



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Αρχιτεκτονική Οπτικού Δικτύου Dense WDM και Μελέτη Απόδοσης

Πηρίγκου Αναστασία

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Μπαζιάνα Περιστέρα
Επίκουρη Καθηγήτρια

Λαμία έτος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Αρχιτεκτονική Οπτικού Δικτύου Dense WDM και Μελέτη Απόδοσης

Πηρίγκου Αναστασία

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Μπαζιάνα Περιστέρα
Επίκουρη Καθηγήτρια

Λαμία έτος 2023



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

Dense WDM Optical Network Architecture and Performance Study

Pirigkou Anastasia

FINAL THESIS

ADVISOR

Baziana Peristera
Assistant Professor

Lamia year 2023

«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων Συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.

2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.

3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια

4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: 10.11.2023

— Η Δηλ.

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία έχει ως θέμα την αρχιτεκτονική οπτικού δικτύου Dense WDM και την μελέτη απόδοσης. Προτείνονται δύο πρωτόκολλα CSMA και μελετάται η απόδοση τους με την βοήθεια προγράμματος εξομοίωσης. Αρχικά, το πρώτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στις οπτικές ίνες και στα στοιχεία ενός οπτικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Το δεύτερο κεφάλαιο ασχολείται με την πολυπλεξία με σκοπό στην συνέχεια να γίνει αναφορά στην αρχιτεκτονική οπτικού δικτύου Dense WDM. Το τρίτο κεφάλαιο έχει ως θέμα τα οπτικά δίκτυα όπου γίνεται αναφορά στα στοιχεία ενός οπτικού δικτύου, στις κατηγορίες και τοπολογίες οπτικών δικτύων καθώς και αναφορές σε σύγχρονα οπτικά δίκτυα. Το τέταρτο κεφάλαιο εστιάζει στα πρωτόκολλα ελέγχου προσπέλασης μέσου, στα οποία συμπεριλαμβάνονται και τα πρωτόκολλα CSMA. Στο πέμπτο κεφάλαιο προτείνονται τα δύο πρωτόκολλα CSMA και περιγράφεται η διαδικασία μετάδοσης στο καθένα από αυτά. Στο έκτο κεφάλαιο μελετάται η απόδοση των πρωτοκόλλων, η οποία προκύπτει από εξομοίωση βασισμένη σε συγκεκριμένη μαθηματική μοντελοποίηση.

ABSTRACT

This paper's subject is Dense WDM Optical Network Architecture and Performance Study. Two CSMA protocols are proposed and their performance is studied with the help of a simulation program. Initially, the first chapter focuses on optical fibers and the elements of an optical telecommunication system. The second chapter deals with multiplexing in order to then reference the Dense WDM Optical Network Architecture. The third chapter's topic is optical networks where the elements, categories and topologies of optical networks are referenced as well as references to modern optical networks. The fourth chapter focuses on Medium Access Control protocols, including CSMA protocols. In the fifth chapter, the two CSMA protocols are proposed and the transmission process in each of them is described. In the sixth chapter, the performance of the protocols, which is calculated from a simulation based on specific mathematical modeling, is studied.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, την κυρία Μπαζιάνα Περιστέρα, Επίκουρη Καθηγήτρια, για την πολύτιμη καθοδήγηση της, τον χρόνο που μου αφιέρωσε, την υπομονή της, το ενδιαφέρον της, τις σημαντικές συμβουλές και οδηγίες που μου έδωσε και για την κατανόηση που μου έδειξε κατά την διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας. Η ολοκλήρωση της δεν θα ήταν εφικτή χωρίς αυτήν. Επίσης, θα ήθελα να την ευχαριστήσω για τις γνώσεις που απέκτησα σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα που διαφορετικά δεν θα είχα αποκτήσει χωρίς την ώθηση και ενθάρρυνση της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τις φίλες μου, Άννα, Βασιλική και Μαριαλένη, καθώς και τον συμφοιτητή και φίλο μου Κωνσταντίνο για την συνεχή συμπαράσταση τους από τότε που ξεκίνησε η εκπόνηση της πτυχιακής μου. Η στήριξη τους ήταν και συνεχίζει να είναι πολύτιμη.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ θα ήθελα να το δώσω στην μητέρα μου, Μπάμπου Χρυσούλα, για όλη την ψυχολογική υποστήριξη που μου πρόσφερε, την απόλυτη εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την συνεχή συμπαράσταση της ενώ αντιμετώπιζα δυσκολίες καθώς και τον πατέρα μου, Πηρίγκο Ευστάθιο, για την κατανόηση, τις αισιόδοξες σκέψεις του και την στήριξη του. Πρέπει να ευχαριστήσω και τους δύο για τον αγώνα που έκαναν για να μπορέσω να ξεκινήσω και να τελειώσω τις σπουδές μου και για την αποδοχή και στήριξη των επιλογών μου και το ενδιαφέρον τους κατά την διάρκεια της φοίτησης μου.

Table of Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ABSTRACT	III
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	IV
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.1 – ΟΠΤΙΚΕΣ ΊΝΕΣ	2
1.1.1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.1.2 – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	2
1.1.3 – ΔΟΜΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΊΝΑΣ	6
1.1.4 – ΕΙΔΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΊΝΩΝ	8
1.1.5 – ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗ	11
1.1.6 – ΔΙΑΣΠΟΡΑ.....	14
1.1.7 – ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΊΝΩΝ	16
1.2 – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΤΙΚΟΥ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	17
1.2.1 – ΔΟΜΗ ΟΠΤΙΚΟΥ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	17
1.2.2 – ΟΠΤΙΚΟΣ ΠΟΜΠΟΣ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΟΣ.....	18
1.2.3 – ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΕΚΤΗΣ	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ	20
2.1 – ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ	20
2.1.1 – Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ ΚΑΙ ΤΑ ΕΙΔΗ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ	20
2.1.2 – ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ WDM.....	23
2.1.3 – ΠΟΛΥΠΛΕΚΤΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΠΟΛΥΠΛΕΚΤΕΣ WDM.....	24
2.1.4 – COARSE WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING - CWDM.....	25
2.1.5 – DENSE WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING - DWDM.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	28
3.1 – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	28
3.2 – ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	30
3.3 – ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	33
3.4 – ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	36
3.4.1 – ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (PASSIVE OPTICAL NETWORKS – PONs)	36
3.4.2 – DATA CENTERS	37
3.4.3 – ΟΠΤΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΛΙΚΟΥ	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ	40
4.1 – ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ	40
4.2 – ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΤΥΧΑΙΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ	40
4.3 – ΕΙΔΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΤΥΧΑΙΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ	40
4.3.1 – ΑΛΟΝΑ	40

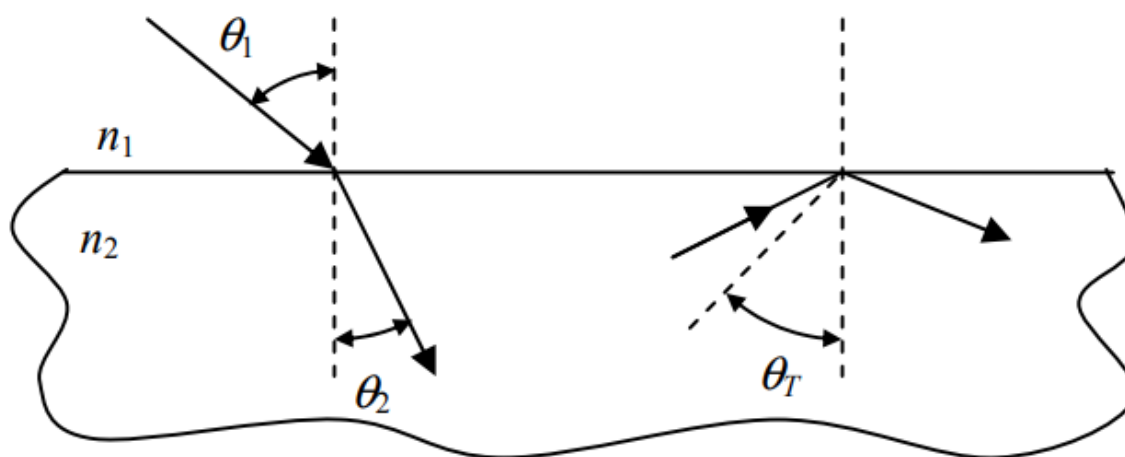
4.3.2 - CSMA	41
4.3.3 – CSMA/CD	42
4.3.4 – CSMA/CA	43
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ CSMA.....</u>	<u>44</u>
5.1 – ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ	44
5.2 – ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΟΜΒΟΥ	45
5.3 – ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ CSMA-1	45
5.4 – ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ CSMA-2	49
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ/ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</u>	<u>52</u>
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	<u>62</u>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 – Οπτικές Ίνες

1.1.1 – Εισαγωγή

Οι οπτικές ίνες είναι ένα μέσο μετάδοσης πληροφοριών. Η κάθε οπτική ίνα εμφανισιακά είναι ένα πολύ λεπτό νήμα με διάμετρο ίση με μία ανθρώπινη τρίχα. Ένα καλώδιο οπτικών ινών μπορεί να περιέχει εκατοντάδες δέσμες οπτικών ινών. Είναι κυρίως κατασκευασμένες από πλαστικό ή γυαλί και χρησιμοποιούνται για την μετάδοση οπτικού σήματος. Η μετάδοση του φωτός είναι εφικτή στις οπτικές ίνες λόγω της κατασκευής τους. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται μία τεχνική που ονομάζεται «ολική εσωτερική ανάκλαση» (total internal reflection).^[1]



Εικόνα 1: Η τεχνική ολικής εσωτερικής ανάκλασης ^[5]

1.1.2 – Ιστορική Αναδρομή

Στις οπτικές ίνες σήμερα χρησιμοποιείται το φως για την μετάδοση πληροφοριών αλλά η χρήση του φωτός για επικοινωνιακούς σκοπούς είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται από την αρχαιότητα ακόμα. Έχουν χρησιμοποιηθεί μέσα όπως οι καθρέφτες, σήματα καπνού και φάροι με σκοπό να μεταφέρουν κάποια σημαντική πληροφορία (κίνδυνος, προειδοποίηση, νίκη σε πόλεμο). Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν σημαίες, λαμπτήρες σήμανσης και άλλες συσκευές που δημιουργήθηκαν με σκοπό την σήμανση. Το 1792 προτάθηκε από τον Claude Chappe η χρήση ενδιάμεσων σταθμών αναμετάδοσης για την μετάδοση μηχανικά κωδικοποιημένων μηνυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις (περίπου 100 χλμ.). Ο σκοπός των ενδιάμεσων σταθμών αναμετάδοσης ήταν να λειτουργήσουν ως αναγεννητές (regenerators) ή αλλιώς επαναληπτές (repeaters).^[2]

Ξεκίνησε η λειτουργία ενός δικτύου οπτικών τηλεγράφων για πρώτη φορά τον Ιούλιο του 1794 στην Γαλλία μεταξύ δύο πόλεων, συγκεκριμένα μεταξύ του Παρισιού και της Λιλ (οι οποίες είχαν απόσταση 200 χλμ. μεταξύ τους). Με την πάροδο του χρόνου, αυτό το δίκτυο συνεχώς επεκτεινόταν μέχρι το 1830 όπου είχε πλέον επεκταθεί σε ολόκληρη την Ευρώπη. Δυστυχώς αυτά τα οπτικομηχανικά συστήματα ήταν αργά, με ρυθμό μετάδοσης μικρότερο από 1 bit/δευτερόλεπτο.^[2]



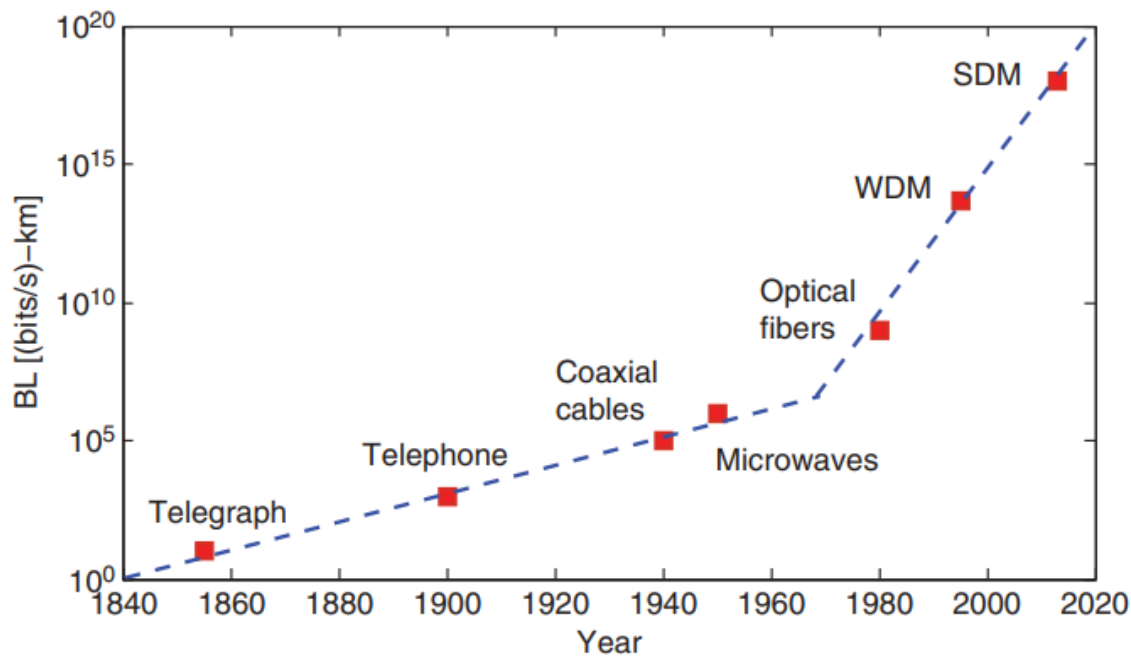
Εικόνα 2: Οπτικός τηλεγράφος στο Σάαρλαντ, Γερμανία ^[27]

Η τηλεγραφία έφερε την επανάσταση στις επικοινωνίες σε μεγάλες αποστάσεις. Πλέον από το 1830 ξεκινάει η εποχή των ηλεκτρικών επικοινωνιών. Παρατηρούνται βελτιώσεις στην απόδοση (έως 10bit/δευτερόλεπτο), με την χρήση τεχνικών κωδικοποίησης όπως Morse, και στην απόσταση (έως 1000 χλμ.), με την χρήση ενδιάμεσων σταθμών αναμετάδοσης. Ως αποτέλεσμα αυτών των βελτιώσεων, τέθηκε σε λειτουργία το πρώτο επιτυχημένο υπερατλαντικό τηλεγραφικό καλώδιο το 1866. Η τηλεγραφία αξιοποίησε τον κώδικα Morse και χρησιμοποίησε ένα ψηφιακό σχήμα μέσω δύο ηλεκτρικών παλμών διαφορετικής διάρκειας (δηλαδή οι τελείες και παύλες του κώδικα Morse).^[2] Στην Ελλάδα, η τηλεγραφία ξεκίνησε αργότερα το 1859 με την πόντιση του υποβρύχιου καλωδίου που συνδέει τον Πειραιά με την Ερμούπολη και χρησιμοποιήθηκε μέχρι και το τέλος του 19^{ου} αιώνα. ^[3] Στην συνέχεια ακολούθησε η εφεύρεση του τηλεφώνου το 1876. Πλέον μιλάμε για την μετάδοση ηλεκτρικού σήματος σε αναλογική μορφή μέσω ενός συνεχώς μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Για περίπου έναν αιώνα επικρατεί η μετάδοση σήματος σε αναλογική μορφή.^[2]

Με την εφεύρεση των τηλεφώνων ακολούθησε στην συνέχεια και η ανάπτυξη τηλεφωνικών δικτύων σε παγκόσμιο επίπεδο. Ξεκινάει η χρήση ομοαξονικών καλωδίων αντί για καλώδια συνεστραμμένων ζευγών (twisted-pair) και με την βοήθεια τους αυξάνεται η χωρητικότητα συστήματος σε σημαντικό βαθμό. Το 1940 τέθηκε σε λειτουργία το πρώτο σύστημα ομοαξονικών καλωδίων. Ήταν 3MHz και μπορούσε να μεταδώσει ένα τηλεοπτικό κανάλι ή 300 κανάλια φωνής. Ένα πρόβλημα που αντιμετώπισαν αυτά τα συστήματα ήταν ο περιορισμός του εύρους ζώνης τους. Ο περιορισμός αυτός υπήρχε λόγω της απώλειας τάσης καλωδίου, η οποία εξαρτάται από το μήκος καλωδίου και την συχνότητα. Αυτή η απώλεια τάσης καλωδίου αυξάνονταν ραγδαία για συχνότητες άνω των 10MHz. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος αναπτύχθηκαν τα συστήματα επικοινωνίας μικροκυμάτων στα οποία μεταδίδεται ένα κατάλληλα κωδικοποιημένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα μέσω του αέρα σε συχνότητες που βρίσκονται στο εύρος 1-10GHz.^[2]

Από το 1948 τόσο τα μικροκυματικά όσο και τα ομοαξονικά συστήματα έχουν εξελιχθεί σε σημαντικό βαθμό και φτάνουν πλέον ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 100Mb/s. Όταν τέθηκε σε λειτουργία το πιο προηγμένο ομοαξονικό σύστημα το 1975, μπόρεσε να ξεπεράσει αυτόν τον ρυθμό μετάδοσης και να φτάσει στα 274Mb/s. Το πρόβλημα ήταν ότι η απόσταση μεταξύ των επαναληπτών ήταν μικρή (περίπου 1 χλμ.), κάνοντας την λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος δαπανηρή. Από την άλλη, τα συστήματα επικοινωνίας μικροκυμάτων δεν είχαν το ίδιο πρόβλημα με την απόσταση μεταξύ των επαναληπτών (επέτρεπαν μεγαλύτερη απόσταση) αλλά ο ρυθμός μετάδοσης δεν μπορούσε να ξεπεράσει τα 100Mb/s λόγω της φέρουσας συχνότητας των μικροκυμάτων.^[2]

Για την αξιολόγηση συστημάτων επικοινωνίας χρησιμοποιείται το γινόμενο ρυθμού μετάδοσης bit προς απόσταση ή αλλιώς BL. Εδώ το B αντιστοιχεί στον ρυθμό μετάδοσης bit και το L στην απόσταση των επαναληπτών. Αυτό το γινόμενο έχει υποστεί πολλές αυξήσεις από το 1840 έως το 1975 ως αποτέλεσμα τεχνολογικής προόδου. Η επόμενη αύξηση όμως δεν ήταν ακόμη εφικτή λόγω εξοπλισμού. Το πρόβλημα ήταν ότι ενώ προτάθηκε η χρήση οπτικών κυμάτων ως φορείς, ένα πρόβλημα ήταν ότι δεν υπήρχε κατάλληλο μέσο μετάδοσης. Με την εφεύρεση του λείζερ το 1960 υπήρχε πλέον μία οπτική πηγή με συνοχή η οποία μπορούσε να αξιοποιηθεί από κάποιο μελλοντικό μέσο μετάδοσης. Αυτό το μέσο αποδείχθηκε να είναι οι οπτικές ίνες, οι οποίες προτάθηκαν για πρώτη φορά το 1966. Όπως γίνεται καθοδήγηση των ηλεκτρονίων στα χάλκινα καλώδια, έτσι και στις οπτικές ίνες θα μπορούσε να γίνει καθοδήγηση του φωτός. Όμως, κατά την δεκαετία του 1960 οι οπτικές ίνες που ήταν διαθέσιμες εκείνη την περίοδο είχαν ένα σοβαρό πρόβλημα. Συγκεκριμένα, υπήρχαν υψηλές απώλειες οι οποίες ξεπερνούσαν τα 1000dB/km. Ευτυχώς ακολούθησε μία ανακάλυψη το 1970 όπου οι απώλειες αυτές μπορούσαν να μειωθούν κάτω από 20dB/km στην περιοχή μήκους κύματος κοντά στο 1μm. Πλέον έχοντας συμπαγείς οπτικές πηγές και οπτικές ίνες χαμηλών απωλειών μπορούσαν να ξεκινήσουν παγκοσμίως οι προσπάθειες ανάπτυξης συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες.^[2]



Εικόνα 3: Η αύξηση στο γινόμενο ρυθμού μετάδοσης bit προς απόσταση (BL) με την ανακάλυψη νέων τεχνολογιών από το 1840 μέχρι το 2020. ^[2]

Σύμφωνα με τον Agrawal, η ερευνητική φάση των συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες ξεκίνησε περίπου το 1975. Η πρόοδος σε αυτά τα 25 χρόνια μπορεί να ομαδοποιηθεί σε διαφορετικές κατηγορίες ή αλλιώς γενιές συστημάτων φωτοκύματος. Σε κάθε γενιά υπάρχει βελτίωση στο γινόμενο BL που προαναφέρθηκε λόγω νέων ανακαλύψεων που φέρνουν θεμελιώδεις αλλαγές. ^[2]

Πρώτη γενιά: Ρυθμός μετάδοσης bit 45Mb/s για αποστάσεις επαναληπτών έως και 10km. Χρήση λέιζερ ημιαγωγών με λειτουργία κοντά στα 0,85μm. Κυκλοφόρησε στο εμπόριο για πρώτη φορά το 1980. Μετά το 1975, τα συστήματα λειτουργούσαν κοντά στα 1,3μm ώστε να μειωθούν έτσι οι απώλειες της ίνας (στην περιοχή μήκους κύματος 1,3μm οι απώλειες ήταν κάτω από 1dB/km). ^[2]

Δεύτερη γενιά: Αύξηση στον ρυθμό μετάδοσης bit. Παρ' όλο που ήταν διαθέσιμη η δεύτερη γενιά στις αρχές της δεκαετίας του 1980, υπήρξε αρχικά περιορισμός στον ρυθμό μετάδοσης λόγω των πολύτροπων ινών που χρησιμοποιούνταν (κάτω από 100Mb/s). Το 1981 ξεπεράστηκε ο περιορισμός αυτός με την ανάπτυξη μονότροπων (single-mode) ινών με ένα πείραμα σε εργαστήριο όπου ο ρυθμός μετάδοσης έφτασε τα 2Gb/s σε 44km μονότροπης ίνας. Πλέον μετά το 1987 είναι διαθέσιμα στο εμπόριο συστήματα φωτοκυμάτων τα οποία λειτουργούν με ρυθμό μετάδοσης έως 1,7Gb/s και απόσταση επαναληπτών γύρω στα 50km. ^[2]

Τρίτη γενιά: Υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες των ινών κατασκευασμένες από διοξείδιο του πυριτίου έγιναν απόπειρες για λειτουργία στην φασματική περιοχή 1,55μm όπου οι απώλειες μειώνονται σε 0,2dB/km. Υπήρξε καθυστέρηση όμως λόγω της μεγάλης διασποράς των ινών σε αυτή την περιοχή. Επιλύθηκε αυτό το πρόβλημα κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1980 με την κατασκευή ινών έτσι ώστε να έχουν ελάχιστη διασπορά κοντά στην φασματική περιοχή 1,55μm (dispersion-shifted fiber). Εναλλακτικά χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος περιορισμού

του φάσματος του λέιζερ σε έναν μόνο διαμήκη τρόπο. Σε εργαστηριακά πειράματα ο ρυθμός μετάδοσης φτάνει μέχρι και 4Gb/s σε αποστάσεις άνω των 100km. Στο εμπόριο έγιναν διαθέσιμα συστήματα τρίτης γενιάς με ταχύτητα 2,5Gb/s το 1990, με την ικανότητα να λειτουργήσουν με ρυθμό μετάδοσης έως και 10 Gb/s. Σημειώνεται ότι για την καλύτερη απόδοση, χρησιμοποιούνται οι ίνες με μετατόπιση διασποράς σε συνδυασμό με την μέθοδο με λέιζερ που ταλαντώνονται σε έναν μόνο διαμήκη τρόπο λειτουργίας.^[2]

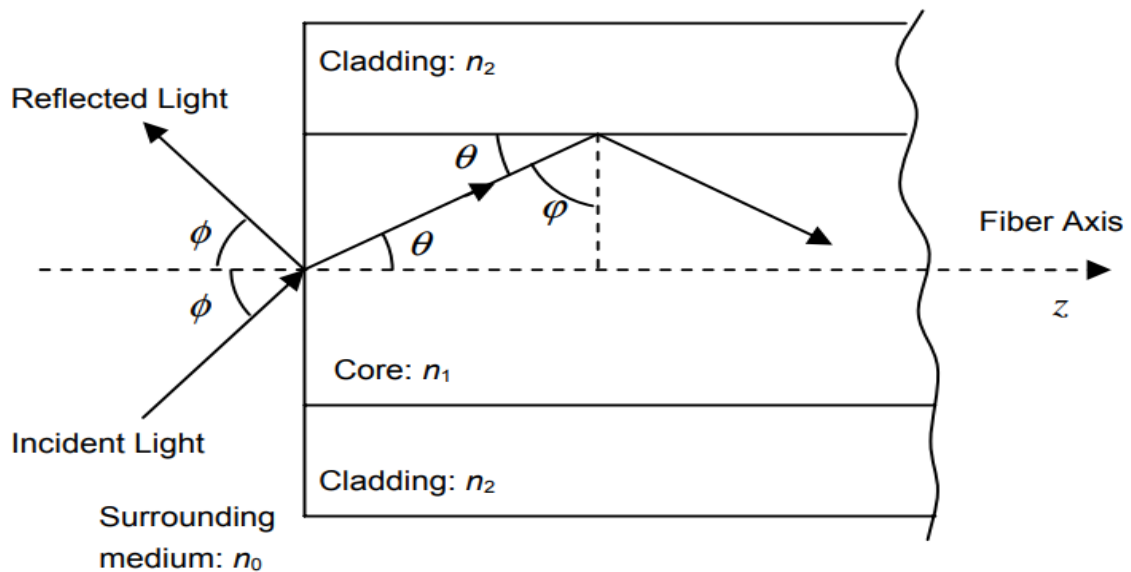
Τέταρτη γενιά: Αύξηση ρυθμού μετάδοσης με την χρήση οπτικής ενίσχυσης (για αύξηση της απόστασης των επαναληπτών) και της πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (Wave Division Multiplexing - WDM). Αυτές οι τεχνικές αναπτύχθηκαν επειδή ένα από τα μειονεκτήματα συστημάτων τρίτης γενιάς που λειτουργούσαν στη φασματική περιοχή 1,55μm ήταν ότι απαιτούνταν η συνεχής αναγέννηση οπτικού σήματος μέσω ηλεκτρονικών επαναληπτών με απόσταση μεταξύ τους περίπου 60-80 χιλιόμετρα. Ξεκίνησε μία επανάσταση με την έλευση της τεχνικής WDM γύρω στο 1992 η οποία είχε ως αποτέλεσμα να διπλασιάζεται η χωρητικότητα συστήματος κάθε 6 μήνες. Το 2001 έχουμε πλέον ρυθμούς μετάδοσης που ανέρχονται στα 10Tb/s.^[2]

Πέμπτη γενιά: Κύριος σκοπός η αύξηση της φασματικής απόδοσης των συστημάτων WDM, ξεκινάει γύρω στο 2005. Η φασματική απόδοση αρχικά περιοριζόταν κάτω από 1bit/s/Hz στα συστήματα τέταρτης γενιάς. Ενώ είχαν αναπτυχθεί μορφές διαμόρφωσης νωρίτερα, χρησιμοποιήθηκαν μόνο μετά το 2001. Με αυτές τις μορφές διαμόρφωσης η πληροφορία κωδικοποιούνταν χρησιμοποιώντας τόσο το πλάτος όσο και τη φάση του οπτικού φέροντος. Ως αποτέλεσμα, αυξήθηκε η φασματική απόδοση σε πάνω από 10bit/s/Hz. Παράλληλα επεκτάθηκε και το εύρος μήκους κύματος στο οποίο μπορούσε να λειτουργήσει ένα σύστημα WDM. Η ζώνη C ή αλλιώς το συμβατικό παράθυρο μήκους κύματος (C-Band - Conventional band) κάλυπτε το εύρος μήκους κύματος από 1,53μm έως 1,56μm και επεκτάθηκε σε ζώνες μεγάλου και μικρού μήκους κύματος, δηλαδή ζώνες L(1,56μm-1,62μm) και S(1,46μm-1,53μm) αντίστοιχα.^[2]

Με την πάροδο του χρόνου παρατηρείται ότι έχουν βελτιωθεί όλο και περισσότερο τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών (εύρος μήκους κύματος, υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης σε όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις). Πλέον βρισκόμαστε στην έκτη γενιά όπου χρησιμοποιείται η πολυπλεξία διαίρεσης χώρου (Space Division Multiplexing – SDM) για την αύξηση της χωρητικότητας των συστημάτων. Με την SDM αξιοποιούμε οπτικές ίνες που περιέχουν πολλαπλούς πυρήνες ή έναν ενιαίο πυρήνα που υποστηρίζει πολλαπλούς τρόπους λειτουργίας. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν πολύτροπες ίνες, τότε αναφερόμαστε σε πολυπλεξία διαίρεσης τρόπων (Mode-Division Multiplexing - MDM).^[2]

1.1.3 – Δομή Οπτικής Ίνας

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η οπτική ίνα είναι ένα πολύ λεπτό νήμα με διάμετρο ίση με μία ανθρώπινη τρίχα και είναι συνήθως από πλαστικό ή γυαλί. Για ποιον λόγο όμως γίνεται η επιλογή αυτών των υλικών; Επειδή το γυαλί και το πλαστικό πληρούν κάποιες συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Οι οπτικές ίνες πρέπει να είναι λεπτές, μακριές και εύκαμπτες. Για την κατασκευή τους, είναι σημαντικό τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν να έχουν κατάλληλους δείκτες διάθλασης για τον πυρήνα και τον μανδύα (δείκτης διάθλασης πυρήνα ελαφρώς μεγαλύτερος από τον δείκτη διάθλασης μανδύα). Επίσης, για την σωστή καθοδήγηση του φωτός θα πρέπει η ίνα να είναι κατασκευασμένη από υλικό που είναι διάφανο σε συγκεκριμένο οπτικό μήκος κύματος.^[7]



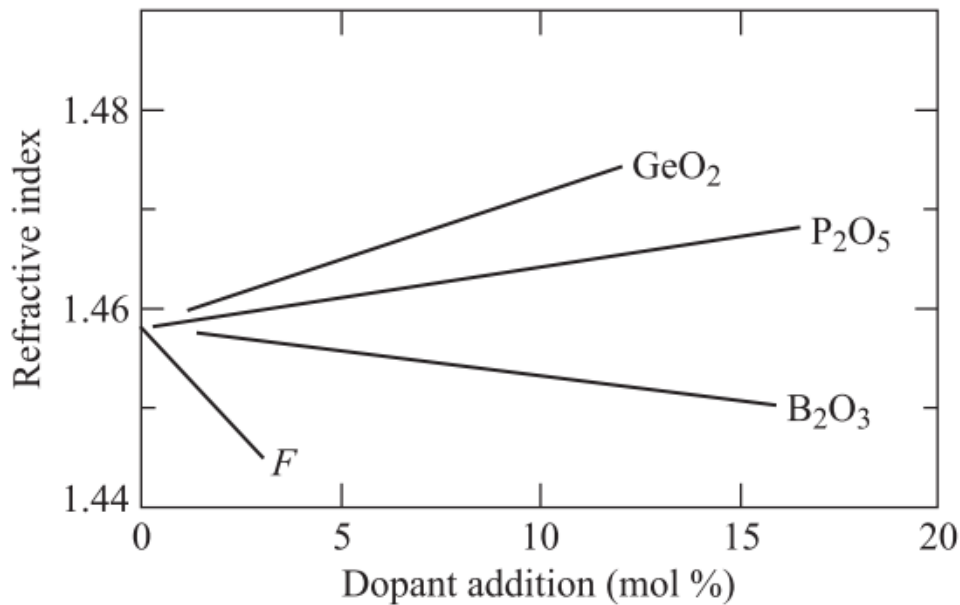
Εικόνα 4: Καθοδήγηση του φωτός μέσα στην ίνα με την βοήθεια της τεχνικής ολικής εσωτερικής ανάκλασης. ^[5]

Επομένως, το γυαλί και το πλαστικό είναι αποδεκτές επιλογές ακριβώς επειδή ικανοποιούν τις παραπάνω απαιτήσεις. Οι ίνες από πλαστικό χρησιμοποιούνται λιγότερο από ότι οι γυάλινες λόγω της υψηλότερης εξασθένισης τους σε σχέση με αυτές. Έχουν όμως μεγαλύτερη μηχανική αντοχή από ότι οι γυάλινες και για αυτών των λόγο προτιμάται η χρήση τους σε καταπιεστικά περιβάλλοντα. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές μικρών αποστάσεων. ^[7]

Σε αντίθεση, προτιμάται πιο πολύ η χρήση γυάλινων οπτικών ινών. Το γυαλί που χρησιμοποιείται στις οπτικές ίνες αποτελείται από διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) ή από πυριτικό άλας. Υπάρχει ποικιλία γυάλινων ινών για διαφορετικές εφαρμογές. Για παράδειγμα οι πολύ διαφανείς γυάλινες ίνες έχουν χαμηλότερες απώλειες και χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα σε εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων, κάτι που δεν είναι εφικτό με την χρήση πλαστικών ινών. Για μετάδοση σε μικρές αποστάσεις χρησιμοποιούνται γυάλινες ίνες με μεγάλους πυρήνες και μέτριες απώλειες. ^[7]

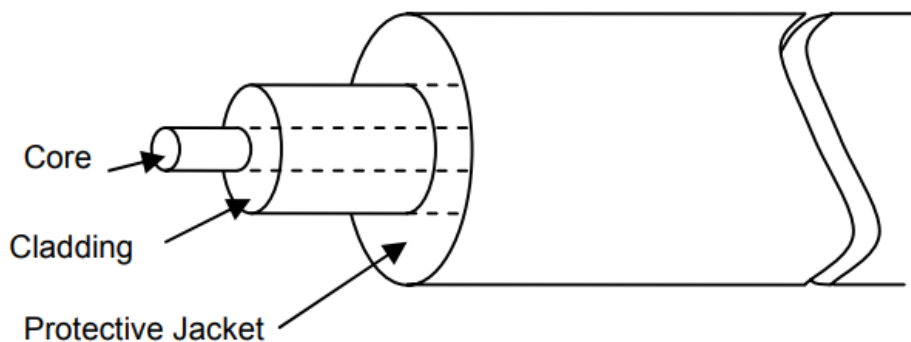
Η δομή μιας οπτικής ίνας είναι ως εξής:

- **Πυρήνας (Core):** Η οπτική ίνα από γυαλί (από διοξείδιο του πυριτίου SiO_2) ή πλαστικό με διάμετρο από 7 έως 200 μm , η οποία είναι κυλινδρική. Το εύρος διαμέτρου είναι μεγάλο επειδή υπάρχουν δύο είδη οπτικών ινών που θα συζητηθούν στο επόμενο υποκεφάλαιο, οι πολύτροπες και οι μονότροπες ίνες, τα οποία έχουν διαφορετικές διαμέτρους πυρήνα. Οι μονότροπες έχουν πολύ μικρότερη διάμετρο σε σχέση με τις πολύτροπες ίνες. ^{[1],[7]}
- **Μανδύας (Cladding):** Είναι η επικάλυψη γύρω από τον πυρήνα, η οποία είναι ένας ομόκεντρος κύλινδρος επίσης από γυαλί ή πλαστικό. Έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα ώστε να περιορίζεται το φως στον πυρήνα με την βοήθεια της ολικής ανάκλασης στην επιφάνεια μεταξύ πυρήνα και μανδύα. Η αύξηση ή μείωση του δείκτη διάθλασης μπορεί να επιτευχθεί με διάφορα νοθεύματα τα οποία αυξάνουν (GeO_2 , P_2O_5) ή μειώνουν (F , B_2O_3) τον δείκτη διάθλασης. ^[7]



Εικόνα 5: Οι αλλαγές στον δείκτη διάθλασης ανάλογα με το νόθευμα που χρησιμοποιήθηκε. ^[7]

- **Κάλυμμα (Jacket):** Επικάλυψη γύρω από τον μανδύα και τον πυρήνα, χρησιμοποιείται για προστασία της ίνας και είναι φτιαγμένο από πολυμερές υλικό (όπως πλαστικό). Είναι σκληρό με σκοπό να προστατεύει τις ίνες στο εσωτερικό από πιθανή φυσική ζημιά λόγω σύνθλιψης ή πίεσης. Εκτός από αυτούς τους άμεσους κινδύνους, το κάλυμμα προστατεύει τις ίνες από την υγρασία, την τριβή, τους διαλύτες και άλλους ρύπους. ^[7]



Εικόνα 6: Δομή μιας οπτικής ίνας ^[5]

1.1.4 – Είδη Οπτικών Ινών

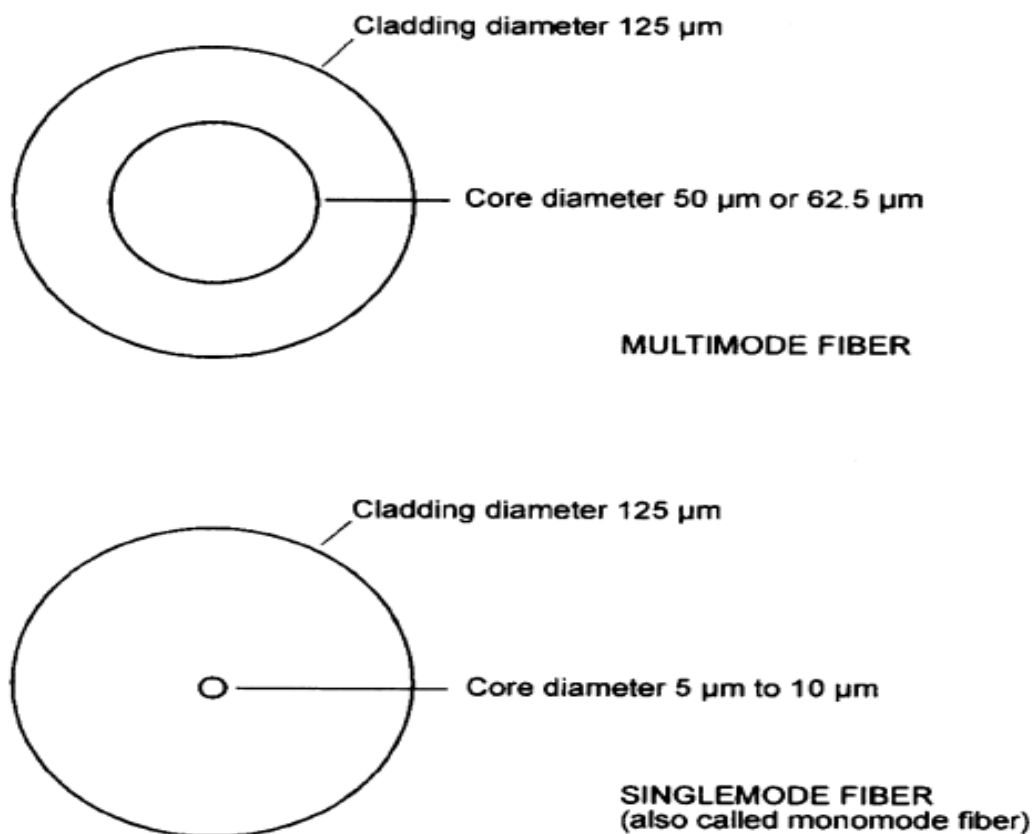
Υπάρχουν δύο είδη οπτικών ινών, οι **μονότροπες (single mode)** ίνες και οι **πολύτροπες (multi-mode)** ίνες. Ανάλογα με το είδος της, μία οπτική ίνα μπορεί να έχει κλιμακωτό δείκτη διάθλασης ή βαθμιαίο δείκτη διάθλασης. Με τον όρο «τρόπο» αναφερόμαστε στις ακτίνες φωτός που ταξιδεύουν μέσα στην ίνα. ^{[1],[4],[7]}

Μονότροπη ίνα (Single-mode fiber): Ο πυρήνας μιας μονότροπης ίνας έχει διάμετρο 8 μm. Η διάμετρος είναι αρκετά μικρή, ειδικά σε σύγκριση με την διάμετρο πυρήνα μιας πολύτροπης ίνας. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι επειδή όσο μικρότερος είναι ο πυρήνας, τόσο λιγότεροι

τρόποι μπορούν να ταξιδεύουν μέσω του πυρήνα. Επομένως, με την μικρή διάμετρο 8μm επιτυγχάνεται η μείωση των τρόπων σε μόνο έναν. Χρησιμοποιείται για την τηλεφωνία και το CATV με πηγές λέιζερ στα 1310 και 1550nm επειδή έχει σχεδόν άπειρο εύρος ζώνης και μικρότερες απώλειες.^{[1],[4]}

Πολύτροπη ίνα (Multi-mode fiber): Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του πυρήνα, τόσο περισσότεροι τρόποι υπάρχουν και για αυτό οι πολύτροπες ίνες έχουν πάντοτε μεγαλύτερο πυρήνα από ότι οι μονότροπες ίνες. Η διάμετρος του πυρήνα είναι συνήθως 50μm ή 62,5μm. Η πολύτροπη ίνα χρησιμοποιείται με πηγές LED σε μήκη κύματος 850 και 1300nm για αργά τοπικά δίκτυα όπως LAN και λέιζερ στα 850nm (VCSEL) και 1310nm (λέιζερ Fabry-Perot) για δίκτυα που λειτουργούν με ταχύτητα gigabits ανά δευτερόλεπτο ή περισσότερο.^{[1],[4],[7]}

Η διάμετρος του μανδύα και στις δύο περιπτώσεις είναι συνήθως 125μm.^[4] Παρακάτω μπορούμε να δούμε καλύτερα την διαφορά διαμέτρου πυρήνα μεταξύ των δύο ειδών οπτικών ινών.

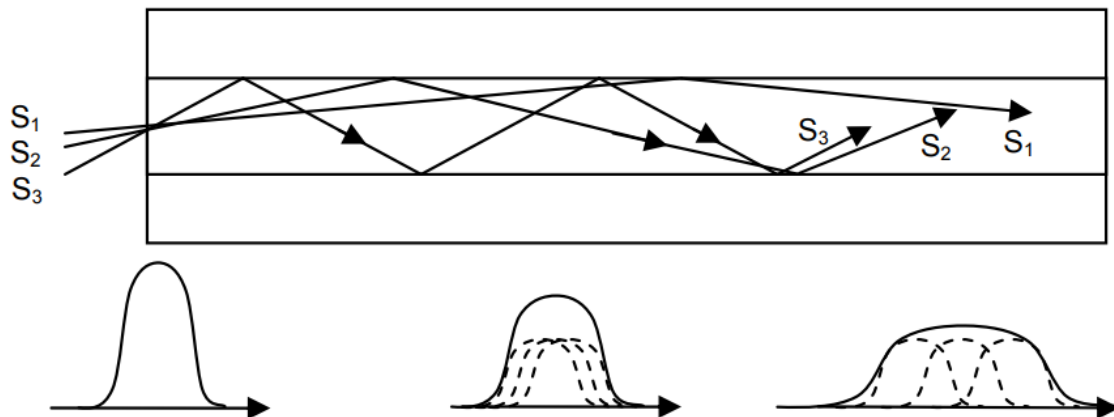


Εικόνα 7: Η διάμετρος πυρήνα-μανδύα σε μονότροπες και πολύτροπες ίνες.^[4]

Όπως προαναφέρθηκε, οι οπτικές ίνες, ανάλογα με το είδος, έχουν είτε **κλιμακωτό δείκτη διάθλασης** (step-index fiber) είτε **βαθμιαίο δείκτη διάθλασης** (graded-index fiber).

Η πολύτροπη ίνα με κλιμακωτό δείκτη διάθλασης ήταν ο πρώτος σχεδιασμός ίνας. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος εξ ολοκλήρου από έναν τύπο οπτικού υλικού και ο μανδύας από άλλο τύπο με διαφορετικά οπτικά χαρακτηριστικά. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι έχει υψηλότερη εξασθένιση και είναι αργή για πολλές χρήσεις λόγω της διασποράς που προκαλείται από τα διαφορετικά μήκη διαδρομής των διαφόρων τρόπων που ταξιδεύουν στον

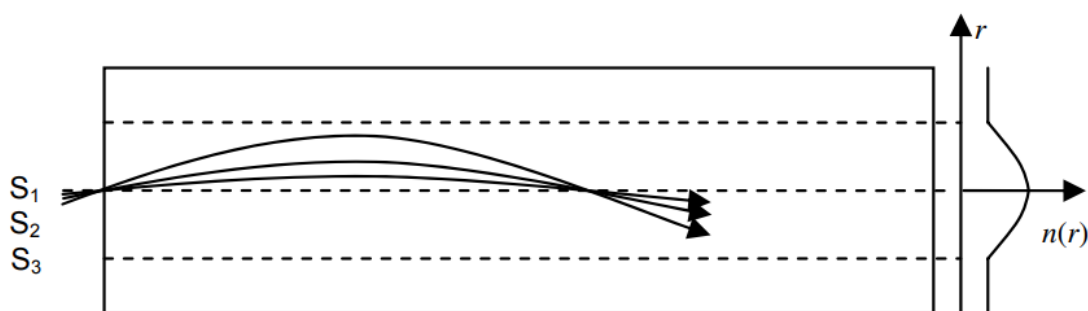
πυρήνα. Για να κατανοήσουμε πώς προκαλείται η διασπορά αρκεί μόνο να δούμε τα μήκη διαδρομής των τρόπων στο παρακάτω σχήμα. ^{[1],[5]}



Εικόνα 8: Διασπορά τρόπων σε πολύτροπη ίνα με κλιμακωτό δείκτη διάθλασης ^[5]

Στην αρχή δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα με το σήμα αλλά κατά την διάρκεια της διάδοσης των ακτινών παρατηρούμε ότι η S1 προηγείται με την S3 να καθυστερεί να φτάσει τις S1, S2 λόγω της μεγαλύτερης απόστασης που έπρεπε να διανύσει. Λόγω αυτής της διαφοράς, το σήμα παραμορφώνεται, διευρύνεται η διάρκεια του και σε περίπτωση όπου είναι μέρος μιας ακολουθίας παλμών θα συγχωνευθεί με τους άλλους παλμούς. Δεν χρησιμοποιείται ευρέως για αυτόν τον λόγο. ^{[1],[5]}

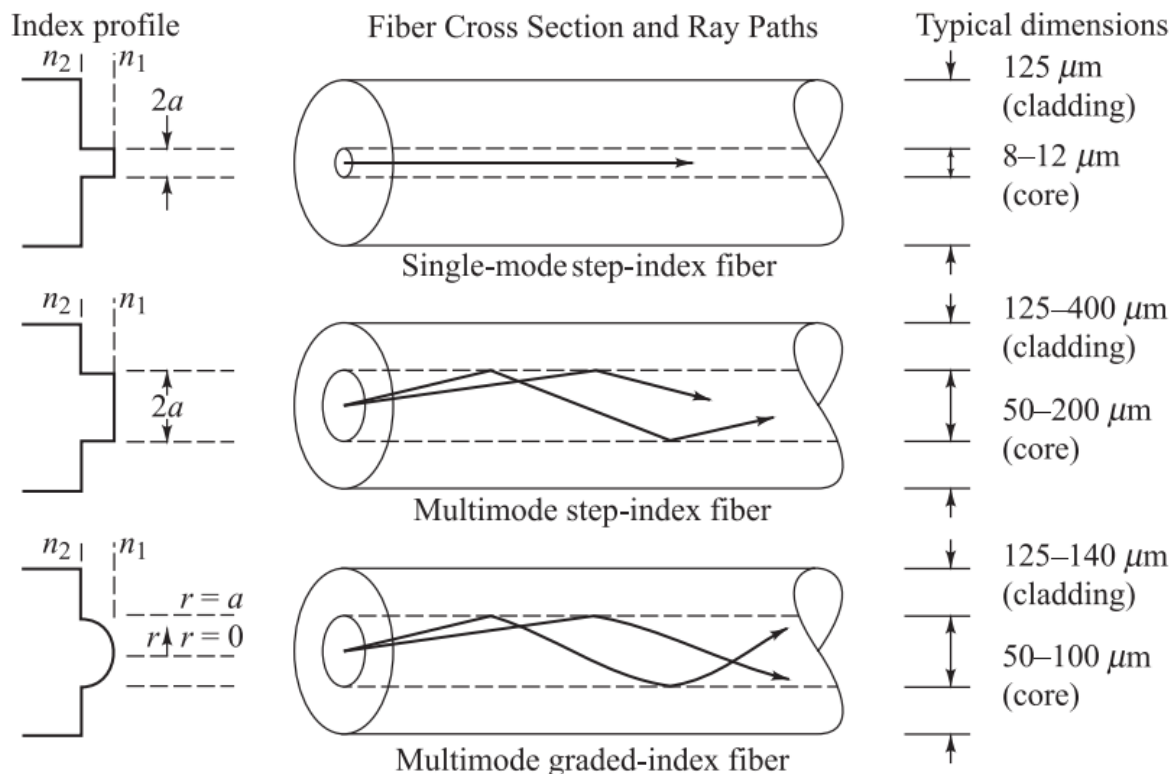
Η πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο δείκτη διάθλασης προσπαθεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα διασποράς χρησιμοποιώντας διαφοροποιήσεις στη σύνθεση του γυαλιού στον πυρήνα. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης διάθλασης είναι διαφορετικός ανάλογα με το που βρισκόμαστε μέσα στον πυρήνα. Στο κέντρο του πυρήνα είναι μέγιστος αλλά καθώς αυξάνεται η ακτινική απόσταση από τον οπτικό άξονα της ίνας, μειώνεται σταδιακά. Με αυτόν τον τρόπο, οι ακτίνες που διαδίδονται πιο μακριά από τον άξονα της ίνας διανύουν μεγαλύτερη απόσταση αλλά με χαμηλότερο δείκτη διάθλασης ώστε να ταξιδεύουν πιο γρήγορα. Οι ακτίνες που διαδίδονται πιο κοντά στο κέντρο ταξιδεύουν με μικρότερη ταχύτητα. Έτσι στο τέλος θα μπορέσουν οι ακτίνες που διανύουν μεγαλύτερη απόσταση να προλάβουν αυτές που είναι πιο κοντά στο κέντρο. Αυτό μπορούμε να το παρατηρήσουμε και στην παρακάτω εικόνα. ^{[1],[5]}



Εικόνα 9: Η διαδρομή των τρόπων (ακτινών) μία πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο δείκτη διάθλασης ^[5]

Σε σχέση με τον κλιμακωτό δείκτη διάθλασης, ο βαθμιαίος προσφέρει εκατοντάδες φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης (έως και ~4GHz/km). Χρησιμοποιούνται συνήθως δύο είδη, οι συνδυασμοί διαμέτρων πυρήνα-μανδύα 50μm/125μm και 62,5μm/125μm. Στην

καθημερινότητα, η πολύτροπη ίνα βαθμιαίου δείκτη διάθλασης χρησιμοποιείται συνήθως για δίκτυα LAN, fiber to the desk, CCTV και άλλα συστήματα ασφαλείας.^[1]



Εικόνα 10: Συνοπτική επισκόπηση ειδών οπτικών ινών καθώς και οι τυπικές διαστάσεις πυρήνα-μανδύα.^[7]

1.1.5 – Εξασθένιση

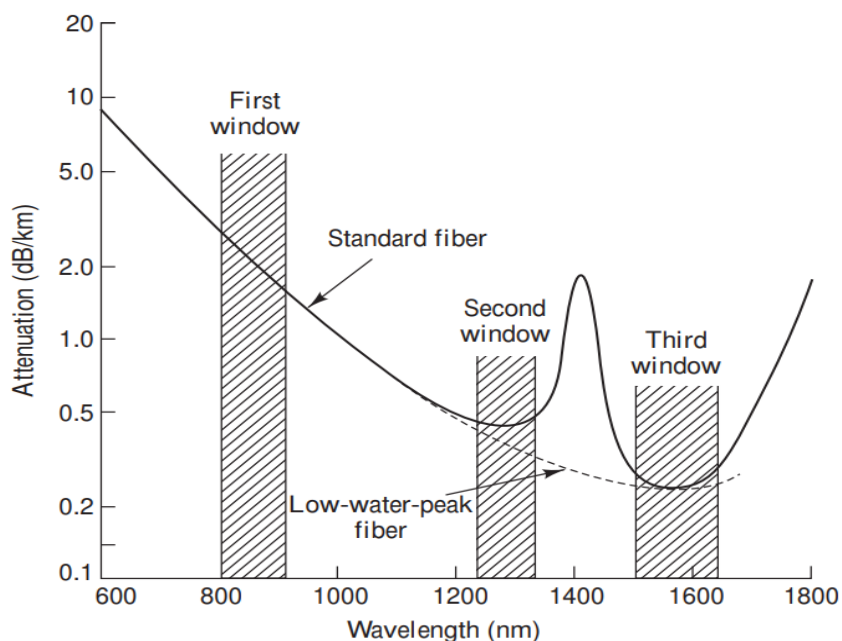
Η εξασθένιση σήματος είναι ένα από τα δύο κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζονται στις οπτικές ίνες. Η εξασθένιση σήματος είναι γνωστή αλλιώς και ως απώλεια σήματος. Το αποτέλεσμα της εξασθένισης είναι να μειωθεί η ισχύς του σήματος και το τελικό σήμα που μεταδόθηκε να είναι διαφορετικό από το αρχικό. Για την αντιμετώπιση της εξασθένισης χρησιμοποιούνται επαναληπτές ή ενισχυτές, κάτι που επηρεάζει το συνολικό κόστος συστήματος ανάλογα με το πλήθος των ενισχυτών ή επαναληπτών που χρησιμοποιούνται. Η ύπαρξη και μόνο της εξασθένισης οδηγεί σε αλλαγές στο σχεδιασμό ενός οπτικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Η μέγιστη απόσταση μετάδοσης μεταξύ ενός πομπού και δέκτη ή ενός ενισχυτή σε σειρά καθορίζεται άμεσα από τον βαθμό της εξασθένισης. Κύριοι παράγοντες εξασθένισης σε μία οπτική ίνα είναι η σκέδαση, η απορρόφηση και οι απώλειες ακτινοβολίας της οπτικής ενέργειας. Κύριοι παράγοντες εξασθένισης σε μία οπτική ίνα είναι η σκέδαση και η απορρόφηση υλικού.^[7]

Παράγοντες Εξασθένισης:

- **Απορρόφηση υλικού (Material absorption):** Σύμφωνα με τον Keiser, η απορρόφηση υλικού διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες.^[7]
 - **Απορρόφηση από ατομικές ατέλειες στη σύνθεση του γυαλιού:** Πρόκειται για ατέλειες στην ατομική δομή του υλικού της οπτικής ίνας. Ελλείποντα μόρια,

συστάδες ομάδων ατόμων υψηλής πυκνότητας, ατέλειες οξυγόνου στη δομή του γυαλιού, όλα αυτά θεωρούνται ατομικές ατέλειες και από αυτές προκύπτουν οι απώλειες απορρόφησης. Παρ' όλα αυτά, οι απώλειες της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι σχεδόν ασήμαντες μπροστά στις απώλειες που προκύπτουν από ενδογενής και εξωγενής απορρόφηση. Υπάρχει περίπτωση όμως να εξελιχθούν σε σημαντικές απώλειες μετά από έκθεση της ίνας σε ιονίζουσα ακτινοβολία. Δηλαδή σε διαστημικές αποστολές, ιατρικές ακτινοθεραπείες, περιβάλλον πυρηνικού αντιδραστήρα είναι πιθανό να υπάρξει συσσώρευση υψηλών δόσεων ακτινοβολίας επί σειρά ετών. ^[7]

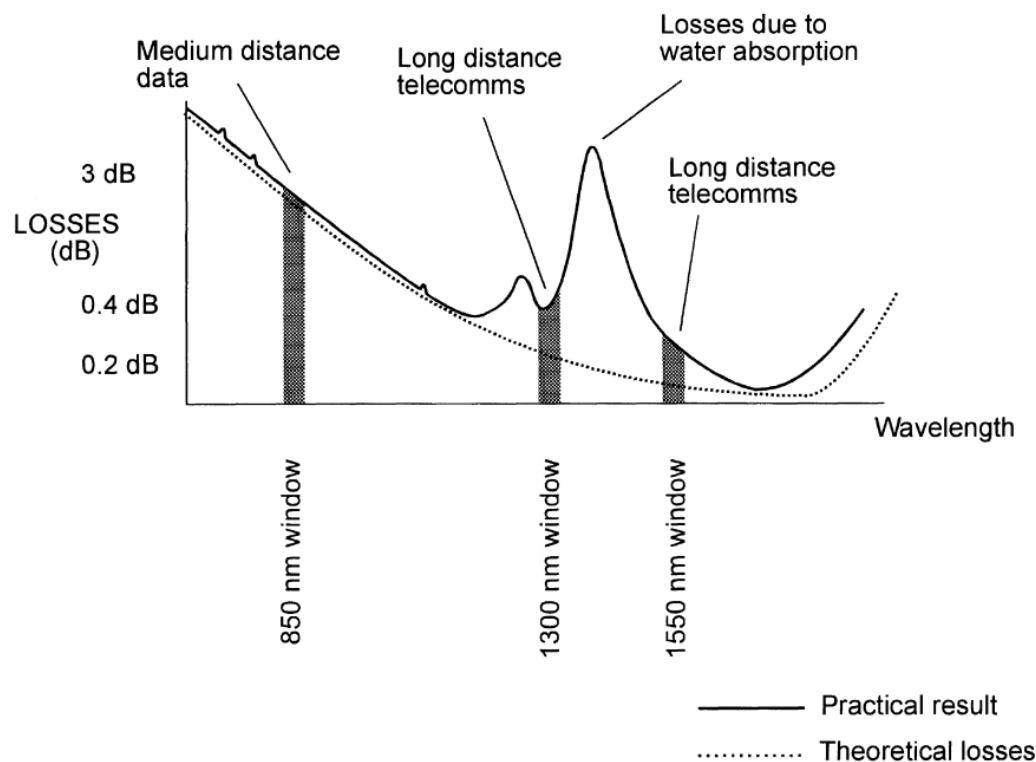
- **Ενδογενής απορρόφηση από άτομα στο υλικό των ινών (Intrinsic absorption):** Προκύπτει από ηλεκτρονιακές διεγέρσεις στην περιοχή του υπεριώδους (ultra violet) όπου $\lambda < 0,4\mu\text{m}$ και από ταλαντώσεις του μορίου SiO_2 στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου (near-infrared) όπου $\lambda < 7\mu\text{m}$. Επειδή οι συγκεκριμένες απώλειες αφορούν το ίδιο το υλικό της ίνας όταν αυτό βρίσκεται σε μία τέλεια, καθαρή κατάσταση, θεωρείται ως το κατώτατο όριο απορρόφησης. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες δεν μπορούν να μειωθούν κάτω από αυτό το όριο. ^{[2],[7]}
- **Εξωγενής απορρόφηση από άτομα ξένων σωμάτων (Extrinsic absorption):** Πρόκειται για προσμείξεις οι οποίες συμπεριλαμβάνουν ιόντα μετάλλων μετάπτωσης (χαλκός, χρώμιο, βανάδιο και σίδηρος) και ιόντα OH^- (νερό) που είναι διαλυμένα στο γυαλί. Κατά την δεκαετία του 1970 οι απώλειες κυμαίνονταν από 1 έως 4dB/km επειδή τα επίπεδα προσμείξεων μετάλλων μετάπτωσης ήταν περίπου 1 ppm (part per million). Σήμερα στις σύγχρονες μονότροπες ίνες είναι εφικτό η συγκέντρωση OH^- να μειωθεί κάτω από 1 ppb (part per billion) με αποτέλεσμα να έχουμε απώλεια 0,4dB/km στο παράθυρο 1310nm και λιγότερο από 0,25dB/km στο παράθυρο 1550nm. Υπάρχει και το παράθυρο 1440nm στο οποίο οι απώλειες συνεχίζουν να υπάρχουν απώλειες λόγω του νερού. Όμως, με την βοήθεια της οπτικής ίνας γνωστής ως dry fiber μπορούν και σε εκείνο το παράθυρο να εξαλειφθούν σχεδόν πλήρως οι απώλειες. Τέτοιες ίνες είναι πολύ χρήσιμες για την μετάδοση σημάτων WDM με χαμηλές απώλειες σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος από τα 1300nm μέχρι τα 1600nm. ^{[2],[5],[7]}



Εικόνα 11: Οι απώλειες στο παράθυρο 1440nm στις σύγχρονες εμπορικές οπτικές ίνες σε σύγκριση με dry fibers (ή αλλιώς low-water-peak fiber). Παρατηρείται σημαντική μείωση απώλειας στα dry fibers. ^[7]

- Σκέδαση Rayleigh:** Στο γυαλί, οι απώλειες σκέδασης οφείλονται σε δομικές ανομοιογένειες ή ατέλειες που εμφανίζονται κατά την κατασκευή των ινών, σε μικροσκοπικές διακυμάνσεις της πυκνότητας του υλικού ή σε διακυμάνσεις της σύνθεσης. Η δομή του γυαλιού είναι ένα τυχαία συνδεδεμένο δίκτυο μορίων, μία δομή που περιέχει κάποιες περιοχές στις οποίες η μοριακή πυκνότητα είναι είτε υψηλότερη είτε χαμηλότερη από τη μέση πυκνότητα στο γυαλί. Αυτό σε συνδυασμό με το ότι το γυαλί αποτελείται από διάφορα οξείδια όπως SiO_2 , GeO_2 και P_2O_5 (μπορεί να εμφανιστούν διακυμάνσεις στη σύνθεση του γυαλιού) έχει ως αποτέλεσμα να προκαλούνται διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης που παρατηρούνται στο εσωτερικό του γυαλιού σε αποστάσεις μικρές σε σύγκριση με το μήκος κύματος. Οι διακυμάνσεις αυτές προκαλούν σκέδαση του φωτός τύπου Rayleigh. Το συγκεκριμένο φαινόμενο εμφανίζεται και στην καθημερινότητα μας και σε αυτό οφείλεται ο μπλε ουρανός (σκεδάζει φως από τον ήλιο στην ατμόσφαιρα). ^[7]

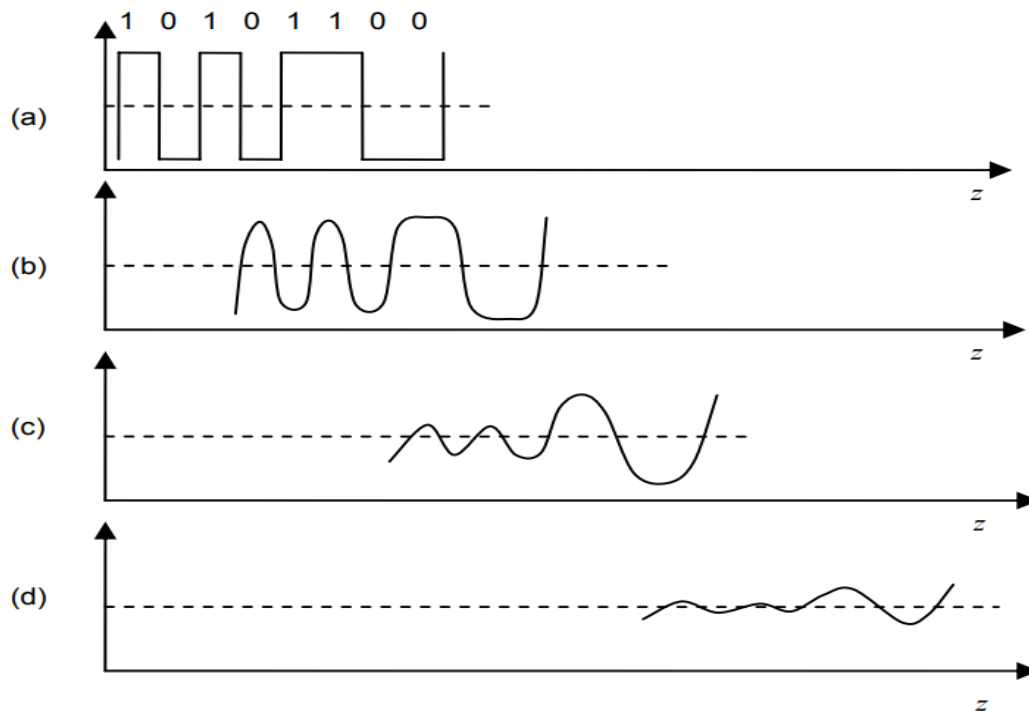
Υπάρχουν κάποια τυποποιημένα μήκη κύματος τα οποία ονομάζονται «παράθυρα» τα οποία έχουν επιλεγεί με σκοπό να εξασφαλιστεί η συμβατότητα του εξοπλισμού διαφορετικών κατασκευαστών. Οι οπτικές ίνες συνεχώς βελτιστοποιούνται ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη αποδοτικότητα σε ένα από αυτά τα παράθυρα. Το παράθυρο 850nm δεν είναι ιδιαίτερα δαπανηρό και είναι εύκολη η εγκατάσταση του και για αυτό χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα. Το μειονέκτημα του είναι ότι έχει υψηλότερες απώλειες από τα άλλα δύο παράθυρα με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται για μεταδόσεις δεδομένων μικρότερης εμβέλειας και τοπικά δίκτυα. Στα παράθυρα 1300nm και 1550nm είναι όμως που οι απώλειες ελαχιστοποιούνται σημαντικά και για αυτό εκείνα τα παράθυρα χρησιμοποιούνται πιο πολύ για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Μεταξύ αυτών των δύο, οι χαμηλότερες απώλειες είναι στο τρίτο παράθυρο 1550nm (0,2dB/km). Επομένως για την ελαχιστοποίηση της εξασθένησης προτιμάται αυτό. ^[4]



Εικόνα 12: Τα τρία παράθυρα λειτουργίας ^[4]

1.1.6 – Διασπορά

Γενικά, με την διασπορά αναφερόμαστε στην παραμόρφωση του σήματος μόνο που αντί να έχουμε μείωση ισχύος όπως στην εξασθένιση, έχουμε διεύρυνση του σήματος καθώς αυτό ταξιδεύει κατά μήκος της ίνας. Δεδομένου ότι υπάρχουν γειτονικοί παλμοί, είναι επόμενο να υπάρξει επικάλυψη. Αν το ποσοστό επικάλυψης είναι υψηλό, ο δέκτης δεν θα μπορεί πλέον να διακρίνει τους γειτονικούς παλμούς ως μεμονωμένους και θα προκύψουν σφάλματα κατά την ερμηνεία του λαμβανόμενου σήματος. ^{[5],[7]}



Εικόνα 13: Η διασπορά του σήματος καθώς ταξιδεύει στην ίνα ^[5]

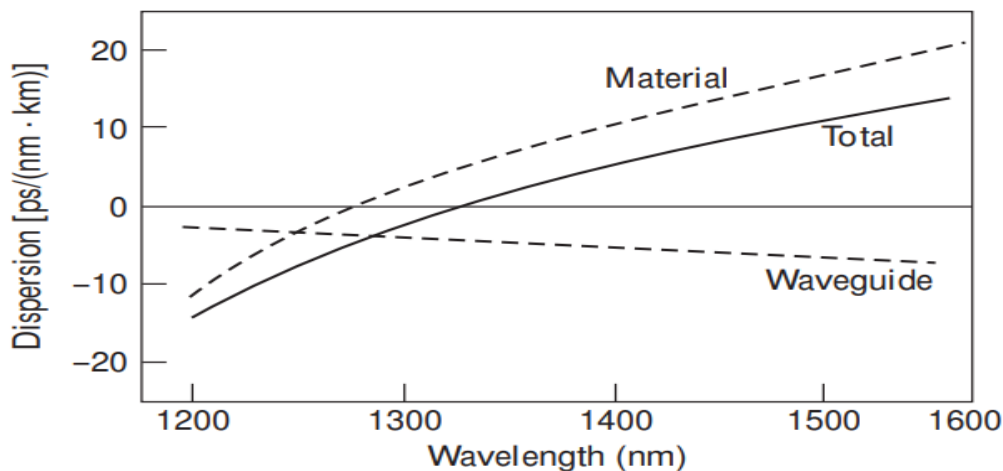
Υπάρχουν διαφορετικά είδη διασποράς:

- **Διασπορά τρόπων (Intermodal dispersion):** Είναι ένα είδος διασποράς που παρατηρείται στις πολύτροπες ίνες και είναι η κυρίαρχη αιτία παραμόρφωσης του σήματος σε αυτές. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1.1.4, ενώ οι τρόποι (ακτίνες φωτός) ξεκινάνε μαζί, κατά την διάρκεια της διαδρομής κάποιοι τρόποι θα διανύσουν μεγαλύτερη ή μικρότερη απόσταση με αποτέλεσμα να υπάρχει ένας αποσυγχρονισμός. Λόγω αυτής της διαφοράς κάποιοι τρόποι θα καθυστερήσουν, με αποτέλεσμα να διευρυνθεί το σήμα και να υπάρξει συγχώνευση παλμών. Το πρόβλημα αυτό προφανώς και δεν υπάρχει στις μονότροπες οπτικές ίνες επειδή υπάρχει μόνο ένας τρόπος. ^[5]
- **Χρωματική διασπορά (Chromatic dispersion):** Αποτελείται από την διασπορά υλικού (material dispersion) και την διασπορά κυματοδηγού (waveguide dispersion). Η χρωματική διασπορά υπάρχει και στις μονότροπες και στις πολύτροπες ίνες επειδή επηρεάζει τα σήματα εντός ενός τρόπου. Ενώ στις πολύτροπες ίνες κυριαρχεί η διασπορά τρόπων, στις μονότροπες το κύριο πρόβλημα είναι η χρωματική διασπορά επειδή η διασπορά τρόπων εξαλείφεται λόγω της φύσεως των μονότροπων ινών, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. ^{[5],[7]}
 - **Διασπορά υλικού (material dispersion):** Οι διάφορες συχνότητες παρουσιάζουν ελαφρώς διαφορετικό δείκτη διάθλασης καθώς ταξιδεύουν μέσα στην ίνα, με αποτέλεσμα να διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες επειδή η ταχύτητα διάδοσης είναι συνάρτηση του δείκτη διάθλασης. Έτσι καθώς ο παλμός διαδίδεται, διευρύνεται ο παλμός φωτός. ^[5]
 - **Διασπορά κυματοδηγού (waveguide dispersion):** Είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι σε μία μονότροπη ίνα ένα μέρος της φωτεινής ενέργειας διαδίδεται στον μανδύα. Στον μανδύα ο δείκτης διάθλασης είναι ελαφρώς μικρότερος από αυτόν στον πυρήνα άρα το τμήμα του σήματος που βρίσκεται

στον μανδύα διαδίδεται ταχύτερα, προκαλώντας έτσι την διασπορά ενέργειας σε έναν παλμό. Συνήθως οι επιπτώσεις της διασποράς κυματοδηγού δεν είναι σοβαρές.^[5]

- **Διασπορά τρόπων πόλωσης (Polarization-mode dispersion):** Στην αρχή της ίνας, οι δύο καταστάσεις πόλωσης είναι ευθυγραμμισμένες. Το υλικό της ίνας όμως δεν είναι εντελώς ομοιόμορφο σε όλο το μήκος της, με αποτέλεσμα κάθε τρόπος πόλωσης να συναντήσει ελαφρώς διαφορετικό δείκτη διάθλασης και στην συνέχεια να ταξιδέψει με ελαφρώς διαφορετική ταχύτητα. Στο τέλος η διαφορά στους χρόνους διάδοσης μεταξύ των δύο ορθογώνιων τρόπων πόλωσης θα προκαλέσει την διεύρυνση του παλμού. Οι επιπτώσεις, όπως και στην διασπορά κυματοδηγού, δεν είναι συνήθως σημαντικές. Προβληματίζουν μόνο σε πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων (περίπου 10Gbps και πάνω).^{[5],[7]}

Στα 1320nm η διασπορά κυματοδηγού και η διασπορά υλικού ακυρώνουν η μία την άλλη με αποτέλεσμα να υπάρχει τελικά μηδενική συνολική διασπορά. Η διασπορά υλικού είναι πιο σημαντική στα 900nm και 1550nm σε σχέση με την διασπορά κυματοδηγού. Η λειτουργία στα 1320nm είναι μία λύση για την αντιμετώπιση της διασποράς αλλά υπάρχει και το πρόβλημα της εξασθένησης το οποίο ελαχιστοποιείται στα 1550nm. Επομένως γίνονται συνεχώς προσπάθειες για την βελτιστοποίηση ινών ώστε να αντιμετωπιστεί η διασπορά πιο αποτελεσματικά. Μία τέτοια προσπάθεια είναι οι πολύτροπες ίνες με βαθμιαίο δείκτη διάθλασης που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1.1.4 με τις οποίες μπορούμε να αντιμετωπίσουμε την διασπορά τρόπων.^{[4],[5],[7]}



Εικόνα 14: Η χρωματική διασπορά (διασπορά υλικού και κυματοδηγού) σε διαφορετικά μήκη κύματος (παρατηρείται ελαχιστοποίηση στα 1320nm)^[7]

1.1.7 – Πλεονεκτήματα Οπτικών Ινών

Σε σχέση με τα χάλκινα και ομοαξονικά καλώδια, οι οπτικές ίνες έχουν πολλά πλεονεκτήματα και για αυτό προτιμώνται περισσότερο.

Η ασφάλεια του σήματος είναι ένα από αυτά τα πλεονεκτήματα. Τα ηλεκτρικά σήματα μπορούν να παραβιαστούν εύκολα. Τα οπτικά σήματα όμως είναι καλά περιορισμένα μέσα στην οπτική ίνα και το κάλυμμα γύρω από την οπτική ίνα απορροφά εκπομπές σήματος. Είναι πολύ δύσκολο επομένως να γίνει κάποια υποκλοπή σήματος. Αυτό ενδιαφέρει και σε προσωπικό επίπεδο αλλά είναι ιδιαίτερα ελκυστικό για περιπτώσεις όπου η ασφάλεια και η

προστασία των δεδομένων είναι εξαιρετικά σημαντική, όπως για παράδειγμα στα συστήματα που χρησιμοποιούνται από το κράτος, τις τράπεζες και τον στρατό. ^{[4],[5]}

Εκτός από την ασφάλεια του σήματος υπάρχει και μία ασφάλεια γενικότερα στην χρήση των οπτικών ινών. Τα χάλκινα και ομοαξονικά καλώδια παράγουν σπινθήρες και ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται, για παράδειγμα σε κάποιο χημικό εργοστάσιο, μπορεί ένας απλός μικροσκοπικός σπινθήρας να προκαλέσει μεγάλη έκρηξη. Ευτυχώς, οι οπτικές ίνες δεν έχουν αυτό το πρόβλημα διότι το σήμα είναι οπτικό και όχι ηλεκτρικό. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι υπάρχουν ανησυχίες για πιθανές οφθαλμικές βλάβες λόγω εκπομπών φωτός λείζερ. ^{[4],[5]}

Όπως αναφέρθηκε, οι οπτικές ίνες μεταφέρουν οπτικά σήματα αντί για ηλεκτρικά. Αυτό σημαίνει ότι οι οπτικές ίνες είναι ουσιαστικά απρόσβλητες από εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Στην περίπτωση μεταφοράς ηλεκτρικού σήματος, τα καλώδια μπορεί να λάβουν ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες από πηγές όπως ραδιοφωνικούς ή τηλεοπτικούς σταθμούς ή από φυσικές πηγές όπως κεραυνούς. Τα οπτικά σήματα δεν επηρεάζονται από αυτές τις πηγές και το πρόβλημα της παρεμβολής αποφεύγεται. ^{[4],[5]}

Το μέγεθος και βάρος των οπτικών ινών είναι επίσης ένα πλεονέκτημα που έχουν. Σε σχέση με τα χάλκινα καλώδια είναι πολύ πιο ελαφριά και με μικρότερες διαστάσεις. Η μεταφορά είναι πιο εύκολη και με χαμηλότερο κόστος. Η εγκατάσταση είναι επίσης πιο εύκολη λόγω του βάρους και του μεγέθους. Προτιμώνται ιδιαίτερα για αυτούς τους λόγους σε αεροσκάφη, πλοία και δορυφόρους. ^{[4],[5]}

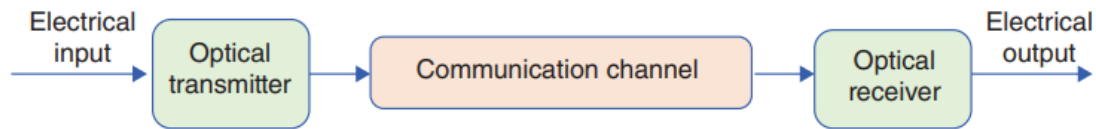
Σημαντικό πλεονέκτημα είναι επίσης τα μεγαλύτερα εύρη ζώνης και οι υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης. Τα εύρη ζώνης είναι πολύ μεγαλύτερα στις οπτικές ίνες από ότι στα χάλκινα και στα ομοαξονικά καλώδια. Για παράδειγμα το εύρος ζώνης στα ομοαξονικά καλώδια είναι περίπου λίγα MHz. Συγκριτικά όταν γίνεται συζήτηση για το εύρος ζώνης στις οπτικές ίνες μιλάμε για αρκετά GHz. Οι ρυθμοί μετάδοσης είναι στην τάξη των Gigabit αλλά υπάρχει συνεχής εξέλιξη. ^{[4],[5]} Για παράδειγμα, τον Οκτώβριο του 2022 σε πείραμα του Εθνικού Ινστιτούτου Τεχνολογίας Πληροφοριών και Επικοινωνιών (NICT, Ιαπωνία) το οποίο συνεργάστηκε με τους Nokia Bell Labs (ΗΠΑ), Prysmian Group (Γαλλία, Ολλανδία) και το Πανεπιστήμιο του Queensland (Αυστραλία) επιδείχθηκε η πρώτη στον κόσμο μετάδοση 55 τρόπων με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 1.53 Petabits ανά δευτερόλεπτο, ρυθμός που αποτέλεσε ρεκόρ. ^[6]

Πρέπει να γίνει σημειωθεί επίσης ότι οι οπτικές ίνες έχουν χαμηλότερες απώλειες από ότι τα χάλκινα καλώδια. Η εξασθένιση ελαχιστοποιείται (0.2dB/km) στο φασματικό παράθυρο των 1.55μm και πολλά σημερινά συστήματα λειτουργούν σε αυτό. Μπορούμε επομένως να μεταδώσουμε δεδομένα σε μεγαλύτερες αποστάσεις με μικρότερο αριθμό επαναληπτών και μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους. Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση κόστους συστημάτων και είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις υποθαλάσσιες συνδέσεις. ^{[4],[5]}

1.2 – Στοιχεία Οπτικού Τηλεπικοινωνιακού Συστήματος

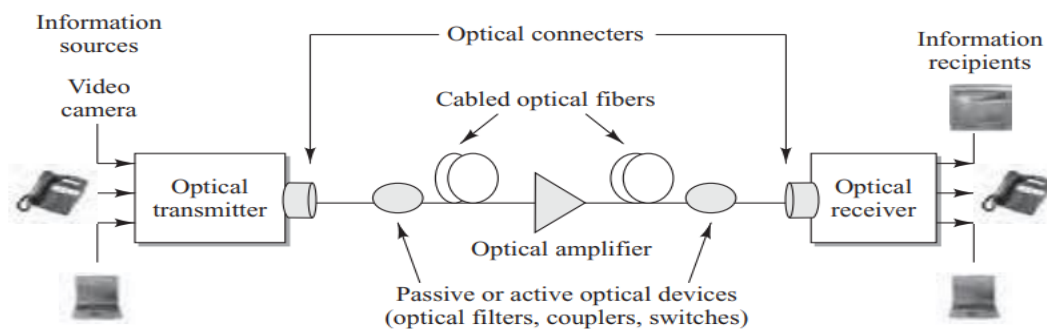
1.2.1 – Δομή Οπτικού Τηλεπικοινωνιακού Συστήματος

Τα βασικά στοιχεία ενός οπτικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι ένας οπτικός πομπός, οπτικός δέκτης, και ένα κανάλι επικοινωνίας. Το κανάλι επικοινωνίας στα οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι το καλώδιο οπτικής ίνας. ^[2]



Εικόνα 15: Ένα τυπικό οπτικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα ^[2]

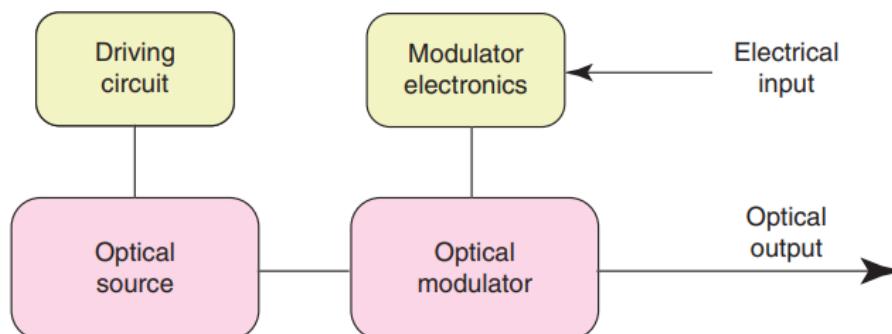
Όπως και τα ηλεκτρικά συστήματα τηλεπικοινωνίας, ο σκοπός τους είναι η επιτυχής μεταφορά ενός σήματος από κάποιο μέσο επικοινωνίας όπως τηλέφωνο, υπολογιστής κλπ. που βρίσκεται σε μία τοποθεσία σε κάποιο άλλο επικοινωνιακό μέσο που βρίσκεται σε διαφορετική τοποθεσία με όσο πιο μεγαλύτερο βαθμό ακρίβειας και αξιοπιστίας γίνεται. Εκτός από τα τρία βασικά στοιχεία ενός οπτικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος, υπάρχουν και πρόσθετα εξαρτήματα όπως οπτικοί ενισχυτές, αναγεννητές, συζεύκτες, συγκολλητές και συνδετήρες. ^{[2],[7]}



Εικόνα 16: Οπτικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα με πρόσθετα εξαρτήματα ^[7]

1.2.2 – Οπτικός Πομπός και Πηγές Φωτός

Οπτικός πομπός (Optical transmitter): Ο κύριος ρόλος του οπτικού πομπού είναι η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος σε οπτικό και στην συνέχεια η εκπομπή του σήματος αυτού στην οπτική ίνα. Ο οπτικός πομπός αποτελείται από μία οπτική πηγή, έναν συζεύκτη καναλιού και έναν διαμορφωτή. Ως συζεύκτες χρησιμοποιούνται μικροφακοί οι οποίοι έχουν κύριο σκοπό να εστιάζουν το οπτικό σήμα στο επίπεδο εισόδου μιας οπτικής ίνας. Οι μικροφακοί έχουν προταθεί συγκεκριμένα λόγω της αποδοτικότητας τους. Το οπτικό σήμα παράγεται με διαμόρφωση του οπτικού φέροντος σήματος αλλά μερικές φορές χρησιμοποιείται και εξωτερικός διαμορφωτής. Ο εξωτερικός διαμορφωτής μπορεί όμως να παραληφθεί σε ορισμένες περιπτώσεις για να μειωθεί το κόστος και να απλοποιηθεί η σχεδίαση του πομπού. ^[2]

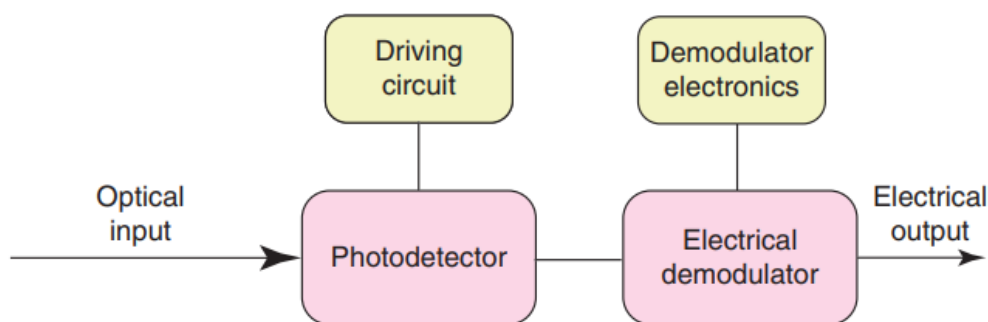


Εικόνα 17: Δομή οπτικού πομπού ^[2]

Χρησιμοποιούνται κυρίως δύο διαφορετικές πηγές φωτός, LED (Light Emitting Diode) ή Ημιαγωγίμο Laser (ILD – Injection Laser Diode) λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που έχουν. Πρόκειται για πλεονεκτήματα όπως υψηλή απόδοση, αξιοπιστία, κατάλληλο εύρος μηκών κύματος, δυνατότητα άμεσης διαμόρφωσης σε υψηλές συχνότητες και συμπαγές μέγεθος. Τα LED είναι αρκετά φθηνά και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής εμβέλειας και σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Ο λόγος που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις ή ρυθμούς είναι επειδή η έξοδος φωτός τους έχει μεγάλο εύρος φάσματος με αποτέλεσμα να υπάρχει υψηλή διασπορά καθώς το φως διαδίδεται στην ίνα. Αυτό το πρόβλημα δεν υπάρχει στα ημιαγωγίμο laser διότι έχουν στενότερο φασματικό εύρος και επομένως λιγότερη διασπορά από ότι τα LED και για αυτό χρησιμοποιούνται σε συνδέσεις μεγάλης εμβέλειας ή υψηλής ταχύτητας. ^{[2],[5]}

1.2.3 – Οπτικός Δέκτης

Οπτικός δέκτης (Optical receiver): Όπως ο οπτικός πομπός μετατρέπει ένα σήμα από ηλεκτρικό σε οπτικό, ο δέκτης κάνει το αντίθετο. Ο ρόλος του δηλαδή είναι να μετατρέπει το λαμβανόμενο οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό. Ένας οπτικός δέκτης αποτελείται από έναν αποδιαμορφωτή, συζεύκτη και φωτοανιχνευτή. Πάλι χρησιμοποιούνται μικροφακοί λόγω της αποδοτικότητάς τους, όπως και στους οπτικούς πομπούς. Και στις δύο περιπτώσεις οι μικροφακοί εστιάζουν το σήμα. Στον οπτικό πομπό ο μικροφακός εστιάζει το σήμα στην είσοδο της οπτικής ίνας ενώ στον οπτικό δέκτη εστιάζει το λαμβανόμενο σήμα στον φωτοανιχνευτή. Ως φωτοανιχνευτές επιλέγονται οι φωτοδίοδοι ημιαγωγών επειδή είναι συμβατοί με ολόκληρο το σύστημα. Όσον αφορά τον αποδιαμορφωτή, εδώ χρησιμοποιούνται μορφές διαμόρφωσης FSK, PSK ή πιο συχνά IM/DD (Intensity modulation with direct detection - διαμόρφωση έντασης με άμεση ανίχνευση). Για την αποδιαμόρφωση μορφής IM/DD χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα απόφασης που ανάλογα με το πλάτος του ηλεκτρικού σήματος αναγνωρίζει bits ως 0 ή 1. ^[2]



Εικόνα 18: Δομή οπτικού δέκτη ^[2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ

2.1 – Δομή Συστήματος Πολυπλεξίας

2.1.1 – Η τεχνική πολυπλεξίας και τα είδη πολυπλεξίας

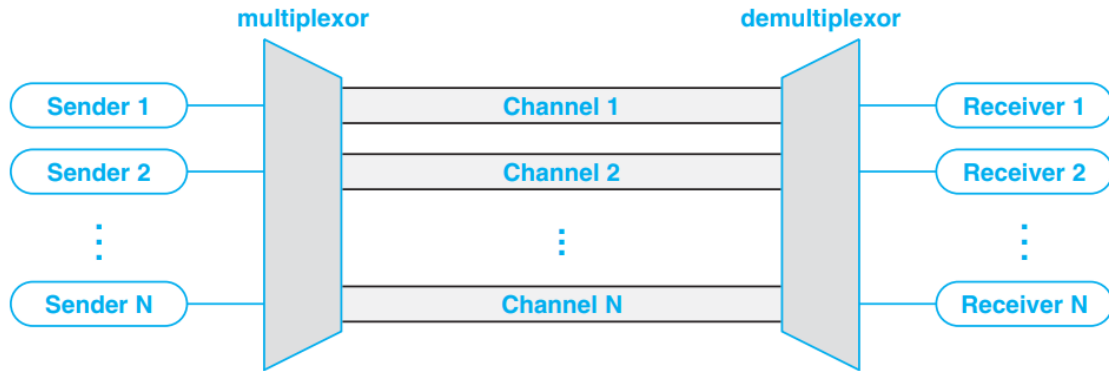
Η πολυπλεξία είναι μία τεχνική με την οποία γίνεται εφικτή η ταυτόχρονη μετάδοση πολλών διαφορετικών ανεξάρτητων σημάτων από διαφορετικές πηγές. Η μετάδοση γίνεται μέσω ενός ενιαίου κοινού καναλιού επικοινωνίας (όπως οι οπτικές ίνες). Τα πολλαπλά σήματα συνδυάζονται (ή αλλιώς πολυπλέκονται) μαζί στον πομπό ενώ στον δέκτη γίνεται το αντίθετο και διαχωρίζονται (αποπολυπλέκονται).^[12] Η τεχνική της πολυπλεξίας αναπτύχθηκε λόγω του ανάγκης εξοικονόμησης. Το κόστος για την κατασκευή ενός συστήματος με υψηλή χωρητικότητα που μπορεί να μεταδώσει με υψηλούς ρυθμούς σε μία οπτική ίνα είναι μικρότερο από το κόστος που απαιτείται για την κατασκευή πολλαπλών συστημάτων που μεταδίδουν με χαμηλότερους ρυθμούς και μικρότερη χωρητικότητα σε πολλαπλές ίνες.^[11]



Εικόνα 19: Η διαδικασία της πολυπλεξίας/αποπολυπλεξίας^[8]

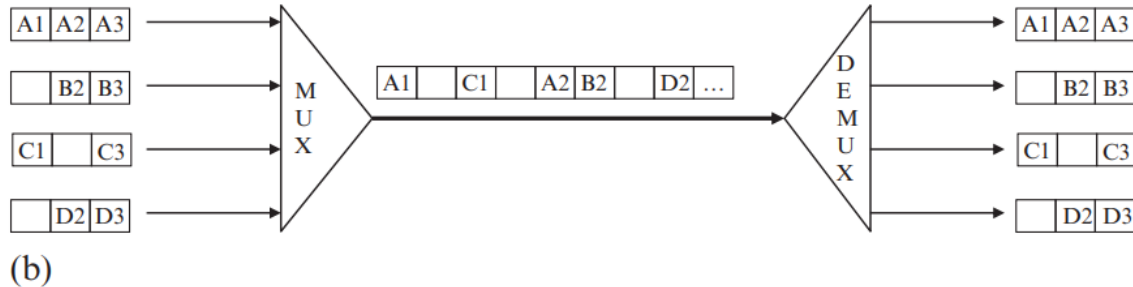
Τα είδη πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται είναι η πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM), πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM), πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (Wave Division Multiplexing – WDM), πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiplexing – CDM)^{[9],[10]} και πολυπλεξία με διαίρεση χώρου (Space Division Multiplexing – SDM).^[2]

Η πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (FDM) χρησιμοποιείται κυρίως σε ραδιοφωνικούς και τηλεοπτικούς σταθμούς^[9]. Στην FDM, το σύνολο των ευρών ζώνης του κάθε σήματος θα είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του κοινού επικοινωνιακού καναλιού (link) που χρησιμοποιείται και έτσι το εύρος του καναλιού αυτού διαιρείται σε έναν αριθμό μη επικαλυπτόμενων ζωνών συχνοτήτων. Το κάθε σήμα μεταδίδεται ταυτόχρονα αλλά έχει την δικιά του ζώνη συχνότητας η οποία είναι διαφορετική από αυτή που έχουν τα υπόλοιπα σήματα.^[12]

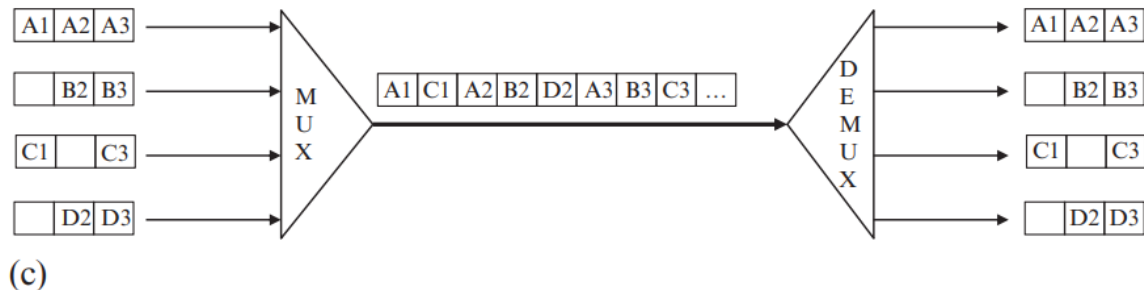


Εικόνα 20: Διαδικασία πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας^[13]

Η πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (TDM), σε αντίθεση με την FDM η οποία είναι κυρίως μία αναλογική τεχνική πολυπλεξίας, είναι μία ψηφιακή τεχνική πολυπλεξίας όπου συνδυάζονται πολλαπλά σήματα χαμηλού ρυθμού δεδομένων σε ένα ενιαίο σήμα με υψηλό ρυθμό δεδομένων. Ενώ στην FDM το κάθε σήμα έχει την δικιά του ζώνη συχνότητας, ο διαμοιρασμός εδώ γίνεται χρονικά (για αυτό και έχει την ανάλογη ονομασία). Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο είδη πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου: συγχρονισμένη (synchronous TDM) και στατιστική TDM (statistical TDM). Στην περίπτωση της στατιστικής TDM, μία πηγή αποκτά πρόσβαση στον πολυπλέκτη μόνο σε περιόδους δραστηριότητας ενώ στην περίπτωση συγχρονισμένης TDM δεν είναι απαραίτητο να έχει διαθέσιμα δεδομένα για μετάδοση η πηγή για να αποκτήσει πρόσβαση. Συγκριτικά, η στατιστική TDM βελτιώνει την αποδοτικότητα του καναλιού (αφού το αξιοποιεί πιο αποτελεσματικά).^[12]



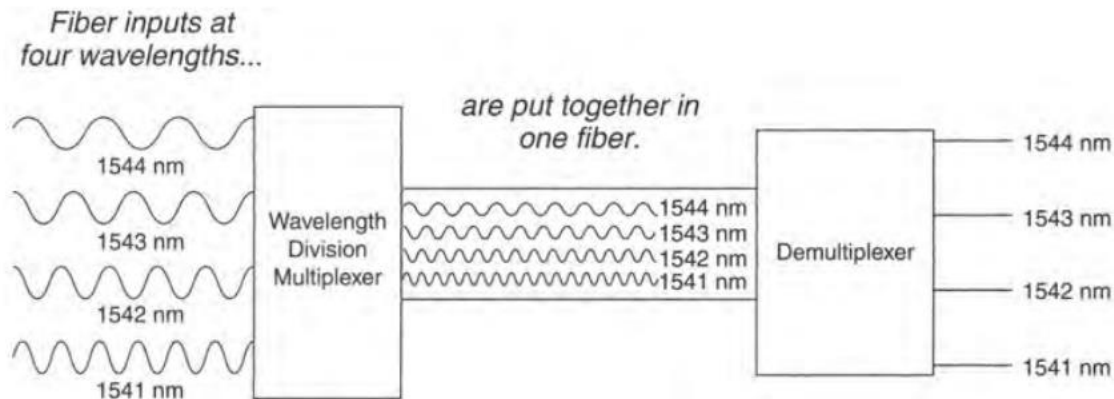
Εικόνα 21: Διαδικασία συγχρονισμένης πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου^[12]



Εικόνα 22: Διαδικασία στατιστικής πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου^[12]

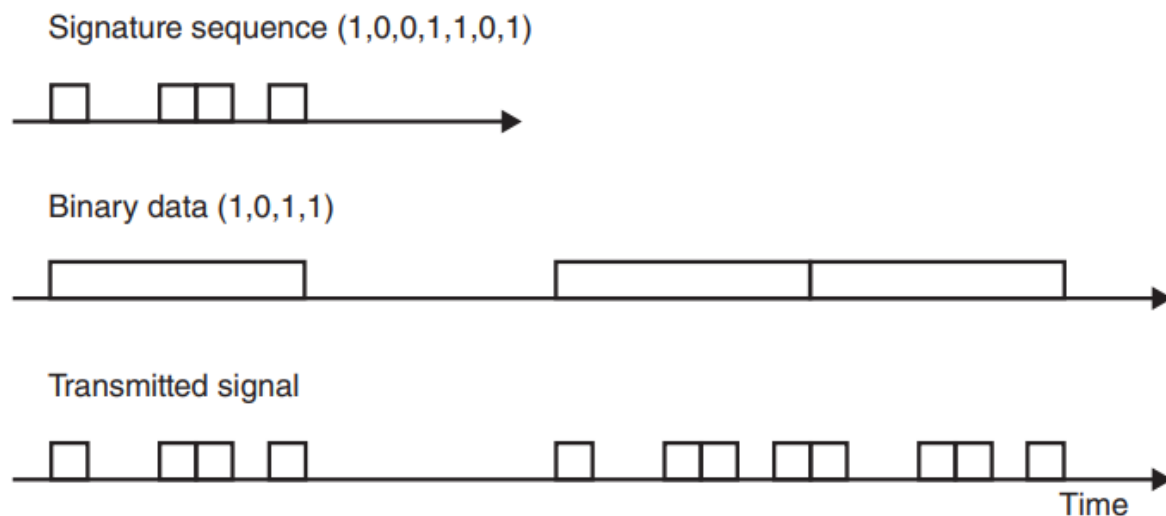
Η πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM) είναι μία τεχνική πολυπλεξίας η οποία είναι παρόμοια σε κάποιον βαθμό με την FDM και χρησιμοποιείται για τον συνδυασμό οπτικών σημάτων.^[12] Το κάθε ξεχωριστό μήκος κύματος αποτελεί ένα οπτικό κανάλι και το

φως από κάθε πηγή συνδυάζεται και μεταδίδεται μέσω της οπτικής ίνας ως ενιαίο και στην συνέχεια θα διαχωριστούν από τον αποπολυπλέκτη στο άλλο άκρο. Απλά αντί για διαφορετικές συχνότητες όπως στην FDM έχουμε διαφορετικά μήκη κύματος.^[9]



Εικόνα 23: Διαδικασία πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος^[9]

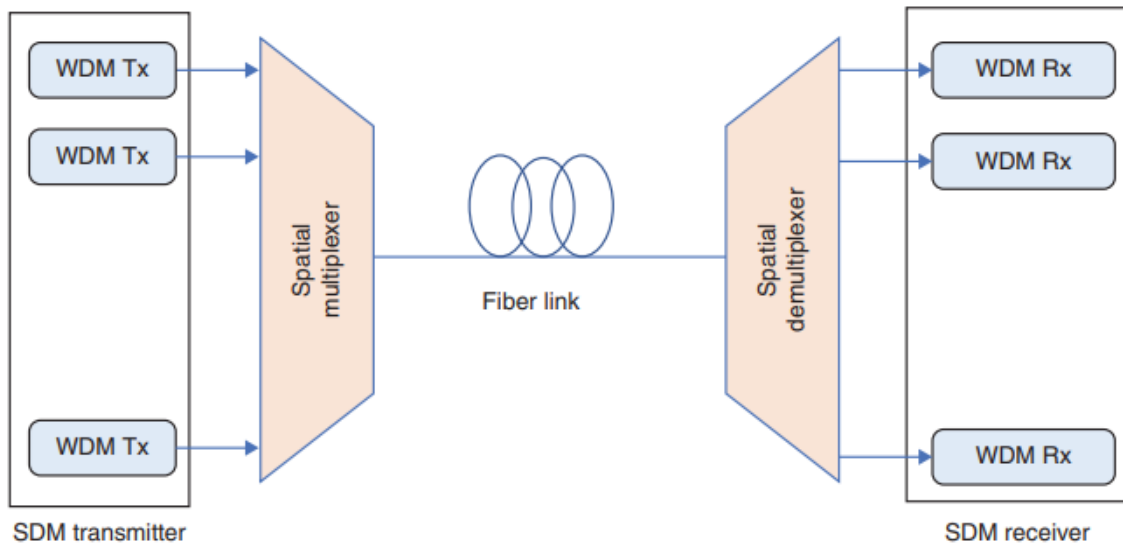
Η πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα (CDM) βασίζεται στην χρήση μαθηματικού συνδυασμού κωδικών ώστε πολλαπλοί αποστολείς να μεταδίδουν ταυτόχρονα χωρίς παρεμβολές.^[13] Ουσιαστικά με την CDM επιτυγχάνεται η φασματική εξάπλωση επειδή το κάθε κανάλι κωδικοποιείται έτσι ώστε το φάσμα του να εξαπλωθεί σε μία ευρύτερη περιοχή από αυτή του αρχικού σήματος. Επειδή όλα τα κανάλια μοιράζονται το ίδιο φάσμα, η φασματική εξάπλωση δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα ούτε σπατάλη. Χρησιμοποιείται συνήθως στα κινητά τηλέφωνα.^[2]



Εικόνα 24: Διαδικασία πολυπλεξίας CDM. Κάθε bit δεδομένων έχει κωδικοποιηθεί με βάση μία χαρακτηριστική ακολουθία η οποία αποτελείται από πολλαπλά chip μικρότερης διάρκειας. (Στο σχήμα $M = 7$ τσιπ)^[2]

Η πολυπλεξία με διαίρεση χώρου (SDM) είναι μία σχετικά καινούργια τεχνική η οποία έχει ως σκοπό την βελτίωση χωρητικότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την διαίρεση του χώρου. Αντί να χρησιμοποιούνται πολλαπλές ίνες παράλληλα, γίνεται προσπάθεια να διαιρέσουμε τον χώρο μέσα στην ίδια οπτική ίνα (να διαχωριστεί ο χώρος σε πολλαπλά 'χωρικά μονοπάτια', ή αλλιώς spatial paths) έτσι ώστε να υπάρχει μείωση κόστους και εξοικονόμηση ενέργειας. Με την βοήθεια της SDM και των πολύτροπων οπτικών ινών μπορούμε να μεταδώσουμε πολλαπλές ροές δεδομένων WDM μέσω της ίδιας ίνας. Σε αυτή την περίπτωση ο οπτικός πομπός και ο

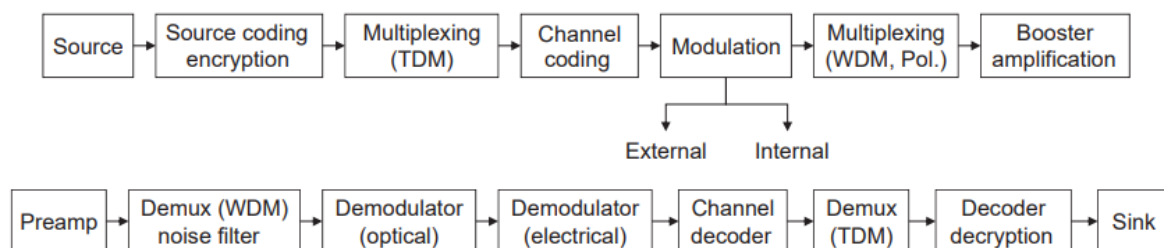
οπτικός δέκτης είναι πιο σύνθετοι επειδή πολυπλέκονται πολλαπλά σήματα WDM τα οποία στην συνέχεια θα πρέπει να διαχωριστούν από τον αποπολυπλέκτη του οπτικού δέκτη. Οι ίνες που χρησιμοποιούνται στην SDM είναι ίνες πολλαπλών πυρήνων ή πολύτροπες ίνες. ^[2]



Εικόνα 25: Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε πώς σε ένα σύστημα SDM μπορούν να συνδυαστούν πολλαπλά σήματα WDM για μετάδοση μέσω του ίδιου μέσου. Η πολυπλεξία και αποπολυπλεξία γίνεται με χωρικούς πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες. ^[2]

2.1.2 – Δομή συστήματος WDM

Στα συστήματα WDM υπάρχει πάντα ένα επικοινωνιακό κανάλι για μετάδοση, ένας πομπός και ένας δέκτης. Συνήθως ως επικοινωνιακό κανάλι χρησιμοποιείται μονότροπη οπτική ίνα κατασκευασμένη από διοξείδιο του πυριτίου. Είναι δεδομένη η χρήση πολυπλεκτών και αποπολυπλεκτών WDM λόγω της πολυπλεξίας. Χρησιμοποιούνται επίσης διαμορφωτές και αποδιαμορφωτές. Γίνεται επίσης κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση καναλιού. Προαιρετικά μπορεί να υπάρχει και κρυπτογράφηση/αποκρυπτογράφηση, οπτικοί ενισχυτές ή προενισχυτές καθώς και πολυπλεξία/αποπολυπλεξία WDM. ^[14]

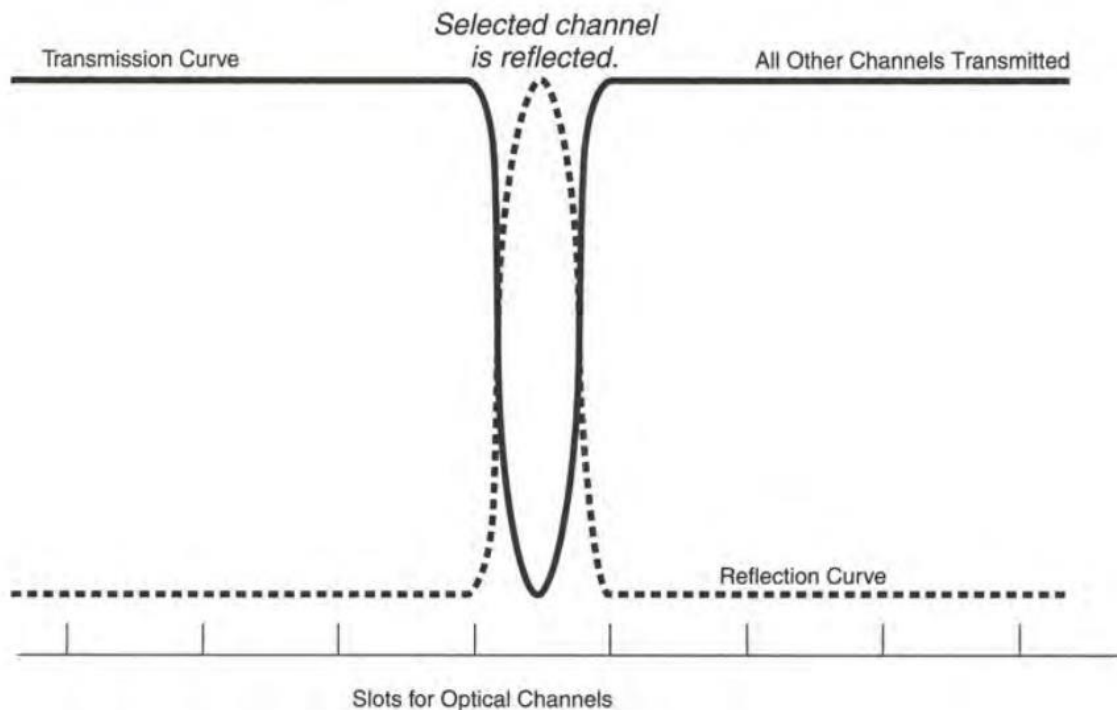


Εικόνα 26: Το άκρο μετάδοσης (transmit end) και από κάτω το άκρο λήψης (receive end) σε ένα σύνθετο σύστημα WDM με επιπρόσθετες προαιρετικές λειτουργίες ^[14]

Υπάρχουν διαθέσιμες σχισμές για τα οπτικά κανάλια οι οποίες είναι ομοιόμορφα διατεταγμένες και η απόσταση μεταξύ των σχισμών καθορίζει την πιθανή πυκνότητα οπτικών καναλιών. Ανάλογα με την απόσταση των καναλιών τα πιο πολλά συστήματα WDM ανήκουν σε δύο κατηγορίες: Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) ή Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM). ^[9]

Ο ρόλος του πολυπλέκτη WDM είναι ο συνδυασμός (πολυπλεξία) πολλαπλών οπτικών σημάτων διαφορετικών οπτικών μηκών κύματος έτσι ώστε να σχηματίζουν ένα ενιαίο φως το οποίο στην συνέχεια μεταδίδεται μέσω της οπτικής ίνας μέχρι να φτάσει στον δέκτη όπου θα διαχωριστεί ξανά από τον αποπολυπλέκτη.^[12] Η αποπολυπλεξία είναι πιο δύσκολη διαδικασία από ότι η πολυπλεξία. Η πολυπλεξία και αποπολυπλεξία μηκών κύματος είναι δύο από τις πιο βασικές απαιτήσεις ενός συστήματος WDM. Οι αποπολυπλέκτες θα πρέπει να έχουν την ικανότητα να διαχωρίζουν κατάλληλα τα οπτικά κανάλια έτσι ώστε να υπάρχει χαμηλή διαρροή φωτός από το ένα κανάλι στο άλλο ενώ από την άλλη μεριά οι πολυπλέκτες θα πρέπει να αποφεύγουν την σκέδαση φωτός πίσω σε οποιονδήποτε από τους πομπούς και να έχουν χαμηλή απώλεια εισαγωγής.^[9]

Υπάρχει και ένα άλλο είδος οπτικού πολυπλέκτη για περιπτώσεις διαχωρισμού ενός ή περισσότερων καναλιών από ένα σύνολο καναλιών, κάτι που δεν μπορεί να κάνει ο αποπολυπλέκτης επειδή αυτός διαχωρίζει όλο το σύνολο των οπτικών καναλιών σε μία ίνα. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο οπτικός πολυπλέκτης προσθήκης-απομάστευσης (optical add-drop multiplexer – OADM). Ο διαχωρισμός συγκεκριμένων καναλιών γίνεται με την βοήθεια της αντανάκλασης. Αρχικά το φως του επιλεγμένου καναλιού πρέπει να περάσει μέσα από μία οπτική συσκευή η οποία αντιμετωπίζει το επιλεγμένο κανάλι διαφορετικά από τα άλλα. Μία τέτοια συσκευή είναι το φίλτρο επιλεκτικού μήκους κύματος. Όταν γίνεται αντανάκλαση του επιλεγμένου καναλιού θα εκπέμπονται τα υπόλοιπα μήκη κύματος που δεν έχουν επιλεχθεί. Επομένως κάθε φορά θα εκπέμπονται τα κανάλια που δεν έχουν επιλεχθεί. Αν θέλαμε να εκπέμψουμε το επιλεγμένο κανάλι τότε θα έπρεπε να γίνει αντανάκλαση των υπόλοιπων καναλιών.^[9]



Εικόνα 27: Η αντανάκλαση ενός καναλιού και η εκπομπή των υπολοίπων καναλιών από τον πολυπλέκτη προσθήκης-απομάστευσης.^[9]

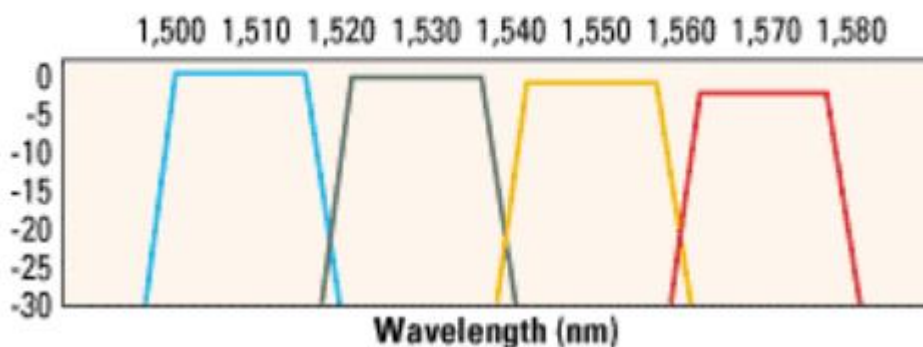
2.1.4 – Coarse Wavelength-Division Multiplexing - CWDM

Τα συστήματα CWDM λειτουργούν στο εύρος 1270-1610nm και έχουν απόσταση καναλιών 20nm (σύμφωνα με το πρότυπο G.694.2 που τέθηκε από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών – International Telecommunication Union). Η χρήση αυτών των συστημάτων είναι συνήθως για μητροπολιτικά δίκτυα όπου οι αποστάσεις μετάδοσης είναι λίγα χιλιόμετρα χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση ενισχυτών. ^[9] Επιπλέον, είναι μία ελκυστική επιλογή για οπτικές διασυνδέσεις σε κέντρα δεδομένων και υπολογιστές υψηλών επιδόσεων επειδή προσφέρει μία χαλαρή σταθερότητα μήκους κύματος. ^[16]

Σύμφωνα με τον Nebeling ^[15], η διαφορά κόστους μεταξύ συστημάτων CWDM και DWDM είναι σημαντική. Οι πομποδέκτες CWDM είναι 4 με 5 φορές φθηνότεροι από ότι οι αντίστοιχοι πομποδέκτες DWDM. Οι πολυπλέκτες, αποπολυπλέκτες και τα φίλτρα CWDM είναι επίσης πολύ φθηνότερα. Συγκεκριμένα για τα φίλτρα CWDM το κατασκευαστικό κόστος τους είναι πολύ χαμηλότερο σε σύγκριση με τα φίλτρα DWDM επειδή έχουν 50 στρώσεις αντί για τις 150 στρώσεις που έχουν τα φίλτρα DWDM. Τα φίλτρα CWDM ήδη είναι 50% φθηνότερα από ότι τα φίλτρα DWDM και με την εξέλιξη των τεχνολογιών πολυπλεξίας/αποπολυπλεξίας το κόστος αυτό μειώνεται συνεχώς.

Ο Nebeling ^[15] επίσης τονίζει ότι οι απαιτήσεις ισχύος στα συστήματα CWDM είναι πολύ χαμηλότερες από ότι στα συστήματα DWDM. Αυτό οφείλεται στα μη ψυχόμενα laser (uncooled lasers) που χρησιμοποιούνται στα συστήματα CWDM. Επίσης τα laser αυτά έχουν μήκος 2cm και διάμετρο 0.5cm, πολύ μικρότερο μέγεθος από ότι τα ψυχόμενα laser (cooled lasers) συστημάτων DWDM. Το 2002 όταν δημοσιεύτηκε το paper ο Nebeling εξηγούσε ότι τα συστήματα CWDM που υπάρχουν στην αγορά υποστηρίζαν 2 με 8 μήκη κύματος αλλά στο μέλλον αναμένεται η αύξηση τους σε 16 μήκη κύματος στο εύρος 1290nm-1610nm. Συγκριτικά, τα ήδη υπάρχοντα εκείνη την εποχή είχαν απόσταση καναλιών 20nm στο εύρος 1470nm-1610nm. Και όντως το 2015, σύμφωνα με τον Hecht ^[9], τα κανάλια συστημάτων CWDM αυξήθηκαν σε 18.

Typical transmittance for a four-channel coarse wavelength demultiplexer

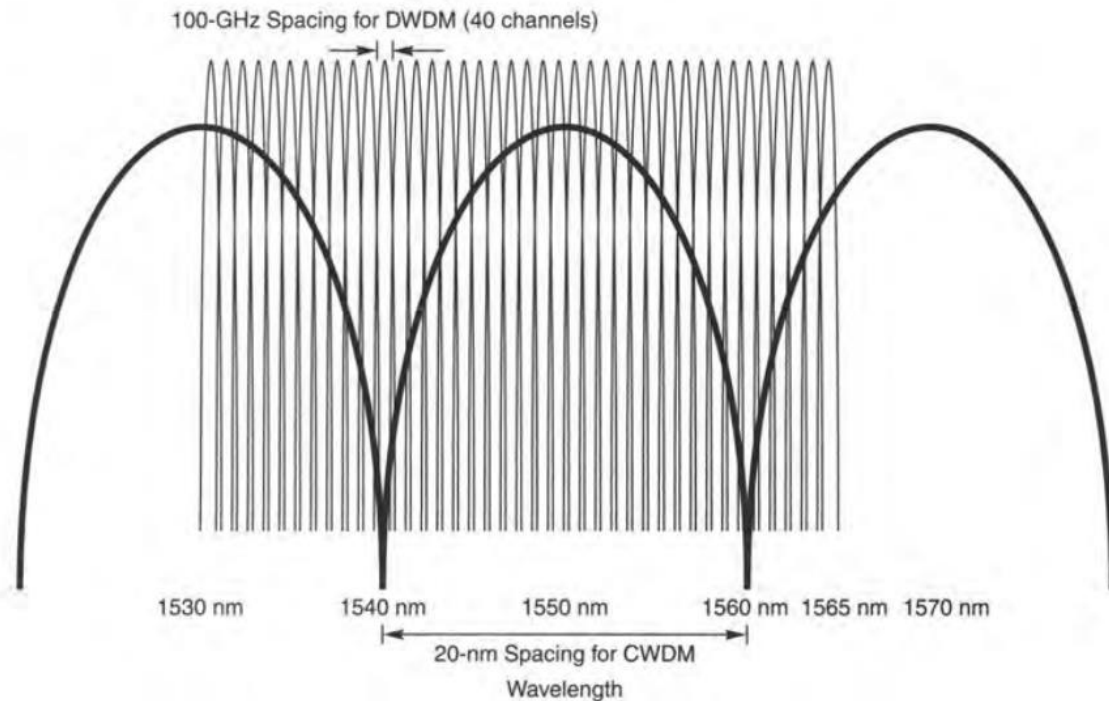


Εικόνα 28: Στο σχήμα φαίνεται η απόσταση καναλιών 20nm όπως είναι στα συστήματα CWDM. ^[15]

2.1.5 – Dense Wavelength-Division Multiplexing - DWDM

Στα συστήματα DWDM η απόσταση καναλιών είναι 200, 100 ή 50GHz με βάση το πρότυπο της Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών. Η διαφορά απόστασης καναλιών μεταξύ DWDM και CWDM είναι τεράστια. Για παράδειγμα, στην ζώνη C 1530-1565nm μπορούν να χωρέσουν 40 κανάλια DWDM με απόσταση μεταξύ τους 100GHz (ή αλλιώς 0.8nm). Όσο πιο στενή είναι

η απόσταση μεταξύ των καναλιών, τόσο πιο πολύ αυξάνεται το κόστος.^[9] Παρ' όλα αυτά η στενή απόσταση καναλιών επιτρέπει πολλά μήκη κύματος σε μικρό παράθυρο οπτικού φάσματος, σημαντικό για μεγάλες αποστάσεις αφού μπορούμε να εκμεταλλευτούμε καλύτερα το γεγονός ότι η εξασθένιση στις οπτικές ίνες ελαχιστοποιείται στην περιοχή 1530-1565nm.^[17]

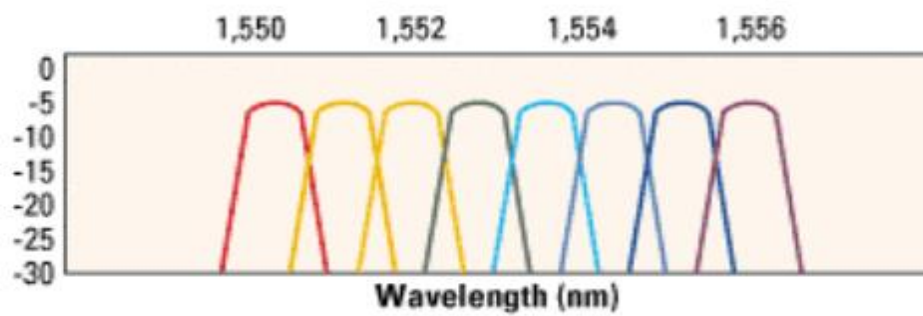


Εικόνα 29: Οι αποστάσεις καναλιών σε συστήματα CWDM και DWDM.^[9]

Στα συστήματα DWDM παρατηρείται πολλές φορές ότι έχουν κενά κανάλια. Αυτό συμβαίνει για διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, στα συστήματα DWDM τα κανάλια δεν απομονώνονται πλήρως με αποτέλεσμα να υπάρχουν παρεμβολές. Έτσι πολλές φορές μπορεί κάποια κενά να υπάρχουν εσκεμμένα για να αποφευχθεί κάποια πιθανή παρεμβολή όπως το κενό 5nm μεταξύ ενισχυτών ζώνης C (σταματούν στα 1565nm) και ενισχυτών ζώνης L (ξεκινούν στα 1570nm). Κάποιες φορές μπορεί τα κενά να υπάρχουν για λόγους μελλοντικής αναβάθμισης της χωρητικότητας.^[9]

Είναι αλήθεια πως τα συστήματα DWDM είναι πολύ χρήσιμα για μεταδόσεις σε μεγάλες αποστάσεις. Το κόστος ανά κανάλι μπορεί να είναι υψηλό αλλά το συνολικό κόστος αλλά η υψηλή χωρητικότητα που προσφέρουν αυτά τα συστήματα μειώνουν το συνολικό κόστος που θα υπήρχε διαφορετικά στις μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων χωρίς τα συστήματα DWDM. Παρ' όλα αυτά δημιουργούνται προβληματισμοί επειδή λόγω του υψηλού κόστους ανά κανάλι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία DWDM σε άλλες εφαρμογές που θα μπορούσαν να επωφεληθούν από αυτήν. Έτσι θα μπορούσαμε να πούμε ότι αυτά τα συστήματα δεν αξιοποιούνται επαρκώς.^[9]

Typical transmittance for an eight-channel dense wavelength demultiplexer



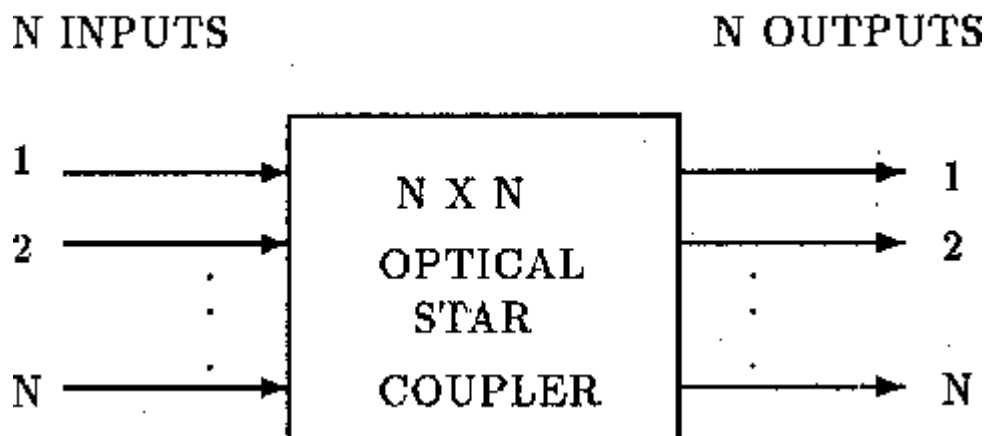
Εικόνα 30: Στο σχήμα φαίνεται η απόσταση καναλιών 0.8nm (αλλιώς 100GHz) σε ένα τυπικό σύστημα DWDM. ^[15]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

3.1 – Στοιχεία Οπτικών Δικτύων

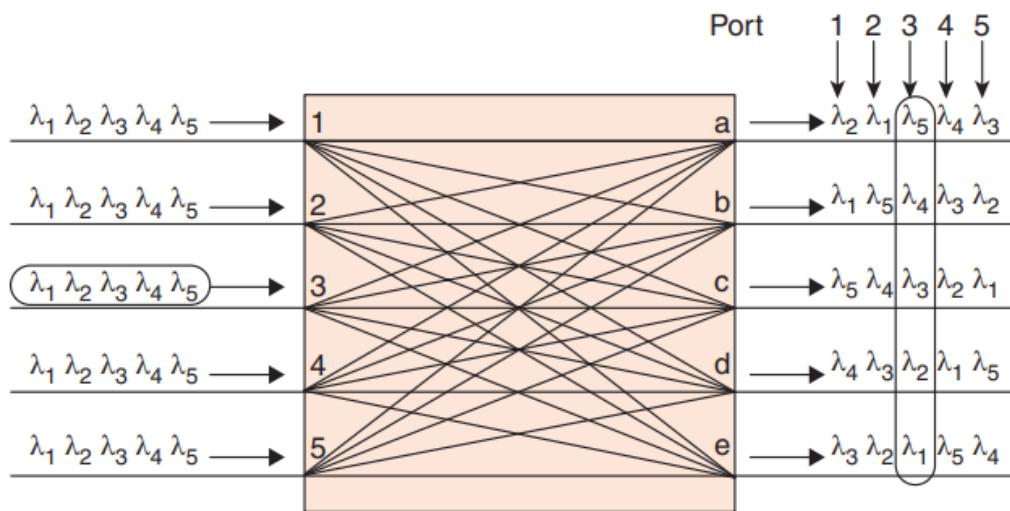
Τα σύγχρονα οπτικά δίκτυα αποτελούνται από στοιχεία όπως οπτικούς συζεύκτες, οπτικούς ενισχυτές, οπτικούς μεταγωγείς και δρομολογητές. ^[11]

Συγκεκριμένα για τους συζεύκτες που βρίσκονται σε ένα οπτικό δίκτυο, αυτοί μπορούν να είναι παθητικοί (passive) ή ενεργητικοί (active) ανάλογα με το πώς λειτουργούν. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι οι παθητικοί συζεύκτες συνδυάζουν ή διαχωρίζουν το σήμα χωρίς να το μετατρέψουν από οπτικό σε ηλεκτρικό. Επειδή αυτή η μετατροπή απαιτεί ισχύ στους ενεργητικούς, προτιμώνται οι παθητικοί. ^[28] Για την συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, μας ενδιαφέρουν πολύ οι οπτικοί συζεύκτες σχήματος αστέρα (optical star couplers) οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές τοπικών δικτύων επειδή το δίκτυο που θα δούμε στο Κεφάλαιο 5 είναι και αυτό τοπικό. Οι οπτικοί star couplers μπορούν να συνδυάσουν οπτικά σήματα που εισέρχονται από πολλαπλές θύρες εισόδου και να τα μοιράσουν εξίσου στις θύρες εξόδου τους. ^[2]



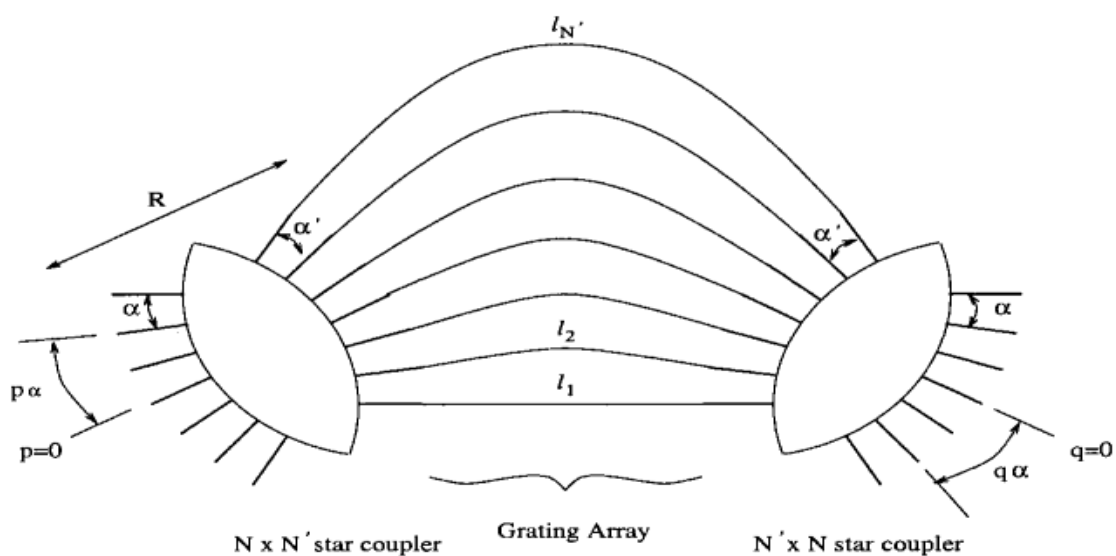
Εικόνα 31: Οπτικός συζεύκτης σχήματος αστέρα NxN ^[29]

Οι οπτικοί συζεύκτες αστέρα χρησιμοποιούνται σε NxN δρομολογητές μήκους κύματος, ένα σημαντικό κομμάτι των δικτύων WDM. Συνδυάζει τις λειτουργίες του συζεύκτη αστέρα με λειτουργίες πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας. Τα σήματα από τις N θύρες εισόδου αποπολυπλέκονται σε ξεχωριστά κανάλια και οδηγούνται προς τις N θύρες εξόδου έτσι ώστε το σήμα σε κάθε θύρα να αποτελείται από κανάλια που εισέρχονται από διαφορετικές θύρες εισόδου. ^[2]



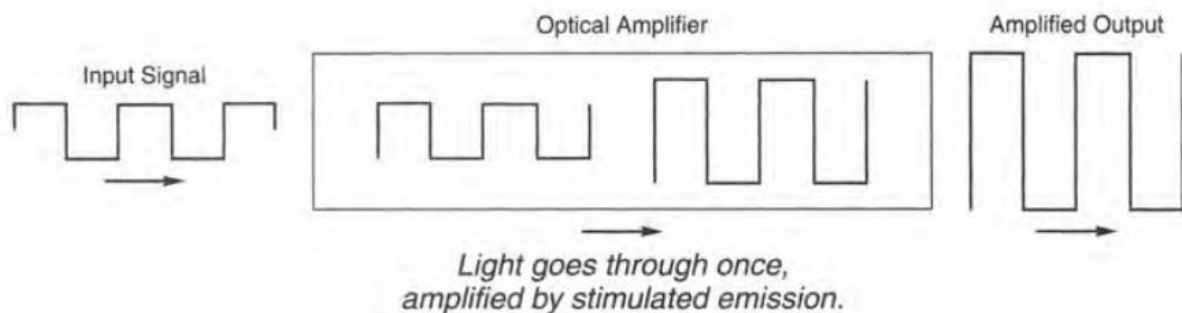
Εικόνα 32: Δρομολογητής μήκους κύματος 5x5. ^[2]

Οι δρομολογητές αυτοί συνήθως χρησιμοποιούν έναν πολυπλέκτη AWG (Arrayed Waveguide Grating – Φράγμα Συστοιχίας Κυματοδηγών) για πολλαπλές θύρες εισόδου και ονομάζονται δρομολογητές AWG (Arrayed Waveguide Grating Routers - AWGRs). Το AWGR αποτελείται από δύο παθητικούς συζεύκτες αστέρα όπου ο ένας είναι $N \times N$ και ο άλλος $N' \times N$ οι οποίοι συνδέονται με μία συστοιχία φράγματος (grating array). Προσφέρει σταθερή δρομολόγηση ενός οπτικού σήματος από δεδομένη θύρα εισόδου σε δεδομένη θύρα εξόδου σύμφωνα με το μήκος κύματος του σήματος. Έτσι πολλαπλά σήματα από μία θύρα εισόδου θα δρομολογηθούν το καθένα ξεχωριστά σε διαφορετική θύρα εξόδου και επιπλέον διαφορετικά σήματα που χρησιμοποιούν το ίδιο μήκος κύματος μπορούν να εισαχθούν ταυτόχρονα σε διαφορετικές θύρες εισόδου χωρίς να υπάρχει παρεμβολή μεταξύ τους στις θύρες εξόδου. Το αρνητικό της συσκευής αυτής είναι ότι έχει πίνακα σταθερής δρομολόγησης ο οποίος δεν μπορεί να επαναρρυθμιστεί. Το AWG μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για την κατασκευή ρυθμιζόμενων οπτικών πομπών και δεκτών. ^[28]



Εικόνα 33: Το φράγμα συστοιχίας κυματοδηγών ^[28]

Οι οπτικοί ενισχυτές είναι από τα πιο σημαντικά στοιχεία ενός οπτικού δικτύου κυρίως λόγω του φαινομένου της εξασθένισης του οπτικού σήματος. Η ισχύς του οπτικού σήματος μειώνεται καθώς αυτό διαδίδεται μέσω της οπτικής ίνας και επομένως πρέπει να αποκατασταθεί. Αυτό επιτυγχάνεται σήμερα με την χρήση οπτικών ενισχυτών. Το πρόβλημα που δημιουργείται με τους οπτικούς ενισχυτές είναι ο συνεχώς συσσωρευόμενος θόρυβος καθώς το σήμα περνάει από πολλούς ενισχυτές, κάτι που οφείλεται στην αναλογική φύση των ενισχυτών. ^[11] Οι πιο αποδοτικοί οπτικοί ενισχυτές είναι αυτοί με πρόσμειξη ερβίου (erbium-doped fiber amplifiers). Επειδή οι οπτικές ίνες από διοξείδιο του πυριτίου έχουν χαμηλότερη απώλεια σε μήκη κύματος από 1530 έως 1605nm, προτιμάται η λειτουργία των συγκεκριμένων ενισχυτών σε εκείνα τα μήκη κύματος. ^[9]



Εικόνα 34: Η λειτουργία ενός οπτικού ενισχυτή. ^[9]

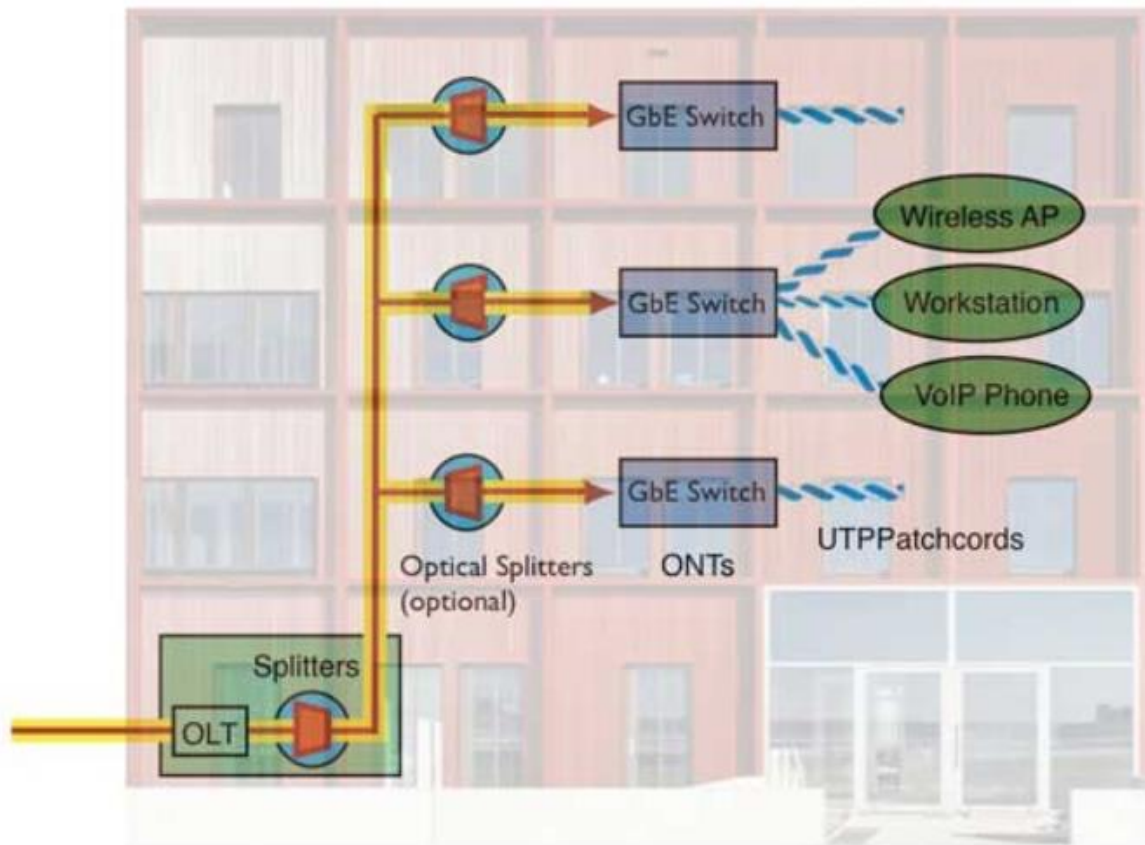
Οι οπτικοί μεταγωγείς μπορούν να επεξεργαστούν και να κατευθύνουν τα οπτικά σήματα σε ένα οπτικό δίκτυο. Δύο σημαντικές λειτουργίες τους είναι η μεταγωγή προστασίας (protection switching) και η παροχή (provisioning). ^[9] Με την μεταγωγή προστασίας αντιμετωπίζονται πιθανές βλάβες οπτικών ινών που μπορεί να προκύψουν. Για παράδειγμα αν μία ίνα σπάσει τότε ο οπτικός μεταγωγέας θα κατευθύνει τα σήματα σε διαφορετικό μονοπάτι (εναλλακτική οπτική ίνα) έτσι ώστε να συνεχιστεί η μετάδοση. Αυτή η διαδικασία γίνεται σε κλάσματα δευτερολέπτου. Με την παροχή μπορεί να αλλάξει η διαμόρφωση δικτύου έτσι ώστε να υποστηρίζονται νέες υπηρεσίες. Εκτός από αυτά, σημαντική λειτουργία των οπτικών μεταγωγών είναι ότι έχουν την δυνατότητα οπτικής μεταγωγής πακέτων (optical packet switching) σε ρυθμούς πολύ υψηλότερους από ότι θα ήταν εφικτό με την ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων (electronic packet switching). ^[11]

3.2 – Κατηγορίες Οπτικών Δικτύων

Τα οπτικά δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το εύρος τους. Συχνά οι κατηγορίες για τις οποίες γίνεται διάλογος είναι τα τοπικά δίκτυα (Local Area Networks – LAN), τα μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Area Networks – MAN) και τα δίκτυα ευρείας ζώνης (Wide Area Networks – WAN). ^[5]

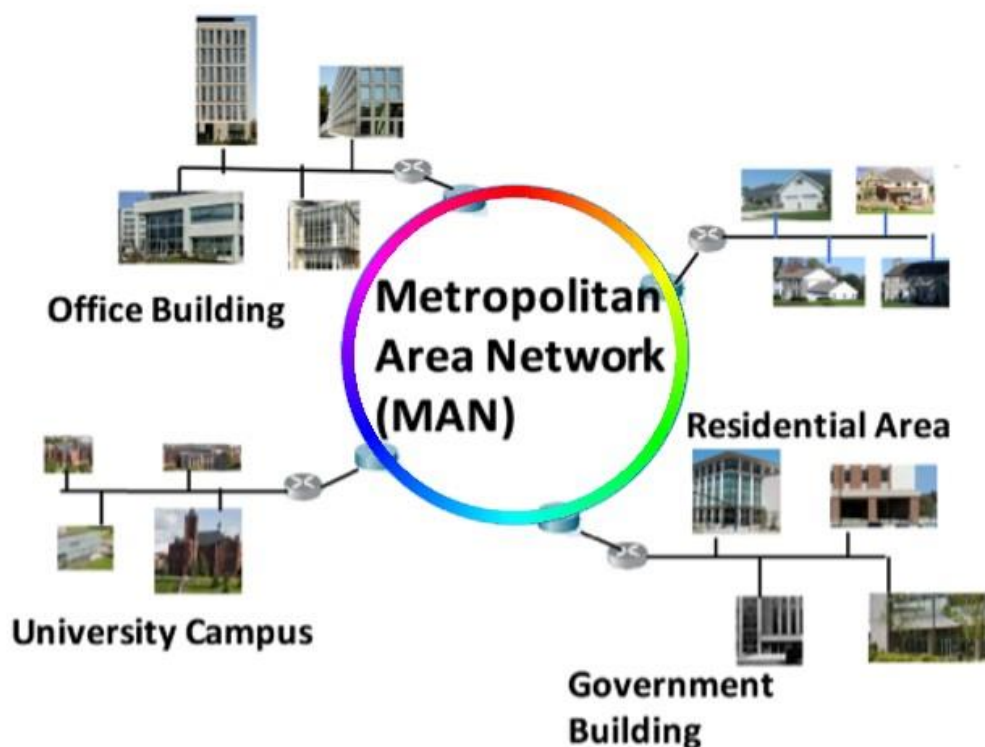
Στα τοπικά δίκτυα τα τερματικά βρίσκονται σχετικά κοντά, όπως για παράδειγμα σε γραφεία, σχολικές αίθουσες, νοσοκομεία, εργοστάσια ή κτίρια επιχειρήσεων ^[18] επομένως τα τοπικά δίκτυα ανήκουν στον ίδιο οργανισμό που χρησιμοποιεί αυτούς τους χώρους (δηλαδή το κάθε σχολείο έχει το δικό του τοπικό δίκτυο). Τα LAN παρ' όλο που έχουν περιορισμένο εύρος είναι συχνά συνδεδεμένα με δίκτυα μεγαλύτερου εύρους. Στα LAN, το κάθε τερματικό έχει ελεύθερη πρόσβαση στο δίκτυο με αποτέλεσμα να διαμοιράζονται πληροφορίες μεταξύ τους. Για αυτό τον λόγο το LAN είναι μία πολύ καλή λύση για οργανισμούς και επιχειρήσεις. Το μειονέκτημα είναι όμως ότι επειδή ακριβώς υπάρχει ελεύθερη πρόσβαση στο δίκτυο από κάθε

συνδεδεμένο τερματικό, υπάρχει περίπτωση να προκύψουν συγκρούσεις κατά την πρόσβαση. Επομένως χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα για να αντιμετωπιστούν πιθανά προβλήματα πρόσβασης.^[5] Σήμερα, τα σύγχρονα παθητικά οπτικά δίκτυα LAN είναι πιο αποδοτικά από τα παραδοσιακά δίκτυα LAN και έχουν χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης. Επίσης απαιτείται λιγότερος χώρος επειδή οι οπτικές ίνες είναι πολύ μικρές. Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι προσφέρουν μεγαλύτερη ασφάλεια σε σχέση με τα μη οπτικά.^[30]



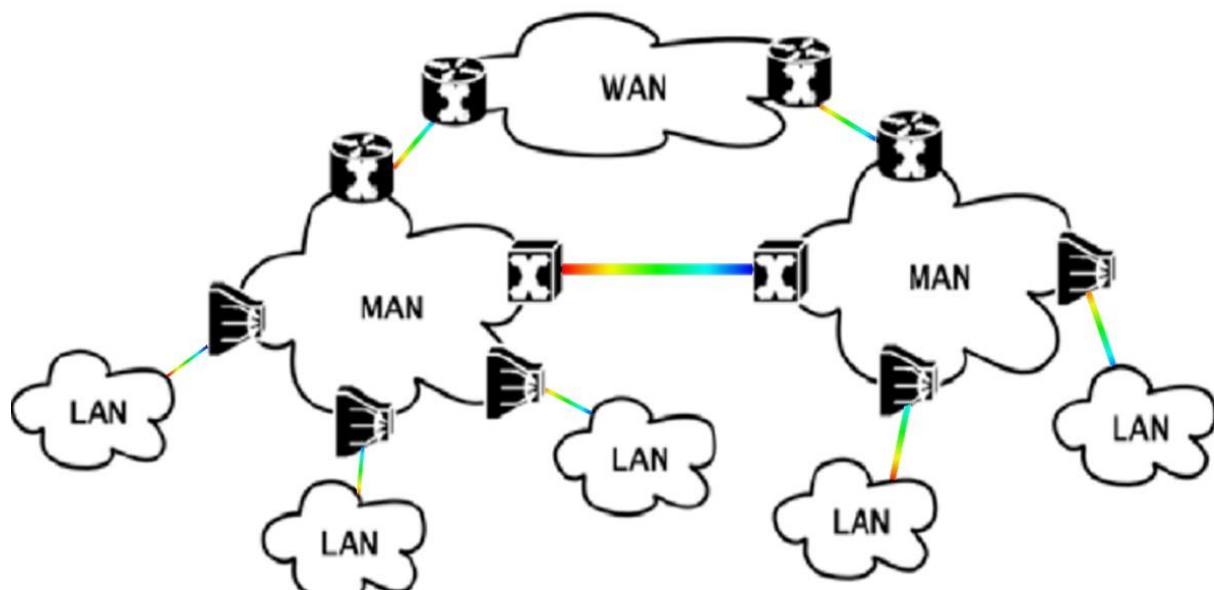
Εικόνα 35: Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο LAN που χρησιμοποιείται από μία επιχείρηση.^[31]

Τα μητροπολιτικά δίκτυα έχουν μεγαλύτερο εύρος από ότι τα τοπικά δίκτυα. Ενώ τα τοπικά δίκτυα είναι περιορισμένα συνήθως σε αίθουσες ή κτίρια, τα μητροπολιτικά μπορούν να καλύψουν περιφέρειες, γειτονιές, μέχρι ακόμα και ολόκληρη πόλη. Τα δίκτυα αυτά, σε αντίθεση για άλλη μία φορά με τα τοπικά, δεν ανήκουν σε κάποιον συγκεκριμένο οργανισμό. Μπορεί όμως μία ομάδα παρόχων υπηρεσιών να μοιράζεται την κυριότητα ενός τέτοιου δικτύου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα LAN πολλές φορές είναι συνδεδεμένα με δίκτυα μεγαλύτερου εύρους. Σε αυτά τα δίκτυα μεγαλύτερου εύρους συμπεριλαμβάνονται και τα MAN. Ο ασύγχρονος τρόπος μεταφοράς (asynchronous transfer mode – ATM) είναι ένα πρωτόκολλο που συνήθως χρησιμοποιείται στα MAN.^[5] Ενώ η τεχνική SONET/SDH έχει χρησιμοποιηθεί για τα οπτικά MANs και έχει αρκετά πλεονεκτήματα, δεν είναι απαραίτητα το ιδανικό. Δεν υπάρχει σε αυτό η παρακολούθηση απόδοσης δικτύου από άκρο-σε-άκρο και εντοπισμός σφαλμάτων σε μεγάλα δίκτυα. Πλέον προτείνεται το Optical Transport Network (OTN) το οποίο είναι ασύγχρονο σε αντίθεση με το SONET/SDH (Synchronous Optical Network - Συγχρονισμένο Οπτικό Δίκτυο, Synchronous Digital Hierarchy – Συγχρονισμένη Ψηφιακή Ιεραρχία) και έχει πλεονεκτήματα όπως λιγότερη πολυπλοκότητα και κόστος σε σχέση με το SONET/SDH και αποτελεσματική χρήση διαθέσιμου εύρους ζώνης DWDM.^[32]



Εικόνα 36: Ένα οπτικό μητροπολιτικό δίκτυο με το οποίο είναι συνδεδεμένα διαφορετικά δίκτυα LAN (πανεπιστημιούπολη, γραφεία, κατοικίες, κλπ.) [Διασκευή από Majumdar, A. K. (2019). Basics of worldwide broadband wireless access independent of terrestrial limitations.^[19]]

Τα δίκτυα ευρείας ζώνης έχουν τόσο μεγάλο εύρος που μπορούν να καλύψουν χώρες, πολλές πόλεις και ολόκληρες ηπείρους. Όπως και στα δίκτυα MAN, δεν υπάρχει ένας συγκεκριμένος ιδιοκτήτης αλλά το δίκτυο ανήκει σε πολλές οντότητες οι οποίες εκμεταλλεύονται κάποια τμήματα του δικτύου WAN. Και πάλι οι χρήστες δεν έχουν άμεση πρόσβαση στο δίκτυο, σε αντίθεση με τα δίκτυα LAN. Όπως πολλά δίκτυα LAN συνδέονται με δίκτυα MAN, έτσι και τα δίκτυα WAN χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν δίκτυα LAN και μικρά δίκτυα MAN. Οι οπτικές ίνες και οι τεχνικές πολυπλεξίας όπως η τεχνική WDM είναι πάρα πολύ σημαντικές για την λειτουργία ενός WAN επειδή αυτό διαχειρίζεται πολλές πληροφορίες με υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Πρωτόκολλα που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι ATM όπως και στα MAN αλλά και το δίκτυο SONET.^[5]

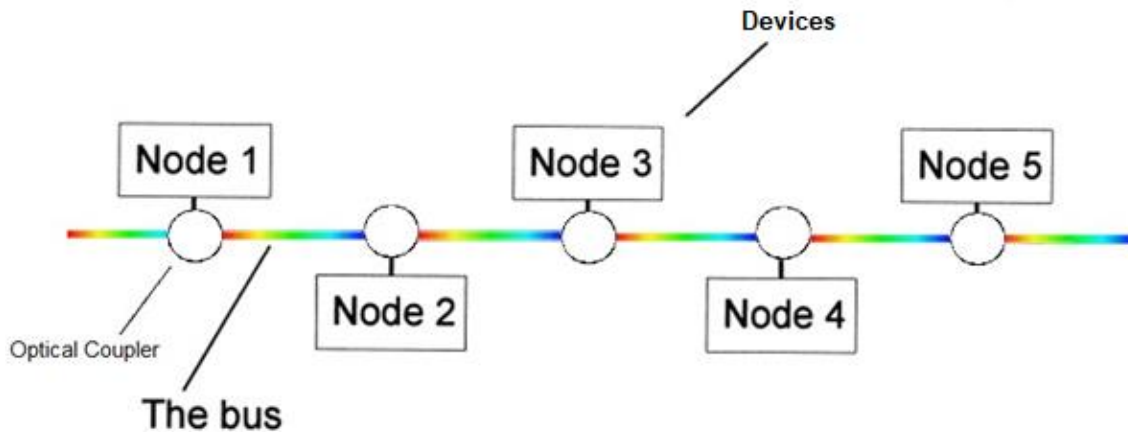


Εικόνα 37: Ένα οπτικό δίκτυο WAN στο οποίο είναι συνδεδεμένα δίκτυα MAN και LAN με οπτικές ίνες. [Διασκευή από ^[20]]

3.3 – Τοπολογίες Οπτικών Δικτύων

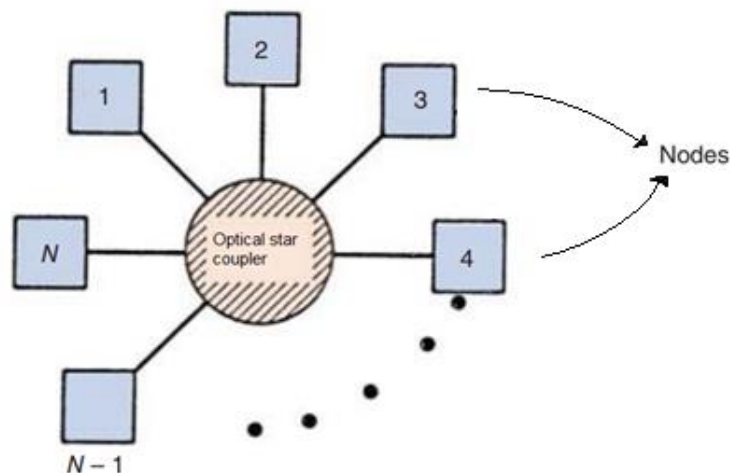
Ο τρόπος με τον οποίον είναι συνδεδεμένες οι συσκευές σε ένα οπτικό δίκτυο (η διάταξη τους) ονομάζεται τοπολογία του δικτύου αυτού.^[4] Γνωστές τοπολογίες δικτύου είναι η τοπολογία διαύλου (bus), η τοπολογία αστέρα (star), η τοπολογία δακτυλίου (ring) και η κατακεντρωμένη τοπολογία (mesh).^[7]

Στην τοπολογία διαύλου τα τερματικά χρησιμοποιούν όλα το ίδιο κανάλι επικοινωνιών. Στα οπτικά δίκτυα το κανάλι επικοινωνιών είναι οι οπτικές ίνες. Ενώ αυτή είναι σχετικά απλή διάταξη και χρειάζεται τον ελάχιστο αριθμό καλωδίων, έχει κάποια σημαντικά προβλήματα που την κάνουν λιγότερο αξιόπιστη σε σχέση με άλλες τοπολογίες. Το πρώτο πρόβλημα είναι η απόσταση που πρέπει να ταξιδέψει το σήμα μεταξύ δύο κόμβων.^[5] Ένας κόμβος μπορεί να είναι οποιοσδήποτε εξοπλισμός που μπορεί να συνδεθεί σε ένα δίκτυο (όπως οι υπολογιστές).^[4] Στην συγκεκριμένη τοπολογία η διάμετρος του δικτύου είναι μεγάλη που σημαίνει ότι η απόσταση θα είναι επίσης μεγάλη. Όσο πιο μακριά βρίσκονται οι δύο κόμβοι, τόσο μεγαλύτερη απόσταση θα χρειαστεί να διανύσουν. Επειδή όλα εξαρτώνται από το μοναδικό κανάλι επικοινωνίας αν αυτό πάθει κάποια βλάβη, για παράδειγμα αν σπάσει η οπτική ίνα, τότε ολόκληρο το δίκτυο θα καταρρεύσει.^[5]



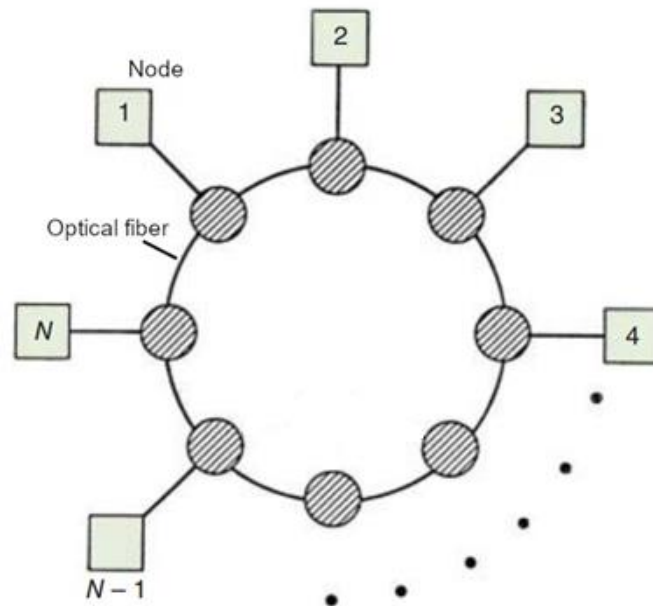
Εικόνα 38: Οπτικό δίκτυο με τοπολογία διαύλου [Διασκευή από ^[4]]

Η τοπολογία αστέρα είναι πιο περίπλοκη από την τοπολογία διαύλου και απαιτεί παραπάνω καλωδίωση διότι εδώ υπάρχει ένας κεντρικός κόμβος ο οποίος συνδέεται με τους υπόλοιπους κόμβους αντί να χρησιμοποιούν πολλοί κόμβοι το ίδιο μέσο. Το δίκτυο δεν καταρρέει εύκολα εδώ επειδή, σε αντίθεση με την τοπολογία διαύλου, αν υπάρξει κάποιο πρόβλημα με κάποια οπτική ίνα τότε θα επηρεαστεί μόνο ο κόμβος ο οποίος συνδέεται με αυτή και οι υπόλοιποι θα συνεχίσουν να λειτουργούν κανονικά. Στην μόνη περίπτωση που δεν συμβαίνει αυτό είναι αν για κάποιο λόγο υπάρξει πρόβλημα με τον κεντρικό κόμβο. Μόνο τότε το δίκτυο θα καταρρεύσει. Η επέκταση στην συγκεκριμένη τοπολογία είναι εύκολη επειδή απλά προσθέτουμε ένα παραπάνω καλώδιο που να συνδέει τον κεντρικό κόμβο με τον καινούργιο κόμβο. ^[5]



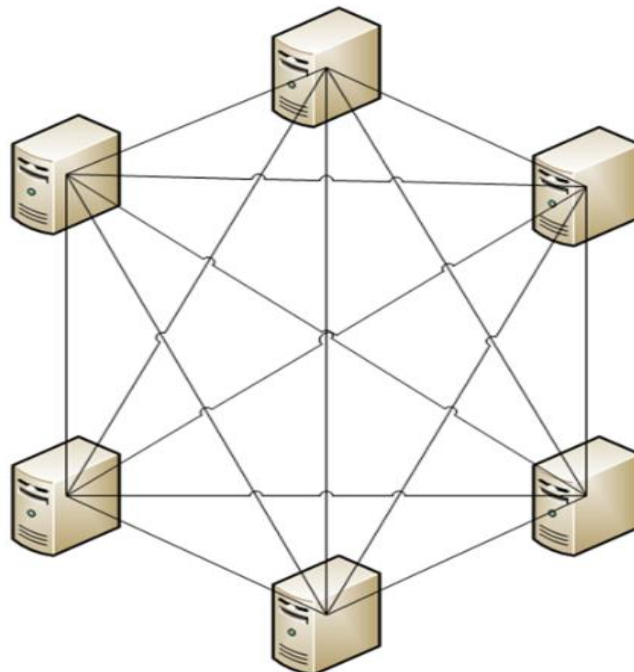
Εικόνα 39: Οπτικό δίκτυο με τοπολογία αστέρα. Οι σταθμοί (nodes) συνδέονται όλοι με έναν κεντρικό κόμβο, ο οποίος εδώ είναι ο οπτικός συζεύκτης σε μορφή αστέρα. [Διασκευή από ^[2]]

Ένα από τα μειονεκτήματα είναι ότι στην τοπολογία αστέρα ο κεντρικός κόμβος διαχειρίζεται μεγάλο φορτίο. Αυτό είναι όμως κάτι που δεν μας προβληματίζει στην τοπολογία δακτυλίου επειδή εδώ μοιράζεται το φορτίο ομοιόμορφα. Ένα από τα αρνητικά της τοπολογίας αυτής είναι ότι, όπως και στην τοπολογία διαύλου, η οποιαδήποτε βλάβη έχει ως αποτέλεσμα την κατάρρευση του δικτύου. Δεν είναι εύκολη η επέκταση σε αυτή την τοπολογία όπως στην τοπολογία αστέρα επειδή εδώ ο κάθε κόμβος βρίσκεται μεταξύ δύο κόμβων οπότε αυτομάτως χρειαζόμαστε δύο καλώδια κάθε φορά για κάθε καινούργιο κόμβο. ^[5]



Εικόνα 40: Οπτικό δίκτυο με τοπολογία δακτυλίου [Διασκευή από ^[2]]

Στην κατακεντρωμένη τοπολογία όλοι οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν πολλαπλές συνδέσεις και επομένως σε περίπτωση βλάβης δεν θα καταρρεύσει ολόκληρο το δίκτυο. Ο κάθε κόμβος δεν χρειάζεται να περάσει από κάπου αλλού για να φτάσει σε κάποιον συγκεκριμένο κόμβο επειδή είναι όλοι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με αποτέλεσμα να χρειαστεί κάθε φορά να γίνει μόνο ένα βήμα. Όμως για να είναι όλοι οι κόμβοι συνδεδεμένοι μεταξύ τους πρέπει να υπάρχει και η ανάλογη καλωδίωση, δηλαδή η μέγιστη ποσότητα καλωδίωσης (σε αντίθεση με την τοπολογία διαύλου). Η κατακεντρωμένη τοπολογία μπορεί να καταλήξει πολύ σύνθετη επειδή υπάρχουν πολλαπλά μονοπάτια για να φτάσει κάποιος στον κόμβο που επιθυμεί, γεγονός που απαιτεί κατάλληλη δρομολόγηση ή μεταγωγή. Έτσι όσους πιο πολλούς κόμβους έχουμε τόσο και πιο σύνθετη είναι η συγκεκριμένη τοπολογία. ^[5]



Εικόνα 41: Οπτικό δίκτυο με καταναμημένη τοπολογία ^[21]

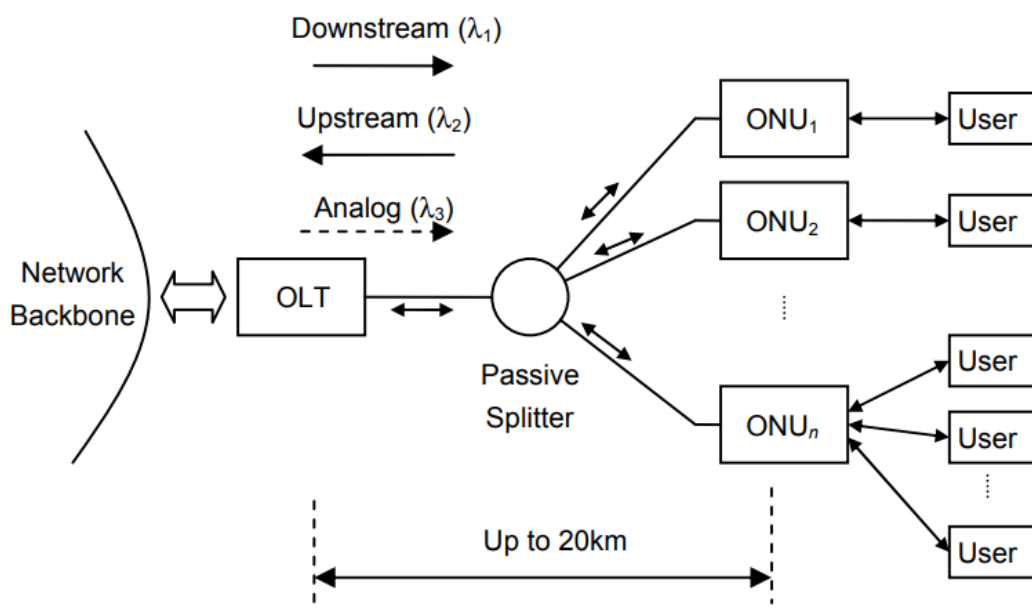
Συχνά χρησιμοποιείται η τοπολογία αστέρα ή διαύλου για μικρά δίκτυα αλλά για μεγαλύτερα δίκτυα προτιμάται ο συνδυασμός τοπολογιών. ^[5]

3.4 – Σύγχρονα Οπτικά Δίκτυα

3.4.1 – Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PONs)

Οι ανάγκες των πελατών γίνονται με τα χρόνια όλο και πιο πολύ απαιτητικές. Πολλές διαδικτυακές εφαρμογές αλλά και συσκευές όπως οι σύγχρονες τηλεοράσεις HDTV απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Επομένως για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού έχουν αναπτυχθεί αρχιτεκτονικές δικτύου οι οποίες χρησιμοποιούν τις οπτικές ίνες ως μέσο μετάδοσης. Οι οπτικές ίνες αντικαθιστούν τα χάλκινα καλώδια που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση είτε ολικώς είτε μερικώς. Αυτές οι αρχιτεκτονικές γενικά ονομάζονται Fiber to the X (FTTX). Η αρχιτεκτονική Fiber to the Premises (FTTP) είναι μία από αυτές και χρησιμοποιεί ως βάση την αρχιτεκτονική παθητικού οπτικού δικτύου (Passive Optical Network – PON). ^[5]

Τα στοιχεία ενός συστήματος PON είναι τα εξής: Ένα τερματικό οπτικής γραμμής (optical line terminal) και ένα σύνολο μονάδων οπτικού δικτύου (Optical Network Units – ONU) ή αλλιώς τερματικά οπτικού δικτύου (Optical Network Terminals – ONT). Τα ONU βρίσκονται κοντά στους χρήστες ενώ το OLT σε κάποιο κεντρικό γραφείο και συνδέονται μεταξύ τους με οπτικές ίνες και μέσω ενός παθητικού διακλαδωτή (passive splitter). Οι χρήστες είναι συνδεδεμένοι με τα ONU ενώ το OLT με το δίκτυο κορμού (backbone network). Σε ένα ONU μπορεί να είναι συνδεδεμένοι ένας ή περισσότεροι χρήστες. Η κίνηση στην αρχιτεκτονική PON χαρακτηρίζεται διαφορετικά ανάλογα με την κατεύθυνση της. Η κίνηση από τα ONU στο OLT ονομάζεται κίνηση upstream ενώ το αντίστροφο είναι γνωστό ως downstream κίνηση. ^[5]



Εικόνα 42: Η αρχιτεκτονική ενός παθητικού οπτικού δικτύου. ^[5]

Ο σκοπός των κέντρων δεδομένων είναι η διαχείριση και η επεξεργασία όγκου δεδομένων τα οποία είναι αποθηκευμένα σε αυτά. Τα κέντρα δεδομένων μπορεί να είναι ένα δωμάτιο ή ένα κτίριο στο οποίο φιλοξενείται ο κατάλληλος εξοπλισμός, όπως οι υπολογιστές, που είναι απαραίτητος για την διαχείριση, επεξεργασία και αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Το δίκτυο ενός κέντρου δεδομένων αποτελείται από πολλούς δρομολογητές και μεταγωγείς ενώ χρησιμοποιούνται οι οπτικές ίνες ως μέσα μετάδοσης. [22]

Οι διακομιστές που χρησιμοποιούνται στα κέντρα δεδομένων μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες. Αυτές οι κατηγορίες είναι οι διακομιστές blade, διακομιστές με δυνατότητα τοποθέτησης σε rack (rack-mount) και οι κεντρικοί διακομιστές (mainframe). Οι διακομιστές blade είναι κατασκευασμένοι έτσι ώστε να εξοικονομούν περισσότερο χώρο και περιέχουν επεξεργαστές και ελεγκτές δικτύου. Συνήθως χρησιμοποιούνται πολλαπλοί διακομιστές blade οι οποίοι μοιράζονται τους ίδιους πόρους. Οι διακομιστές με δυνατότητα τοποθέτησης σε rack τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλον για εξοικονόμηση χώρου και σε αντίθεση με τους διακομιστές blade δεν μοιράζονται πόρους, έχει ο κάθε διακομιστής τους δικούς του. Οι κεντρικοί διακομιστές (mainframe) είναι υπολογιστές υψηλής απόδοσης ικανοί να κάνουν την ίδια δουλειά που θα έκανε ένα ολόκληρο δωμάτιο διακομιστών blade ή rack-mount, αφού έχουν στην διάθεση τους πολλούς επεξεργαστές και την δυνατότητα εικονικοποίησης. [22]

Η δυνατότητα εικονικοποίησης είναι πολύ σημαντική. Πλέον με το υπολογιστικό νέφος (cloud computing) οι εφαρμογές τρέχουν σε εικονικούς υπολογιστές με την βοήθεια της εικονικοποίησης χωρίς να χρειάζεται η κάθε εφαρμογή τον δικό της εξοπλισμό. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο απαιτούμενος εξοπλισμός που χρειάζεται και αξιοποιούνται οι υπάρχοντες πόροι καλύτερα. Γνωστοί πάροχοι υπηρεσιών νέφους όπως οι Amazon Web Services, IBM Cloud, Microsoft Azure, Oracle Cloud Infrastructure, Google Cloud Platform έχουν τα δικά τους κέντρα δεδομένων στα οποία εφαρμόζεται η τεχνολογία της εικονικοποίησης. [22]

Θέλουμε να αποφύγουμε όσο πιο πολύ μπορούμε την πιθανή διακοπή λειτουργίας ενός κέντρου δεδομένων. Για παράδειγμα πάντα υπάρχει ο κίνδυνος πυρκαγιάς και θα πρέπει σε αυτή την περίπτωση να υπάρχει κατάλληλος εξοπλισμός για την πρόληψη πυρκαγιάς. Επίσης χρειάζεται εξοπλισμός για την ασφαλής εκφόρτιση στατικού ηλεκτρισμού για να αποφευχθεί καταστροφή εξοπλισμού και δεδομένων. Η εκφόρτιση στατικού ηλεκτρισμού είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιβάλλοντα με χαμηλή υγρασία επειδή σε εκείνα αυξάνεται ο κίνδυνος υπερτάσεων στατικού ηλεκτρισμού. Σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία έχουμε το πρόβλημα της σκουριάς του εξοπλισμού. Άρα είναι απαραίτητο να υπάρχει εξοπλισμός ελέγχου υγρασίας, δηλαδή κατάλληλος εξαερισμός, αισθητήρες υγρασίας και συστήματα CRAC (computer room air conditioning). Με τα συστήματα CRAC μπορούμε να καταπολεμήσουμε και το πρόβλημα της θερμότητας ώστε να συνεχίζουν οι διακομιστές και ο εξοπλισμός να λειτουργούν σε φυσιολογικές θερμοκρασίες. Εκτός από τα συστήματα CRAC, χρησιμοποιείται η υδροψύξη (liquid cooling) και η αεροψύξη (air cooling). Προτιμάται η υδροψύξη λόγω χαμηλότερων απαιτήσεων νερού και ρεύματος. [22]



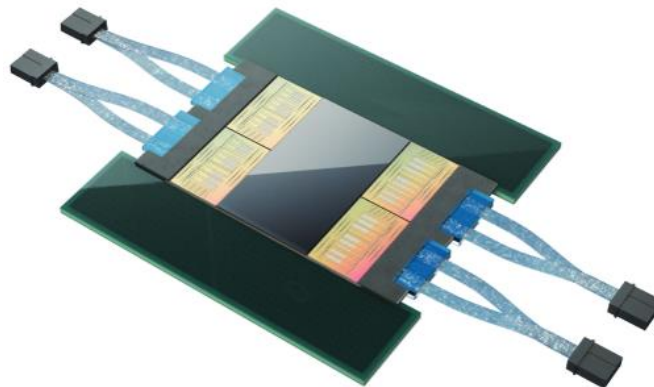
Εικόνα 43: Το κέντρο δεδομένων της CERN ^[23]

3.4.3 – Οπτική Δικτύωση Μεταξύ Υλικού

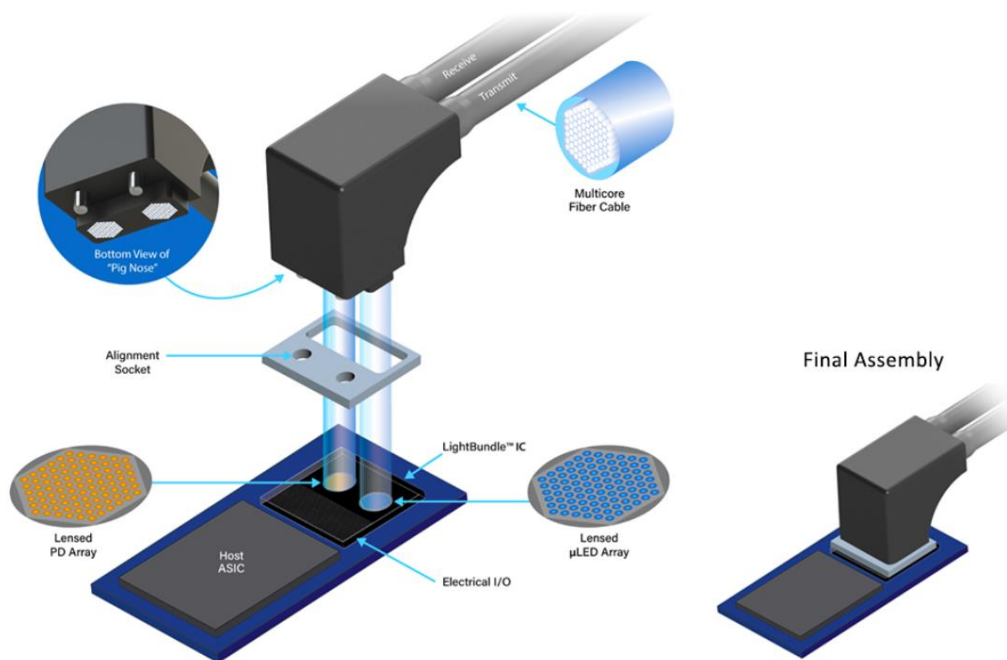
Σύμφωνα με το περιοδικό IEEE Spectrum του IEEE ^[24], γίνονται προσπάθειες να κατασκευαστούν chiplets με οπτική διασύνδεση με σκοπό την βελτίωση των σημερινών επεξεργαστών. Τα chiplets είναι μικρά τσιπ τα οποία συνδέονται με επεξεργαστές. Οι επεξεργαστές που βρίσκονται στην ίδια μητρική κάρτα θα μπορούσαν να είχαν γρηγορότερες ταχύτητες επικοινωνίας αν δεν υπήρχε ο χαλκός. Η βελτίωση της ταχύτητας των επεξεργαστών σημαίνει και γενικότερη βελτίωση των υπολογιστών. Για αυτόν τον λόγο η προσπάθεια αυτή είναι σημαντική.

Δύο εταιρίες, η Avicena και η Ayar Labs, προσπαθούν να κατασκευάσουν τέτοια chiplets έχοντας όμως διαφορετικές προσεγγίσεις. Η προσέγγιση της Avicena είναι η χρήση απλού φωτός από μία μικροσκοπική οθόνη από μπλε microLED. Τα δεδομένα εδώ στέλνονται παράλληλα μέσω ξεχωριστών μονοπατιών σε ένα εξειδικευμένο οπτικό καλώδιο. Η Ayar Labs από την άλλη πλευρά στέλνει τα δεδομένα μέσω πολυπλεξίας. Το υλικό τους κωδικοποιεί τα δεδομένα σε πολλαπλά μήκη κύματος φωτός από ένα υπέρυθρο laser (infrared laser) και στέλνει το φως μέσω μιας ίνας. ^[24]

Δυστυχώς αυτά τα τσιπ δεν βρίσκονται ακόμα στο στάδιο όπου μπορούν να βρεθούν σε υπολογιστές στο εμπόριο και πιθανότατα να περάσουν χρόνια μέχρι να εμφανιστούν και να χρησιμοποιηθούν από τους καταναλωτές. ^[24]



Εικόνα 44: Τέσσερα TeraPHY chiplets της Ayar Labs ενσωματωμένα σε ένα πακέτο. ^[33]



Εικόνα 45: Η διασύνδεση LightBundle της Avicena και η τελική συναρμολόγηση. ^[34]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ

4.1 – Πρωτόκολλα Πολλαπλής Προσπέλασης

Τα πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης αφορούν το υπόστρωμα MAC (Medium Access Control), ένα μέρος του επιπέδου σύνδεσης δεδομένων. Είναι γνωστά ως πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης (Multiple Access Protocols – MAC).^[25] Είναι ένα σετ κανόνων που πρέπει να ακολουθήσουν πολλαπλοί υπολογιστές για να μοιραστούν δίκαια ένα κανάλι.^[26]

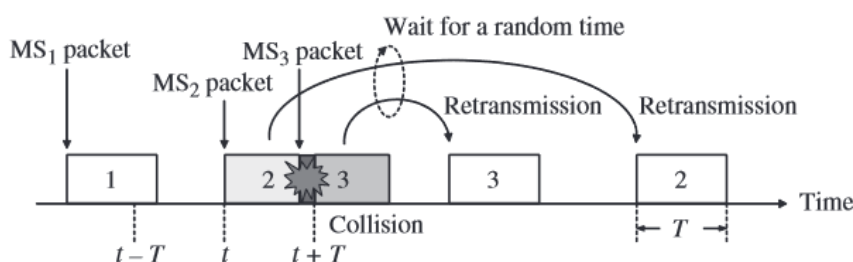
4.2 – Πρωτόκολλα Τυχαιάς Προσπέλασης

Θα εστιάσουμε συγκεκριμένα στα πρωτόκολλα προσπέλασης με διαμάχη (contention-based protocols). Τα τερματικά που μοιράζονται το ίδιο κανάλι μπορούν να το χρησιμοποιήσουν οποιαδήποτε στιγμή θελήσουν. Αυτό σημαίνει όμως ότι μπορεί να υπάρξει κάποια σύγκρουση και για αυτό υπάρχουν τρόποι αντιμετώπισης συγκρούσεων έτσι ώστε να γίνει σωστή αναμετάδοση. Κάποια πρωτόκολλα επιτρέπουν την αναμετάδοση μόνο μετά από τυχαίο χρονικό διάστημα. Αυτά ονομάζονται πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης.^[25]

4.3 – Είδη Πρωτοκόλλων Τυχαιάς Προσπέλασης

4.3.1 – ALOHA

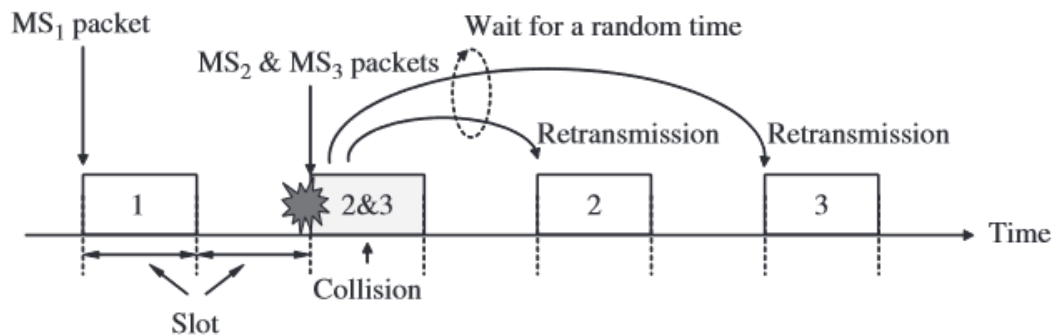
Το πρωτόκολλο ALOHA αναπτύχθηκε κατά την δεκαετία του 1970. Ο κάθε χρήστης δημιουργεί πακέτα σταθερού μήκους T με ρυθμό άφιξης λ (πακέτα/sec) σύμφωνα με μία διαδικασία Poisson. Όταν ένας σταθμός/τερματικό έχει πακέτο έτοιμο για μετάδοση, κάνει την μετάδοση κατευθείαν. Στην συνέχεια περιμένει να λάβει κάποια απάντηση από τον δέκτη, ο οποίος δεν θα απαντήσει στην περίπτωση όπου έχει γίνει κάποια σύγκρουση. Αν υπάρξει σύγκρουση, ξανακάνει αναμετάδοση μετά από κάποιο τυχαίο χρονικό διάστημα.^[25]



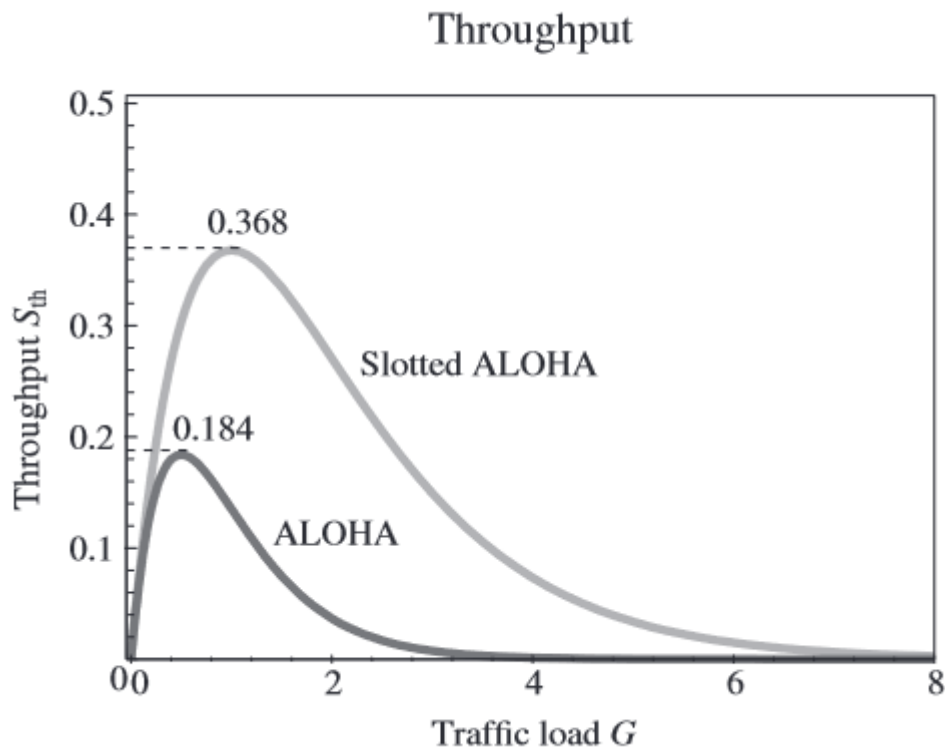
Εικόνα 46: Η διαδικασία μετάδοσης στην Pure ALOHA^[25]

Υπάρχουν δύο είδη πρωτοκόλλου ALOHA. Το παραπάνω πρωτόκολλο ALOHA ονομάζεται Pure ALOHA. Το άλλο είδος ALOHA ονομάζεται Slotted ALOHA επειδή ο χρόνος είναι χωρισμένος σε σχισμές. Κάθε σχισμή έχει μέγεθος ίσο με την διάρκεια της μετάδοσης πακέτου T . Όταν ένας σταθμός/τερματικό θέλει να μεταδώσει, περιμένει αναγκαστικά μέχρι την αρχή της επόμενης σχισμής. Έτσι μπορούν να αποφευχθούν πολλές συγκρούσεις που διαφορετικά

θα υπήρχαν στην Pure ALOHA. Για να έχουμε επιτυχής μετάδοση θα πρέπει να υπάρχει μόνο ένα πακέτο που θα μεταδίδεται κατά την διάρκεια μιας σχισμής. ^[25]



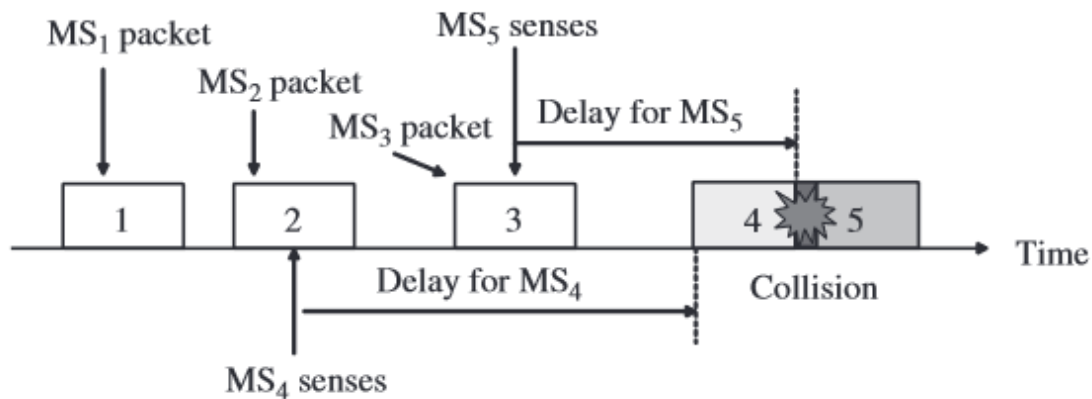
Εικόνα 47: Η διαδικασία μετάδοσης στην slotted ALOHA. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει μερική σύγκρουση όπως στην Pure ALOHA, έχει γίνει ολική σύγκρουση (πακέτα σταθμών 2 και 3). ^[25]



Εικόνα 48: Σύγκριση του throughput των Slotted και Pure ALOHA. ^[25]

4.3.2 - CSMA

Στα πρωτόκολλα CSMA (Carrier Sense Multiple Access) γίνεται έλεγχος πριν την μετάδοση πακέτου κάνοντας ανίχνευση του καναλιού μετάδοσης. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αποφύγουμε τις συγκρούσεις και να βελτιώσουμε τους ρυθμούς απόδοσης. Ο κάθε σταθμός έχει την ικανότητα να ανιχνεύσει την μετάδοση των υπολοίπων και η καθυστέρηση διάδοσης είναι μικρή. ^[25]



Εικόνα 49: Η διαδικασία μετάδοσης στο πρωτόκολλο CSMA. Οι σταθμοί 4 και 5 ανιχνεύουν και βρίσκουν το κανάλι απασχολημένο (πρώτα επειδή γίνεται η μετάδοση του πακέτου του σταθμού 2 και μετά λόγω του σταθμού 3) και περιμένουν ένα τυχαίο χρονικό διάστημα. Στο τέλος υπάρχει σύγκρουση μεταξύ τους. ^[25]

Μπορούμε να χωρίσουμε τα πρωτόκολλα CSMA σε δύο κατηγορίες: Persistent και Non-Persistent. Στα Non-Persistent ο σταθμός όταν είναι έτοιμος να μεταδώσει ανιχνεύει πρώτα το κοινό μέσο. Αν αυτό είναι απασχολημένο, θα περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα και μετά θα ξανακάνει την ανίχνευση. Θα κάνει μετάδοση μόνο όταν το κανάλι δεν είναι απασχολημένο, δηλαδή όταν είναι αδρανές. Αν συμβεί σύγκρουση τότε περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα και ξαναεπαναλαμβάνει την διαδικασία. Ανάλογα με το αν χρησιμοποιούμε slots ή όχι τα Non-Persistent πρωτόκολλα χωρίζονται σε Slotted Non-Persistent CSMA και Unslotted Non-Persistent CSMA. ^[25]

Υπάρχουν δύο είδη persistent πρωτοκόλλων, τα 1-Persistent και τα p-Persistent. Στα 1-Persistent, ο σταθμός ανιχνεύει όταν είναι έτοιμος για μετάδοση. Αν βρει το κανάλι απασχολημένο τότε θα συνεχίζει να ανιχνεύει μέχρι να το βρει αδρανές. Με το που το βρει idle κατευθείαν θα κάνει μετάδοση. Επειδή στο πρωτόκολλο αυτό η μετάδοση γίνεται με πιθανότητα 1 όταν το κανάλι είναι αδρανές ονομάζεται 1-Persistent. Το πρόβλημα σε αυτό το πρωτόκολλο είναι ότι πάντα θα υπάρξει σύγκρουση αν δύο ή περισσότεροι σταθμοί είναι έτοιμοι να μεταδώσουν επειδή θα συνεχίζουν να ανιχνεύουν μέχρι να το βρουν αδρανές και επομένως θα μεταδώσουν την ίδια χρονική στιγμή. ^[25]

Στο πρωτόκολλο CSMA p-Persistent χωρίζεται ο χρόνος σε σχισμές (είναι δηλαδή slotted) με το μέγεθος της κάθε σχισμής να είναι μία περίοδος διαμάχης. Ο σταθμός εδώ ανιχνεύει το κανάλι όταν είναι αυτός έτοιμος και στην περίπτωση που το βρει αδρανές θα μεταδώσει με πιθανότητα p , διαφορετικά θα περιμένει μέχρι την επόμενη χρονοσχιμή (γεγονός που έχει πιθανότητα $1-p$) και θα ανιχνεύσει ξανά το κανάλι. Σε περίπτωση σύγκρουσης θα περιμένει ο σταθμός για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα και στην συνέχεια θα ξεκινήσει πάλι την ίδια διαδικασία. ^[25]

4.3.3 – CSMA/CD

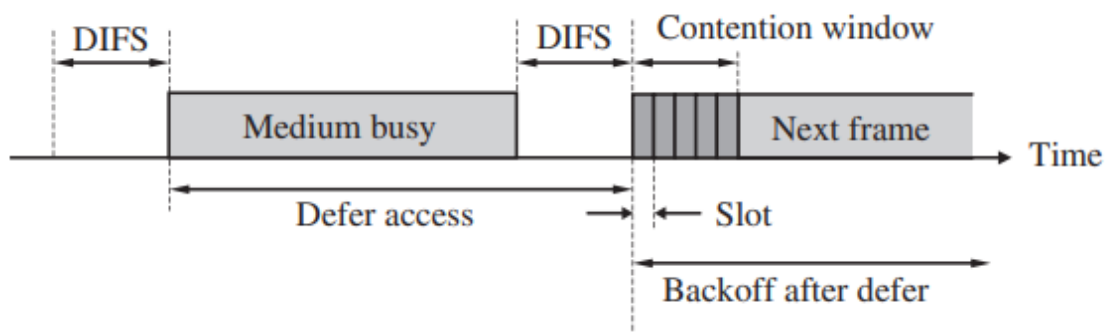
Το πρωτόκολλο CSMA/CD είναι ένα πρωτόκολλο CSMA με ειδικό μηχανισμό για εντοπισμό συγκρούσεων, για αυτό και ονομάζεται CSMA/CD όπου το CD σημαίνει Collision Detection. Οι σταθμοί θα προσπαθήσουν να μεταδώσουν ολόκληρα τα πακέτα παρ' όλο που θα

ακολουθήσει σύγκρουση. Όμως στο CSMA/CD η διαδικασία είναι διαφορετική. Πρώτα ο σταθμός θα ανιχνεύσει όταν είναι έτοιμος να μεταδώσει και αν βρει το κανάλι απασχολημένο θα περιμένει, διαφορετικά στέλνει το πακέτο κατευθείαν. Αν όμως εντοπιστεί σύγκρουση κατά την διάρκεια της μετάδοσης, ο σταθμός θα σταματήσει κατευθείαν την μετάδοση και θα προσπαθήσει ξανά μετά από τυχαίο χρονικό διάστημα. Η άμεση διακοπή της μετάδοσης έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας που θα είχαν σπαταληθεί διαφορετικά αν μεταδίδονταν ολόκληρα τα πακέτα. Το CSMA/CD χρησιμοποιείται σε τοπικά δίκτυα όπως Ethernet.^[25]

4.3.4 – CSMA/CA

Το πρωτόκολλο CSMA/CD δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ασύρματα δίκτυα επειδή δεν μπορεί να γίνει μετάδοση και ανίχνευση ταυτόχρονα σε αυτά όπως στα ενσύρματα. Αυτό το γεγονός οδήγησε στην ανάπτυξη ενός τροποποιημένου πρωτοκόλλου CSMA/CD το οποίο ονομάζεται CSMA/CA το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ασύρματα δίκτυα. Η διαδικασία είναι ως εξής: οι σταθμοί παρακολουθούν το κανάλι όπως και στην CSMA/CD. Ο σταθμός όταν έχει πακέτο και είναι έτοιμος να μεταδώσει θα ανιχνεύσει το κανάλι αντί να ξεκινήσει κατευθείαν με το που είναι το κανάλι αδρανές. Για να ξεκινήσει την μετάδοση του ο σταθμός θα πρέπει το κανάλι να είναι αδρανές για χρονικό διάστημα που να υπερβαίνει το καταναμημένο χρονικό διάστημα μεταξύ πλαισίων (Distributed Interframe Space – DIFS). Αν είναι μικρότερο από αυτό τότε θα περιμένει για χρονικό διάστημα DIFS και επιλέγει μία τυχαία περίοδο υποχώρησης (backoff period) μέσα στο πλαίσιο του παραθύρου διαμάχης (Contention Window – CW) πριν ξεκινήσει την μετάδοση.^[25]

Για να ξεκινήσει η μετάδοση θα πρέπει ο μετρητής υποχώρησης να έχει τιμή 0. Ο μετρητής αρχικοποιείται κατά την περίοδο υποχώρησης και μετράει αντίστροφα μόνο όταν το κανάλι είναι αδρανές, διαφορετικά παραμένει σταθερός. Θα συνεχίσει την αντίστροφη μέτρηση όταν δεν είναι πλέον απασχολημένο και με προϋπόθεση ότι έχει παραμείνει αδρανές για παραπάνω από το προκαθορισμένο χρονικό διάστημα DIFS. Στην CSMA/CA υπάρχει σύγκρουση μόνο όταν δύο ή περισσότεροι σταθμοί επιλέγουν την ίδια χρονική σχισμή (time slot) για την μετάδοση δεδομένων τους. Σε περίπτωση σύγκρουσης το παράθυρο διαμάχης θα διπλασιαστεί και αυτό θα συνεχιστεί μέχρι την επιτυχής μετάδοση όπου στο τέλος αυτής θα επανέλθει το παράθυρο στην αρχική του τιμή. Αυτό συμβαίνει επειδή με τον διπλασιασμό του παραθύρου διαμάχης αυξάνεται και το εύρος της χρονοκαθυστερήσης (ώστε με κάθε επανάληψη να μειώνεται όλο και περισσότερο η πιθανότητα σύγκρουσης).^[25]



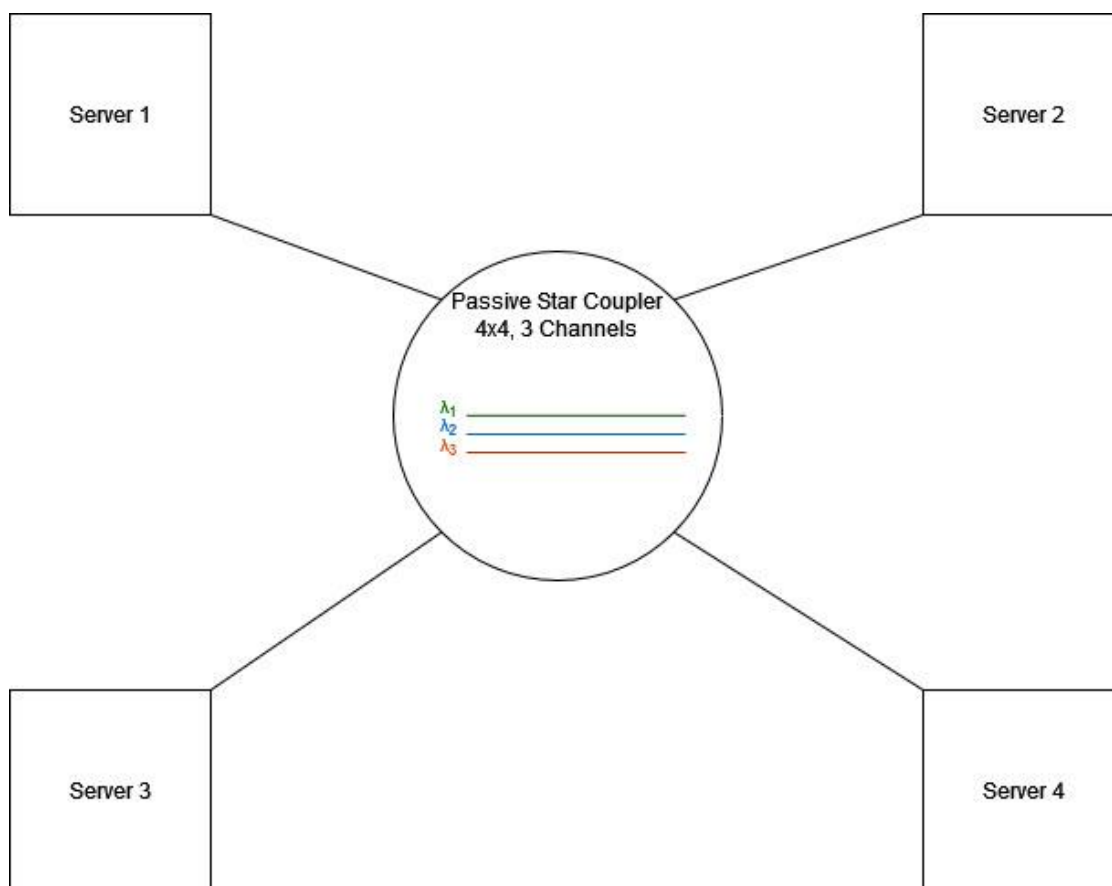
Εικόνα 50: Η διαδικασία μετάδοσης με πρωτόκολλο CSMA/CA. ^[25]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ CSMA

5.1 – Αρχιτεκτονική Δικτύου

Πριν γίνει οποιαδήποτε μελέτη απόδοσης των πρωτοκόλλων που θα προταθούν, θα χρειαστεί πρώτα να γίνει αναφορά στο δίκτυο όπου θα χρησιμοποιηθούν και στα στοιχεία που θα χρειαστούν για την συναρμολόγηση του. Θέλουμε να δημιουργήσουμε ένα οπτικό τοπικό δίκτυο με τοπολογία αστέρα. Ο οπτικός συζεύκτης σε μορφή αστέρα θα είναι παθητικός. Σε ένα οπτικό δίκτυο όπως το δικό μας, οι οπτικές ίνες είναι το μέσο μετάδοσης και χρησιμοποιούνται για την σύνδεση του κάθε σταθμού με τον παθητικό συζεύκτη. Υπάρχει σύστημα πολλαπλών καναλιών (multichannel system) το οποίο αποτελείται από έναν συγκεκριμένο αριθμό καναλιών v . Για να υποστηριχθεί αυτό το σύστημα πολλαπλών καναλιών χρησιμοποιείται η τεχνική DWDM.

Ο κάθε σταθμός του δικτύου είναι συνδεδεμένος με παθητικό οπτικό συζεύκτη $N \times N$ όπου N ο αριθμός των σταθμών. Στο παρακάτω σχήμα υποθέτουμε ότι ισχύει $N = 4$ και επομένως έχουμε παθητικό συζεύκτη 4×4 . Τα κανάλια υποθέτουμε ότι είναι $v = 3$ και συμβολίζουμε το κάθε κανάλι με λ_v . Οι σταθμοί συνδέονται μόνο με τον παθητικό συζεύκτη και όχι μεταξύ τους.

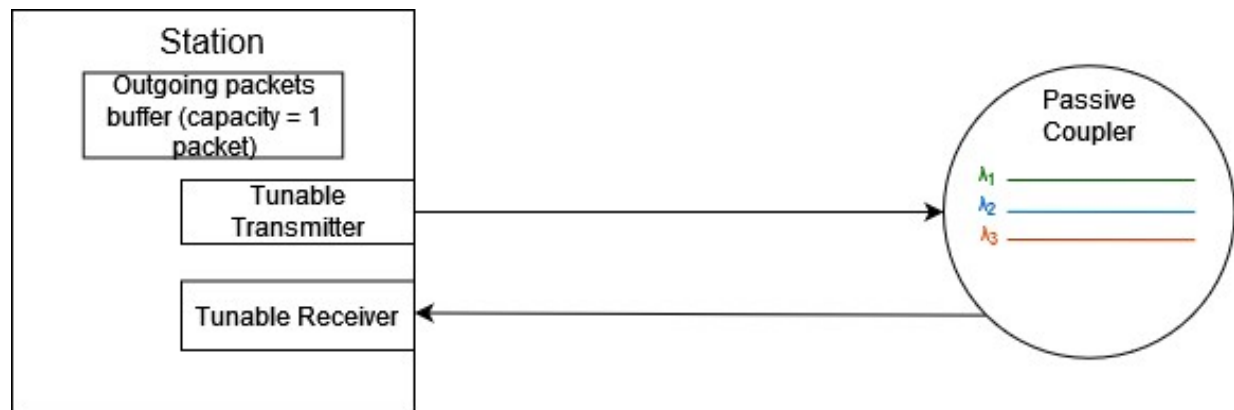


Εικόνα 51: Απεικονίζεται η αρχιτεκτονική δικτύου που περιγράφεται παραπάνω για $N = 4$ σταθμούς και $v = 3$ κανάλια.

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε ότι και οι τέσσερις σταθμοί συνδέονται με τον παθητικό συζεύκτη και έχουν πρόσβαση σε τρία κανάλια $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. Ο κάθε σταθμός έχει την δυνατότητα να επιλέξει το κανάλι το οποίο θα ήθελε να χρησιμοποιήσει. Αυτό είναι εφικτό λόγω της αρχιτεκτονικής του κάθε κόμβου/σταθμού.

5.2 – Αρχιτεκτονική Κόμβου

Ο κάθε σταθμός μπορεί να μεταδώσει στα κανάλια αλλά μπορεί ταυτόχρονα και να λάβει πακέτα από αυτά. Επομένως, οι σταθμοί έχουν από έναν δέκτη και έναν πομπού ο καθένας. Για την δυνατότητα επιλογής καναλιού, θα πρέπει οι πομποί και οι δέκτες του κάθε σταθμού να είναι tunable (ρυθμιζόμενοι). Επίσης, έχουν όλοι οι σταθμοί από ένα buffer με χωρητικότητα ενός πακέτου. Όταν είναι γεμάτο το buffer ενός σταθμού, οποιοδήποτε καινούργιο πακέτο προκύψει από γέννηση πακέτου χάνεται για πάντα και διατηρείται το ήδη υπάρχον. Παρακάτω απεικονίζονται τα στοιχεία του κάθε σταθμού του οπτικού δικτύου στο οποίο βρισκόμαστε.

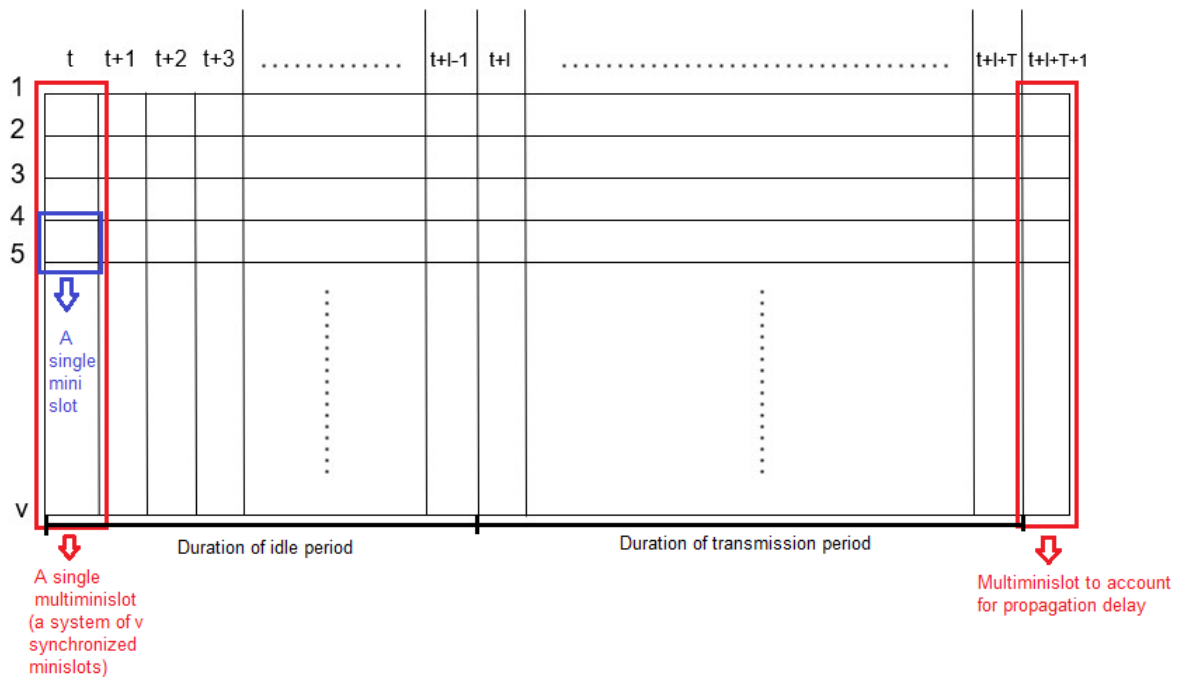


Εικόνα 52: Τα στοιχεία του κάθε σταθμού του οπτικού δικτύου.

Στην συνέχεια θα μελετηθούν δύο πρωτόκολλα CSMA, το CSMA-1 και το CSMA-2, τα οποία είναι τα πρωτόκολλα προσπέλασης που προτείνονται για το συγκεκριμένο δίκτυο.

5.3 – Πρωτόκολλο Προσπέλασης CSMA-1

Το πρωτόκολλο CSMA-2 βασίζεται στο πρωτόκολλο CSMA-1 με σκοπό την βελτιστοποίηση του και επομένως έχει παρόμοιο τρόπο λειτουργίας με συγκεκριμένες διαφορές. Η ροή των πακέτων και στα δύο πρωτόκολλα γίνεται με διαδικασία Poisson με ρυθμό λ πακέτα ανά multiminislot. Το multiminislot είναι ένα παράλληλο σύστημα που αποτελείται από n minislots. Ο χρόνος είναι χωρισμένος σε minislots μήκους τ (καθυστέρηση διάδοσης από άκρο-σε-άκρο του multichannel). Αυτό ισχύει για το κάθε κανάλι του συστήματος. Τα minislots των διαφορετικών καναλιών είναι συγχρονισμένα και μαζί αποτελούν ένα multiminislot. Ο χρόνος επίσης μπορεί και στα δύο πρωτόκολλα να χωριστεί σε περίοδο αδράνειας (idle period) και σε περίοδο μετάδοσης (transmission period). Η περίοδος αδράνειας είναι τυχαία ενώ η περίοδος μετάδοσης πάντα θα διαρκεί $T + 1$ multiminislots όπου το T είναι ο χρόνος μετάδοσης πακέτου και το ένα παραπάνω multiminislot υπάρχει επειδή λαμβάνεται υπόψη η καθυστέρηση μετάδοσης από άκρο-σε-άκρο. Αυτά μπορούμε να τα παρατηρήσουμε και στο σχήμα παρακάτω. Υποθέτουμε ότι t είναι η αρχή της περιόδου αδράνειας και $t+I-1$ το τέλος της ενώ για την περίοδο μετάδοσης υποθέτουμε ότι $t+I$ είναι η αρχή της και $t+I+T$ το τέλος της. Το multiminislot $t+I+T+1$ είναι για την καθυστέρηση μετάδοσης.



Εικόνα 53: Στο σχήμα απεικονίζονται τα minislots και multiminislots καθώς και η διάρκεια της κάθε περιόδου.

Τα δύο προτεινόμενα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν την ίδια λογική όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίον χωρίζεται ο χρόνος αλλά το CSMA-1 εφαρμόζει την λογική για ένα ενιαίο σύνολο καναλιών ενώ το CSMA-2 για δύο ανεξάρτητα σύνολα καναλιών. Επομένως, στο CSMA-2 οι δύο ομάδες καναλιών θα έχουν διαφορετικούς κύκλους.

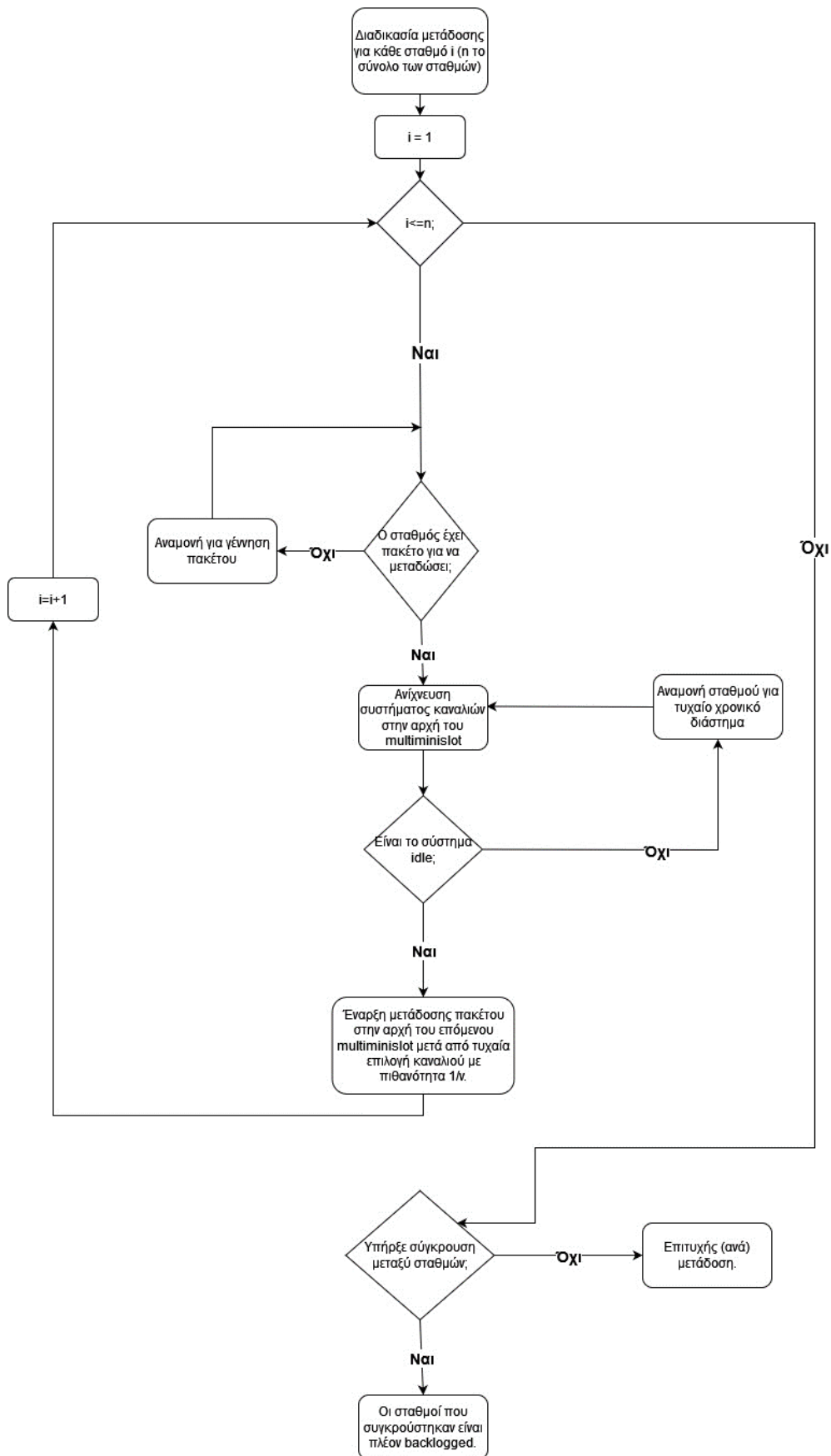
Στο πρωτόκολλο CSMA-1 υπάρχουν κάποιοι κανόνες με βάση τους οποίους γίνεται η μετάδοση. Αρχικά το πρωτόκολλο είναι non-persistent, δηλαδή, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στο Κεφάλαιο 4, ο σταθμός δεν θα ανιχνεύει συνεχώς το κανάλι μέχρι να το βρει idle. Θα περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα πριν ανιχνεύσει ξανά. Είναι slotted, που σημαίνει ότι ο χρόνος χωρίζεται σε σχισμές. Οι σχισμές αυτές είναι τα multiminislots που αναφέρθηκαν και απεικονίζονται στο σχήμα παραπάνω.

Γνωρίζουμε από την αρχιτεκτονική κόμβου ότι ο κάθε σταθμός έχει buffer χωρητικότητας ενός πακέτου. Όταν το buffer είναι άδειο, ο σταθμός χαρακτηρίζεται ως free. Διαφορετικά θα χαρακτηριστεί ως backlogged. Αν ένας backlogged σταθμός αποκτήσει νέο πακέτο, αυτό θα χαθεί για πάντα. Ένας σταθμός που είναι backlogged προγραμματίζει την αναμετάδοση του με πιθανότητα p .

Πριν όμως μπορέσει να το κάνει αυτό, θα πρέπει να κάνει πρώτα ανίχνευση. Όταν έχει ο σταθμός πακέτο και είναι έτοιμος να μεταδώσει, θα ανιχνεύσει το multichannel στην αρχή του multiminislot και θα μεταδώσει μόνο αν το σύστημα εντοπιστεί ότι είναι idle. Στην περίπτωση όπου είναι όντως idle, η (ανα)μετάδοση θα προγραμματιστεί για την αρχή του επόμενου multiminislot. Αν είναι busy το multichannel και ο σταθμός free, ο σταθμός θα πρέπει να περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα πριν την επόμενη ανίχνευση. Αν ο σταθμός είναι backlogged και το multichannel busy, ο σταθμός θα επαναλάβει την διαδικασία ανίχνευσης σε τυχαίο μελλοντικό χρόνο.

Στην περίπτωση όπου προγραμματιστεί η μετάδοση στην αρχή του επόμενου multiminislot κανονικά, ο σταθμός θα επιλέξει τυχαία ένα από τα v κανάλια για την (ανα)μετάδοση με

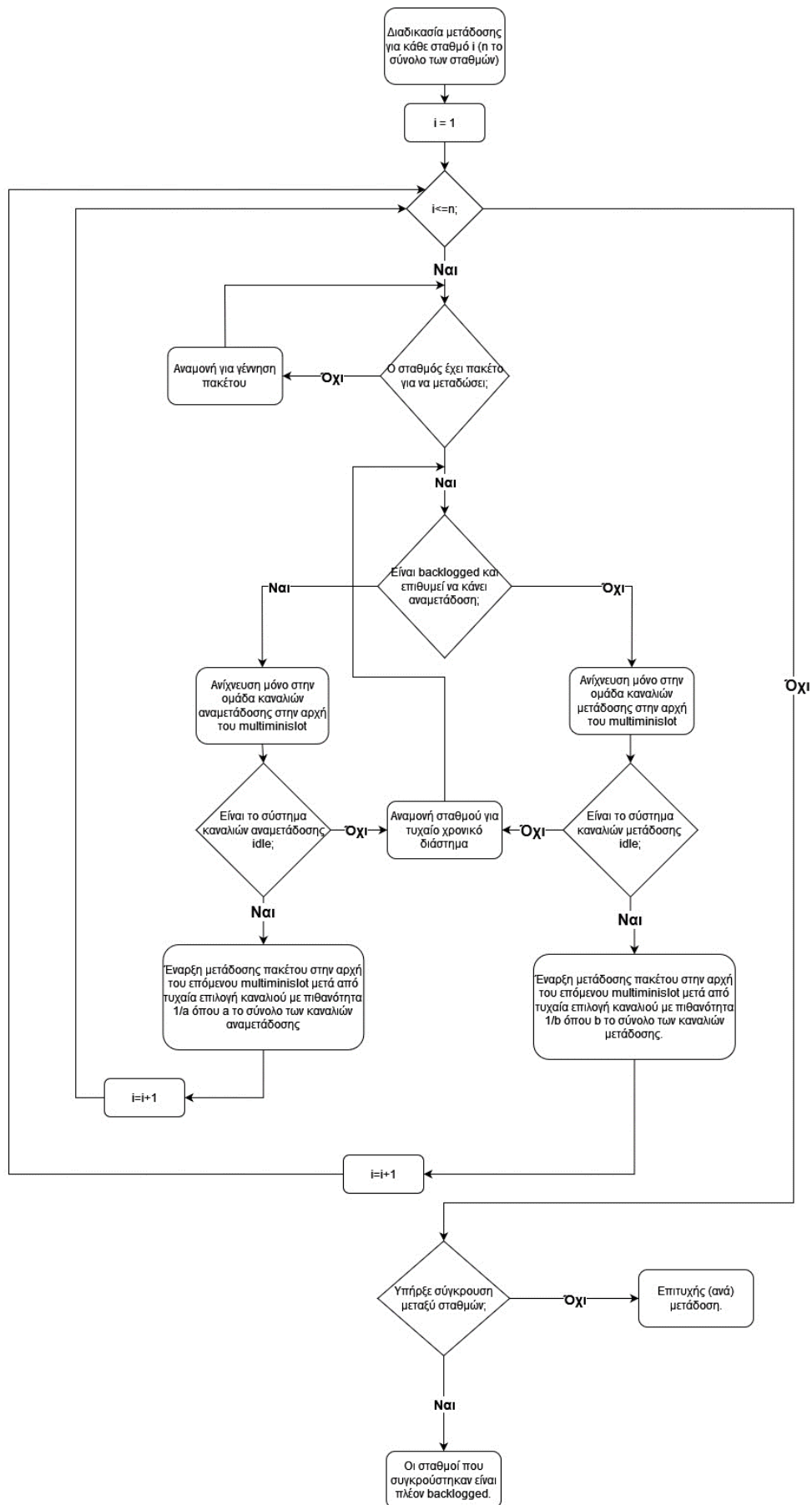
πιθανότητα $1/v$. Υπάρχει όμως κίνδυνος σύγκρουσης μεταξύ δύο διαφορετικών σταθμών. Αυτό συμβαίνει επειδή στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο ανιχνεύεται το ενιαίο σύστημα καναλιών και όχι το κάθε κανάλι ξεχωριστά. Δηλαδή, το σύστημα θα είναι idle όταν στην αρχή ενός multiminislot δεν γίνεται καμία (ανα)μετάδοση και busy όταν γίνεται μετάδοση σε οποιοδήποτε από τα κανάλια του. Υπάρχει περίπτωση δύο ή περισσότεροι σταθμοί να επιλέξουν διαφορετικά κανάλια και να (ανα)μεταδώσουν στην αρχή του επόμενου multiminislot κανονικά αλλά μπορεί και να επιλέξουν το ίδιο κανάλι επειδή η επιλογή γίνεται τυχαία. Σε αυτή τη περίπτωση θα αλλοιωθούν τα πακέτα λόγω σύγκρουσης και οι σταθμοί θα αλλάξουν σε κατάσταση backlogged.



Εικόνα 54: Η διαδικασία μετάδοσης σε διάγραμμα ροής για το πρωτόκολλο CSMA-1

Το πρωτόκολλο CSMA-2 βασίζεται στο CSMA-1 και έχει ως σκοπό την βελτίωση του. Τα κανάλια πλέον διαχωρίζονται σε δύο ομάδες όπου η μία ομάδα είναι τα κανάλια που μπορούν να επιλέξουν μόνο οι free σταθμοί (Κανάλια Μετάδοσης – Transmission Channels – V_f) ενώ η άλλη ομάδα αποτελείται από τα κανάλια που μπορούν να χρησιμοποιήσουν μόνο οι busy σταθμοί (Κανάλια Αναμετάδοσης – Retransmission Channels - V_b) και είναι πάντα το σύνολο των καναλιών (V) πλην τα κανάλια μετάδοσης που είναι μόνο για τους free σταθμούς (V_f), δηλαδή $V_b = V - V_f$.

Ουσιαστικά με αυτόν τον τρόπο διαχωρίζεται το multichannel σε δύο ανεξάρτητες και ξεχωριστές ομάδες καναλιών και ως αποτέλεσμα αυτού του διαχωρισμού η ανίχνευση θα γίνεται και αυτή ξεχωριστά σε κάθε ομάδα. Οι κανόνες λειτουργίας είναι σχεδόν ίδιοι με αυτούς του CSMA-1. Υπάρχουν όμως διαφορές. Για παράδειγμα, οι free σταθμοί πλέον είναι υποχρεωμένοι να μεταδίδουν μόνο στην ομάδα καναλιών μετάδοσης. Όταν αποκτήσει ο free σταθμός πακέτο, θα ανιχνεύσει μόνο την ομάδα καναλιών μετάδοσης στην αρχή του multiminislot και μόνο όταν αυτή είναι idle θα μεταδώσει στην αρχή του επόμενου multiminislot, αλλιώς αν είναι busy η συγκεκριμένη ομάδα καναλιών ο σταθμός θα πρέπει να περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα και να ξανακάνει ανίχνευση. Ομοίως οι backlogged σταθμοί χρησιμοποιούν μόνο την ομάδα καναλιών αναμετάδοσης. Πρώτα περιμένουν για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα και στην συνέχεια ανιχνεύουν την ομάδα καναλιών αναμετάδοσης στην αρχή του multiminislot και αν είναι αυτή είναι idle θα ξεκινήσει η μετάδοση στην αρχή του επόμενου multiminislot, διαφορετικά αν είναι busy το σύστημα θα περιμένουν ένα τυχαίο χρονικό διάστημα και θα επαναλάβουν την διαδικασία ανίχνευσης.



Εικόνα 55: Η διαδικασία μετάδοσης σε διάγραμμα ροής για το πρωτόκολλο CSMA-2

Στο παραπάνω σχήμα υπάρχουν οι δύο πιθανότητες $1/a$ και $1/b$ επειδή πλέον δεν έχουμε ένα ενιαίο σύνολο καναλιών αλλά δύο ανεξάρτητα σύνολα και επομένως οι πιθανότητες θα πρέπει και αυτές να διαχωριστούν και να είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη. Υπάρχουν πλέον και δύο διαφορετικοί κύκλοι αντί για έναν όπως στο CSMA-1 επειδή γίνονται ανιχνεύσεις σε δύο ανεξάρτητα συστήματα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ/ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

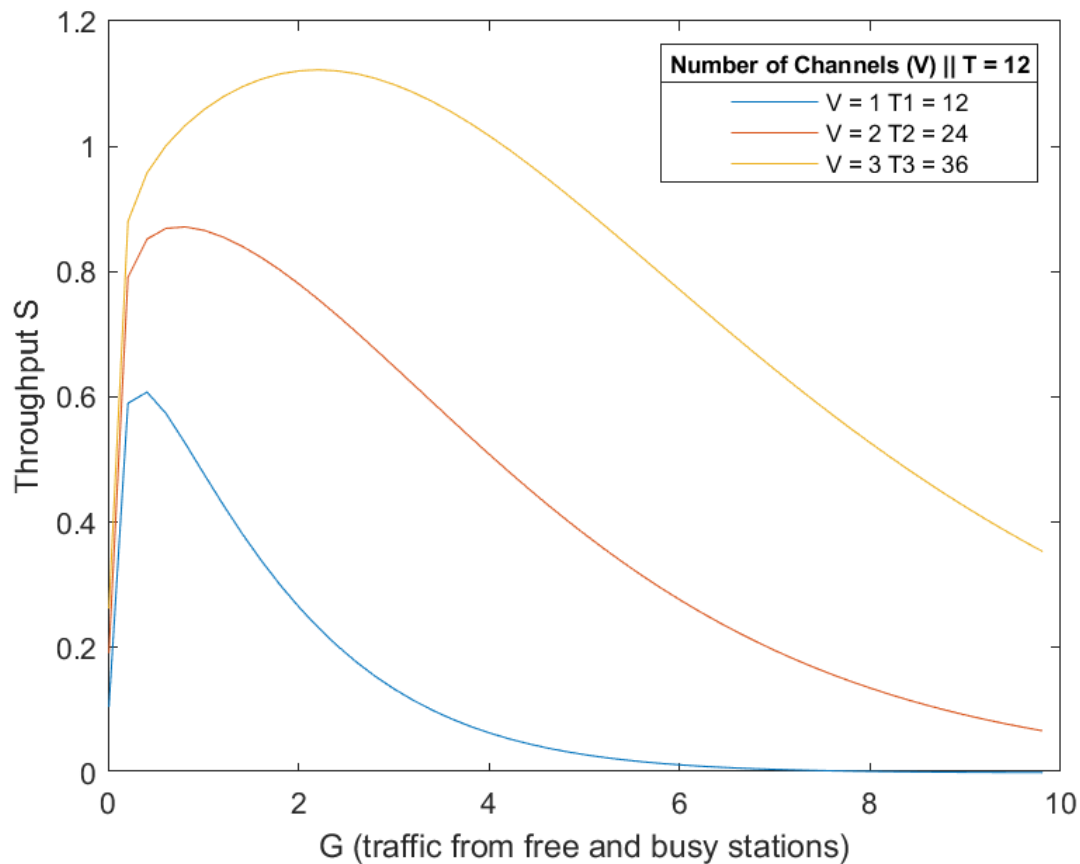
Η μελέτη απόδοσης των δύο πρωτοκόλλων CSMA έγινε με την βοήθεια προγράμματος εξομοίωσης σε περιβάλλον MATLAB. Το πρόγραμμα εξομοίωσης έγινε με βάση μαθηματικής μοντελοποίησης από paper ^[35], η οποία είναι σχετική με τα πρωτόκολλα CSMA που προτείνονται. Η ροή πακέτων στα δύο πρωτόκολλα CSMA ακολουθεί διαδικασία Poisson, κάτι που λαμβάνεται υπόψη από την συγκεκριμένη σχέση. Η σχέση συνδέεται με τα διαγράμματα ροής των δύο πρωτοκόλλων CSMA που απεικονίζονται στο Κεφάλαιο 5 και χρησιμοποιείται για να βρεθεί το throughput και στα δύο πρωτόκολλα. Κάνοντας εξομοίωση την παρακάτω σχέση κάνουμε ουσιαστικά και εξομοίωση τα διαγράμματα ροής. Όπου G αφορά την κίνηση (traffic) των busy και free σταθμών. Το T αντιστοιχεί στον χρόνο μετάδοσης πακέτου και το ν αφορά τον αριθμό των καναλιών.

$$S = T \times G \times e^{-G/v} / [1 + (T + 1) \times (1 - e^{-G})] \quad (1)$$

Μέσω της εξίσωσης (1) μπορούμε να βρούμε και το κανονικοποιημένο (normalized) throughput διαιρώντας το throughput S με τον αριθμό των καναλιών ν:

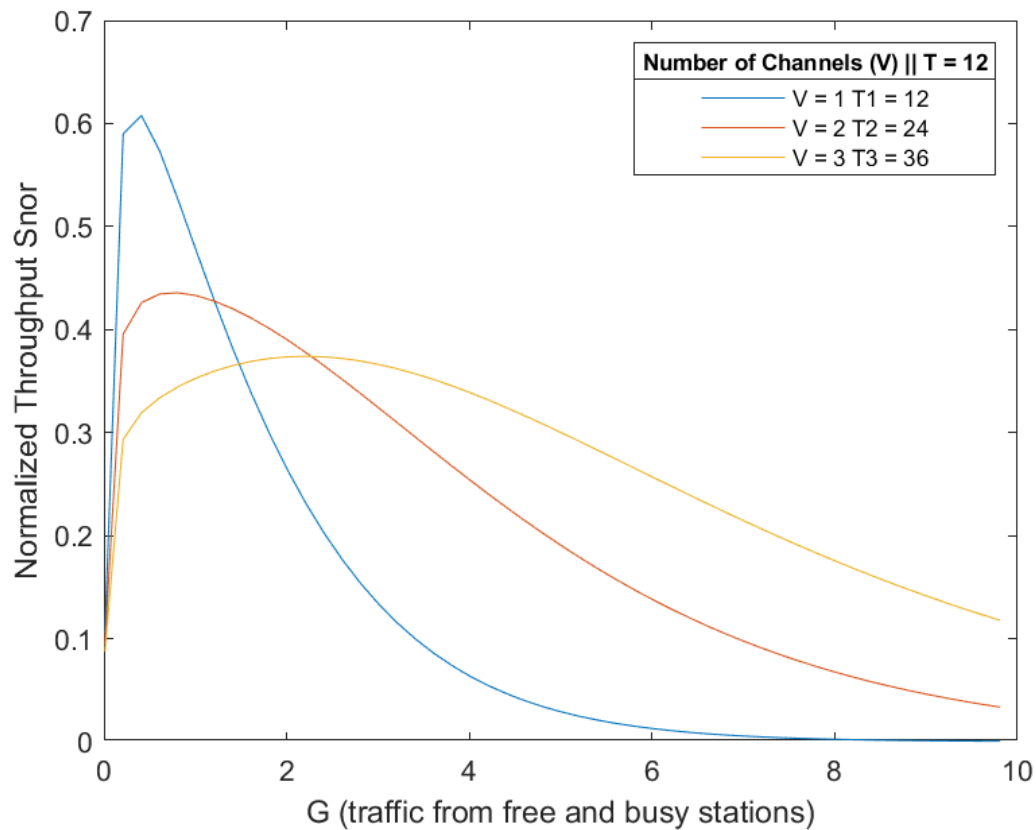
$$S_{nor} = S/v \quad (2)$$

Στα διαγράμματα παρακάτω φαίνονται το throughput S και το normalized throughput S_{nor} για διαφορετικές τιμές. Υποθέτουμε ότι ο χρόνος μετάδοσης πακέτου είναι $T = 12$ με πακέτο μεγέθους 1500 bytes. Συγκρίνονται κάθε φορά τα throughputs για διαφορετικό αριθμό καναλιών ν. Σε κάποια διαγράμματα γίνονται οι συγκρίσεις μεταξύ ν = 1,2 και 3 καναλιών ενώ σε άλλα γίνονται μεταξύ ν = 10,20,30. Το T παρ' όλο που είναι 12 μεταβάλλεται ανάλογα με το πλήθος των καναλιών έτσι ώστε να ισχύει $T_v = T \times v$. Αυτό σημαίνει ότι για 1 κανάλι το $T_1 = 12$ αλλά για 2 κανάλια θα ισχύει $T_2 = 12 \times 2 \Rightarrow T_2 = 24$. Για το πρωτόκολλο CSMA-1, το G ορίζεται ως $G = \alpha + \lambda$ όπου το α είναι η κίνηση από τους busy σταθμούς ενώ το λ είναι η κίνηση από τους free σταθμούς. Στο πρωτόκολλο CSMA-1 η κίνηση από τους free και busy σταθμούς δεν διαχωρίζεται και μετριέται ως σύνολο και για αυτό το G εδώ είναι η συνολική κίνηση από όλους τους σταθμούς. Οι παρακάτω διαδικασίες γίνονται ξεκινώντας από $i = 0.01$ μέχρι $i = 10$ με βήμα 0.2.



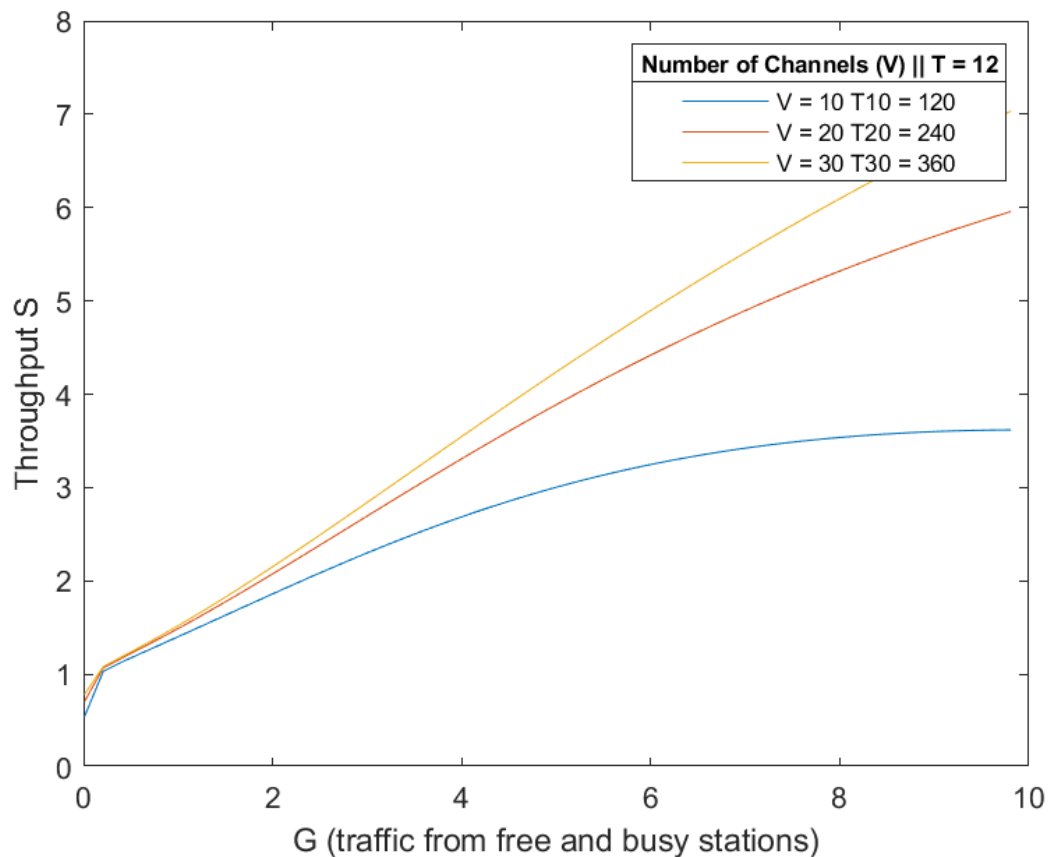
Εικόνα 56: Throughput S για $v = 1, 2, 3$ κανάλια με $T = 12$. ($G = 0.01$ έως $G = 10$ με βήμα 0.2)

Παρατηρούμε ότι το throughput στην αρχή είναι αρκετά υψηλό ενώ στην συνέχεια μειώνεται. Η μείωση στο throughput συμβαίνει λόγω συγκρούσεων. Στο σύστημα που έχει ένα μόνο κανάλι η εξυπηρέτηση για μικρά φορτία γίνεται κανονικά αλλά όσο αυξάνεται το φορτίο δεν είναι αρκετό το ένα κανάλι για πλήρης εξυπηρέτηση με αποτέλεσμα να πέφτει απότομα η αποδοτικότητα λόγω συγκρούσεων μεταξύ σταθμών που επιλέγουν το ίδιο κανάλι, το οποίο στην περίπτωση αυτή είναι και το μοναδικό κανάλι. Στα συστήματα δύο ή τριών καναλιών δεν είναι η μείωση του throughput το ίδιο απότομη επειδή υπάρχουν περισσότερα κανάλια για να εξυπηρετήσουν τους σταθμούς που μεταδίδουν. Με άλλα λόγια, η πιθανότητα να επιλέξουν δύο ή περισσότεροι σταθμοί το ίδιο κανάλι είναι μικρότερη από ότι σε ένα σύστημα ενός καναλιού και επομένως ο αριθμός των καναλιών που μπορεί να βρεθούν αδρανής και να είναι διαθέσιμα να εξυπηρετήσουν τους σταθμούς είναι μεγαλύτερος. Έτσι σε σύστημα με 3 κανάλια μπορούμε να δούμε ότι η μείωση του throughput είναι μικρότερη επειδή το σύστημα με 3 κανάλια μπορεί να ανταπεξέλθει καλύτερα από ότι τα συστήματα με λιγότερα κανάλια.



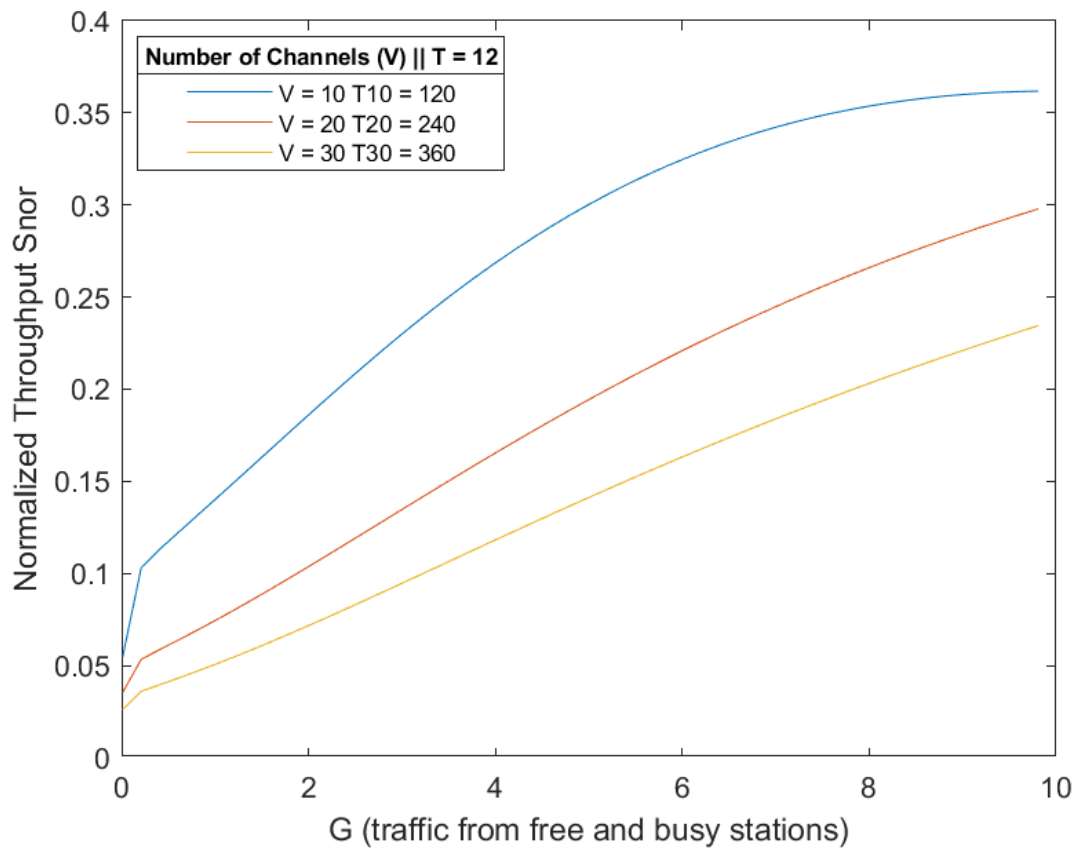
Εικόνα 57: Normalized throughput S_{nor} για $v = 1, 2, 3$ κανάλια με $T = 12$ ($G = 0.01$ έως $G = 10$ με βήμα 0.2)

Στο διάγραμμα κανονικοποιημένου throughput μπορούμε να δούμε την απόδοση του κάθε καναλιού σε ένα σύστημα καναλιών αντί για ολόκληρο το σύστημα καναλιών. Η διαφορά είναι ότι υπάρχει μία σταθερότητα στο normalized throughput και στην μείωση του. Για παράδειγμα οι καμπύλες που είναι για $v = 2$ και $v = 3$ στο διάγραμμα για τα normalized throughputs έχουν λιγότερες απότομες αρνητικές κλίσεις από ότι οι αντίστοιχες στο διάγραμμα για τα μη κανονικοποιημένα throughputs. Παρατηρούμε ότι και πάλι σε μικρότερα φορτία η απόδοση είναι αυξημένη επειδή μπορούν να εξυπηρετηθούν οι σταθμοί από τα συστήματα με 1,2,3 κανάλια αλλά σε μεγαλύτερα φορτία πάλι είναι πιο αποδοτικά τα συστήματα με 3 κανάλια επειδή είναι περισσότερα τα κανάλια και ενώ αυξάνεται ο αριθμός των πιθανών συγκρούσεων παραμένει να είναι μικρότερος από ότι σε συστήματα με λιγότερα κανάλια λόγω του ότι υπάρχουν περισσότερες πιθανές επιλογές καναλιών από τους σταθμούς.



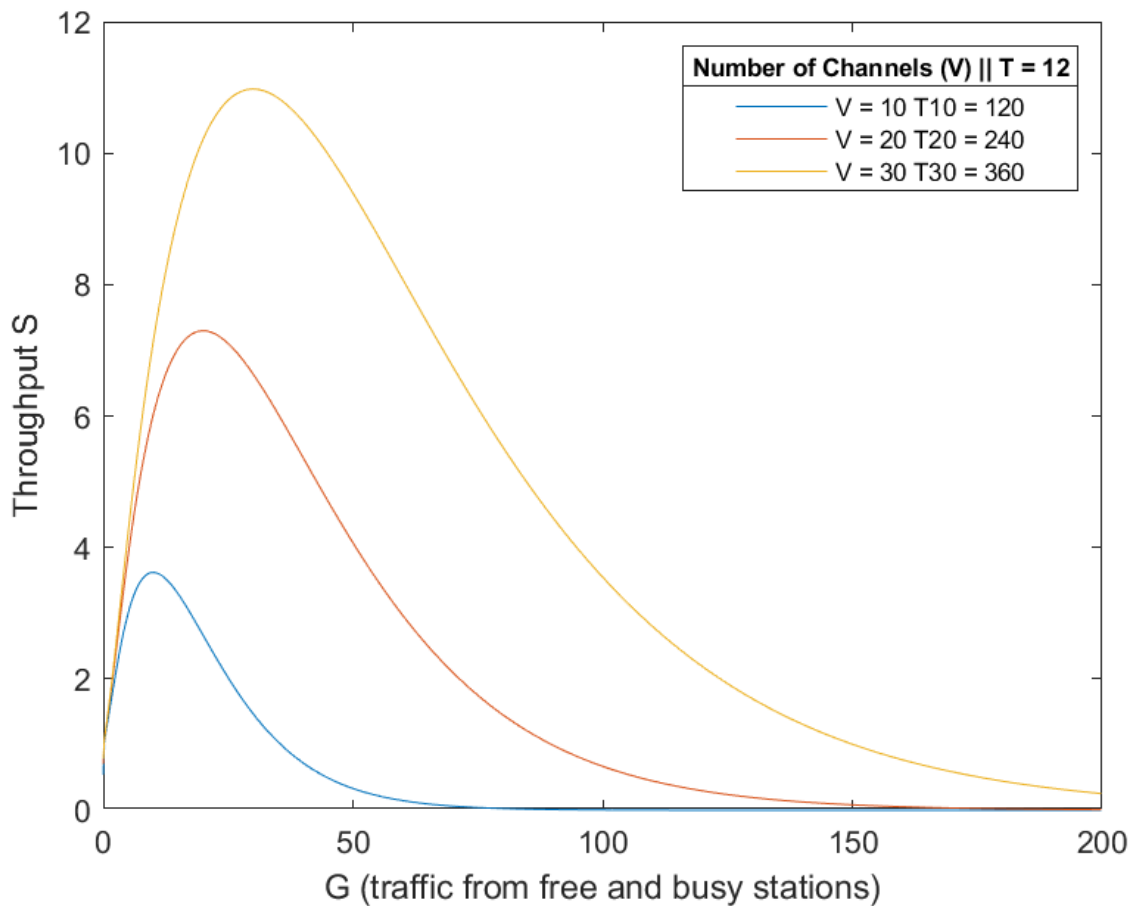
Εικόνα 58: Throughput S για $v = 10, 20, 30$ κανάλια με $T = 12$ ($G = 0.01$ έως $G = 10$ με βήμα 0.2).

Στο παραπάνω διάγραμμα έχουμε πλέον συγκρίσεις μεταξύ συστημάτων με 10, 20 και 30 κανάλια. Εδώ παρατηρούμε αυξήσεις χωρίς όμως να υπάρχει κάποια μείωση όσο το φορτίο αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει επειδή στο σημείο που σταματάει το διάγραμμα δεν έχει κορεστεί το δίκτυο. Το δίκτυο κάθε φορά έχει απλά πάρα πολλά κανάλια και μπορεί να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των σταθμών με το παραπάνω. Βρισκόμαστε ακόμα στην «αρχή» του διαγράμματος, ενώ η καμπύλη είναι ακόμα με αύξουσα κλίση, χωρίς να έχουμε φτάσει ακόμα στο μέγιστο throughput. Για να παρατηρήσουμε την μείωση που είδαμε νωρίτερα για λιγότερα κανάλια θα πρέπει να αυξηθεί το φορτίο παραπάνω σε βαθμό που να μην μπορούν να ανταπεξέλθουν τόσο καλά τα κανάλια.



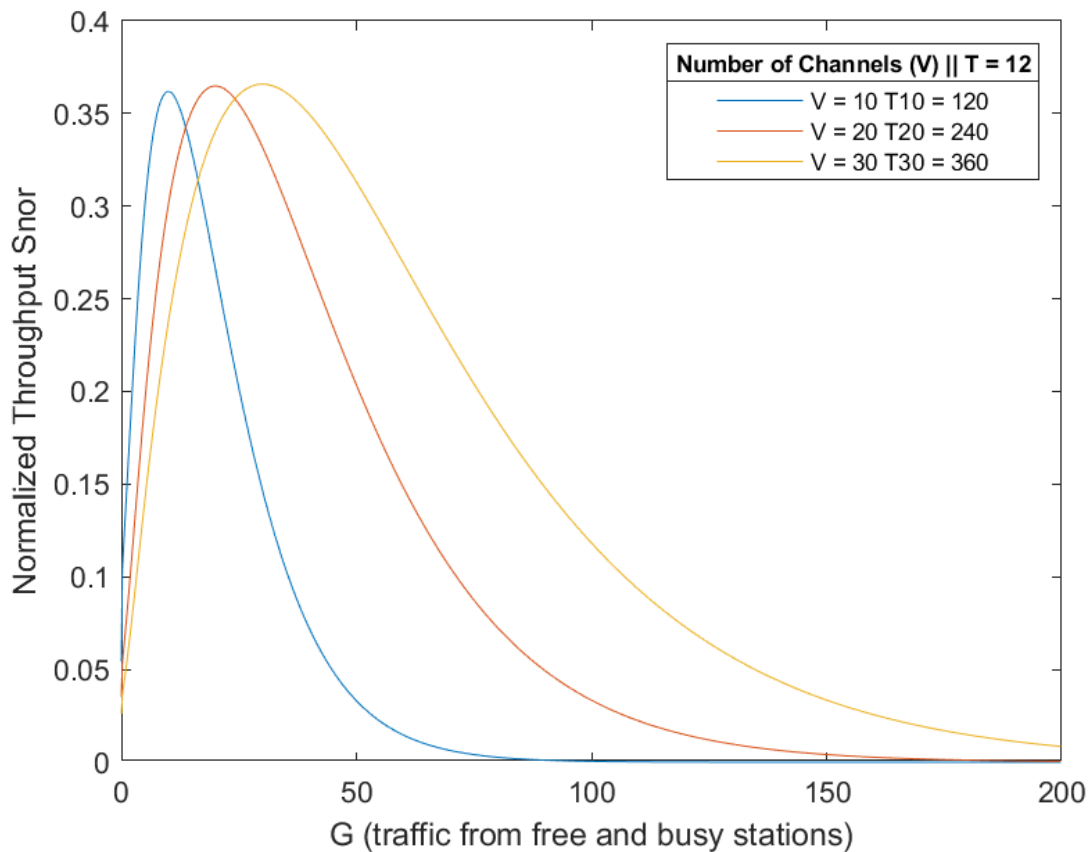
Εικόνα 59: Normalized throughput S_{nor} για $v = 10, 20, 30$ κανάλια με $T = 12$ ($G = 0.01$ έως $G = 10$ με βήμα 0.2)

Το ίδιο παρατηρείται και εδώ με το αμέσως προηγούμενο διάγραμμα με την διαφορά ότι τώρα πρόκειται για normalized throughput όπου παρατηρείται η απόδοση του κάθε καναλιού ενός συστήματος όσο πιο πολύ αυξάνεται το φορτίο αλλά εδώ, όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα, το φορτίο δεν είναι αρκετά μεγάλο για να δημιουργήσει προβλήματα όπως για παράδειγμα αυξημένο ρυθμό συγκρούσεων μεταξύ των σταθμών. Το φορτίο είναι απλά τόσο χαμηλό για τα συγκεκριμένα συστήματα και επομένως εξυπηρετείται τόσο άριστα που δεν μπορούμε να δούμε κάποια ιδιαίτερη μείωση λόγω συγκρούσεων. Θα χρειαστεί να αυξήσουμε το φορτίο σημαντικά.



Εικόνα 60: Throughput S για $v = 10, 20, 30$ κανάλια με $T = 12$ με πολύ μεγαλύτερο φορτίο. ($G = 0.01$ έως $G = 10$ με βήμα 0.2)

Μετά την αύξηση του φορτίου, μπορούμε πλέον να δούμε καλύτερα την δυσκολία που σταδιακά αντιμετωπίζουν τα συστήματα με 10, 20 και 30 κανάλια. Πριν, είχε αυξηθεί ο αριθμός των καναλιών χωρίς όμως να γίνει το ίδιο και με το φορτίο με αποτέλεσμα τα κανάλια να «υπερεξυπηρετούν» τους σταθμούς ενώ αυτή τη στιγμή βλέπουμε το throughput για φορτίο που είναι πολύ μεγαλύτερο από το αρχικό. Οι παρατηρήσεις είναι παρόμοιες με αυτές για μη κανονικοποιημένο throughput για 1, 2 και 3 κανάλια με την διαφορά ότι βρισκόμαστε σε μεγαλύτερη κλίμακα.



Εικόνα 61: Normalized throughput S_{nor} για $v = 10, 20, 30$ κανάλια με $T = 12$ με πολύ μεγαλύτερο φορτίο. ($G = 0.01$ έως $G = 10$ με βήμα 0.2)

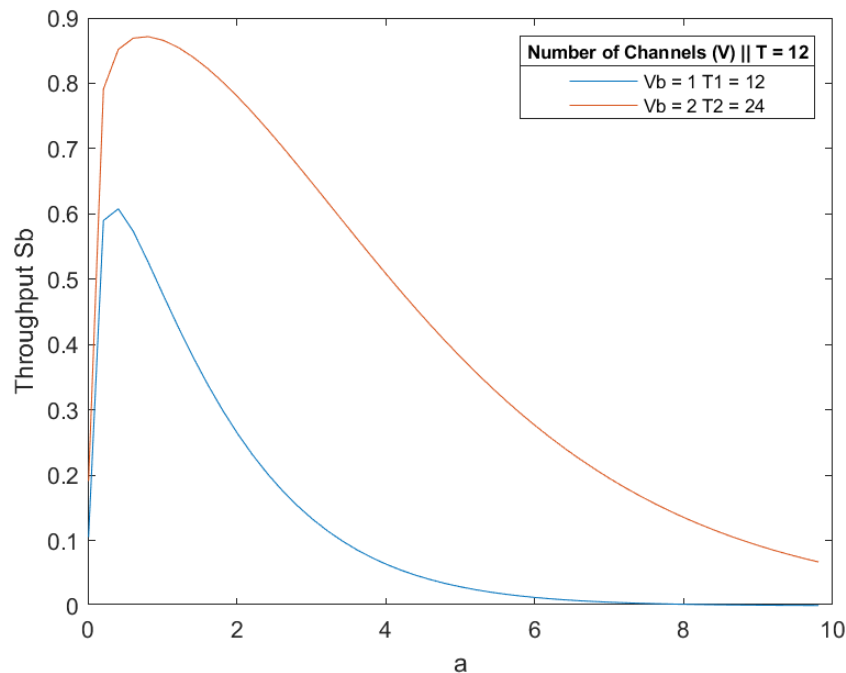
Όπως και για την περίπτωση normalized throughput για 1,2 και 3 κανάλια πάλι παρατηρούμε ότι υπάρχει μία σταθερότητα στο διάγραμμα σε σχέση με το αμέσως προηγούμενο που ήταν το μη κανονικοποιημένο throughput. Οι μειώσεις είναι πιο σταδιακές με λιγότερο απότομες αρνητικές κλίσεις καμπυλών. Η διαφορά είναι ότι σε αντίθεση με την περίπτωση normalized throughput για 1,2 και 3 κανάλια όπου ήταν εμφανείς οι διαφορές στα throughputs, εδώ είναι όλα περίπου το ίδιο στην αρχή και ξεκινάνε να διαφέρουν σταδιακά καθώς αυξάνεται το φορτίο. Η μείωση είναι πιο απότομη όσο πιο μικρότερος είναι ο αριθμός των καναλιών.

Στο πρωτόκολλο CSMA-2 η σημαντική διαφορά είναι ότι πλέον χωρίζεται το ενιαίο σύστημα καναλιών σε δύο διαφορετικές ομάδες καναλιών. Η μία ομάδα καναλιών είναι η ομάδα καναλιών μετάδοσης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο από σταθμούς που είναι free, και η ομάδα καναλιών αναμετάδοσης, η οποία χρησιμοποιείται μόνο από σταθμούς που είναι busy. Για τον υπολογισμό του throughput θα πρέπει να γίνουν οι υπολογισμοί κάθε φορά με διαφορετική κίνηση G . Ενώ στο πρωτόκολλο CSMA-1 η κίνηση αποτελούνταν από την κίνηση από τους busy σταθμούς α και από την κίνηση από τους free σταθμούς λ , εδώ το G αλλάζει ανάλογα με το τι υπολογίζεται.

Για να βρεθεί το throughput S_f στην ομάδα καναλιών μετάδοσης, οι υπολογισμοί θα γίνουν με την προϋπόθεση ότι πλέον ισχύει $G = \lambda$ και όχι $G = \alpha + \lambda$ επειδή η ομάδα καναλιών μετάδοσης χρησιμοποιείται για να μεταδίδουν μόνο οι free σταθμοί και επομένως μας αφορά μόνο η κίνηση των free σταθμών.

Ομοίως για τον υπολογισμό throughput S_b στην ομάδα καναλιών αναμετάδοσης οι υπολογισμοί γίνονται για $G = \alpha$ αντί για $G = \alpha + \lambda$ επειδή η ομάδα καναλιών αναμετάδοσης

χρησιμοποιείται μόνο από τους busy σταθμούς για να μεταδώσουν και επομένως μας αφορά μόνο η κίνηση των busy σταθμών.



Εικόνα 62: Throughput S_b της ομάδας καναλιών αναμετάδοσης για $V_b = 1,2$ σε σύστημα με συνολικό αριθμό καναλιών $v = 3$ για $T = 12$. ($a = 0.01$ έως $a = 10$ με βήμα 0.2)

Στο παραπάνω σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε το throughput S_b της ομάδας καναλιών αναμετάδοσης ανάλογα με το πόσα κανάλια διαθέτει η ομάδα αυτή. Όταν η ομάδα καναλιών αναμετάδοσης αποτελείται από 2 κανάλια, το throughput είναι μεγαλύτερο από όταν η ομάδα καναλιών διαθέτει μόνο ένα κανάλι για τους busy σταθμούς. Επομένως προτιμάται ο αριθμός των καναλιών της ομάδας αναμετάδοσης να είναι όσο πιο μεγαλύτερος γίνεται.

Επειδή έχουμε χωρίσει το σύνολο των καναλιών σε δύο ομάδες, έχουμε δύο throughputs S_b (για την ομάδα καναλιών αναμετάδοσης) και S_f (για την ομάδα καναλιών μετάδοσης). Αυτό σημαίνει ότι το τελικό κανονικοποιημένο throughput S_{nor} θα είναι το άθροισμα της κανονικοποιημένης S_b και κανονικοποιημένης S_f . Αυτό δεν συμβαίνει στο CSMA-1 επειδή προκύπτει κατευθείαν το κανονικοποιημένο throughput S_{nor} από τις εξισώσεις (1) και (2). Το S_b προκύπτει από την εξίσωση (1) με την διαφορά ότι αντικαθιστούμε το v με V_b και το G με το a επειδή μας αφορούν μόνο τα κανάλια για τους busy σταθμούς και η κίνηση των busy σταθμών.

$$S_b = T \times a \times e^{-a/vb} / [1 + (T + 1) \times (1 - e^{-a})] \quad (3)$$

Το ίδιο ισχύει και για το S_f . Προκύπτει από την εξίσωση (1) αλλά αντί για v έχουμε V_f και αντί για G έχουμε το λ επειδή μας ενδιαφέρει μόνο η κίνηση των free σταθμών και τα κανάλια για αυτούς.

$$S_f = T \times \lambda \times e^{-\lambda/vf} / [1 + (T + 1) \times (1 - e^{-\lambda})] \quad (4)$$

Στον πίνακα παρακάτω έχουμε T που είναι ο χρόνος μετάδοσης πακέτου, V_f ο αριθμός των καναλιών της ομάδας μετάδοσης (που χρησιμοποιούν μόνο οι free σταθμοί), V_b ο αριθμός των

καναλιών της ομάδας αναμετάδοσης (που χρησιμοποιούν μόνο οι busy σταθμοί), G η κίνηση των free και των busy σταθμών, α η κίνηση μόνο των busy σταθμών, λ η κίνηση μόνο των free σταθμών, $S_{nor(CSMA-1)}$ το κανονικοποιημένο throughput του πρωτοκόλλου CSMA-1 για κίνηση G , $S_{f(nor)}$ το κανονικοποιημένο throughput του CSMA-2 για $G = \lambda$, $S_{b(nor)}$ το κανονικοποιημένο throughput του CSMA-2 για $G = \alpha$ και $S_{nor(CSMA-2)}$ το άθροισμα των $S_{b(nor)}$ και $S_{f(nor)}$. Τα κανονικοποιημένα throughputs του CSMA-2 προκύπτουν από την εξίσωση (2) όπου για το $S_{f(nor)}$ αντικαθιστούμε το S με το S_f και το v με το V_b ενώ για το $S_{b(nor)}$ αντικαθιστούμε το S με το S_b και το v με το V_f .

T	v	v_f	v_b	α	λ	$G = \alpha + \lambda$	$S_{nor(CSMA-1)}$	$S_{f(nor)}$	$S_{b(nor)}$	$S_{nor(CSMA-2)}$
50	5	4	1	1.61	0.41	2.02	0.29770	0.25020	0.32834	0.57854
50	5	3	2	1.61	0.41	2.02	0.29770	0.31297	0.40433	0.71730
50	5	2	3	1.61	0.41	2.02	0.29770	0.41422	0.36481	0.77903
50	5	1	4	1.61	0.41	2.02	0.29770	0.57894	0.31845	0.89739
40	4	3	1	1.01	0.81	1.82	0.32621	0.33957	0.46019	0.79976
40	4	2	2	1.01	0.81	1.82	0.32621	0.42680	0.42472	0.85152
40	4	1	3	1.01	0.81	1.82	0.32621	0.50704	0.34829	0.85533
30	3	2	1	1.21	0.61	1.82	0.36768	0.42460	0.41379	0.83839
30	3	1	2	1.21	0.61	1.82	0.36768	0.55028	0.41984	0.97012

Πίνακας 1: Σύγκριση των δύο πρωτοκόλλων για διαφορετικές αναλογίες καναλιών και φορτία.

Παρατηρούμε ότι το πρωτόκολλο CSMA-2 είναι πιο αποδοτικό από το πρωτόκολλο CSMA-1 και αυτό ισχύει για όλες τις τιμές. Επίσης, η αναλογία των καναλιών παίζει και αυτή ρόλο στην απόδοση. Για $T = 30, 40, 50$ σε σύστημα τριών, τεσσάρων, πέντε καναλιών αντίστοιχα, η απόδοση αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με την αναλογία των καναλιών ομάδας μετάδοσης και καναλιών ομάδας αναμετάδοσης για τις ίδιες τιμές α και λ (συγκεκριμένες σταθερές τιμές λ και α για κάθε σύστημα). Παρατηρούμε ότι κάθε φορά το μέγιστο throughput προκύπτει όταν υπάρχει μία συγκεκριμένη αναλογία. Η ιδανική αναλογία καναλιών για κάθε ομάδα έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουμε το throughput θα πρέπει να είναι $V_b = V - V_f$ όπου V ο συνολικός αριθμός των καναλιών ολόκληρου του συστήματος και $V_f = 1$. Αυτό παρατηρείται για $T = 50$, $V = 5$ κανάλια με την αναλογία καναλιών $V_f = 1$, $V_b = 4$, για $T = 40$, $V = 4$ κανάλια με την αναλογία καναλιών $V_f = 1$, $V_b = 3$ και για $T = 30$, $V = 3$ με την αναλογία καναλιών $V_f = 1$, $V_b = 2$.

Ένα σύστημα που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο CSMA-1 μπορεί να διαχειριστεί μικρά φορτία όλο και πιο αποδοτικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των καναλιών. Για μεγαλύτερα φορτία,

καθώς αυξάνεται ο αριθμός των καναλιών η μείωση της απόδοσης είναι λιγότερο απότομη επειδή υπάρχουν περισσότερα κανάλια να εξυπηρετήσουν τους σταθμούς και επομένως μικρότερη πιθανότητα σύγκρουσης. Το πρωτόκολλο CSMA-2, το οποίο βασίζεται στο CSMA-1 και το βελτιστοποιεί, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για περιπτώσεις όπου αναμένεται η εκρηκτικότητα κίνησης και επομένως προβλέπεται μεγάλος αριθμός busy σταθμών. Με την ιδανική αναλογία καναλιών μοιράζονται τα κανάλια σε ομάδες καναλιών μετάδοσης και αναμετάδοσης έτσι ώστε οι busy σταθμοί να έχουν περισσότερα κανάλια στην διάθεση τους και να εξυπηρετηθούν πιο γρήγορα από τους σταθμούς free που δεν εκκρεμούν τόσο. Ιδανικά θέλουμε οι busy σταθμοί να έχουν $V_b = V - V_f$ κανάλια που να μπορούν να χρησιμοποιήσουν όπου $V_f = 1$ τα κανάλια που χρησιμοποιούν οι free σταθμοί και V το σύνολο των καναλιών (και των busy και των free σταθμών).

1. "Optical Fiber", The Fiber Optic Association. (23/06/2023)
<https://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>
2. Agrawal, G. P. (2021). Fiber-Optic communication systems. John Wiley & Sons.
3. <https://www.otegroupmuseum.gr/anakalipse/monimi-ekthesi/tilegrafia/>
4. Crisp, J. (2005). Introduction to fiber optics. Elsevier.
5. Azadeh, M. (2009). Fiber Optics Engineering. Springer Science & Business Media.
6. <https://www.nict.go.jp/en/press/2022/11/10-1.html> (23/07/2023)
7. Keiser, G. (2010). Optical Fiber Communications.
8. Louro, Paula & Vieira, Manuela & Fernandes, Miguel & Costa, Joao. (2011). Use of a-SiC:H Photodiodes in Optical Communications Applications. 10.5772/14048.
9. Hecht, J. (2015). Understanding fiber optics. Jeff Hecht.
10. Haykin, S. (2003). Communication Systems, Civilian. Encyclopedia of Physical Science and Technology, 409–432. doi:10.1016/b0-12-227410-5/00125-3
11. Ramaswami, R., Sivarajan, K. N., & Sasaki, G. H. (2009). Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition. <https://www.amazon.com/Optical-Networks-Practical-Perspective-3rd/dp/0123740924>
12. Grami, A. (2016). Communication Networks. Introduction to Digital Communications, 457–491. doi:10.1016/b978-0-12-407682-2.00011-9
13. Comer, D. (2015). *Computer networks and internets*. Addison-Wesley.
14. Grobe, K., & Eiselt, M. (2013). *Wavelength Division Multiplexing: A Practical Engineering Guide*. John Wiley & Sons.
15. Nebeling, M. (2002). CWDM: lower cost for more capacity in the short-haul. *Fiber Network Engineering: Livermore, CA, USA*.
16. Shi, W., Yun, H., Lin, C., Wang, X., Wang, Y., Flueckiger, J., ... & Chrostowski, L. (2013, June). Silicon CWDM demultiplexers using contra-directional couplers. In *CLEO: 2013* (pp. 1-2). IEEE.
17. Durkin, J., Goodman, J., Posse, F., Rezek, M., Wallace, M., & Harris, R. (2012). *Building multiservice transport networks: Buildin Multise Transpo Netw*. Cisco Press.
18. Marakas, G., & O'Brien, J. (2010). *Management Information Systems*. McGraw-Hill Education.
19. Majumdar, A. K. (2019). Basics of worldwide broadband wireless access independent of terrestrial limitations. In *Elsevier eBooks* (pp. 5–38). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813365-1.00002-3>
20. Atmaca, Tülin & Nguyen, Viet Hung. (2011). Optical Metropolitan Networks: Packet Format, MAC Protocols and Quality of Service. 10.1007/978-3-642-02742-0_35.
21. Faircloth, J. (2014). *Networks. Enterprise Applications Administration*, 27–79. doi:10.1016/b978-0-12-407773-7.00002-8
22. <https://www.ibm.com/topics/data-centers> (16/08/2023)
23. <https://cds.cern.ch/journal/CERNBulletin/2015/21/News%20Articles/2014004> (16/8/2023)

24. <https://spectrum.ieee.org/optical-interconnects> (17/08/2023)
25. Agrawal, D. P., & Zeng, Q. (2015). *Introduction to wireless and mobile systems*. Cengage Learning.
26. Austerlitz, H. (2003). Standard hardware interfaces. In *Elsevier eBooks* (pp. 142–190). <https://doi.org/10.1016/b978-012068377-2/50008-5>
27. <https://www.britannica.com/biography/Claude-Chappe#/media/1/106172/128756> (21/8/2023)
28. Mukherjee, B. (2006). *Optical WDM networks*. Springer Science & Business Media.
29. Zhang, J. (1992). Design of new optical fiber transceivers for a MIL-STD-1773 data bus. *Proceedings of the IEEE 1992 National Aerospace and Electronics Conference@m_NAECON 1992*, 1186-1192 vol.3.
30. Ruan, Y., Anerousis, N., Srivatsa, M., Xiao, J., Christner, R. T., Farrolas, L., & Short, J. (2015, May). Measuring enterprise network usage pattern & deploying passive optical LANs. In *2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)* (pp. 890-893). IEEE.
31. “Fiber Optic Local Area Networks”, The Fiber Optic Association. (27/10/2023) <https://www.thefoa.org/tech/ref/appln/OLAN.html>
32. Chadha, D. (2019). *Optical WDM networks: from static to elastic networks*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781119393399>
33. https://20173286.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/20173286/Resource%20Files%20-%20August%202022/Site%20Downloads/Technical%20Papers/Optical_IO_Chiplets_Eliminate_Bottlenecks_to_Unleash_Innovation_2.0%2011-15-2019.pdf?utm_referrer=https%3A%2F%2Ffayarlabs.com%2F (28/10/2023)
34. <https://avicena.tech/technology/> (28/10/2023)
35. Pountourakis, I. E., Sykas, E. D., & Protonotarios, E. (1995). Stability and throughput optimization of multichannel slotted non-persistent CSMA protocol. *Computer Communications*, 18(12), 949–958. [https://doi.org/10.1016/0140-3664\(96\)81594-5](https://doi.org/10.1016/0140-3664(96)81594-5)