίνας δημιουργώντας χρωματικά κέντρα απορρόφησης. Έτσι η έκθεση των οπτικών ινών σε ραδιενεργή περιβάλλον μεταβάλλει τη χαρακτηριστική απόσβεσης αυξάνοντας την εξασθένηση κατά ποσό που εξαρτάται από παραμέτρους όπως είναι το είδος της ραδιενέργειας, η συνολική δόση, ο ρυθμός της δόσης, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ισχύς του οπτικού σήματος. Η αύξηση των απωλειών μπορεί να είναι μόνιμη ή και προσωρινή ανάλογα με το είδος των προσμίξεων που περιέχει η οπτική ίνα. Οι ίνες που περιέχουν GeO₂ στον πυρήνα τους έχουν μικρότερη επίδραση από τη ραδιενέργεια όμως η αύξηση της εξασθένησης είναι μόνιμη. Αντίθετα οι ίνες που περιλαμβάνουν SiO₂ στον πυρήνα τους και στον μανδύα τους νοθεύσεις φθορίου και φωσφόρου εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στη ραδιενέργεια με επίδραση όμως προσωρινή αφού η επαναφορά έρχεται σε λίγα λεπτά έως λίγες ώρες. Ο χρόνος επαναφοράς μπορεί να ελαττωθεί σημαντικά παρέχοντας έτσι στο σύστημα πρόσθετη εξωτερική ενέργεια που απορροφάται από τα χρωματικά κέντρα αποκαθιστώντας με αυτόν τον τρόπο τα ελαττώματα στην μοριακή δομή του γυαλιού που επήλθε σαν αποτέλεσμα της ραδιενέργειας. Η ενέργεια αυτή που προστίθεται μπορεί να επέλθει ή από την αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον ή με την διέλευση κάποιου σοβαρού σήματος (100 μW-1mW) από την ίνα. Η μέθοδος φωτο-αποκατάσταση είναι η

μέθοδος η οποία διορθώνει τα μοριακά ελαττώματα και χρησιμοποιείται για την προστασία των οπτικών ζεύξεων που υπάρχουν στο ραδιενεργό περιβάλλον. Σε χαμηλά μήκη κύματος το φαινόμενο της φωτο-αποκατάστασης είναι περισσότερο έντονο και ο λόγος είναι το μεγάλο ποσό ενέργειας που μεταφέρουν.

Δύο είναι τα βασικά φαινόμενα που καθορίζουν το κατώτερο όριο εξασθένησης στις γυάλινες ίνες: Η σκέδαση και η απορρόφηση.

3.3 Σκέδαση

Υπάρχει απώλεια οπτικής ενέργειας λόγω ατελειών στην βασική δομή της ίνας.

A)σε χαμηλά μήκη κύματος όπου εμφανίζεται η σκέδαση Raleigh που οφείλεται στην απουσία κανονικότητας της κρυσταλλικής και ατομικής δομής του γυαλιού, δηλαδή ανομοιομορφίες στην ίνα. Οι ανομοιομορφίες αυτές προκαλούν τις ακτίνες φωτός να διασκορπιστούν κατά ένα μέρος καθώς μεταδίδονται μέσα στην ίνα με αποτέλεσμα κάποια ενέργεια φωτός να χάνεται. Το φαινόμενο αυτό γίνεται έντονο πιο πολύ όταν το μήκος κύματος του φωτός πλησιάζει το μέγεθος της ατομικής δομής του γυαλιού. Η σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην εξασθένηση που οφείλεται στη σκέδαση Raleigh είναι ότι η πρώτη μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα ως προς την τέταρτη δύναμη του μήκους κύματος. ($1/\lambda^4$). Η σκέδαση κατά Raleigh αυξάνεται πολύ σε μικρά μήκη κύματος.

B) Το άλλο είδος σκέδασης είναι η σκέδαση Mie που συμβαίνει λόγω των ατελειών στην κυλινδρική δομή του κυματοδηγού. Αυτές οι ατέλειες εμφανίζονται πιο συχνά στην κοινή επιφάνεια του πυρήνα και του μανδύα λόγω μικρών μεταβολών στους συντελεστές διάθλασης των υλικών των διαφορών που υπάρχουν στη διάμετρο του πυρήνα κατά μήκος της ίνας και λόγω της ύπαρξης μικρό-φυσάλιδων. Στη σκέδαση Mie οι επιπτώσεις μπορούν να βελτιωθούν κατά τη διαδικασία κατασκευής της ίνας.

Εκτός από τα παραπάνω είδη γραμμικής σκέδασης υπάρχουν και φαινόμενα μη γραμμικής σκέδασης που εμφανίζονται όταν στις οπτικές ίνες εμφανίζονται μεγάλα επίπεδα οπτικής ισχύος. Είδη μη-γραμμικής σκέδασης είναι η σκέδαση Brillouin και

η σκέδαση Raman που εμφανίζονται στις μονότροπες ινο-οπτικές ζεύξεις μεγάλου μήκους που τροφοδοτούνται από οπτικά σήματα με μεγάλη ισχύ.

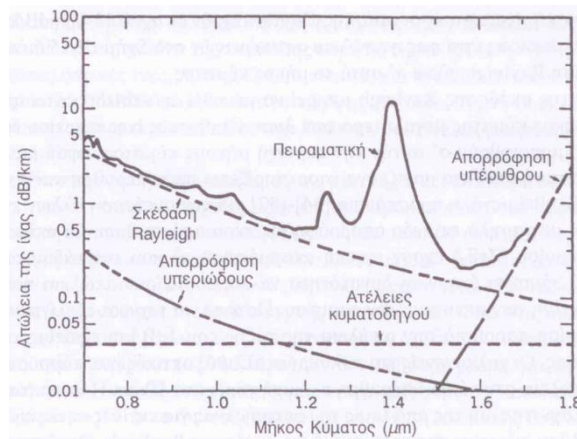
3.4 Απορρόφηση

Το φως απορροφάται από το υλικό μετάδοσης και η ενέργεια του μετατρέπεται σε θερμότητα.

Απορρόφηση υλικού:

Η κατασκευή των οπτικών ινών γίνεται από τηγμένο πυρίτιο. Η απορρόφηση υλικού μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες. Η φυσική απορρόφηση υλικού αντιστοιχεί στην απώλεια που προκαλείται από καθαρό πυρίτιο ενώ η εξωγενής απορρόφηση σχετίζεται με την απώλεια που προκαλείται από τις διάφορες προσμίξεις. Σε συγκεκριμένα μήκη κύματος όλα τα υλικά παρουσιάζουν απορρόφηση που αντιστοιχούν στους ηλεκτρονικούς και δονητικούς συντονισμούς που έχουν σχέση με τα μόρια. Στα μόρια του πυριτίου (SiO_2) ο ηλεκτρονικός συντονισμός εμφανίζεται στην υπεριώδη περιοχή ($\lambda > 7 \mu\text{m}$). Λόγω της άμορφης φύσης του τηγμένου πυριτίου οι συντονισμοί αυτοί έχουν τη μορφή ζωνών απορρόφησης που οι ουρές εκτείνονται μέχρι και την περιοχή ορατού φωτός. Στα οπτικά συστήματα τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται είναι μεταξύ των τιμών από 1,3 έως 1,6 μm και η απορρόφηση υλικού είναι στην τιμή των 0,3 dB/km. Η εξωγενής απορρόφηση προκαλείται όπως αναφέρθηκε από την παρουσία προσμίξεων. Οι προσμίξεις των μετάλλων μετάβασης όπως είναι τα Fe, Cu, Co, Ni, Mn και Cr παρουσιάζουν μία έντονη απορρόφηση σε μήκος κύματος μεταξύ 0,6-1,6 μm . Η ποσότητά τους θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί σε ποσοστό τέτοιο μικρότερο του 1 μέρους στο 1 δισεκατομμύριο για να υπάρχει επίπεδο απώλειας στις τιμές κάτω από 1 dB/km. Με σύγχρονες τεχνικές μπορεί να παραχθεί αυτό το πυρίτιο πολύ μικρής περιεκτικότητας σε προσμίξεις. Στην εξωγενής απορρόφηση η κύρια πηγή που την προκαλεί είναι η παρουσία υδρατμών στις τεχνικά εξελιγμένες οπτικές ίνες πυριτίου. Ένας δονητικός συντονισμός του ιόντος OH εμφανίζεται στην τιμή των 2,73 μm . Οι αρμονικές και οι συνδυασμοί του με τους δονητικούς συντονισμούς που εμφανίζει το πυρίτιο προκαλούν έντονη απορρόφηση σε μήκος κύματος 1,39 μm , 1,24 μm , και 0,95 μm , που οφείλονται στην παρουσία υπολειμματικών

υδρατμών στο πυρίτιο. Αρκεί να σκεφτούμε πως ακόμη και μία συγκέντρωση της τάξης του 1 μέρους στο 1 εκατομμύριο μπορεί να προκαλέσει απώλεια των 50dB/km περίπου στα 1,39 μm. Τυπικά η συγκέντρωση ιόντων OH θα πρέπει να μειωθεί σε επίπεδο χαμηλότερο του 10^{-8} για να έχουμε ένα χαμηλής απώλειας. Τα υλικά πρόσμιξης που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή οπτικών ινών για να πάρουμε τον κατάλληλο βηματικό δείκτη διάθλασης μπορούν να οδηγήσουν σε επιπλέον απώλειες.



Το προφίλ της φασματικής απώλειας για μια μονότροπη οπτική ίνα. Επίσης παρουσιάζεται η εξάρτηση της απώλειας της οπτικής ίνας από το μήκος κύματος για διάφορους μηχανισμούς απώλειας

3.5 Διασπορά

Η διασπορά είναι η χρονική παραμόρφωση του σήματος πληροφορίας είτε είναι αναλογικό είτε ψηφιακό στο δέκτη λόγω της διαφορετικής ταχύτητας που μεταφέρονται κατά τη μετάδοση στα διάφορα τμήματα του σήματος. Η παραμόρφωση αυτή που όταν γίνεται ψηφιακή μετάδοση εμφανίζεται σαν διερεύνηση των παλμών του πομπού στον δέκτη έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης της οπτικής ζεύξης. Τα είδη της διασποράς που εμφανίζονται είναι τρία και είναι τα εξής: διασπορά τρόπου μετάδοσης, διασπορά υλικού και διασπορά κυματοδηγού.

Διασπορά τρόπου μετάδοσης: η διασπορά τρόπου μετάδοσης πραγματοποιείται και εμφανίζεται μόνο σε πολύτροπες ίνες. Αυτό οφείλεται στο ότι γίνεται επιμερισμός της οπτικής ισχύος του σήματος σε πιο πολλούς τρόπους μετάδοσης που κινούνται μέσα στον οπτικό κυματοδηγό με διαφορετικές ταχύτητες. Αύξηση της τιμής της διασποράς τρόπου μετάδοσης γίνεται ανάλογα με τον αριθμό των τρόπων μετάδοσης που υποστηρίζει ο κυματοδηγός. Συμπέρασμα αυτού είναι ότι η μεταβολή εξαρτάται από το μέγεθος του πυρήνα. Σε πολύτροπες ίνες με βηματική μεταβολή η τιμή που μπορεί να έχει η διασπορά τρόπου μετάδοσης είναι τα 30 ns/km ενώ στις πολύτροπες ίνες με βαθμιαία μεταβολή η τιμή που μπορεί να έχει η διασπορά τρόπου μετάδοσης είναι μικρότερη από το 1 ns/km.

Διασπορά υλικού: η διασπορά υλικού είναι γνωστή και ως χρωματική διασπορά και πραγματοποιείται και εμφανίζεται τόσο στις μονότροπες όσο και στις πολύτροπες ίνες. Η διασπορά υλικού εμφανίζεται επειδή ο δείκτης διάθλασης του πυριτίου, υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της ίνας μεταβάλλεται με την οπτική συχνότητα ω . Σε βασικό επίπεδο, η προέλευση της διασποράς υλικού σχετίζεται με τις χαρακτηριστικές συχνότητες συντονισμού στις οποίες το υλικό απορροφά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Πέρα από τις συχνότητες συντονισμού του μέσου ο δείκτης διάθλασης $n(\omega)$ προσεγγίζεται κατά πολύ με την εξίσωση Sellmeier.

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^M \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2} \quad (\text{εξίσωση 10})$$

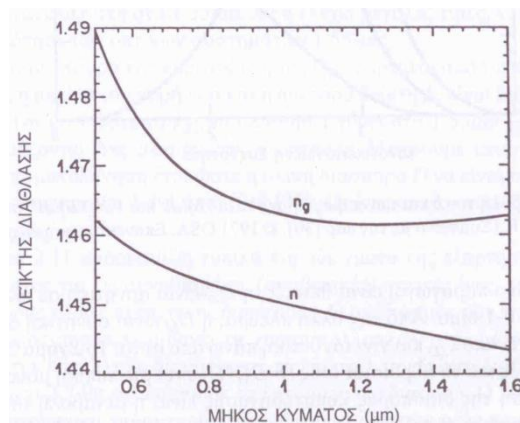
όπου ω_j είναι η συχνότητα συντονισμού και B_j είναι η ισχύς του ταλαντωτή. Εδώ, n σημαίνει είτε n_1 είτε n_2 , ανάλογα με το αν ληφθούν υπόψη οι ιδιότητες διασποράς του πυρήνα ή του περιβλήματος. Το άθροισμα στη εξίσωση 10 καλύπτει στους συντονισμούς κάθε υλικού που συμβάλλουν στην περιοχή συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. Στην περίπτωση των οπτικών ινών οι παράμετροι B_j και ω_j βρίσκονται εμπειρικά αν προσαρμόσουμε τις καμπύλες διασποράς που υπολογίσαμε ήδη στην εξίσωση 10 με $M=3$. Οι καμπύλες αυτές εξαρτώνται από την ποσότητα προσμίξεων και αναρτήθηκαν για τα διάφορα είδη ινών. Για το καθαρό πυρίτιο οι παράμετροι

αυτές είναι $B_1= 0,6961663$, $B_2= 0,4079426$, $B_3= 0,8974794$, $\lambda_1= 0.0684043\mu\text{m}$, $\lambda_2=0,1162414\mu\text{m}$ και $\lambda_3= 9,896161\mu\text{m}$ όπου $\lambda_j=2\pi c/\omega_j$ με $j= 1-3$. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων αυτών μπορούμε να βρούμε το δείκτη διάθλασης ομάδας $n_g=n+\omega (dn/d\omega)$.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει την εξάρτηση των n και n_g από το μήκος κύματος μεταξύ $0,5-1,6\mu\text{m}$ για τηγμένο πυρίτιο. Η διασπορά υλικού D_M σχετίζεται με την κλίση του n_g μέσω της σχέσης $D_M=c^{-1}(dn_g/d\lambda)$. Φαίνεται πως $dn_g/d\lambda =0$ όταν $\lambda=1,276 \mu\text{m}$. Το συγκεκριμένο μήκος κύματος ονομάζεται μήκος κύματος μηδενικής διασποράς λ_{ZD} , αφού $D_M=0$ όταν $\lambda= \lambda_{ZD}$. Η παράμετρος διασποράς D_M είναι αρνητική κάτω από το λ_{ZD} και θετική πάνω από αυτό. Σε μήκος κύματος μεταξύ $1,25-1,66\mu\text{m}$ μπορούμε μέσω της παρακάτω εμπειρικής σχέσης να το υπολογίσουμε:

$$D_M \approx 122 (1- \lambda_{ZD}/\lambda) \quad (\text{εξίσωση 11})$$

Θα πρέπει να γίνει σαφές πως $\lambda_{ZD}=1,276$ μόνο για το καθαρό πυρίτιο. Αυτό μπορεί να μεταβάλλεται μεταξύ $1,27-1,29 \mu\text{m}$ για τις οπτικές ίνες των οποίων ο πυρήνας και το περίβλημα έχουν εμπλουτιστεί ώστε να μεταβληθεί ο δείκτης διάθλασης τους. Το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς στις οπτικές ίνες εξαρτάται και από την ακτίνα του πυρήνα a και το βήμα του δείκτη διάθλασης Δ , λόγω της επίδρασης της κυματοδότησης στην ολική διασπορά.



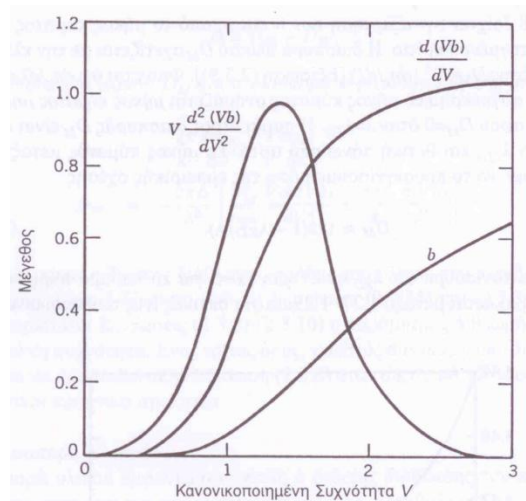
Η μεταβολή του δείκτη διάθλασης n και του δείκτη διάθλασης ομάδας n_g με το μήκος κύματος για τηγμένο πυρίτιο.

Διασπορά κυματοδήγησης: η διασπορά κυματοδήγησης οφείλεται στη διαφορετική ταχύτητα μετάδοσης μεταξύ του πυρήνα και του μανδύα λόγω της μικρής διαφοράς ως προς το συντελεστή διάθλασης. Η εμφάνιση της διασποράς κυματοδήγησης γίνεται στις μονότροπες ίνες όπου μεγάλο μέρος της κυματοδηγούμενης οπτικής ενέργειας διέρχεται από τον μανδύα ενώ είναι ασήμαντη σε πολύτροπες ίνες. Όσον αφορά την τιμή της διασποράς κυματοδήγησης εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που είναι κατασκευασμένος ο κυματοδηγός όπως είναι η μεταβολή του συντελεστή διάθλασης στον πυρήνα και στον μανδύα. με κατάλληλο όμως σχεδιασμό μπορούν να επιτευχθούν οι επιδιωκόμενες τιμές διασποράς. Μια τιμή που αντιστοιχεί τυπικά στο κυματοδηγό είναι τα 2 ps (nm.km) στα 1300 nm.

Η επίδραση της διασποράς κυματοδήγησης D_w στην παράμετρο διασποράς D δίνεται από την εξίσωση:

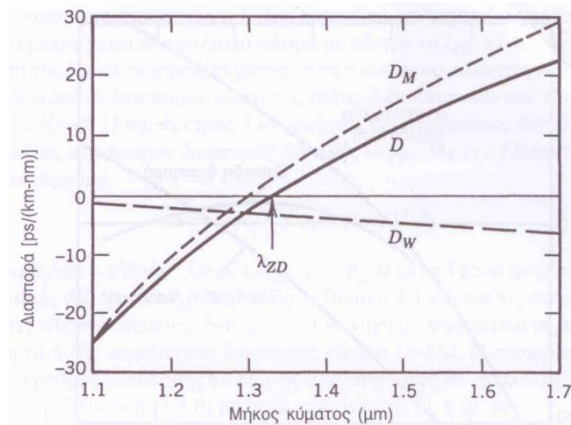
$$D_w = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2} \left[\frac{n_{2g}^2}{\omega n_2} \frac{V d^2}{dV^2} (Vb) + \frac{dn_{2g}}{d\omega} \frac{d(Vb)}{dV} \right]$$

Και εξαρτάται από την παράμετρο V της ίνας. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο οι $d(V)/dV$ και $Vd^2(Vb)/dV^2$ μεταβάλλονται με την V .



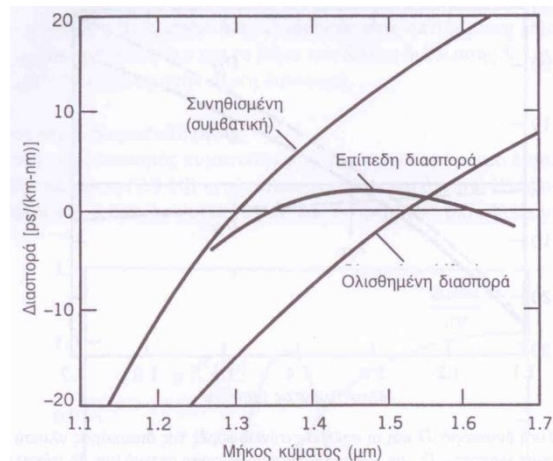
Η μεταβολή του b και του $d(Vb)/dV$ σε συνάρτηση με την παράμετρο V

Εφόσον και οι δύο παράγωγοι είναι θετικές η D_W είναι αρνητική σε όλο το μήκος κύματος μεταξύ 0-1,6 μm . Από την άλλη πλευρά η D_M είναι αρνητική σε κάθε μήκος κύματος κάτω από το λ_{ZD} ενώ γίνεται θετική πάνω από αυτό. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τις D_M , D_W , καθώς και το άθροισμά τους, $D = D_M + D_W$, για μία τυπική μονότροπη ίνα.



Η ολική διασπορά D και οι σχετικές συνεισφορές της διασποράς υλικού D_M και της διασποράς κυματοδήγησης D_W σε μια συμβατική μονότροπη οπτική ίνα. Το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς ολισθαίνει σε μεγαλύτερη τιμή λόγω των επιδράσεων της κυματοδήγησης.

Η κύρια επίδραση της διασποράς κυματοδήγησης είναι η μεταβολή του λ_{ZD} κατά 30-40nm, έτσι ώστε η ολική διασπορά να ισούται με μηδέν στα 1,31 μm . Επίσης, αφαιρεί την D από την τιμή της D_M σε μήκος κύματος 1,3-1,6 μm που χρειάζεται για τα οπτικά συστήματα επικοινωνιών. Οι τυπικές τιμές της D κυμαίνονται μεταξύ 15-18ps/(km-nm) στα 1,55 μm . Αν η D έχει μεγάλες τιμές τότε περιορίζεται η λειτουργικότητα των οπτικών συστημάτων στα 1,55 μm . Επειδή η συνεισφορά της κυματοδήγησης D_W εξαρτάται από τις παραμέτρους των ινών, όπως η ακτίνα του πυρήνα a και η διαφορά δείκτη Δ είναι δυνατόν να σχεδιάσουμε μία ίνα έτσι ώστε το λ_{ZD} να κάνει ολίσθηση στα 1,55 μm . Οι ίνες αυτές ονομάζονται ίνες ολισθημένης διασποράς.



Η τυπική εξάρτηση της παραμέτρου διασποράς D από το μήκος κύματος για τις οπτικές ίνες καθώς και τις ίνες ολισθημένης διασποράς και επίπεδης διασποράς

Μπορούμε επίσης να διαμορφώσουμε την κυματοδότηση έτσι ώστε η ολική διασπορά D να είναι σχετικά μικρή για μήκος κύματος μεταξύ των τιμών 1,3-1,6 μm . Οι ίνες αυτές ονομάζονται ίνες επίπεδης διασποράς.

Συνολική διασπορά: το πώς συσχετίζεται η διασπορά Δ και το εύρος ζώνης B σε μια οπτική ίνα είναι πολύπλοκο και για τις οπτικές ίνες δίνεται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$B = 0,187 / \{\delta \cdot (\Phi E) \cdot L\}$$

Όπου ΦE το φασματικό εύρος της πηγής και L το μήκος που έχει η ζεύξη.

Όταν υπάρχει λειτουργία στα 1550 nm η συνολική διασπορά δίνεται από το σύνολο της πρόσθεσης της διασποράς υλικού $\Delta\psi$ και την διασπορά του κυματοδηγού $\Delta\kappa$. Η σχέση που δίνει την συνολική διασπορά είναι η εξής:

$$\Delta = \Delta\psi + \Delta\kappa = 12 \text{ ps (nm.km)} - 7 \text{ ps (nm.km)} = 5 \text{ ps (nm.km)}$$

Διασπορά στις μονότροπες ίνες:

Όπως προαναφέρθηκε η διασπορά εσωτερικών τρόπων μετάδοσης στις πολύτροπες ίνες οδηγεί σε σημαντική διεύρυνση των οπτικών παλμών μικρής διάρκειας

(περίπου 10 ns/km). Στην περιγραφή μέσω γεωμετρικής οπτικής η διεύρυνση αυτή αποδόθηκε στις διαφορετικές διαδρομές που ακολουθούσε η κάθε ακτίνα. Στην τροπολογική περιγραφή σχετίστηκε με τους διαφορετικούς δείκτες διάθλασης των τρόπων μετάδοσης που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης. Το βασικό πλεονέκτημα των μονότροπων ινών είναι ότι δεν έχουν διασπορά λόγω εσωτερικών τρόπων μετάδοσης απλώς επειδή η ενέργεια του εκπεμπόμενου παλμού μεταφέρεται μέσω ενός και μόνο τρόπου μετάδοσης. Ωστόσο η παλμική διεύρυνση δεν εξαφανίζεται εντελώς. Η ταχύτητα ομάδας που σχετίζεται με το βασικό τρόπο μετάδοσης εξαρτάται από την συχνότητα εξαιτίας της χρωματικής διασποράς. Σαν αποτέλεσμα οι διαφορετικές φασματικές συνιστώσες του παλμού μεταδίδονται με ελαφρώς διαφορετικές ταχύτητες ομάδας φαινόμενο που ονομάζεται διασπορά ταχύτητας ομάδας (GVD), ενδοτροπική διασπορά, ή απλώς διασπορά στην ίνα. Η ενδοτροπική διασπορά έχει δύο συνιστώσες: τη διασπορά υλικού και τη διασπορά κυματοδήγησης. Εξετάζοντας και τις δύο θα ανακαλύψουμε πως η GVD περιορίζει τη λειτουργικότητα των οπτικών συστημάτων που χρησιμοποιούν μονότροπες ίνες.

Διασπορά Ταχύτητας ομάδας: έστω μια ίνα μήκους L. Στην έξοδο της ίνας θα φτάσει συγκεκριμένη φασματική συνιστώσα με συχνότητα ω μετά από χρονική καθυστέρηση $T=L/ u_g$ όπου u_g είναι η ταχύτητα ομάδας που ορίζεται ως εξής:

$$U_g = (d\beta/d\omega)^{-1} \quad (\text{εξίσωση 12})$$

Χρησιμοποιώντας $\beta = nk_0 = n\omega/c$ στην παραπάνω εξίσωση αποδεικνύεται ότι $u_g = c/n_g$, όπου n_g είναι ο δείκτης διάθλασης ομάδας που δίνεται από τη σχέση:

$$n_g = n + \omega (dn/d\omega) \quad (\text{εξίσωση 13})$$

Η εξάρτηση της ταχύτητας ομάδας από τη συχνότητα οδηγεί σε παλμική διεύρυνση απλώς επειδή οι διαφορετικές φασματικές συνιστώσες του παλμού διασκορπίζονται κατά τη διάρκεια της μετάδοσης και δεν φτάνουν ταυτόχρονα στην έξοδο της ίνας. Αν $\Delta\omega$ είναι το φασματικό εύρος του παλμού, η έκταση της διεύρυνσης του παλμού για μία ίνα μήκους L διέπεται από τη σχέση:

$$\Delta T = dt \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{u_g} \right) \Delta\omega = L \frac{\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega \quad (\text{εξίσωση 14})$$

όπου έγινε χρήση της εξίσωσης 12. Η παράμετρος $\beta_2 = d^2 \beta / d\omega^2$ είναι γνωστή και ως παράμετρος GVD. Αυτή καθορίζει το πόσο θα διευρυνθεί ένας οπτικός παλμός κατά τη μετάδοση του μέσα στην ίνα. Σε μερικά οπτικά συστήματα επικοινωνιών η εξάπλωση της συχνότητας $\Delta\omega$ καθορίζεται από την περιοχή των μηκών κύματος $\Delta\lambda$ που εκπέμπονται από μια οπτική πηγή. Συνήθως χρησιμοποιούμε $\Delta\lambda$ αντί για $\Delta\omega$. Αν $\omega = 2\pi c / \lambda$ και $\Delta\omega = (-2\pi c / \lambda^2) \Delta\lambda$, η εξίσωση 14 μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{u_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (\text{εξίσωση 15})$$

Όπου
$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{u_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (\text{εξίσωση 16})$$

D είναι η παράμετρος διασποράς και εκφράζεται σε μονάδες ps/(km-nm). Η επίδραση της διασποράς στο ρυθμό μετάδοσης bit B υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το κριτήριο $B\Delta T < 1$. Αν από την εξίσωση 15 χρησιμοποιήσουμε το ΔT η συνθήκη αυτή γίνεται:

$$BL|D|\Delta\lambda < 1 \quad (\text{εξίσωση 17})$$

Η εξίσωση 17 παρέχει έναν υπολογισμό της τάξεως μεγέθους του γινομένου BL για τις μονότροπες ίνες. Στις συνηθισμένες ίνες πυριτίου η D είναι σχετικά μικρή στην περιοχή μήκους κύματος γύρω στα 1,3 μm [$D \sim 1\text{ps}/(\text{km-nm})$]. Για έναν ημιαγωγό laser το φασματικό εύρος $\Delta\lambda$ είναι μεταξύ 2-4 μm ακόμα και όταν το laser

λειτουργεί με διάφορους διαμήκεις τρόπους μετάδοσης. Το γινόμενο BL τέτοιου είδους οπτικών συστημάτων μπορεί να υπερβεί τα 100 (Gb/s) –km. Τα συστήματα τηλεπικοινωνιών 1,3μm τυπικά λειτουργούν με ρυθμό μετάδοσης bit 2 Gb/s και με απόσταση μεταξύ επαναλήψεων σε απόσταση 40-50 km. Το γινόμενο BL μιας μονότροπης ίνας μπορεί να υπερβεί το 1 (Tb/s)-km και όταν χρησιμοποιούμε μονότροπους ημιαγωγούς laser για να μειώσουμε με αυτό τον τρόπο την Δλ κάτω από το 1 nm. Η παράμετρος διασποράς D μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά όταν το μήκος κύματος λειτουργίας μεταβληθεί από τα 1,3μm. Η εξάρτηση αυτής της D από το μήκος κύματος ρυθμίζεται από την εξάρτηση του δείκτη τρόπου μετάδοσης ν από τη συχνότητα. Από την εξίσωση 16 η D μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d}{d\omega} \left(\frac{l}{u_g} \right) = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{nd^2}{d\omega^2} \right) \quad (\text{εξίσωση 18})$$

Όπου έγινε χρήση της εξίσωσης 13. Αν γίνει αντικατάσταση του ν της εξίσωσης του βαθμού της διπλοθλαστικότητας $B = |n_x - n_y|$ και γίνει και χρήση της εξίσωσης της συνθήκης αποκοπής $V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx (2\pi/\lambda) a n_{1V2\Delta}$ η D μπορεί να γραφεί σαν το άθροισμα των δύο όρων.

$$D = D_M + D_W \quad (\text{εξίσωση 19})$$

Όπου η διασπορά υλικού D_M και η διασπορά κυματοδήγησης D_W δίνονται από τις σχέσεις:

$$D_M = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \frac{dn_{2g}}{d\omega} = \frac{1}{c} \frac{dn_{2g}}{d\lambda} \quad (\text{εξίσωση 20})$$

$$D_W = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2} \left[\frac{n_{2g}^2}{\omega n_2} \frac{V d^2}{dV^2} (Vb) + \frac{dn_{2g}}{d\omega} \frac{d(Vb)}{dV} \right] \quad (\text{εξίσωση 21})$$

Σε αυτή την περίπτωση το n_{2g} είναι ο δείκτης διάθλασης ομάδας του υλικού του περιβλήματος και οι παράμετροι V και b δίνονται από τις εξισώσεις της συνθήκης αποκοπής και της εξίσωσης κανονικοποιημένης σταθεράς μετάδοσης b αντίστοιχα. Για να ισχύουν οι εξισώσεις 8,9,10 η παράμετρος Δ θεωρείται ότι εξαρτάται από τη συχνότητα.

Διασπορά ανώτερης τάξης: από την εξίσωση $BL|D|\Delta\lambda < 1$ φαίνεται πως το γινόμενο BL μιας μονότροπης οπτικής ίνας μπορεί να αυξηθεί στο άπειρο με λειτουργικό μήκος κύματος μηδενικής διασποράς λ_{ZD} όπου $D=0$. Το φαινόμενο της διασποράς ωστόσο δεν εξαλείφεται εντελώς όταν $\lambda = \lambda_{ZD}$. Οι οπτικοί παλμοί επίσης δεν υφίστανται διεύρυνση εξαιτίας των φαινομένων διασποράς ανώτερης τάξης. Το χαρακτηριστικό αυτό γίνεται κατανοητό εφόσον ξέρουμε πως η D δεν μπορεί να μηδενιστεί σε κάθε μήκος κύματος που εμπεριέχεται στο παλμικό φάσμα με κέντρο το λ_{ZD} . τα φαινόμενα διασποράς ανώτερης τάξης διέπονται από τον τύπο κλίσης διασποράς $S=dD/d\lambda$. Η παράμετρος S ονομάζεται και παράμετρος διαφορικής διασποράς ή παράμετρος διασποράς δεύτερης τάξης. Με τη βοήθεια της εξίσωσης

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{u_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$$

Μπορούμε να υπολογίσουμε πως:

$$S = (2\pi c/\lambda^2)^2 \beta_3 + (4\pi c/\lambda^3) \beta_2 \quad (\text{εξίσωση 22})$$

Όπου $\beta_3 = d\beta_2/d\omega = d^3\beta/d\omega^3$. Όταν $\lambda = \lambda_{ZD}$ τότε $\beta_2=0$ και η S είναι ανάλογη με το β_3 . Για πηγή με φασματικό εύρος $\Delta\lambda$ η ενδεδειγμένη τιμή της παραμέτρου διασποράς γίνεται $D=S\Delta\lambda$. Ο περιορισμός του γινομένου του ρυθμού μετάδοσης bit επί την απόσταση μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$BL|D|\Delta\lambda < 1$$

Με αυτή την τιμή της D ή με την εξής εξίσωση:

$$BL|S|(\Delta\lambda)^2 < 1 \quad (\text{εξίσωση 23})$$

Τύπος ίνας	NA	Δ (%)	$2w$ (μm)	λ_{ZD} (μm)	GVD Κλίση S [ps/(km-nm ²)]
Corning SMF-28	0.13	0.36	9.3	1.312	0.090
AT&T Matched-Clad	0.12	0.33	9.3	1.312	0.088
LITESPEC GSM-13	0.12	0.33	9.3	1.312	0.087
Corning SMF-DS	0.17	0.90	8.1	1.550	0.075
AT&T TrueWave	0.16	0.75	8.4	1.530	0.095
LITESPEC DSM-15	0.17	0.90	8.0	1.555	0.072

Χαρακτηριστικά διαφόρων ινών του εμπορίου

Διασπορά πόλωσης τρόπου μετάδοσης: μια δυνατή πηγή διεύρυνσης παλμού σχετίζεται με τη διπλοθλαστικότητα της ίνας. Οι μικρές αποκλίσεις από την τέλεια κυλινδρική συμμετρία οδηγούν σε διπλοθλαστικότητα εξαιτίας του διαφορετικού δείκτη τρόπου μετάδοσης ο οποίος σχετίζεται με τις ορθογώνια πολωμένες συνιστώσες του βασικού τρόπου μετάδοσης στην ίνα. Αν ο παλμός εισόδου διεγείρει και τις δύο συνιστώσες πόλωσης αυτός διευρύνεται στην έξοδο αφού οι δύο αυτές συνιστώσες διασκορπίζονται κατά μήκος της ίνας εξαιτίας της διαφορετικής ταχύτητας ομάδας που διαθέτει η καθεμία. Το φαινόμενο αυτό, είναι γνωστό σαν διαφορά πόλωσης – τρόπου μετάδοσης (PMD). Όπως και στην περίπτωση της GVD η παλμική διεύρυνση μπορεί να υπολογιστεί από τη χρονική καθυστέρηση ΔT μεταξύ των δύο συνιστωσών πόλωσης κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του παλμού. Για ίνα μήκους L , η ΔT δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta T = \left| \frac{L}{u_{gx}} - \frac{L}{u_{gy}} \right| = L |\beta_{1x} - \beta_{1y}| = L \Delta\beta_1 \quad (\text{εξίσωση 24})$$

Όπου οι δείκτες x, y αντιστοιχούν στους δύο ορθογώνια πολωμένους τρόπους μετάδοσης, ενώ η $\Delta\beta_1$ σχετίζεται με τη διπλοθλαστική ιδιότητα της ίνας. Η εξίσωση 12 χρησιμοποιήθηκε για να συσχετίσουμε την ταχύτητα ομάδας u_g με τη σταθερά μετάδοσης β . Όπως συμβαίνει και στην περίπτωση της διασποράς μεταξύ των τρόπων μετάδοσης η ποσότητα $\Delta T/L$ αποτελεί μέτρο της PMD. Για τις οπτικές ίνες διατήρησης πόλωσης η $\Delta T/L$ είναι αρκετά μεγάλη όταν οι δύο συνιστώσες διεγείρονται με τον ίδιο τρόπο στην είσοδο της ίνας αλλά μπορούμε να μηδενίσουμε με εκπομπή φως κατά μήκος ενός από τους δύο κύριους άξονες. Δεν μπορεί να γίνει άμεσα της εξίσωσης 24 για να υπολογιστεί η PMD για τις συνηθισμένες οπτικές ίνες που έχουν εφαρμογή στα συστήματα τηλεπικοινωνίας. Αυτό συμβαίνει λόγω της τυχαίας ζεύξης μεταξύ των δύο τρόπων μετάδοσης οι οποίοι επάγονται λόγω των τυχαίων διαταραχών της διπλοθλαστικότητας που εμφανίζεται κατά μήκος της ίνας. Η ζεύξη τείνει να εξισώσει τους χρόνους μετάδοσης στις δύο συνιστώσες πόλωσης. Στην πραγματικότητα η PMD χαρακτηρίζεται από την ενεργό τιμή της ΔT που βρίσκουμε από το μέσο όρο των τυχαίων διαταραχών. Το αποτέλεσμα θα είναι:

$$\sigma_{\tau}^2 = \{(\Delta T)^2\} = 1/2 \Delta\beta_1^2 h^2 [2L/h - 1 + \exp(-2L/h)] \quad (\text{εξίσωση 25})$$

όπου h είναι το μήκος αποσυσχέτισης με τυπικές τιμές μεταξύ 1-10m. Για τις οπτικές ίνες διατήρησης πόλωσης το μήκος αποσυσχέτισης είναι άπειρα μεγάλο και η σ_T PMD αυξάνει γραμμικά με το μήκος της οπτικής ίνας όπως είναι και το αναμενόμενο. Αντίθετα για $h \ll L$ ισχύει:

$$\sigma_T \approx \Delta\beta_1 v h L = D_p v L \quad (\text{εξίσωση 26})$$

όπου η D_p είναι η παράμετρος PMD με τυπικές τιμές στην κλίμακα $D_p = 0,1-1$ ps/vkm. Λόγω της εξάρτησης της από την vL , η διεύρυνση του επαγόμενου παλμού PMD είναι σχετικά μικρή σε σχέση με την επίδραση της GVD. Ωστόσο, η PMD μπορεί να μεταβληθεί σε περιοριστικό παράγοντα για τα συστήματα τηλεπικοινωνίας οπτικών ινών τα οποία έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν σε μεγάλες αποστάσεις γύρω στο μήκος κύματος μηδενικής διασποράς της ίνας.

Περιορισμοί λόγω διασποράς: η διεύρυνση παλμού βασίζεται σε μια διαισθητική φαινομενολογική προσέγγιση. Μας παρέχει έναν υπολογισμό πρώτου βαθμού παλμών των οποίων το φασματικό εύρος καθορίζεται από το φάσμα της οπτικής πηγής αντί από το φάσμα Fourier του παλμού. Γενικά η έκταση της διεύρυνσης του παλμού εξαρτάται από το εύρος και τη μορφή του παλμού που εισέρχεται.

Περιορισμοί του ρυθμού μετάδοσης bit: οι περιορισμοί που επιβάλλονται στο ρυθμό μετάδοσης bit λόγω της διασποράς στην ίνα μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικοί μεταξύ τους ανάλογα με το φασματικό εύρος της πηγής.

Εύρος ζώνης λειτουργίας της οπτικής ίνας: η έννοια του εύρους ζώνης λειτουργίας της ίνας προέρχεται από τη θεωρία των αναλλοίωτων χρονικά γραμμικών συστημάτων. Αν θεωρήσουμε την οπτική ίνα σαν ένα γραμμικό σύστημα η ισχύς εξόδου και εισόδου της θα σχετίζονται με την παρακάτω σχέση:

$$P_{out}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - t') P_{in}(t') dt' \quad (\text{εξίσωση 27})$$

Για έναν κρουστικό παλμό $P_{in}(t) = \delta(t)$ όπου $\delta(t)$ είναι η συνάρτηση δέλτα και $P_{out}(t) = h(t)$. Για το λόγο αυτό η $h(t)$ ονομάζεται κρουστική απόκριση του γραμμικού συστήματος. Μέσω μετασχηματισμού Fourier παίρνουμε τη σχέση:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(i2\pi ft) dt \quad (\text{εξίσωση 28})$$

που μας δίνει την απόκριση της συχνότητας και ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς. Γενικά η $|H(f)|$ ελαττώνεται με την αύξηση της συχνότητας f που σημαίνει πως οι συνιστώσες υψηλής συχνότητας του σήματος εισόδου παθαίνουν εξασθένιση από την ίνα. Αποτέλεσμα είναι η ίνα να λειτουργεί σαν φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων. Το εύρος ζώνης της ίνας f_{3dB} αντιστοιχεί σε συχνότητα $f = f_{3dB}$ στην οποία η $|H(f)|$ μειώνεται στο μισό ή κατά 3 dB.

$$|H(f_{3dB})/ H(0)| = 1/2 \quad (\text{εξίσωση 29})$$

Στη θεωρία των ηλεκτρικών επικοινωνιών το εύρος ζώνης λειτουργίας των γραμμικών συστημάτων γενικά ορίζεται σαν η συχνότητα στην οποία η ηλεκτρική ισχύς μειώνεται κατά 3 dB. Εφόσον η ηλεκτρική μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα μπορούμε να πάρουμε το ηλεκτρικό εύρος ζώνης των 3 dB εάν αντικαταστήσουμε τον συντελεστή $\frac{1}{2}$ στην εξίσωση 29, με $1/\sqrt{2}$.

Κεφάλαιο 4

Συνδέσεις οπτικών ινών-OTDR

Οι οπτικές ίνες βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές κατηγορίες. Κάποιες από αυτές είναι:

4.1 Συνδέσεις

Για να επικοινωνήσουν δύο ή περισσότερα συστήματα πρέπει να εξασφαλιστεί η φυσική ροή της πληροφορίας μεταξύ τους καθώς και οι λειτουργίες ελέγχου και διαχείρισης της ανταλλαγής της πληροφορίας. Ένας διαχωρισμός που μπορεί να γίνει ανάμεσα σε δύο λειτουργίες είναι ο εξής: η μετάδοση των δεδομένων και η επικοινωνία δεδομένων. Η μετάδοση δεδομένων ορίζεται ως η μετάδοση πληροφορίας διαμέσου κάποιου φυσικού μέσου χρησιμοποιώντας κάποια μορφή φυσικής αναπαράστασης του σήματος ανάλογα βέβαια με το μέσο που χρησιμοποιείται. Η επικοινωνία δεδομένων στην οποία υπάρχει μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με αυτό που υπάρχει στη μετάδοση δεδομένων λόγω του ότι καλύπτει όχι μόνο τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μετάδοσης αλλά και πολλές άλλες παραμέτρους όπως είναι το λογισμικό για τη μετάδοση δεδομένων, έλεγχος λαθών πρωτόκολλα για την εξασφάλιση της ανταλλαγής πληροφορίας. Αν η πληροφορία οποιασδήποτε μορφής μεταδίδεται μόνο προς μία κατεύθυνση έχουμε μονόδρομη επικοινωνία. Αντιθέτως αν η πληροφορία μεταδίδεται ταυτόχρονα και στις δύο κατευθύνσεις έχουμε αμφίδρομη επικοινωνία. Η ημι-αμφίδρομη επικοινωνία είναι αυτή που υπάρχει διάδοση και στις δύο κατευθύνσεις όχι όμως ταυτόχρονα. Ο τελικός σκοπός που πρέπει να επιτευχθεί στη μετάδοση είναι η μεταφορά ηλεκτρικών σημάτων στο φυσικό μέσο μετάδοσης. Κρίνεται απαραίτητη η χρήση DCE (Data Communication Equipment) για να επικοινωνήσει ο τερματικός χρήστης DTE (Data Terminal Equipment).

Ο φυσικός δρόμος μετάδοσης της πληροφορίας είναι το μέσο μετάδοσης μέσω του οποίου σήμα κάποιας μορφής φτάνει από τον πομπό στο δέκτη. Το μέσο μετάδοσης μπορεί να πάρει διάφορες μορφές. Από την πιο απλή όπως είναι ένα

συνεστραμμένο ζεύγος μέχρι και την πιο σύγχρονη που είναι η οπτική ίνα. Υπάρχουν και άλλοι τρόποι μετάδοσης όπως μετάδοση μέσω ομοαξονικού καλωδίου ραδιοζεύξεις και δορυφορικές ζεύξεις.

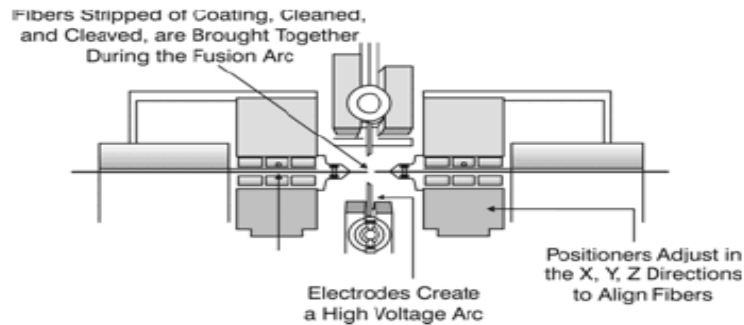
Το συνεστραμμένο καλώδιο: είναι μία απλή και φθηνή γραμμή μετάδοσης. Αποτελείται από μεμονωμένα καλώδια τα οποία είναι τυλιγμένα το ένα γύρω στο άλλο και αυτό για το λόγο μείωσης του θορύβου που επηρεάζουν το ηλεκτρικό σήμα εξωτερικοί παράγοντες. Η χρήση του γίνεται τόσο σε αναλογικά όσο και ψηφιακά σήματα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων και το εύρος ζώνης με την απόσβεση έχουν τιμές οι οποίες εξαρτώνται από τη διάμετρο των καλωδίων. Κάποιες τυπικές τιμές διαμέτρου είναι 0,4mm 0,6mm και 0,8mm. όταν χρησιμοποιείται μεταλλική εξωτερική προστασία μειώνεται η επίδραση του θορύβου ελαττώνεται όμως το εύρος ζώνης.

Το ομοαξονικό καλώδιο: το ομοαξονικό καλώδιο αποτελείται από έναν αγωγό ο οποίος βρίσκεται μέσα σε έναν χάλκινο σωλήνα που χρησιμοποιείται ως μονοπάτι επιστροφής και ηλεκτρικής προστασίας του εσωτερικού αγωγού. Επιτρέπει τη μετάδοση σημάτων μεγάλου εύρους ζώνης. Είναι εφικτό να μεταφερθούν μέχρι 10800 αναλογικές τηλεφωνικές διοδεύσεις με πολυπλεξία ενώ μπορεί να μεταφέρει ψηφιακό σήμα σε ρυθμό μετάδοσης της τάξεως των 34Mbps 140Mbps και 565Mbps ανάλογα με τη διάμετρο αγωγού περιβλήματος (0,6/2,8 mm 1.2/4.4 mm και 2.6/9.5mm).

4.2 Συγκολλήσεις ινών

Ο συγκολλητής χρησιμοποιείται για τη δημιουργία χαμηλών απωλειών συνδέσεων οπτικών ινών μέσω τήξης ώστε να επιτυγχάνεται η όσο δυνατόν καλύτερη συνέχεια μιας ζεύξης. Η σωστή λειτουργία ενός fusion splicer προϋποθέτει την ύπαρξη κάποιων συνθηκών. Οι συνθήκες αυτές αφορούν τον τύπο των οπτικών ινών που θα τοποθετηθούν (πολύτροπες, μονότροπες), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών, την απόσταση μεταξύ τους, την καθαρότητα τους, κτλ.

Η διάταξη λειτουργίας ενός συγκολλητή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Αρχή λειτουργίας

Η διαδικασία της συγκόλλησης σε ένα fusion splicer επιτυγχάνεται με την εφαρμογή υψηλής τάσης σε δύο ακίδες και ως εκ τούτου τη δημιουργία τόξου που λιώνει τις δύο οπτικές τοπικά. Σε μία οπτική ίνα λόγω της διαφορετικότητας του υλικού του πυρήνα σε σχέση με αυτό του μανδύα ισχύουν διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης για το κάθε υλικό και προκειμένου η θερμοκρασία τήξης του πυρήνα να είναι χαμηλότερη σε σχέση με αυτή του πυρήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο πυρήνας της ίνας να είναι αρκετά πιο μαλακός από το μανδύα κατά τη διάρκεια της τήξης και έτσι να επιτυγχάνεται η συγκόλληση μεταξύ δύο ινών ενώ παράλληλα ο μανδύας τους να παραμένει ανεπηρέαστος. Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται για να είμαστε σε θέση να κάνουμε μια επιτυχημένη συγκόλληση είναι οι εξής.

1. Ποιότητα της ίνας: ο τερματισμός της ίνας πρέπει να είναι κάθετος στον διαμήκη άξονα της ίνας όπως επίσης ο τερματισμός της ίνας πρέπει να είναι επίπεδος χωρίς ανομοιομορφίες.

Αν οι παραπάνω συνθήκες δεν ικανοποιούνται ο πυρήνας θα παραμορφωθεί κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

2. Οι πυρήνες των ινών προς συγκόλληση δεν πρέπει να είναι έκκεντροι.

3. Κατά τη διάρκεια της σύντηξης οι ίνες πρέπει να οδηγούνται η μία προς την άλλη. Το πλησίασμα της μίας ίνας προς την άλλη πρέπει να είναι περίπου 2-3μm

μεγαλύτερο από το κενό που είναι οι δύο ίνες πριν ξεκινήσει η τήξη τους. Αν το πλησίασμα είναι μεγαλύτερο ή και μικρότερο από την παραπάνω απόσταση τότε οι πυρήνες θα παραμορφωθούν.

4. Ο τερματισμός της κάθε ίνας πρέπει να είναι απόλυτα καθαρός. Οποιαδήποτε σκόνη μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα.

5. Πρέπει να γίνει πολύ καλή ευθυγράμμιση μεταξύ των ινών.

Βήματα διαδικασίας συγκόλλησης

Απογύμνωση των ινών από τον μανδύα (50mm περίπου)

Καθαρισμός των ινών

Κάθετη κοπή των τερματισμών των ινών με fiber cleaver (10mm περίπου)

Τοποθέτηση των ινών στις κατάλληλες θέσεις

Ρύθμιση της απόστασης μεταξύ των δύο ινών

Εφαρμογή επιπλέον καθαρισμού του τερματισμού των οπτικών ινών

Δημιουργία τόξου για τη συγκόλληση ινών

Ενδεικτικά τα κουμπιά που υπάρχουν στα περισσότερα splicer είναι τα εξής: reset, set, mode, X/Y, Arc, cnd, motor, ent, heat, condition/comment input, πλήκτρο πάνω-κάτω.



Αναλυτικότερα για το πώς λειτουργεί το κάθε πλήκτρο εξηγείται παρακάτω:

Πλήκτρο reset: όταν πατηθεί το πλήκτρο αυτό το σύστημα σταματάει σε οποιοδήποτε σημείο και να βρίσκεται και η οπτική ίνα κινείται προς τα πίσω στο Z άξονα προς την αρχική θέση. Ο συγκολλητής αποδέχεται την εντολή αυτή με τον χαρακτηριστικό ήχο beer και στην οθόνη εμφανίζεται η ένδειξη reset.

Πλήκτρο set: το πλήκτρο αυτό χρησιμοποιείται για να οριστεί το διάστημα μεταξύ των δύο άκρων των ινών και η αυτόματη ευθυγράμμιση των ινών. Το μήνυμα gar set fiber ok? και aligning εμφανίζονται κατά τα ενδιάμεσα στάδια της λειτουργίας.

Πλήκτρο mode: το πλήκτρο αυτό χρησιμοποιείται για να επιλεγθεί το πρόγραμμα που αντιστοιχεί στην ίνα με την οποία δουλεύουμε. Σε SM κατάσταση υπάρχει απόλυτη ευθυγράμμιση του πυρηνικού άξονα ενώ σε κατάσταση MM κατάσταση υπάρχει αυτόματη ευθυγράμμιση του άξονα των ινών.

Πλήκτρο X/Y: το πλήκτρο αυτό χρησιμοποιείται για την αυτόματη αλλαγή πεδίου. Όταν το πλήκτρο X/Y πατηθεί υπάρχει αλλαγή στην εικόνα της ίνας από X σε Y και από Y σε X. εάν πατηθεί το πλήκτρο αυτό μετά τον ορισμό του διαστήματος οι ίνες προσαρμόζονται στο κέντρο της οθόνης και εστιάζονται αυτόματα.

Πλήκτρο arc: το πλήκτρο αυτό χρησιμοποιείται για να πετύχουμε τόξα αλλά δεν θα λειτουργήσει εάν το μηχάνημα είναι σε κατάσταση αυτόματης συγκόλλησης. Στην οθόνη εμφανίζεται το μήνυμα ARC λίγο πριν εκτελεστεί η εκφόρτιση. Εάν ο ορισμός διαστήματος έχει ήδη γίνει μετά την εκφόρτιση έχουμε αυτόματα τον υπολογισμό της απώλειας. Η λειτουργία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση που επιθυμούμε να δημιουργήσουμε ξανά τόξο σε ήδη υπάρχουσα συγκόλληση.

Πλήκτρο CND: χρησιμοποιείται για τις διάφορες επιλογές που υπάρχουν στο menu.

Πλήκτρο motor: χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των κινητήρων του συγκολλητή χειροκίνητα.

Πλήκτρο Ent: χρησιμοποιείται για να διαλέξουμε την επιλογή για τις συνθήκες εκφόρτισης ή για να διαλέξουμε τον έλεγχο της μηχανής.

Πλήκτρο heat: χρησιμοποιείται ώστε να αρχίσει η διαδικασία της θέρμανσης. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης ανάβει μια ενδεικτική φωτεινή ένδειξη.

Condition/comment input: χρησιμοποιείται για να εισαχθούν οι παράμετροι λειτουργίας ή κάποια σχόλια που θέλουμε να κάνουμε για την κόλληση της ίνας.

Πλήκτρο πάνω-κάτω: χρησιμοποιείται για να μετακινούμε τον αστερίσκο μεταξύ των επιλογών του menu. Όταν επιλεγθεί ο χειροκίνητος έλεγχος τα πλήκτρα αυτά λειτουργούν ως επιλογές διεύθυνσης μπροστά και πίσω αντίστοιχα.

Για να ξεκινήσει η διαδικασία της συγκόλλησης ο συγκολλητής θα πρέπει να είναι στη κατάσταση ready ή ότι η διαδικασία συγκόλλησης είναι σε παύση ή έχει τελειώσει. Τοποθετούμε την ίνα από την μία άκρη και το rigtail από την άλλη. Εάν η κόλληση είναι επιτυχής τότε δεν εμφανίζεται κάποιο μήνυμα λάθους και η κόλληση γίνεται κανονικά τοποθετώντας το πλαστικό και πατώντας την ένδειξη heat. Εάν η κόλληση δεν είναι δυνατόν να γίνει και αυτό είτε επειδή η ίνα έχει κάποιο σπάσιμο είτε κάποια βρωμιά είτε μεγάλες απώλειες κόβεται ξανά και ξαναρχίζει η διαδικασία της κόλλησης.

Κάποια μηνύματα λάθους που είναι δυνατόν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της κόλλησης είναι τα εξής:

Over run XF XR YF YR: οι αιτίες μπορεί να είναι ότι υπάρχει σκόνη στο V-αυλάκι, η ίνα έχει αποκολληθεί από το V-αυλάκι, η κυρίως επικάλυψη (προστατευτικό) δεν έχει αφαιρεθεί εντελώς. Οι λύσεις είναι να καθαριστεί το V-αυλάκι, να τοποθετηθεί η ίνα στο V-αυλάκι ή να κοπεί η ίνα και η διαδικασία να επαναληφθεί από την αρχή.

Over run focus near, focus far, focus up, focus down: η αιτία είναι πως η ίνα δεν είναι καλά τοποθετημένη στο V-αυλάκι. Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό θα πρέπει το σημείο εστίασης και η θέση της εικόνας της ίνας να επανέρχονται αυτόματα. Τοποθετούμε την ίνα στο V-αυλάκι και ξαναρχίζουμε τη ρύθμιση του διαστήματος.

Over run ZLF, ZRF: η ίνα είτε έχει κοπεί πολύ κοντή είτε έχει αποκολληθεί από το V-αυλάκι. Ξανά κόβουμε την ίνα κατάλληλα και την τοποθετούμε ξανά στο V-αυλάκι.

Over run ZLR, ZRR: κατά τη διάρκεια της χειροκίνητης κίνησης του μοτέρ η ίνα κινείται προς τα πίσω μέχρι ο διακόπτης ορίου να ενεργοποιηθεί. Τότε επανέρχεται αυτόματα στην κατάσταση ready.

Για τους συγκολλητές ινών υπάρχει και η κατάλληλη συντήρηση ώστε να υπάρχουν οι σωστές και ακριβείς αποδόσεις. Έτσι τα βασικά πράγματα που πρέπει να γίνονται κατά τη συντήρηση είναι τα εξής: καθαρισμός της μονάδας οδήγησης της οπτικής ίνας. Όταν το V-αυλάκι μονάδας οδήγησης της ίνας έχει λερωθεί προκαλείται αξονική αντιστάθμιση της οπτικής ίνας. Ελέγχουμε αν το μηχάνημα δεν είναι σε λειτουργία, σηκώνουμε το σφικτήρα της ίνας και σκουπίζουμε απαλά το V-αυλάκι με μία μπατονέτα που έχει ποτιστεί με αλκοόλη. Εάν δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα το τρίβουμε με τη μία άκρη της οπτικής ίνας.

4.3 Μέθοδος μετρήσεων

Φασματικές μετρήσεις. Η εξασθένηση στις φασματικές μετρήσεις μετράται ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Η πηγή φωτός σε αυτό τον τύπο μετρήσεων είναι μια πηγή λευκού φωτός και πηγή μονοχρωματική.

Μετρήσεις σε ένα μόνο μήκος κύματος: η εξασθένηση μετράται σε ένα μόνο μήκος κύματος. Η πηγή φωτός μπορεί να είναι είτε μία δίοδος laser είτε μία δίοδος εκπομπής φωτός led.

Μέθοδος οπτικής ανάκλασης στο χρόνο (OTDR): οι μετρήσεις OTDR χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της εξασθένησης κατά μήκος μίας ζεύξης με ίνα από το ένα άκρο στο άλλο. Οι OTDR μετρήσεις βασίζονται στη σκέδαση Rayleigh κατά την αντίστροφη κατεύθυνση. Χρησιμοποιώντας ένα βραχύ οπτικό παλμό και παρατηρώντας τη στάθμη του διαχεόμενου σήματος συναρτήσει του χρόνου είναι δυνατόν να μετατρέψουμε αυτή την εξασθένηση σε συνάρτηση της απόστασης από το ένα άκρο της ίνας.

Τύπος μετρήσεως:

Μπορούμε να μετρήσουμε σε μία οπτική ίνα:

Το συντελεστή εξασθένησης ενός τμήματος της ίνας, την απόσβεση της μούφας, την ολική απόσβεση σε μία ζεύξη ίνας, το μήκος της ίνας, όπως επίσης και να προσδιορίσουμε τη θέση που βρίσκονται οι μούφες της ίνας οι συνδετήρες της ίνας οι ασυνέχειες εξασθένησης της ίνας ή ακόμα και τα ελαττώματα της ίνας.



4.4 Όργανο μετρήσεων OTDR

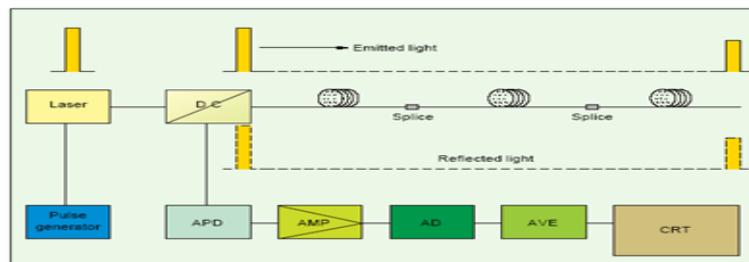
Το OTDR είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο ποιότητας εγκατεστημένων ή προς εγκατάσταση καλωδίων και τον ευρύτερο χαρακτηρισμό τους όσον αφορά τις απώλειες που εμφανίζουν κατά το μήκος τους. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στη διαδικασία εύρεσης σημείων που προκαλούν τη διακοπή μίας ζεύξης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

Συγκεκριμένα η χρησιμότητα 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.

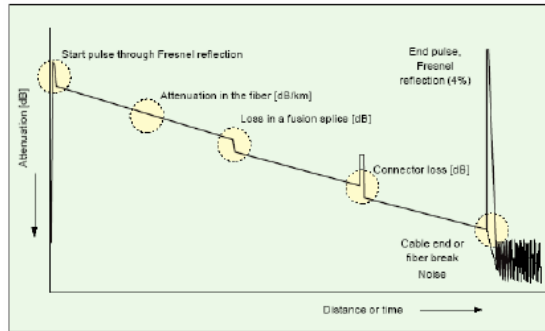
4.5 Αρχή λειτουργίας του OTDR

Το όργανο OTDR λειτουργεί με βάση τη διάδοση φωτός σε οπτική ίνα κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Η λειτουργία του γίνεται με βάση τη γεννήτρια στενών ηλεκτρικών παλμών (συνήθως από 0,01μs έως 0,1μs) που παράγει τους παλμούς αυτούς ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Οι παλμοί αυτοί οδηγούν μια διοδική 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 κατά τη διάδοση συγκεκριμένης ποσότητας φωτός θα επιστρέψει στο όργανο μέσω σκέδασης Rayleigh ή ανακλάσεων. Η επιστρεφόμενη δέσμη θα ανιχνευθεί από μία φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (APD Avalanche Photodiode) και το ηλεκτρικό σήμα που θα παραχθεί από αυτή ενισχύεται από ενισχυτική βαθμίδα και γίνεται 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.



Σχηματική αναπαράσταση των βασικών δομικών στοιχείων της διάταξης OTDR

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



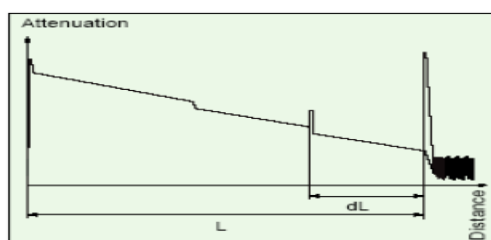
Απλοποιημένο διάγραμμα του OTDR

Μέτρηση απόστασης ίνας

Με τη χρήση ενός OTDR είναι δυνατό να προσδιοριστεί το μήκος μιας οπτικής ζεύξης με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια. Η μέτρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για να προσδιοριστεί το σημείο διακοπής μιας ζεύξης ή εισαγωγής υψηλής εξασθένησης. Η μέτρηση επιτυγχάνεται έμμεσα μέσω της παρακάτω σχέσης.

$$L = vt/2 = ct/2n$$

Όπου v η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στην οπτική ίνα, t ο χρόνος που απαιτείται να διαδοθεί και να ανακλαστεί το φως πίσω στο όργανο L το μήκος της οπτικής ίνας c η ταχύτητα του φωτός στο κενό και n ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα της οπτικής ίνας. Στην ουσία το όργανο μετράει το χρόνο διάδοσης και επιστροφής της φωτεινής δέσμης και έχοντας μια τιμή του δείκτη διάθλασης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια της μέτρησης.



OTDR καμπύλη και η χρήση της για τον υπολογισμό μήκους ζεύξης

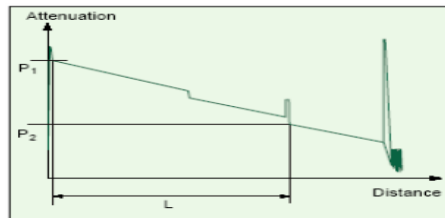
Απώλεια οπτικής ισχύος- Εξασθένηση

Η απώλεια οπτικής ισχύος σε ένα διάστημα μπορεί να υπολογιστεί αφαιρώντας τα επίπεδα ισχύος των δύο σημείων που ορίζουν τα διάστημα με βάση την απλή σχέση

$$A = P_1 - P_2 \text{ (dB)}$$

Η εξασθένιση υπολογίζεται διαιρώντας με το αντίστοιχο διάστημα.

$$A = \frac{P_1 - P_2}{L} \text{ (dB/km)}$$

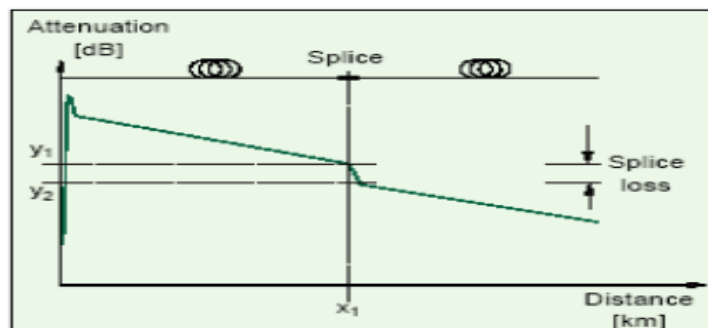


OTDR καμπύλη και η χρήση της για τον υπολογισμό της εξασθένισης στη ζεύξη

Μέτρηση της εξασθένισης με μια συγκόλληση ή έναν συνδετήρα

Στη οθόνη του OTDR φαίνεται πως εξασθενεί η ισχύς σε ένα τμήμα της οπτικής ζεύξης. Αν η ζεύξη περιέχει συγκολλήσεις ή συνδέσεις αυτές θα εμφανιστούν σαν κάθετες πτώσεις στην καμπύλη. Η απώλεια της συγκόλλησης ή της σύνδεσης μπορεί να προσδιοριστεί μετρώντας την υποβάθμιση της ισχύος στα δύο σημεία της καμπής.

$$A \text{ (συγκόλλησης)} = \gamma_1 - \gamma_2$$



Μέθοδος δύο σημείων για τον υπολογισμό απωλειών σε μια συγκόλληση οπτικών ινών.

4.6 Ρυθμίσεις ενός OTDR

Οι σωστές ρυθμίσεις ενός OTDR παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή αξιόπιστων μετρήσεων. Χαρακτηριστικά κρίσιμης σημασίας είναι τα παρακάτω.

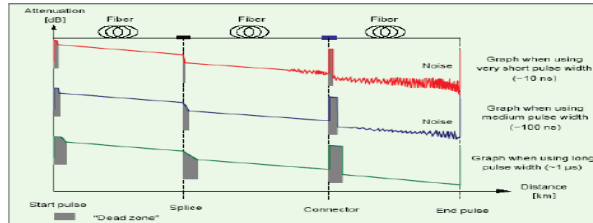
1 Νεκρή ζώνη.

Κάθε συγκόλληση ή συνδετήρας προκαλούν μια παρενόχληση στο ανακλώμενο οπτικό σήμα. Αυτού του είδους η επίδραση επιβάλλει μια ζώνη συγκεκριμένου μήκους μετά την ένωση για την οποία δεν είναι δυνατόν να μετρήσουμε το οτιδήποτε. Για παράδειγμα η συγκόλληση που βρίσκεται στο εσωτερικό ενός κατανεμητή (Optical Distribution Frame) δεν είναι δυνατό να ανιχνευθεί από ένα OTDR αφού πριν από αυτή υπάρχει ο συνδετήρας που ενώνει την οπτική ίνα με τον κατανεμητή. Επίσης για μία οπτική ίνα που έχει συγκολληθεί δύο φορές σε απόσταση μερικών μέτρων (έως 3 μέτρα) δεν είναι δυνατή η διάκριση των δύο συγκολλήσεων από το όργανο. Αντί αυτών θα φανεί μια συγκόλληση της οποίας οι συνολικές απώλειες είναι το άθροισμα των επιμέρους απωλειών.

2. Εύρος παλμών

Η νεκρή ζώνη μπορεί να προσδιοριστεί σε μέγεθος αν οι παλμοί που εκπέμπονται από το OTDR είναι όσο το δυνατό στενότερου εύρους. Δυστυχώς μια τέτοια μέτρηση δεν είναι άμοιρη μειονεκτημάτων μιας και οι στενοί παλμοί δεν είναι δυνατό να διαδίδονται για μεγάλες αποστάσεις. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν περιορίζεται η ικανότητα του οργάνου για τον καθορισμό χαρακτηριστικών σε μεγάλες αποστάσεις. Συμπερασματικά οι μεγάλοι εύρους παλμοί είναι κατάλληλοι (>1μs) για το χαρακτηρισμό μιας οπτικής ζεύξης μεγάλης σχετικά απόστασης (>40 km) με τίμημα τη μεγέθυνση της νεκρής ζώνης. Αντίθετα οι στενοί παλμοί αυξάνουν τη διακριτική ικανότητα του οργάνου μειώνοντας το μήκος της νεκρής ζώνης αλλά ταυτόχρονα λόγω της ευαισθησίας τους, μειώνουν την απόκριση του οργάνου στις μεγάλες αποστάσεις. Συνήθως η σωστή ρύθμιση επιτυγχάνεται από την αυτόματη λειτουργία που διαθέτουν σαν επιλογή σχεδόν από όλα τα εμπορικά διαθέσιμα

όργανα. Η αυτόματη λειτουργία επιλέγει το σωστό εύρος παλμών με κριτήριο την όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοση του για τον ικανοποιητικό καθορισμό όλων των χαρακτηριστικών της ζεύξης.



Διαγράμματα που απεικονίζουν την μεταβολή του εύρους παλμού.

3. Δυναμική Περιοχή

Η δυναμική περιοχή του OTDR καθορίζεται από το πόσο ισχυρή είναι η οπτική πηγή του οργάνου και ταυτόχρονα από το πόσο ευαίσθητη είναι η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (APD) που λαμβάνει το ανακλώμενο σήμα. Όσο αυξάνει η ισχύς και η ευαισθησία του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα τόσο το όργανο θεωρείται πληρέστερο αφού αποδίδει τα χαρακτηριστικά της ζεύξης με μεγάλη ακρίβεια για μεγαλύτερες αποστάσεις. Η δυναμική περιοχή ενός τυπικού OTDR επιτρέπει τη εξαγωγή ασφαλώς συμπερασμάτων για αποστάσεις μέχρι 100 km η οποία θεωρείται επαρκής για το χαρακτηρισμό των σημερινών οπτικών ζεύξεων. Η δυναμική περιοχή σε αυτή την περίπτωση μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά σκεπτόμενα ότι 100 km εισάγουν 35 dB απωλειών στο μήκος κύματος των 1310nm. Αν συμπεριληφθούν άλλα 5 dB απωλειών λόγω συγκολλήσεων και συνδέσεων στον κατανεμητή συμπεραίνουμε ότι η δυναμική περιοχή πρέπει να είναι ίση με 40 dB. Επίσης αν αναλογιστούμε ότι το σήμα που στέλνουμε θα υποστεί τα διαδικασία δυο φορές από το ένα άκρο της ζεύξης στο άλλο (αρχικά διαδιδόμενο μετά ανακλώμενο) τότε συμπεραίνουμε ότι η δυναμική περιοχή πρέπει να είναι 80 dB αριθμός που είναι ιδιαίτερα ψηλός και είναι δυνατό να επιτευχθεί για μικρό εύρος παλμών.

Συμβουλές για πιο αποδοτική χρήση ενός OTDR

- Η σμίκρυνση της νεκρής ζώνης επιτυγχάνεται με τη χρήση στενών παλμών
- Η ελαχιστοποίηση του θορύβου στη μέτρηση επιτυγχάνεται με ευρύτερους παλμούς
- Πιο ευκρινή διαγράμματα επιφέρει η χρήση της επιλογής στατιστικής επεξεργασίας. (averaging)

Για απόλυτο χαρακτηρισμό μιας ζεύξης μπορεί να πραγματοποιηθεί μέτρηση σε στάδια ανάλογα με το τι επιθυμούμε να ανιχνεύσουμε. Για παράδειγμα, αν μας ενδιαφέρει ο ακριβής χαρακτηρισμός του πρώτου άκρου της, χρησιμοποιούμε στενούς παλμούς για να εξαλείψουμε όσο το δυνατόν περισσότερο το φαινόμενο της νεκρής ζώνης. Για το χαρακτηρισμό του μήκους της χρησιμοποιούμε ευρείς παλμούς που είναι ανθεκτικοί στις απώλειες. Έτσι η πραγματοποίηση της μέτρησης σε περισσότερα από ένα στάδια συμβάλλει στον ακριβή καθορισμό των ιδιαιτεροτήτων της ζεύξης σε όλο το μήκος της.

Κεφάλαιο 5

Περιγραφή – Διαδικασία Μετρήσεων

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία με την οποία γίνονται οι μετρήσεις σε οπτικό δίκτυο με το όργανο μέτρησης OTDR. Οι φωτογραφίες είναι από το μητροπολιτικό δίκτυο της Αλεξανδρούπολης και κατά τη διάρκεια της πρακτικής μου βρίσκομαι σε έναν κόμβο που είναι κύριος και ενώνει και άλλους κόμβους μεταξύ τους, αλλά και δημόσια κτίρια.

Στις παρακάτω φωτογραφίες βλέπουμε τις καμπίνες μέσα στις οποίες καταλήγουν τα οπτικά καλώδια και βρίσκονται οι κασετίνες όπου έχουν γίνει οι κολλήσεις των ινών.



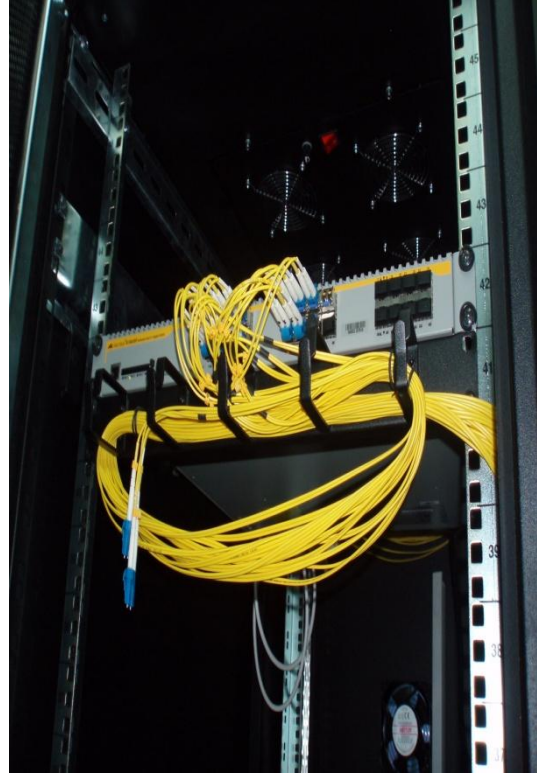
Παρακάτω παρατηρούμε ότι στον κόμβο εισέρχονται αρκετά μέτρα περίσσιου οπτικού καλωδίου ώστε σε ενδεχόμενη βλάβη να υπάρχει η δυνατότητα επισκευής (μετακίνηση καμπινών, επανασύνδεση οπτικών ινών).



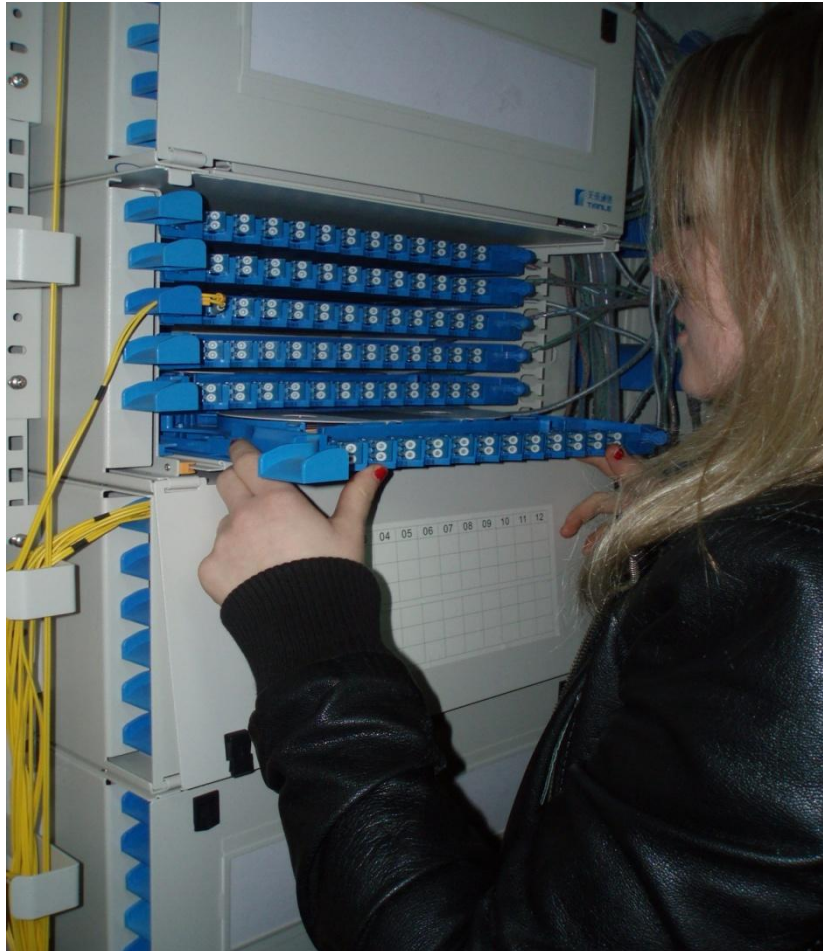
Η κατανομή των καλωδίων που καταλήγουν στον κόμβο γίνεται στο πάνω μέρος της καμπίνας όπως φαίνεται παρακάτω.



Εδώ βλέπουμε τις κασετίνες στις οποίες έχουν γίνει οι κολλήσεις των οπτικών ινών καθώς και τα patch cord τα οποία συνδέουν είτε κασετίνες μεταξύ τους, είτε τις ίνες με τον ενεργό εξοπλισμό του κόμβου (switch).



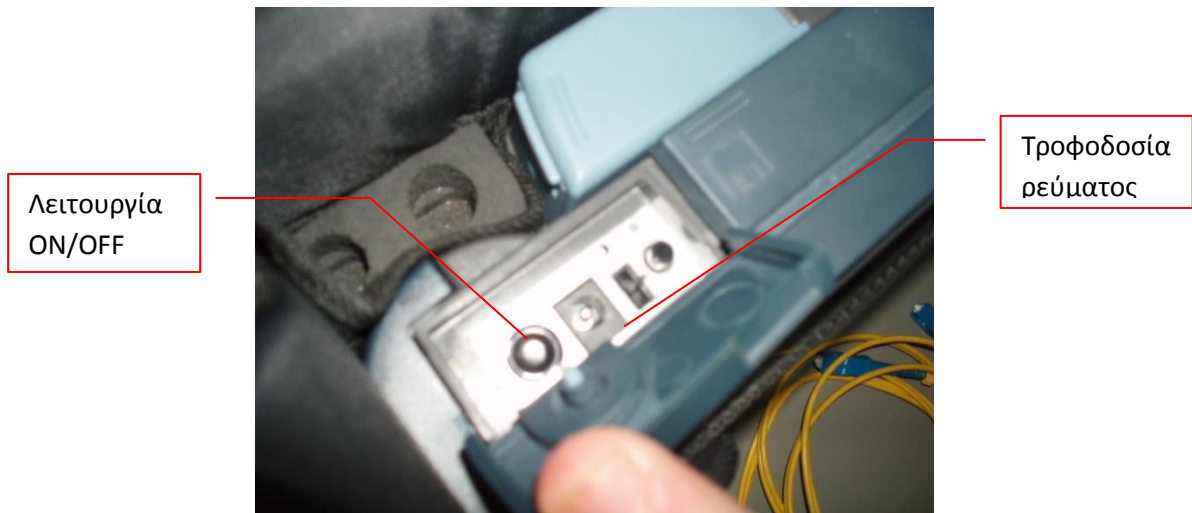
Προχωράμε στη διαδικασία των μετρήσεων. Επιλέγουμε μια κασετίνα και την φέρνουμε ελάχιστα προς τα έξω με προσοχή να μην επηρεάσουμε τις συνδέσεις που έχουν γίνει.



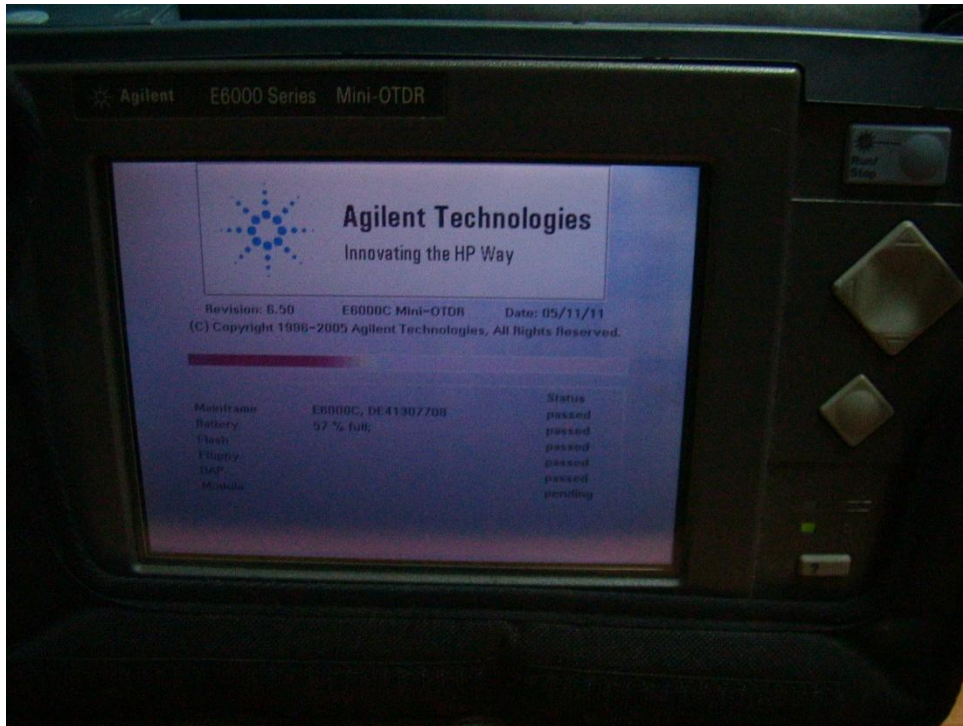
Το όργανο το οποίο χρησιμοποίησα για όλες τις μετρήσεις είναι το **Agilent Technologies OTDR E6000c**. Το οπτικό ανακλασίμετρο E6000c mini-OTDR χρησιμοποιείται από εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό για τις μετρήσεις των οπτικών ινών με σκοπό την διάγνωση βλαβών και την εποπτεία της καλής λειτουργίας του οπτικού δικτύου.



Θέτουμε σε λειτουργία το OTDR. Το OTDR διαθέτει μπαταρία λιθίου την οποία φροντίζουμε να φορτίζουμε πριν προχωρήσουμε στις μετρήσεις.



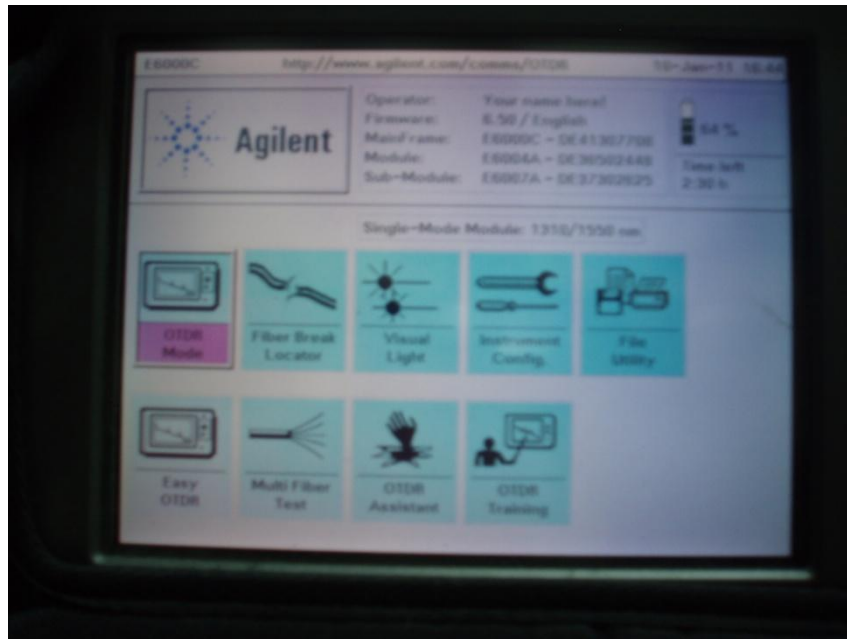
Αρχική οθόνη εκκίνησης OTDR η οποία εμφανίζει τον τύπο του οργάνου, την ένδειξη μπαταρίας, την ένδειξη flash σε περίπτωση που έχουμε χρησιμοποιήσει εξωτερικό δίσκο αποθήκευσης, την ένδειξη floppy εάν χρησιμοποιήσουμε δισκέτα, καθώς και τους τύπους module και Sub-Module που χρησιμοποιούμε. Τα module και Sub-Module αφορούν τους κόνεκτορες που θα χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση single-mode οπτικών ινών.



Η επόμενη οθόνη που μας εμφανίζεται είναι το κεντρικό μενού του OTDR. Από εδώ επιλέγουμε το είδος της εργασίας που θέλουμε να κάνουμε. Οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής:

1. **OTDR mode:** Παραμετροποίηση και μέτρηση του οπτικού δικτύου. Με αυτή την επιλογή δηλώνουμε όλες τις παραμέτρους μέτρησης που θέλουμε (πχ μήκος κύματος, μετρήσιμη απόσταση, πλάτος παλμών, μέσο όρο μέτρησης) .
2. **Fiber Break Locator:** Με αυτή την επιλογή μπορούμε να ανιχνεύσουμε το σημείο στο οποίο έχουμε θραύση της οπτικής ίνας.
3. **Visual Light:** Έχουμε τη δυνατότητα αποστολής δέσμης φωτός μέσα στην οπτική ίνα ώστε να πιστοποιήσουμε ότι δεν έχουμε διακοπή του οπτικού καλωδίου.
4. **Instrument Config:** Παραμετροποίηση λειτουργίας οργάνου.
5. Χρησιμοποιείται μόνο από εξειδικευμένο προσωπικό για τον έλεγχο και τη ρύθμιση της σωστής λειτουργίας του οργάνου.
6. **File Utility:** Διαχείριση φακέλων και αρχείων των δεδομένων των μετρήσεων.
7. **Easy OTDR:** Απ' ευθείας μέτρηση ενός οπτικού καλωδίου.

8. **Multi Fiber Test:** Αυτοματοποιημένη διαδικασία μέτρησης πολλών οπτικών καλωδίων.
9. **OTDR Assistant:** Ο βοηθός του OTDR ο οποίος μας παρέχει χρήσιμες πληροφορίες και συμβουλές για τον τρόπο λειτουργίας του οργάνου.
10. **OTDR Training:** Επίδειξη και εκπαίδευση στον τρόπο λειτουργίας του οργάνου.



Το πρώτο πράγμα που κάνουμε πριν αρχίσουμε τις μετρήσεις είναι να καθαρίσουμε προσεκτικά με τα ειδικά μαντηλάκια τους κονέκτορες των patch cord που θα χρησιμοποιήσουμε.



Παρακάτω ελέγχουμε ότι το patch cord που χρησιμοποιούμε είναι καλό χρησιμοποιώντας το module του OTDR που στέλνει δέσμη φωτός.



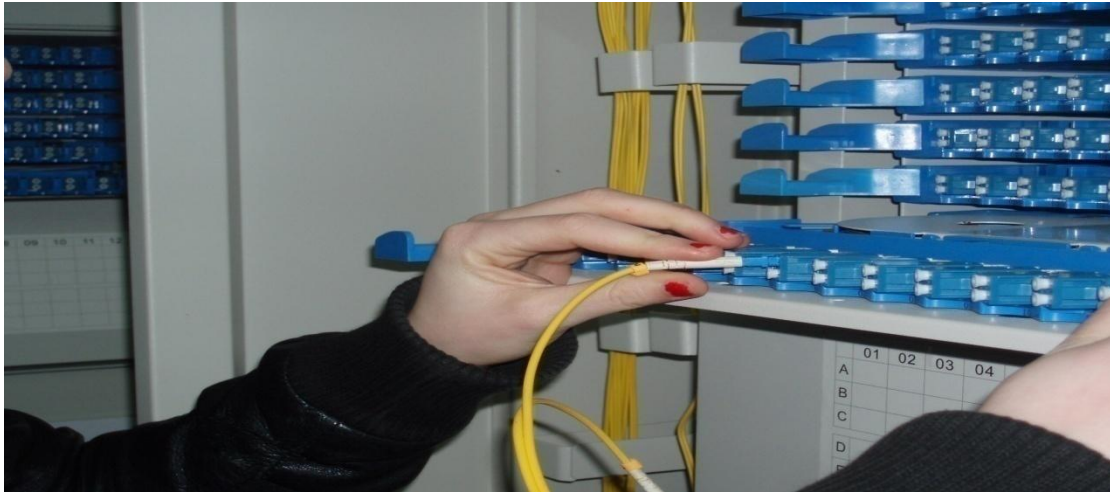
Στη συνέχεια κουμπώνουμε το patch cord στο module που στέλνει σήμα για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.





Καθαρίζουμε το δεύτερο άκρο του patch cord , αφαιρούμε το προστατευτικό που υπάρχει στον κονέκτορα της κασετίνας και κουμπώνουμε το patch cord.

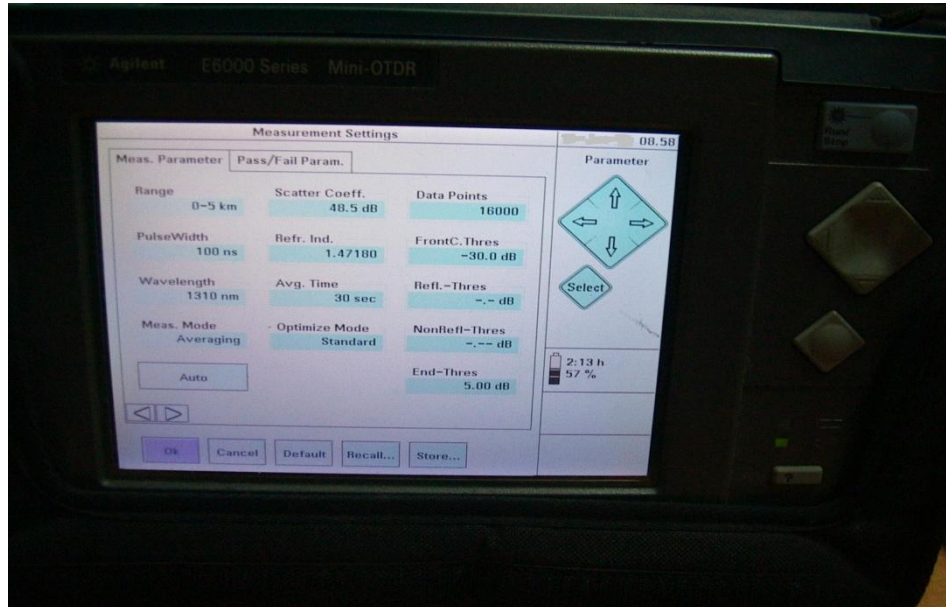




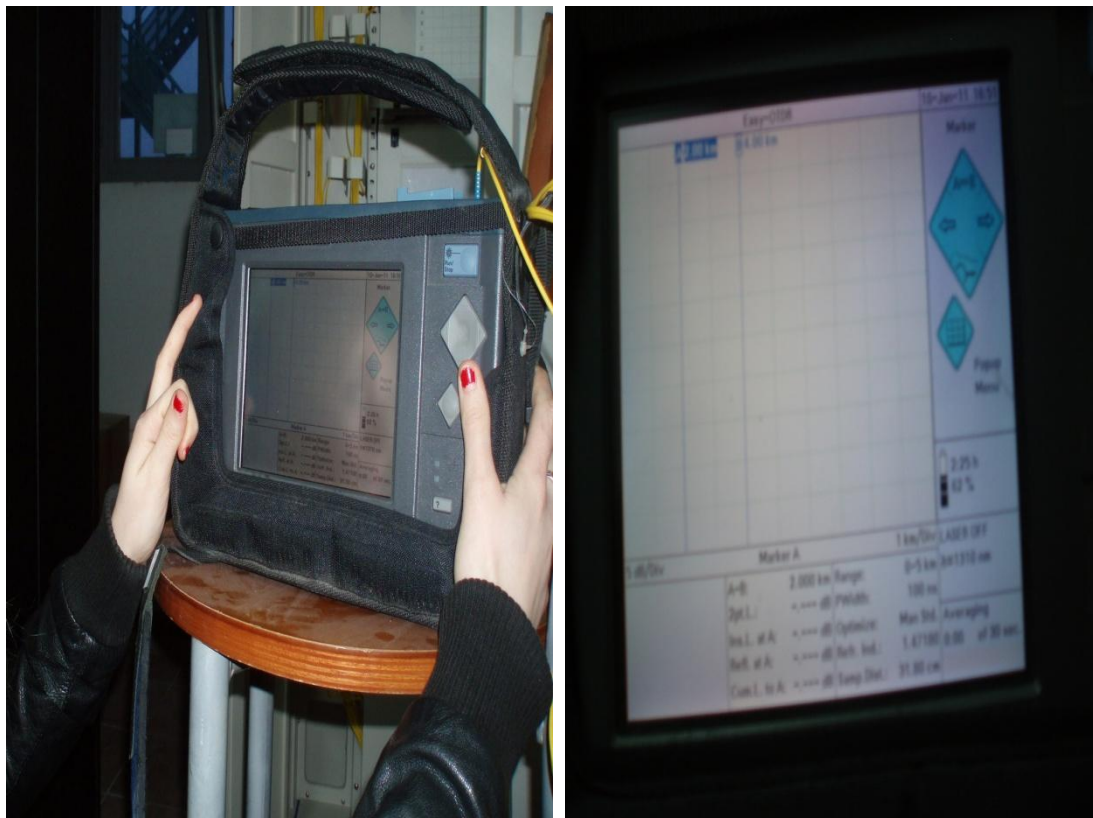
Στο κεντρικό μενού επιλέγω OTDR Mode.

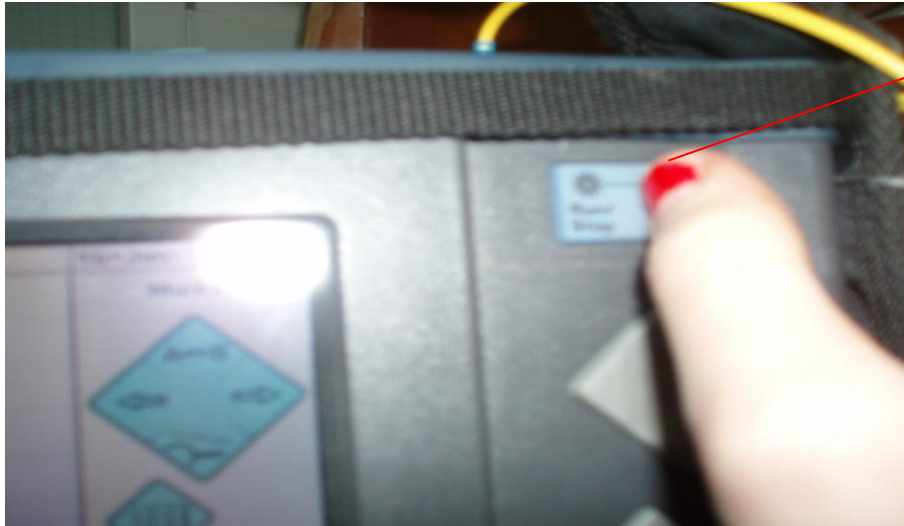


Παραμετροποιώ το μήκος κύματος, το πλάτος των παλμών και το μέσο όρο μέτρησης.



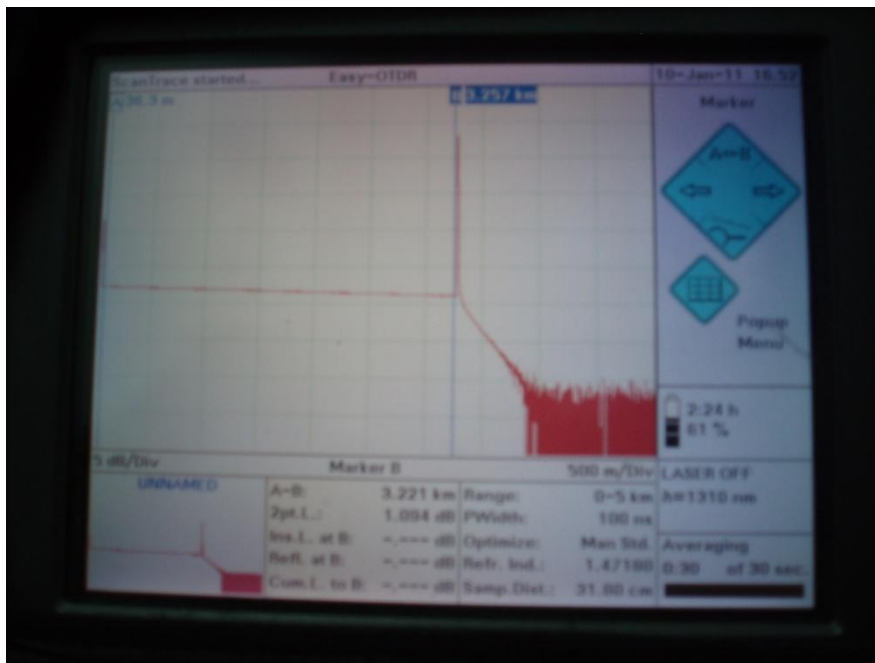
Αμέσως μετά ξεκινάμε τη μέτρηση του οπτικού καλωδίου με το πλήκτρο Run/Stop.



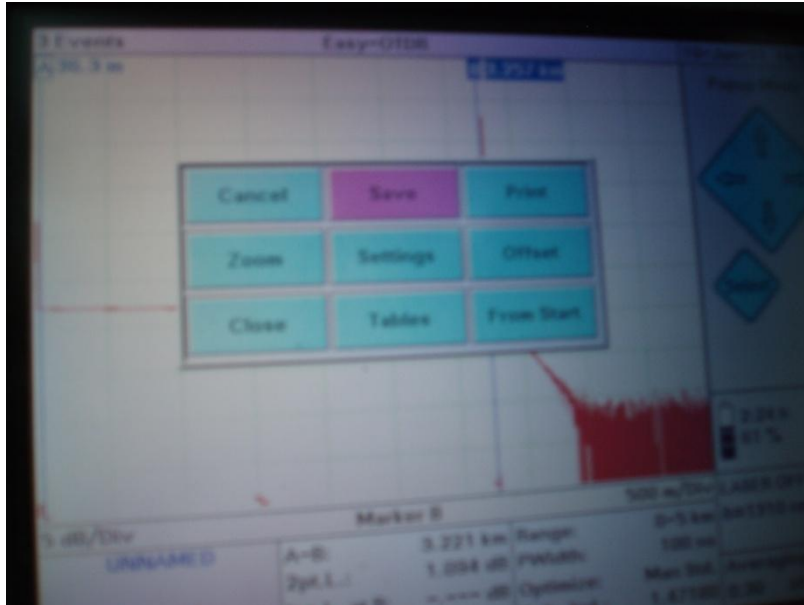


Πλήκτρο
Run/Stop

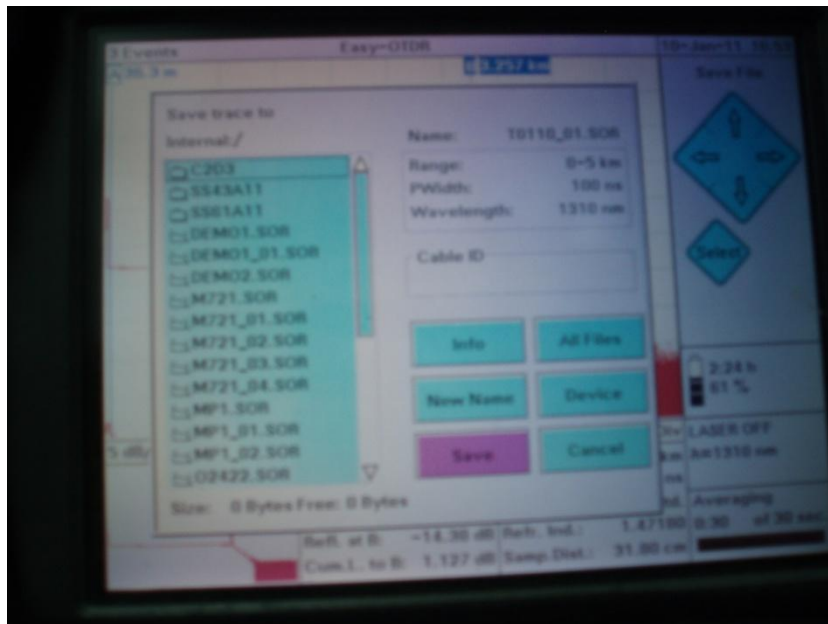
Με την έναρξη της μέτρησης εμφανίζεται στην οθόνη μας η πορεία του οπτικού σήματος.



Με τη λήξη του μέσου όρου μέτρησης εμφανίζεται ένα μενού επιλογών με το οποίο έχουμε τη δυνατότητα να διαχειριστούμε την μέτρηση. (ακύρωση της μέτρησης, σώσιμο, εκτύπωση, μεγέθυνση, επανεκκίνηση της μέτρησης ή κλείσιμο της εφαρμογής).



Αποθηκεύουμε την μέτρηση στην μνήμη του οργάνου ή σε εξωτερική μονάδα αποθήκευσης που έχουμε συνδέσει στο όργανο.





Εάν θέλουμε να εκτυπώσουμε τη μέτρηση συνδέουμε το όργανο με την υποδοχή του καλωδίου για εκτυπωτή.



Κεφάλαιο 6

Μετρήσεις Οπτικών Ινών

Οι συγκεκριμένες μετρήσεις έγιναν στο μητροπολιτικό δίκτυο οπτικών ινών του δήμου Αλεξανδρούπολης. Αφορούν οπτικές ίνες οι οποίες συνδέουν κόμβους μεταξύ τους αλλά και κόμβους με τελικούς χρήστες. Αυτό έγινε για να έχουμε δειγματοληψία από διάφορες αποστάσεις. Οι μετρήσεις έγιναν με το όργανο Agilent Technologies OTDR E6000c. Στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στον υπολογιστή για ανάλυση με τη βοήθεια του προγράμματος HP OTDR Toolkid.

Στο μητροπολιτικό δίκτυο της Αλεξανδρούπολης οι απώλειες που κρίνονται επιτρεπτές σε μία μέτρηση είναι της τάξεως των 0.35 – 0.50 db/km.

Μέτρηση 1:

Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με τελικό χρήστη. Χρησιμοποιούμε δυο patch cord των 150 μέτρων εργοστασιακής κατασκευής.

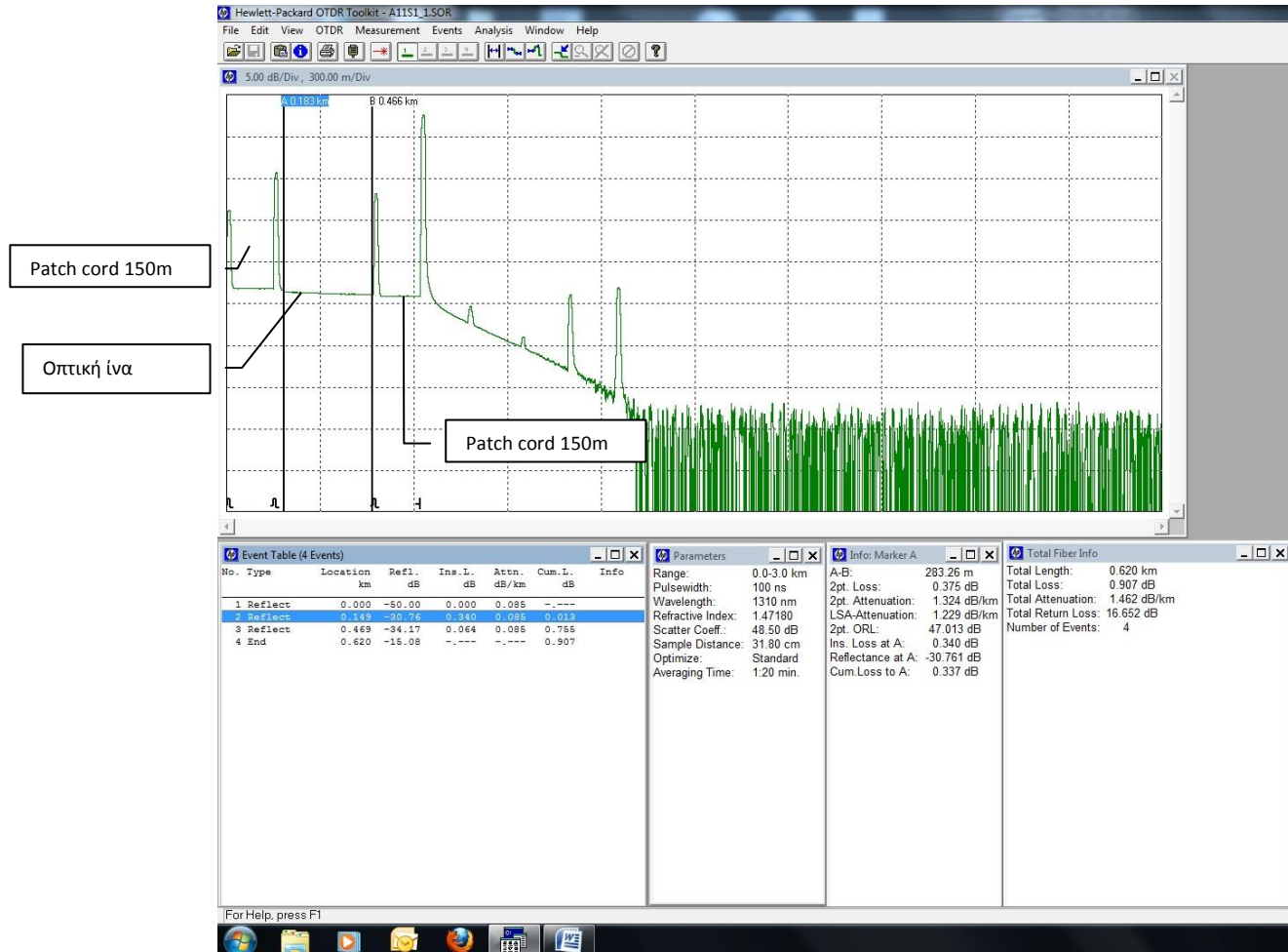
Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση τριών χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1310nm και πλάτος παλμών 100 nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα ένα λεπτό και είκοσι δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που έχει το σήμα μεταξύ του κόμβου και του τελικού χρήστη.

Στα αποτελέσματα που μας δίνει το όργανο μέτρησης OTDR βλέπουμε τέσσερα συμβάντα (reflections). Το πρώτο και το τέταρτο συμβάν αφορούν την αρχή και το τέλος όλης της μετρήσιμης απόστασης. Το δεύτερο συμβάν αφορά τον κονέκτορα του κόμβου και το τρίτο συμβάν τον κονέκτορα του τελικού χρήστη. Η μέτρηση που μας ενδιαφέρει λαμβάνεται ανάμεσα στο δεύτερο και το τρίτο συμβάν. Ορίζουμε το σημείο A στο τέλος του δεύτερου συμβάντος και το σημείο B στην αρχή του τρίτου συμβάντος.

Στα αποτελέσματα των μετρήσεων βλέπουμε ότι στο μήκος μέτρησης που έχουμε επιλέξει (A-B) 283,26 m η απώλεια σήματος είναι 0,375dB/km.

Η παραπάνω απώλεια σήματος θεωρείται στα όρια του αποδεκτού για το μητροπολιτικό δίκτυο του δήμου Αλεξανδρούπολης.



Μέτρηση 2:

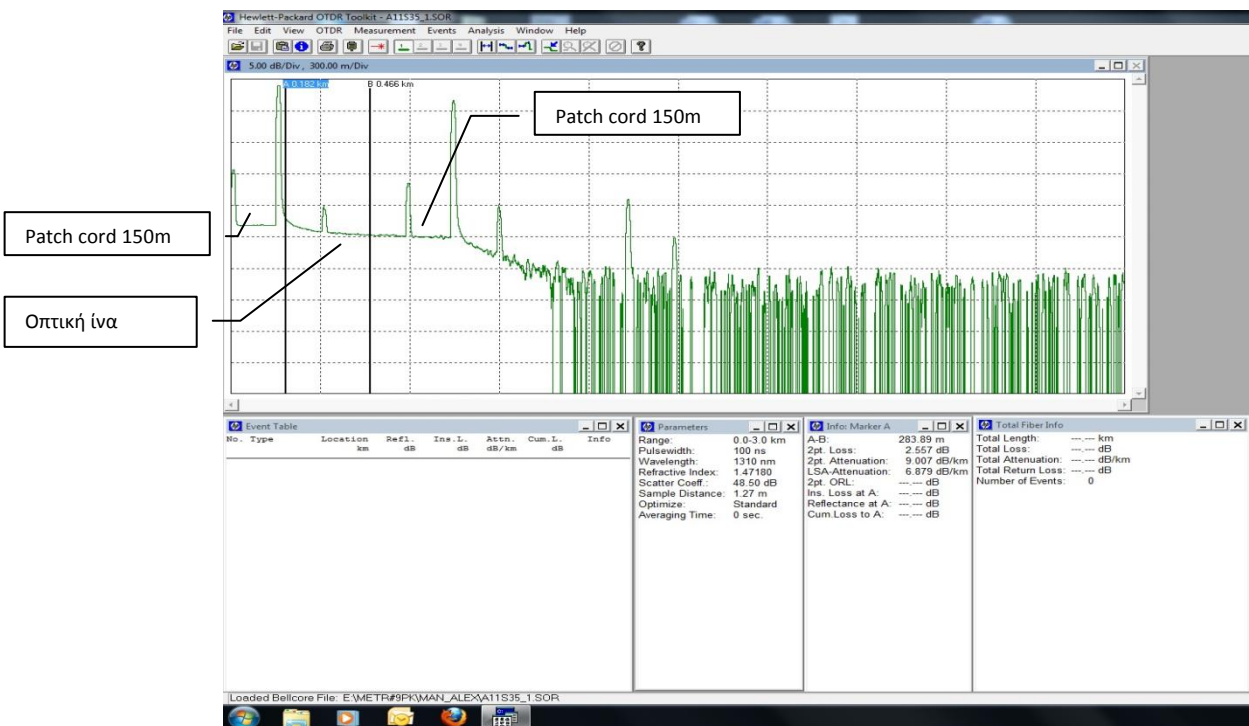
Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με τελικό χρήστη. Χρησιμοποιούμε δυο patch cord των 150 μέτρων εργασιακής κατασκευής.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση τριών χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1310nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που έχει το σήμα μεταξύ του κόμβου και του τελικού χρήστη.

Στα αποτελέσματα που μας δίνει το όργανο μέτρησης OTDR βλέπουμε ότι υπάρχει πρόβλημα σε όλη τη συγκεκριμένη απόσταση λόγω των συνεχών αυξομειώσεων που εμφανίζονται. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες όπως η κακή ποιότητα καλωδίου, μη αποδεκτές κολλήσεις των ινών, προβληματικοί ή και βρώμικοι κονέκτορες.

Σε αυτή την μέτρηση δεν υπάρχουν αποδεκτά αποτελέσματα.



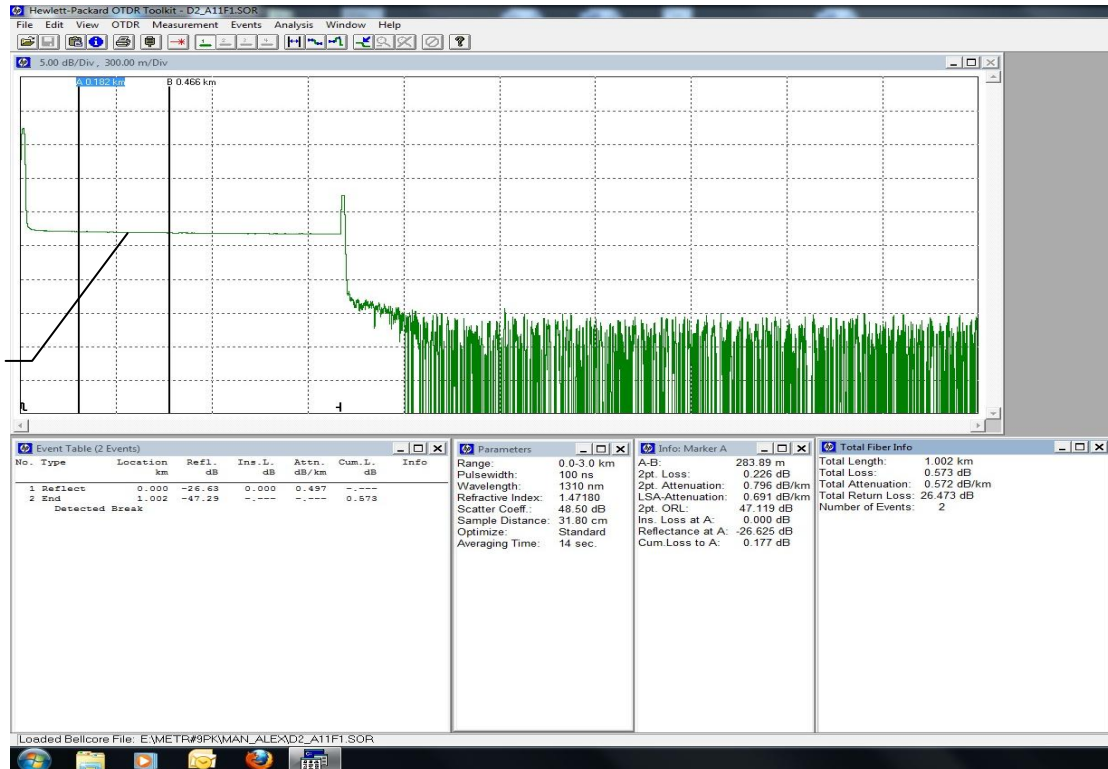
Μέτρηση 3:

Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με κόμβο στην ένωση των οποίων γνωρίζουμε ότι χρησιμοποιήθηκαν πάνω από δύο χιλιόμετρα οπτικής ίνας.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση τριών χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1310nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα δεκατέσσερα δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι τα ακριβή μέτρα οπτικού καλωδίου που χρησιμοποιήθηκαν.

Στα αποτελέσματα που μας δίνει το όργανο μέτρησης OTDR βλέπουμε δύο συμβάντα (reflections). Τα δύο συμβάντα αφορούν την αρχή και το τέλος όλης της μετρήσιμης απόστασης. Παρατηρούμε ότι το τελευταίο συμβάν παρουσιάζεται στα 1,002 km. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε διακοπή του οπτικού καλωδίου (θραύση ίνας).



Μέτρηση 4:

Η παρακάτω μέτρηση αφορά ένα στροφέιο οπτικής ίνας εργοστασιακής κατασκευής που επρόκειται να χρησιμοποιηθεί στην εκφύσηση του συγκεκριμένου δικτύου. Γενικότερα είναι κανόνας σε όλα τα ευρυζωνικά δίκτυα να προμετρούνται όλα τα σροφέια οπτικών ινών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν.

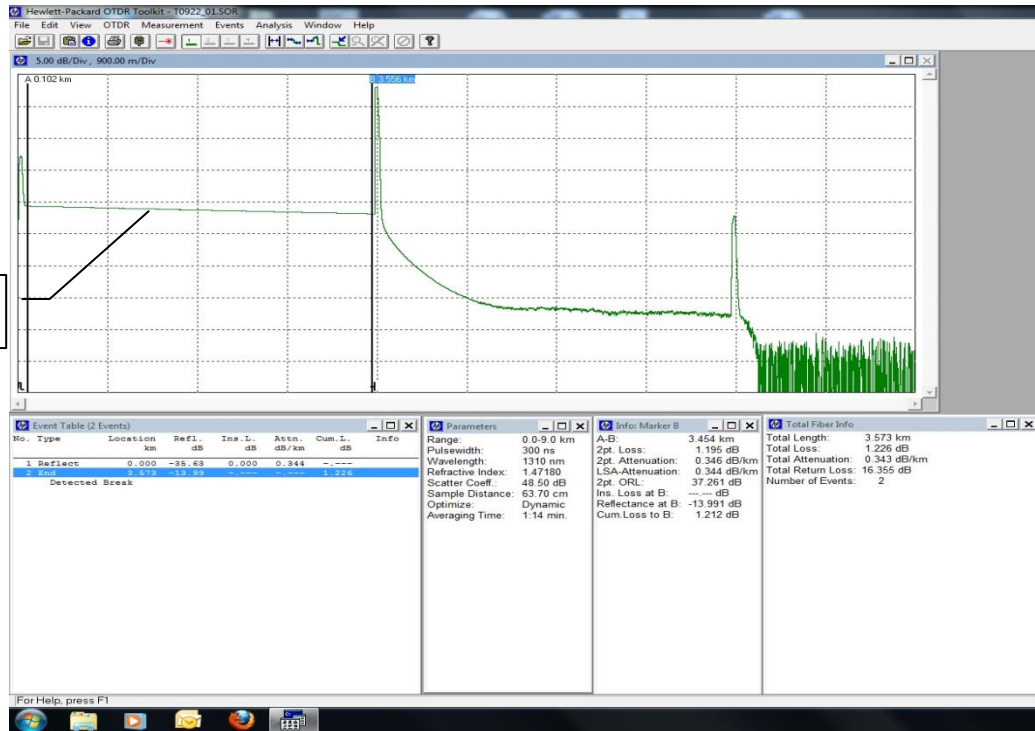
Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση εννέα χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1310nm και πλάτος παλμών 300nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης το ένα λεπτό και δεκατέσσερα δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι τα ακριβή μέτρα οπτικού καλωδίου του στροφείου καθώς και να πιστοποιήσουμε ότι το οπτικό καλώδιο του συγκεκριμένου στροφείου δεν παρουσιάζει προβλήματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο δίκτυο μας.

Στα αποτελέσματα που μας δίνει το όργανο μέτρησης OTDR βλέπουμε ότι το συνολικό μήκος του οπτικού καλωδίου είναι 3,573 km καθώς και ότι οι συνολικές απώλειες είναι 1,226db, δηλαδή 0,343 db/km.

Το οπτικό καλώδιο πληροί τις προϋποθέσεις για να χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο δίκτυο.

Στροφείο
οπτικής ίνας



Μέτρηση 5:

Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με κόμβο στην ένωση των οποίων γνωρίζουμε ότι χρησιμοποιήθηκαν πάνω από δύο χιλιόμετρα οπτικής ίνας.

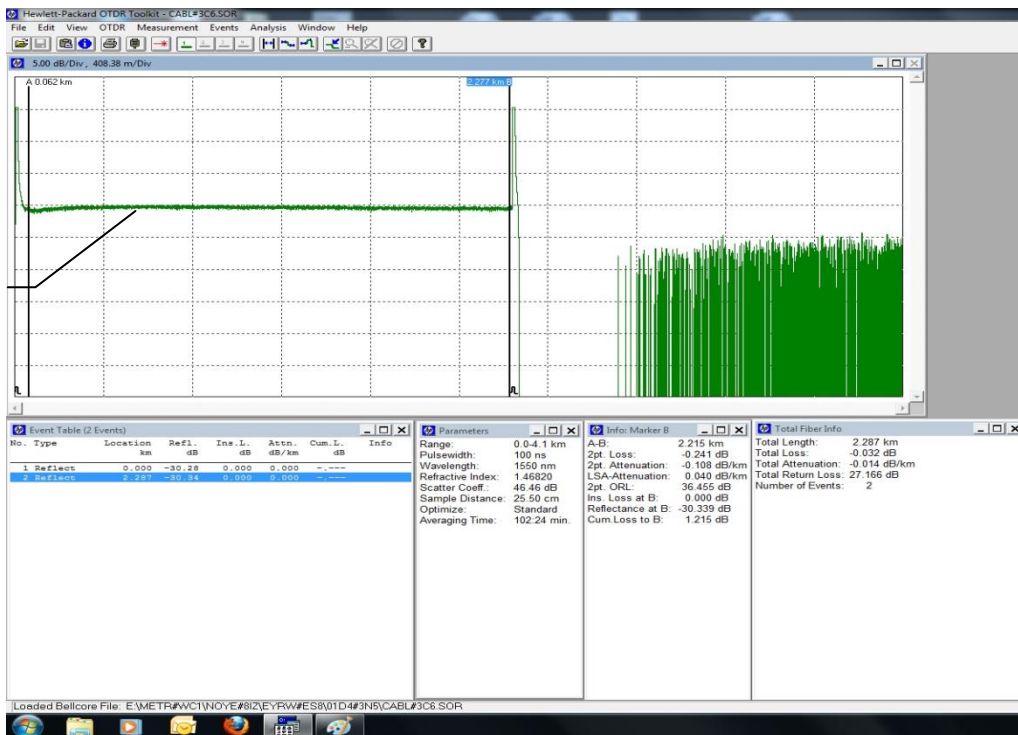
Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση τεσσάρων χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1550nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης

φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης το ένα 1 λεπτό και είκοσι δύο δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που υπάρχουν ανάμεσα στους δύο κόμβους.

Τα δύο συμβάντα αφορούν την αρχή και το τέλος όλης της μετρήσιμης απόστασης. Παρατηρούμε ότι το τελευταίο συμβάν παρουσιάζεται στα 2,215 km. Αυτό σημαίνει ότι είναι εκεί το σημείο του δεύτερου κόμβου. Οι απώλειες είναι της τάξεως των 0,241 db.

Οπτική ίνα



Μέτρηση 6:

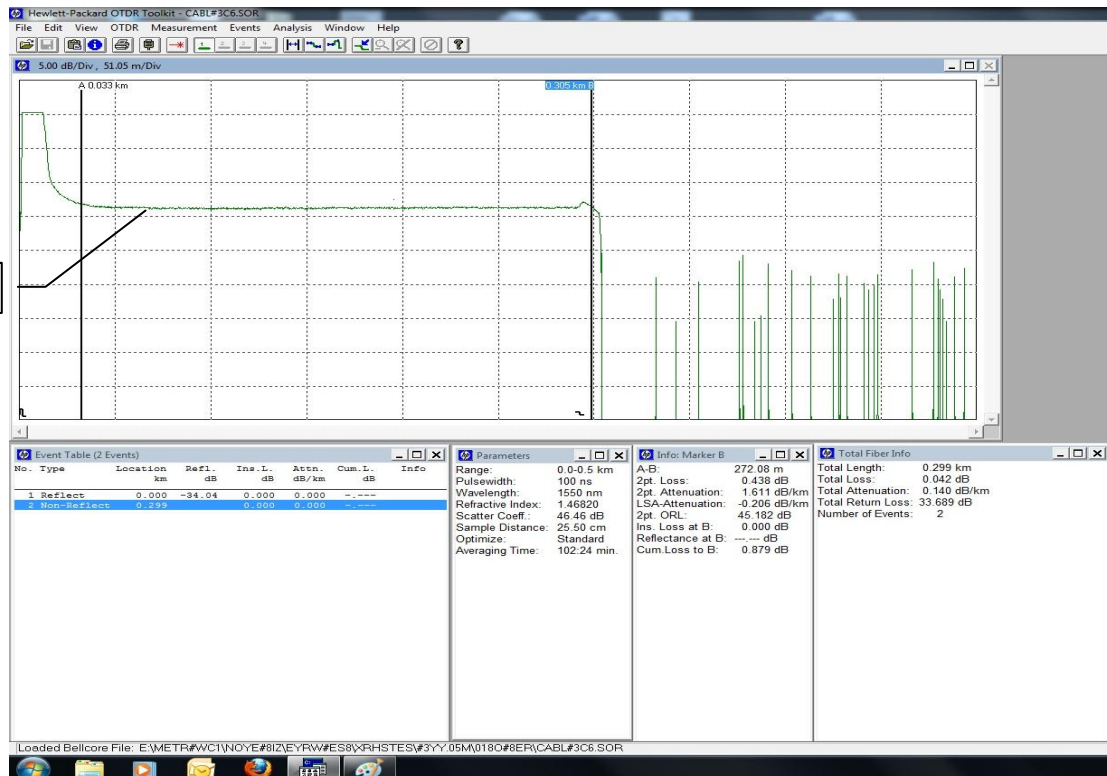
Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με κόμβο στην ένωση των οποίων γνωρίζουμε ότι χρησιμοποιήθηκαν πάνω από τρεισίμισι χιλιόμετρα οπτικής ίνας.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση πέντε χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1550nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης το ένα 1 λεπτό και είκοσι δύο δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που υπάρχουν ανάμεσα στους δύο κόμβους.

Τα δύο συμβάντα αφορούν την αρχή και το τέλος όλης της μετρήσιμης απόστασης. Παρατηρούμε ότι το τελευταίο συμβάν παρουσιάζεται στα 299m. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε θραύση της οπτικής ίνας.

Οπτική ίνα



Μέτρηση 7:

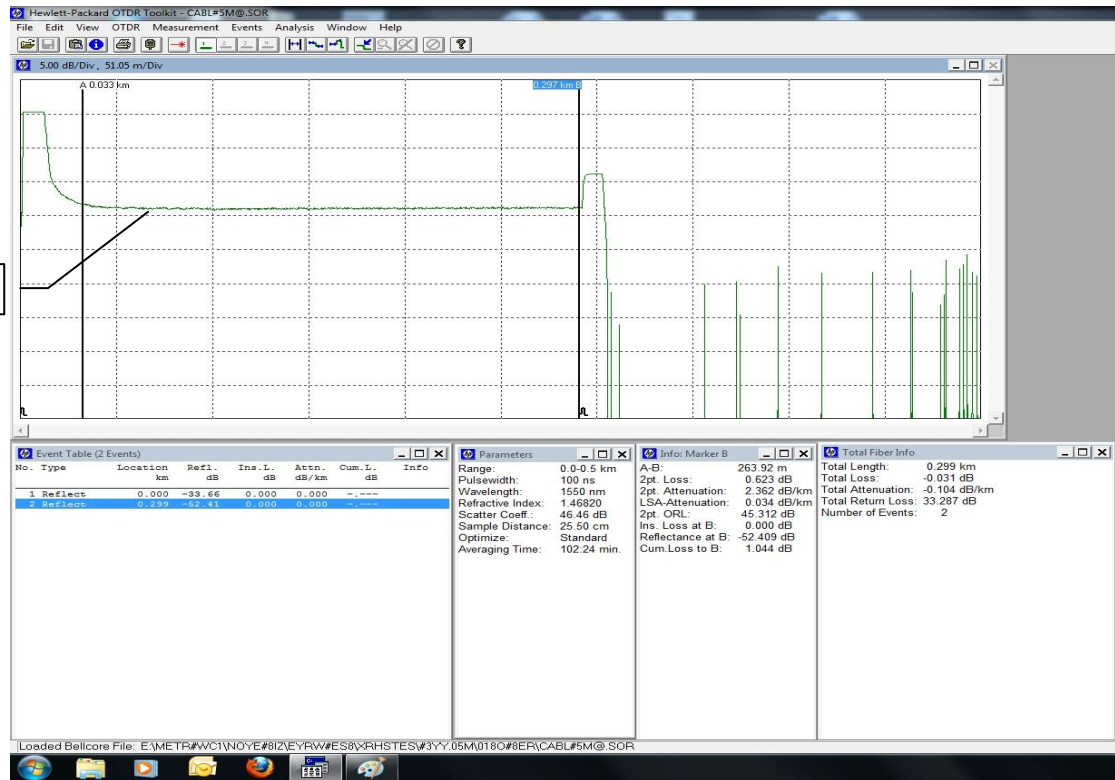
Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με τελικό χρήστη.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση πέντε χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1550nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα ένα λεπτό και είκοσι δύο δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που έχει το σήμα μεταξύ του κόμβου και του τελικού χρήστη.

Από τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι η απόσταση μεταξύ κόμβου και τελικού χρήστη είναι περίπου 263,92 m. Οι απώλειες σήματος είναι της τάξεως των 0,623 db. Η παρακάτω μέτρηση δεν είναι αποδεκτή.

Οπτική ίνα



Μέτρηση 8:

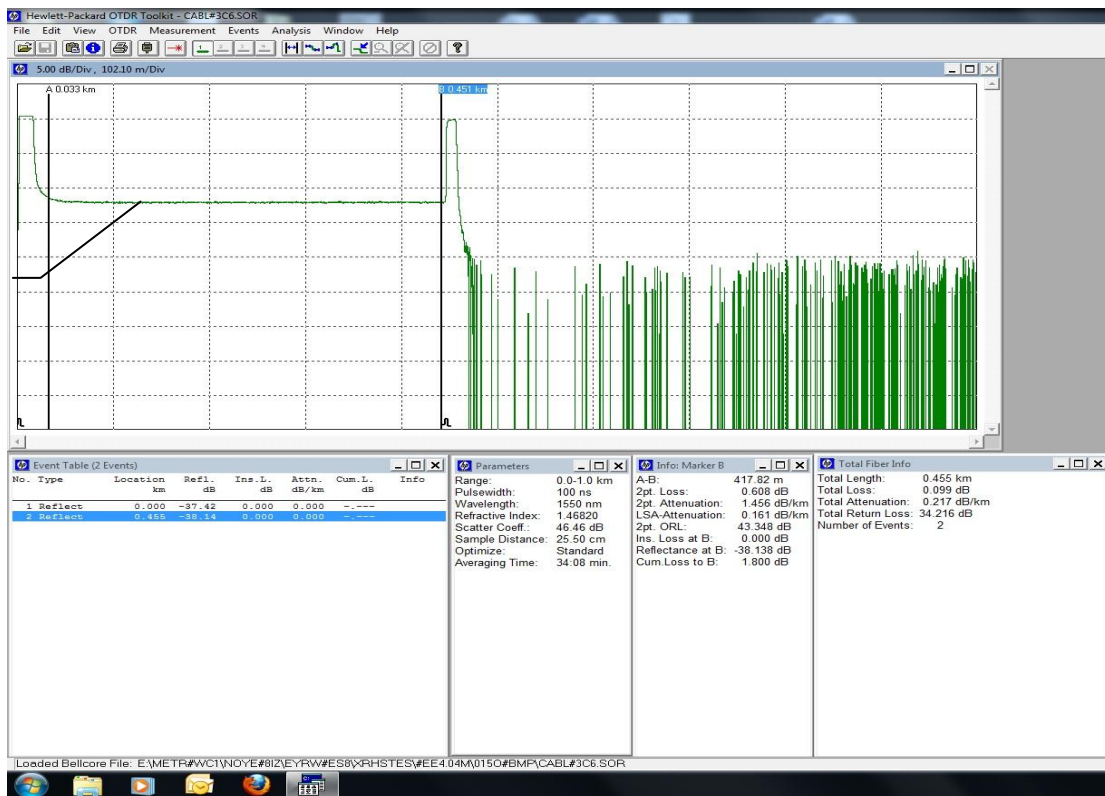
Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με τελικό χρήστη.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση ενός χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1550nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα τρία λεπτά και τέσσερα δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που έχει το σήμα μεταξύ του κόμβου και του τελικού χρήστη.

Από τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι η απόσταση μεταξύ κόμβου και τελικού χρήστη είναι περίπου 417.82 m. Οι απώλειες σήματος είναι της τάξεως των 0,608 db. Η παρακάτω μέτρηση δεν είναι αποδεκτή.

Οπτική ίνα



Μέτρηση 9:

Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με κόμβο στην ένωση των οποίων γνωρίζουμε ότι χρησιμοποιήθηκε ένα χιλιόμετρο οπτικής ίνας.

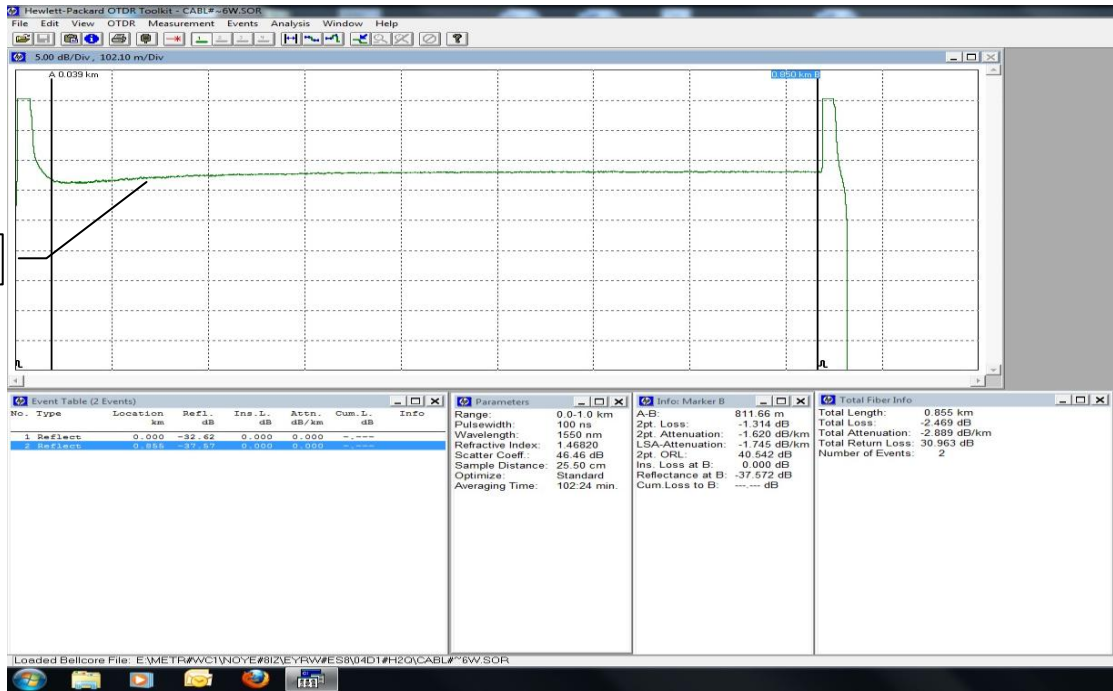
Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση ενός χιλιομέτρου καθώς και το μήκος κύματος 1550nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα ένα λεπτό και είκοσι δύο δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που υπάρχουν ανάμεσα στους δύο κόμβους.

Τα δύο συμβάντα αφορούν την αρχή και το τέλος όλης της μετρήσιμης απόστασης. Παρατηρούμε ότι το τελευταίο συμβάν παρουσιάζεται στα 0,855m. Ορίζουμε τα σημεία A και B στην αρχή και στο τέλος αντίστοιχα της μετρήσιμης απόστασης και παρατηρούμε ότι οι απώλειες είναι της τάξεως των 1,314 db. Στην αρχή της ίνας παρατηρούμε ότι το σήμα παρουσιάζει μια μικρή πτώση η οποία οφείλεται είτε σε

κακή κόλληση είτε σε βρώμικο κονέκτορα. Η παραπάνω μέτρηση δεν είναι αποδεκτή και πρέπει είτε να καθαριστεί η ίνα είτε να ξαναγίνει η κόλληση.

Οπτική ίνα

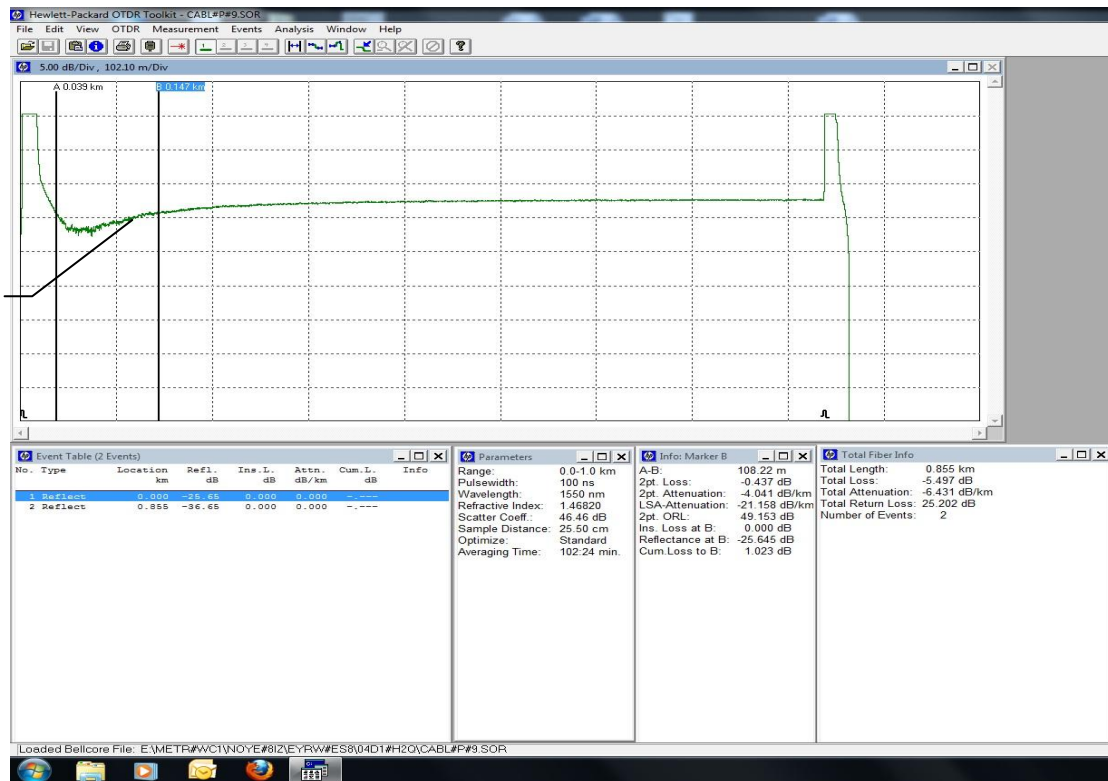


Μέτρηση 10:

Η μέτρηση αυτή είναι η ίδια με την μέτρηση 9 μόνο που εδώ για να εξακριβώσουμε το πρόβλημα έχουμε καθαρίσει τον κονέκτορα.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση ενός χιλιομέτρου καθώς και το μήκος κύματος 1550nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα ένα λεπτό και είκοσι δύο δευτερόλεπτα.

Παρατηρούμε ότι στην αρχή της ίνας η πτώση έγινε μεγαλύτερη. Ορίζουμε μετρήσιμη απόσταση A-B εκείνο το σημείο και παρατηρούμε ότι οι απώλειες είναι της τάξεως των 0,437 db. Συμπεραίνουμε ότι το πρόβλημα οφείλεται σε κακή κόλληση η από κάμψη του καλωδίου.



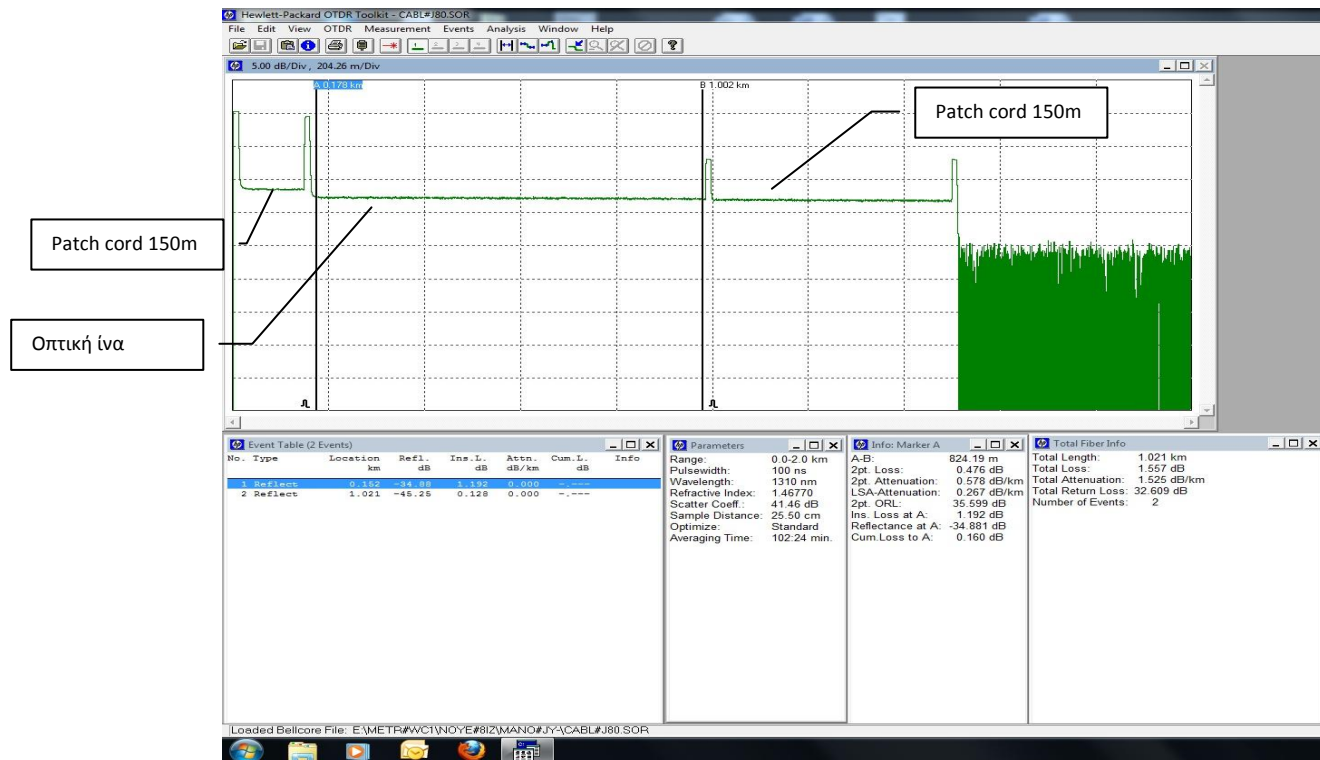
Μέτρηση 11:

Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με κόμβο. Χρησιμοποιούμε δυο patch cord των 150 μέτρων εργοστασιακής κατασκευής.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση δύο χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1310nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα ένα λεπτό και είκοσι δύο δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που υπάρχουν ανάμεσα στους δύο κόμβους.

Ορίζουμε τα σημεία A και B στην αρχή και στο τέλος αντίστοιχα της μετρήσιμης απόστασης που μας ενδιαφέρει και παρατηρούμε ότι οι απώλειες είναι της τάξεως των 0,476 db. Η οπτική ίνα που χρησιμοποιήθηκε ανάμεσα στους δύο κόμβους είναι 824,19 m. Η μέτρηση αυτή είναι στα όρια του αποδεκτού.



Μέτρηση 12:

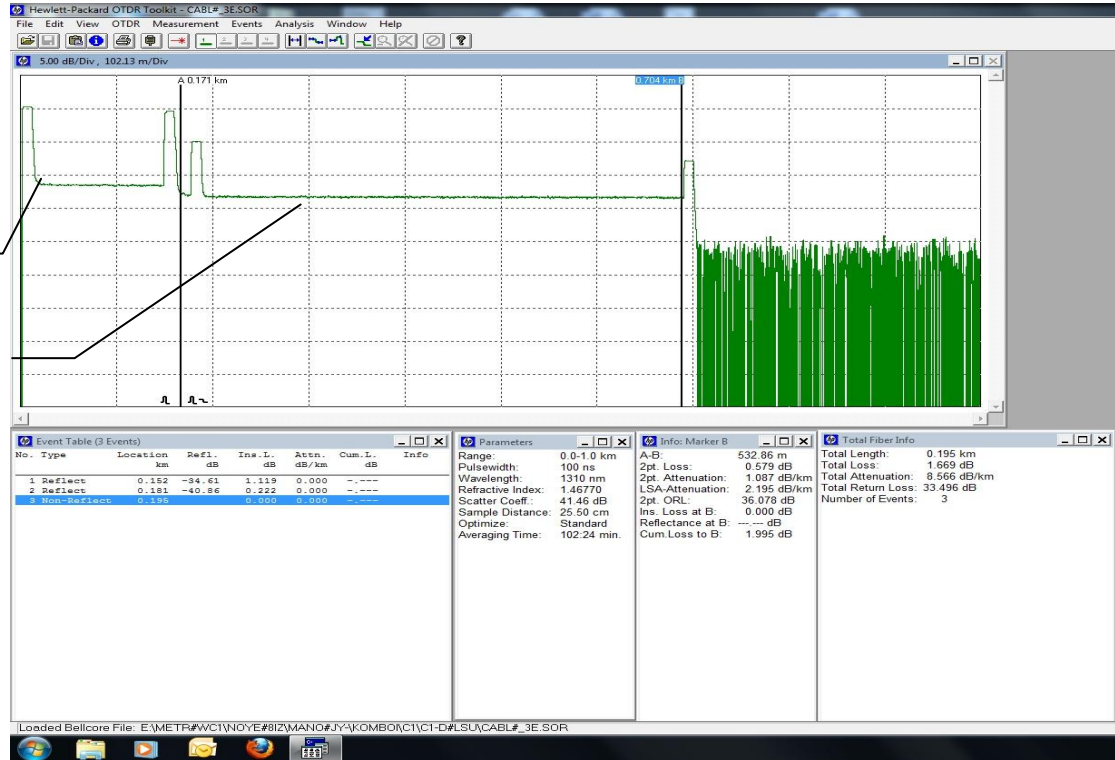
Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με τελικό χρήστη. Χρησιμοποιούμε δυο patch cord των 150 μέτρων εργοστασιακής κατασκευής.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση ενός χιλιομέτρου καθώς και το μήκος κύματος 1310nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα ένα λεπτό και είκοσι δύο δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που έχει το σήμα μεταξύ του κόμβου και του τελικού χρήστη.

Στα αποτελέσματα που μας δίνει το όργανο μέτρησης OTDR βλέπουμε τρία συμβάντα (reflections). Παρατηρούμε ότι στα 181m υπάρχει μια έντονη αυξομείωση του σήματος δηλαδή 30 περίπου μέτρα από τον κονέκτορα. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κακή ποιότητα της οπτικής ίνας στο συγκεκριμένο σημείο είτε σε βρωμιά, είτε σε μη ορθή πορεία της (γωνία).

Για οποιονδήποτε από τους παραπάνω λόγους θα πρέπει να ξαναγίνει εμφύσηση καινούριου οπτικού καλωδίου.



Μέτρηση 13:

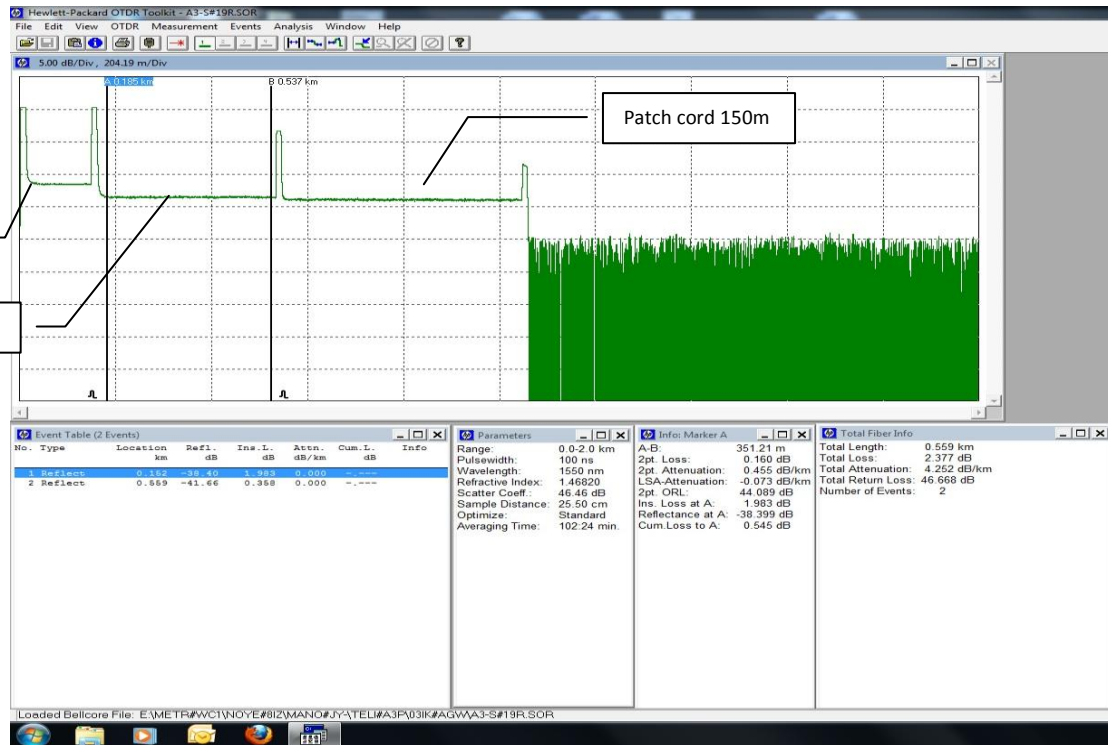
Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με τελικό χρήστη. Χρησιμοποιούμε δυο patch cord των 150 μέτρων εργοστασιακής κατασκευής.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση δύο χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1550nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα ένα λεπτό και είκοσι δύο δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που έχει το σήμα μεταξύ του κόμβου και του τελικού χρήστη.

Ορίζουμε τα σημεία A και B στην μετρήσιμη απόσταση που μας ενδιαφέρει και παρατηρούμε ότι οι απώλειες είναι της τάξεως των 0,160db.

Αυτή η μέτρηση θεωρείται αποδεκτή για το μητροπολιτικό δίκτυο της Αλεξανδρούπολης.



Μέτρηση 14:

Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με τελικό χρήστη. Χρησιμοποιούμε δυο patch cord των 150 μέτρων εργοστασιακής κατασκευής.

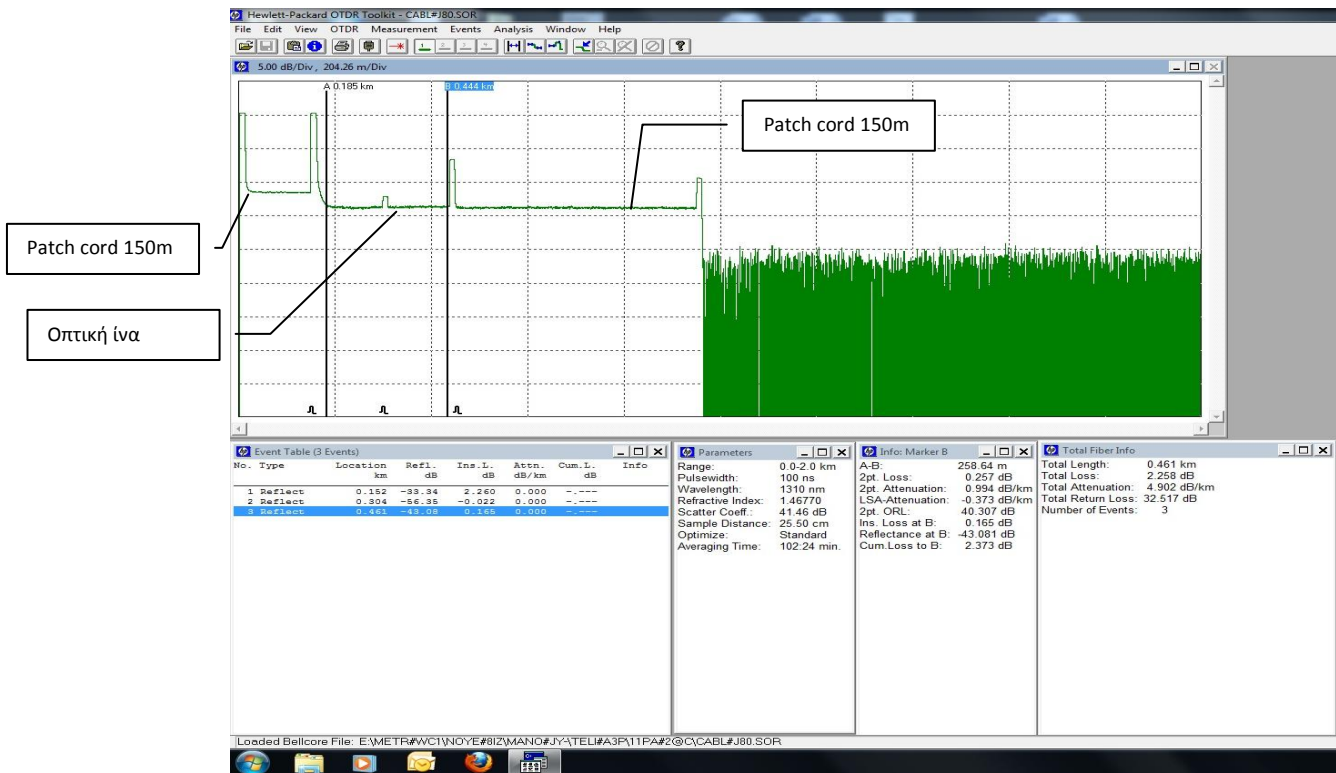
Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση δύο χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1310nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα ένα λεπτό και είκοσι δύο δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που έχει το σήμα μεταξύ του κόμβου και του τελικού χρήστη.

Στα αποτελέσματα που μας δίνει το όργανο μέτρησης OTDR βλέπουμε τρία συμβάντα (reflections). Παρατηρούμε ότι στα 304m υπάρχει μια μικρή αυξομείωση

του σήματος. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κακή ποιότητα της οπτικής ίνας στο συγκεκριμένο σημείο είτε σε βρωμιά, είτε σε μη ορθή πορεία της (γωνία).

Για οποιονδήποτε από τους παραπάνω λόγους θα πρέπει να ξαναγίνει εμφύσηση καινούριου οπτικού καλωδίου.



Μέτρηση 15:

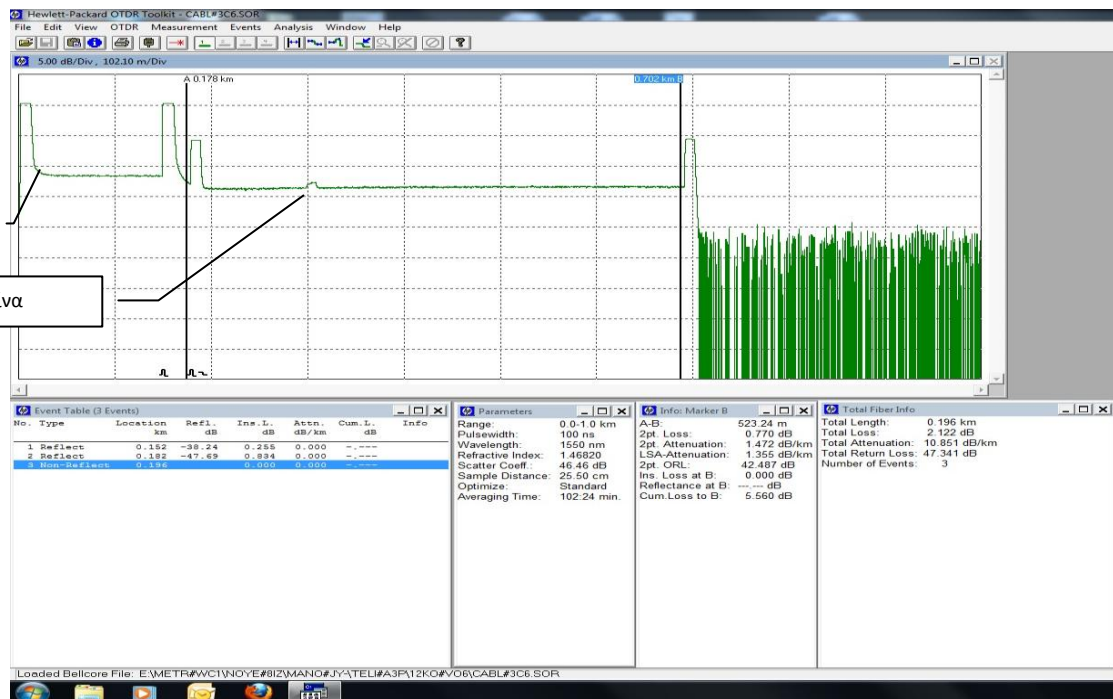
Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με τελικό χρήστη. Χρησιμοποιούμε δυο patch cord των 150 μέτρων εργασιακής κατασκευής.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση ενός χιλιομέτρου καθώς και το μήκος κύματος 1550nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα ένα λεπτό και είκοσι δύο δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που έχει το σήμα μεταξύ του κόμβου και του τελικού χρήστη.

Στα αποτελέσματα που μας δίνει το όργανο μέτρησης OTDR βλέπουμε τρία συμβάντα (reflections). Παρατηρούμε ότι στα 182m υπάρχει μια έντονη αυξομείωση του σήματος στα 30 μέτρα από τον κονέκτορα. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κακή ποιότητα της οπτικής ίνας στο συγκεκριμένο σημείο είτε σε βρωμιά, είτε σε μη ορθή πορεία της (γωνία).

Για οποιονδήποτε από τους παραπάνω λόγους θα πρέπει να ξαναγίνει εμφύσηση καινούριου οπτικού καλωδίου.



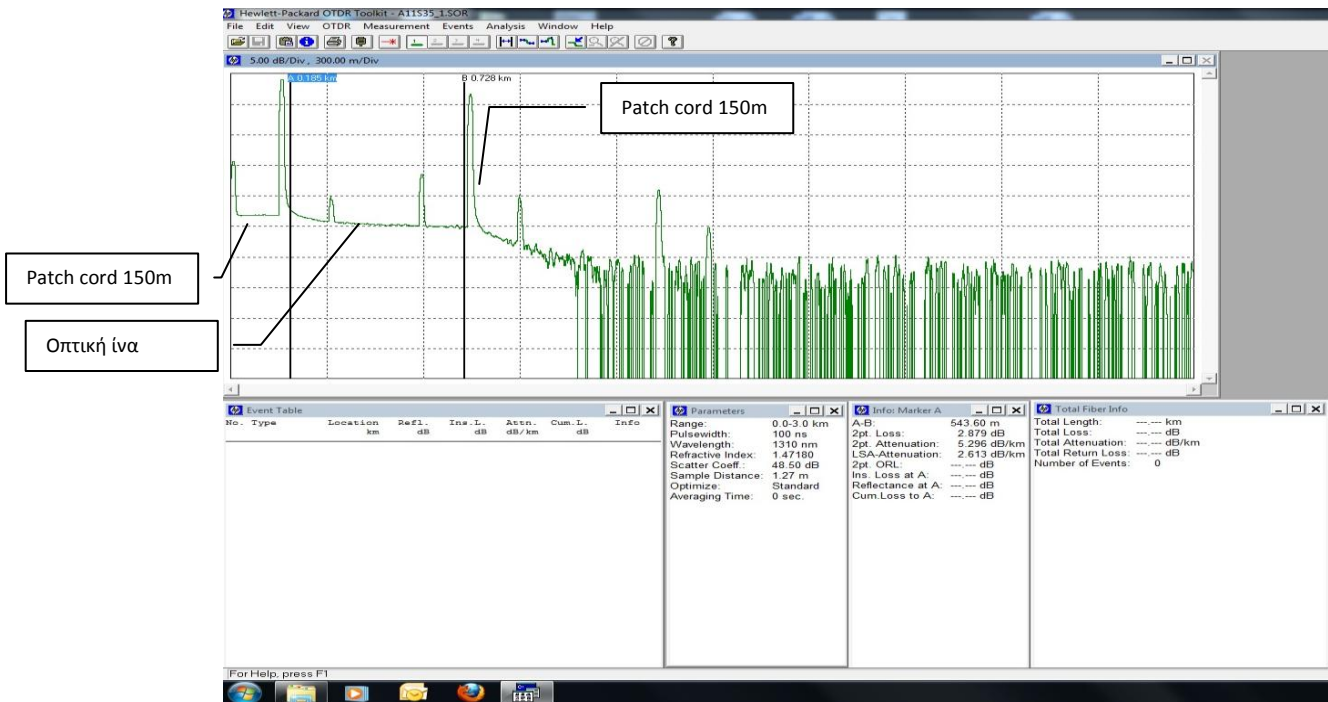
Μέτρηση 16:

Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με τελικό χρήστη. Χρησιμοποιούμε δυο patch cord των 150 μέτρων εργασιαστικής κατασκευής.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση τριών χιλιομέτρου καθώς και το μήκος κύματος 1310nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που έχει το σήμα μεταξύ του κόμβου και του τελικού χρήστη.

Από την εικόνα που παίρνουμε στο OTDR καταλαβαίνουμε ότι δεν είναι δυνατόν να πάρουμε σωστή μέτρηση. Αυτό οφείλεται είτε σε βρώμικους κονέκτορες και στα δύο σημεία μας είτε σε προβληματικές κολλήσεις των ινών. Θα πρέπει να γίνουν νέες κολλήσεις με καινούρια pig tails και νέους κονέκτορες.



Μέτρηση 17:

Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με κόμβο.

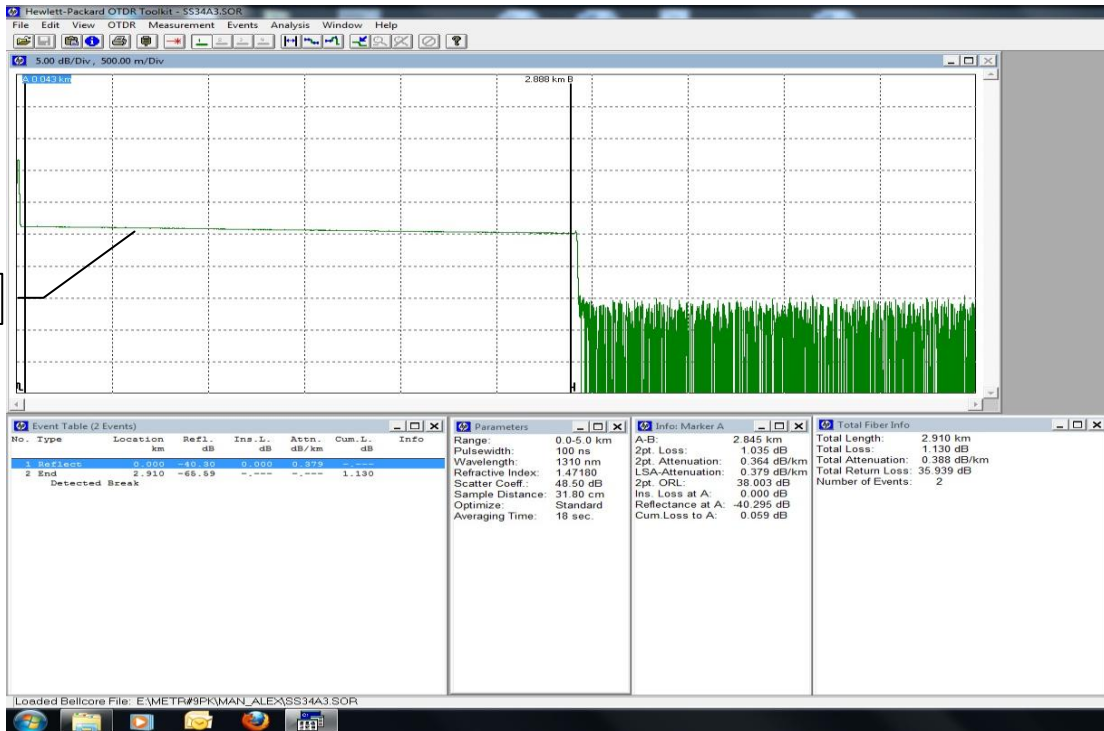
Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση πέντε χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1310nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα δεκαοχτώ δευτερόλεπτα.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι τα μέτρα της οπτικής ίνας που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι απώλειες ανά χιλιόμετρο διότι η μετρήσιμη

απόσταση είναι σίγουρα άνω των δύο χιλιομέτρων. Σε τέτοιες μεγάλες αποστάσεις, μας ενδιαφέρουν οι απώλειες που υπάρχουν ανά χιλιόμετρο.

Βλέπουμε από το OTDR ότι η μετρήσιμη απόσταση ανέρχεται στα 2,910km. Ορίζουμε τα σημεία A και B στην αρχή και στο τέλος της μετρήσιμης απόστασης που μας ενδιαφέρει και παρατηρούμε ότι οι απώλειες είναι της τάξεως των 0,364db/km, οι οποίες είναι αποδεκτές.

Οπτική ίνα



Μέτρηση 18:

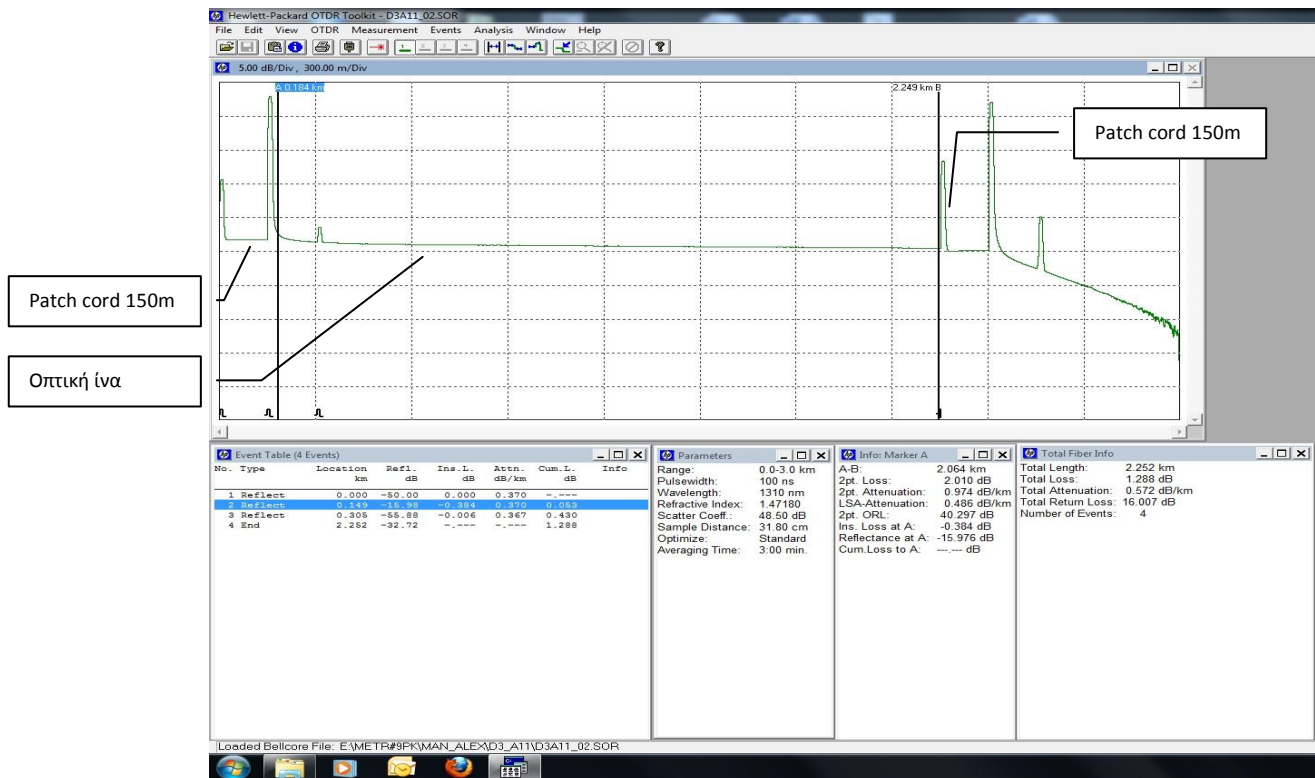
Η παρακάτω μέτρηση αφορά κόμβο με κόμβο. Χρησιμοποιούμε δυο patch cord των 150 μέτρων εργοστασιακής κατασκευής.

Έχουμε επιλέξει στο όργανο ότι θα μετρήσουμε απόσταση τριών χιλιομέτρων καθώς και το μήκος κύματος 1310nm και πλάτος παλμών 100nsec της δέσμης φωτός που θα στείλει ο ακροδέκτης του OTDR. Έχουμε ορίσει μέσο όρο μέτρησης τα τρία λεπτά.

Αυτό που ζητάμε στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι οι απώλειες που έχει το σήμα μεταξύ των δύο κόμβων.

Στα αποτελέσματα που μας δίνει το όργανο μέτρησης OTDR βλέπουμε τέσσερα συμβάντα (reflections). Παρατηρούμε ότι στα 305m υπάρχει μια έντονη αυξομείωση του σήματος δηλαδή περίπου στα 150 m από τον κονέκτορα. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κακή ποιότητα της οπτικής ίνας στο συγκεκριμένο σημείο είτε σε βρωμιά, είτε σε μη ορθή πορεία της (γωνία).

Για οποιονδήποτε από τους παραπάνω λόγους θα πρέπει να ξαναγίνει εμφύσηση καινούριου οπτικού καλωδίου.



Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Από τη θεωρητική ανάλυση των οπτικών ινών, τους λόγους εξασθένησης της ίνας καθώς και το σύνολο των μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε στο ευρυζωνικό μητροπολιτικό δίκτυο της Αλεξανδρούπολης καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στην πραγμάτωση ενός ορθού δικτύου οπτικών ινών πρέπει να ληφθούν υπόψη πλήθος παραγόντων τόσο θεωρητικών όσο και πρακτικών. Από τις θεωρητικές απώλειες της οπτικής ίνας αλλά και από πολύ απλές πρακτικές αιτίες κρίνεται εξαιρετικά δύσκολος ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός οπτικού δικτύου. Παρατηρήσαμε ότι στα δίκτυα οπτικών ινών η θεωρία έρχεται σε άμεση σχέση με την πράξη και αντίστροφα.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι σημαντικό ρόλο στην επίτευξη ενός σωστού οπτικού δικτύου παίζουν: η ποιότητα των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτό και κατά πόσο αυτά πληρούν τις σωστές θεωρητικές προδιαγραφές, ο σωστός σχεδιασμός όδευσης του οπτικού καλωδίου ιδιαίτερα σε μεγάλες αποστάσεις και η πολύ προσεκτική εμφύσηση του κατά μήκος αυτών καθώς και η σωστή σύνδεση των οπτικών ινών.

Γενικότερα η επιτυχία ενός δικτύου οπτικών ινών μπορεί να κριθεί τόσο από έναν μεγάλο όγκο παραγόντων και προϋποθέσεων όσο και από έναν απλό κόκκο σκόνης εσωτερικά του οπτικού καλωδίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών Ν.Κ Ουζουνόγλου
2. Οπτικές ίνες: Θεωρία και εφαρμογές Χ.Ι Γεωργόπουλου
3. Οπτικές ίνες – Οπτικά καλώδια. Το πέρασμα από τη φαντασία στην πραγματικότητα Alcatel
4. Εισαγωγή στα συστήματα επικοινωνίας Τηλεπικοινωνίες 2
Κώστας Παισόπουλος
5. Συστήματα Επικοινωνιών με οπτικές ίνες Govind P. Agrawal
6. Προηγμένες τηλεπικοινωνιακές υποδομές και υπηρεσίες
ΟΤΕ γενική διεύθυνση τεχνικών θεμάτων
7. Οπτικές ίνες David Goff
8. Τηλεπικοινωνιακή Τεχνική Τ.Ε.Ι Καβάλας Βραδέλης Ιωάννης
9. www.Wikipedia.com
10. www.agilent.com