



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΕΝΤΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

ΒΑΪΑ ΑΠΟΣΤΟΛΙΔΟΥ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Μπαζιάνα Μπέττυ
Επικουρη Καθηγήτρια

Λαμία 19/10 έτος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΕΝΤΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

ΑΠΟΣΤΟΛΙΔΟΥ ΒΑΪΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Μπαζιάνα Μπέττυ
Επίκουρη Καθηγήτρια

Λαμία 19/10 έτος 2022



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

OPTICAL DATA CENTER NETWORKS AND ARCHITECTURES

APOSTOLIDOU VAIA

FINAL THESIS

ADVISOR

Baziana Betty
Assistant Professor

Lamia 19/10-year 2022

«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 επεξεργάσθηκαν, 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 αντιγραφής.

Ημερομηνία: 19/10/2022

Ο – Η Δηλ.
Αποστολίδου Βαΐα

(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

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται εκτενής αναφορά στις οπτικές ίνες, στην τεχνολογία WDM, στο πρωτόκολλο CSMA και ειδικότερα στο CSMA/CA, που βρίσκουν εφαρμογή στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα και για την πληρέστερη κατανόηση των εννοιών και του αντικειμένου που πραγματεύεται η εργασία αυτή, θα παρουσιάσουμε αρχικά τις οπτικές ίνες και τις εφαρμογές τους σήμερα. Στην συνέχεια θα επεκταθούμε στην τεχνολογία των δικτύων WDM και ακολούθως θα μελετήσουμε ιδιαίτερα τα δίκτυα κέντρων δεδομένων. Τέλος παρουσιάζεται το πρωτόκολλο CSMA/CA και η λειτουργία του υλοποιημένη με κώδικα, προσομοιώνοντας έτσι ένα δίκτυο των 10 Gb/s. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής παρουσιάζονται και αναλύονται με βάση τις γραφικές παραστάσεις των μέτρων αποδοτικότητας: προσφερόμενο φορτίο, ρυθμαπόδοση, καθυστέρηση, ρυθμός απωλειών.

ABSTRACT

In this thesis, an extensive reference is made to optical fibers, WDM technology, the CSMA protocol and especially the CSMA/CA protocol, which find application in modern telecommunication networks. More specifically, and for a more complete understanding of the concepts and the subject of this paper, we will first present optical fibers and their applications today. We will then expand on the technology of WDM networks and then we will study the data center networks. Finally, the CSMA/CA protocol is presented, and it is simulated for a 10 Gb/s network. The results of this simulation are presented and commented based on the graphical representations of the performance measures: offered load, throughput, delay, dropping rate.

Ακρωνύμια

ADM: add-drop multiplexer	10
BER: bit error rate	7
CSMA: carrier sense multiple access	31
CSMA/CA: carrier sense multiple access/collision avoidance	32
CSMA/CD: carrier sense multiple access/collision detection.....	32
DCN: data center network	26
DEMUX: demultiplexer	38
DSL: digital subscriber line	8
DWDM: dense wavelength division multiplexing.....	16
E/O: electrical to optical	26
EDFA: Erbium-doped fiber amplifier.....	20
EPS: evolved packet system	29
FDM: frequency-division multiplexing	16
FTTC: fiber to the cabinet	14
FTTH: fiber to the home.....	14
InGaAsP: indium gallium arsenide phosphide.....	5
ISDN: integrated services digital network	8
MUX: multiplexer	38
O/E: optical to electrical	29
OCS:optical circuit switched	29
ONU: optical network units	25
ONT: optical network terminal	10
PON: passive optical network.....	11
PSTN: public switched telephone network.....	8
SDH: synchronous digital hierarchy	10
SONET: synchronous optical network	10
TDM:time division multiplexing	16
ToR: top-of-rack	29
VoD: video on demand	14
WAN: wide area network	23
WDM: wave division multiplexing	5

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Οπτικός πομπός	7
Εικόνα 2 Οπτικός δέκτης	7
Εικόνα 3 Ενεργός κόμβος	11
Εικόνα 4 Κόμβος δακτυλίου	12
Εικόνα 5 Παθητικός εξοπλισμός οπτικού δικτύου	13
Εικόνα 6 Ενεργός εξοπλισμός οπτικού δικτύου	13
Εικόνα 7 Η εξέλιξη των συστημάτων DWDM	17
Εικόνα 9 Διάγραμμα δομής ενός συστήματος μετάδοσης WDM.....	18
Εικόνα 8 Λεπτομερές διάγραμμα δομής ενός συστήματος WDM	18
Εικόνα 10 WDM πολυπλέκτης και ενισχυτικές διατάξεις.....	19
Εικόνα 11 Κατηγορίες Οπτικών Δικτύων 2ης Γενιάς.....	21
Εικόνα 12 Παράδειγμα WDM συνδέσμου σημείου-προς-σημείο	22
Εικόνα 13 Γενικευμένη αρχιτεκτονική PON	25
Εικόνα 14 Ηλεκτρικά σε αμιγώς οπτικά δίκτυα	27
Εικόνα 15 Σύγχρονο δίκτυο κέντρου δεδομένων	29
Εικόνα 16 Σύγχρονες αρχιτεκτονικές δικτύων κέντρων δεδομένων (α) υβριδικό (β) αμιγώς οπτικό.....	30
Εικόνα 17 Κατηγορίες Πρωτοκόλλων Πολλαπλής Πρόσβασης.....	31
Εικόνα 18 Λειτουργίες πρόσβασης του CSMA.....	34
Εικόνα 19 Παραλλαγές πρωτοκόλλου CSMA.....	34
Εικόνα 20 Σύνδεση οπτικών δεδομένων εντός rack με τον παθητικό οπτικό συζεύκτη & σύνδεση οπτικών δεδομένων με το διακόπτη ToR.....	37
Εικόνα 21 Δομή διακομιστή στο DCN εντός rack.....	38
Εικόνα 22 Πρώτο μέρος του κώδικα προσομοίωσης.....	41
Εικόνα 23 Δεύτερο μέρος του κώδικα προσομοίωσης	42
Εικόνα 24 Τρίτο μέρος του κώδικα προσομοίωσης.....	43
Εικόνα 25 Συνάρτηση output.....	44
Εικόνα 26 Συνάρτηση εισαγωγής στον buffer	44
Εικόνα 27 Συνάρτηση delay.....	45
Εικόνα 28 Συνάρτηση display.....	45
Εικόνα 29 Συνάρτηση predelay	45
Εικόνα 30 Συνάρτηση διαγραφής από τον buffer.....	46
Εικόνα 31 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμαπόδοση για R=10 Gb/s, S=20, B=200, p=10%, P=576/1500/3000 bytes	47
Εικόνα 32 Προσφερόμενο φορτίο vs καθυστέρηση για R=10 Gb/s, S=20, B=200, p=10%, P=576/1500/3000 bytes	48
Εικόνα 33 Ρυθμαπόδοση vs καθυστέρηση για R=10 Gb/s, S=20, B=200, p=10%, P=576/1500/3000 bytes.....	48
Εικόνα 34 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμός απώλειας για R=10 Gb/s, S=20, B=200, p=10%, P=576/1500/3000 bytes	49
Εικόνα 35 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμαπόδοση για R=10 Gb/s, S=20, B=50/500/800, p=10%, P=1500 bytes	50
Εικόνα 36 Προσφερόμενο φορτίο vs καθυστέρηση για R=10 Gb/s, S=20, B=50/500/800, p=10%, P=1500 bytes	51
Εικόνα 37 Ρυθμαπόδοση vs καθυστέρηση για R=10 Gb/s, S=20, B=50/500/800, p=10%, P=1500 bytes	52
Εικόνα 38 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμός απώλειας για R=10 Gb/s, S=20, B=50/500/800, p=10%, P=1500 bytes	52

Εικόνα 39 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμαπόδοση για $R=10$ Gb/s, $S=20/30/40$, $B=200$, $p=10\%$, $P=1500$ bytes	53
Εικόνα 40 Προσφερόμενο φορτίο vs καθυστέρηση για $R=10$ Gb/s, $S=20/30/40$, $B=200$, $p=10\%$, $P=1500$ bytes	54
Εικόνα 41 Ρυθμαπόδοση vs καθυστέρηση για $R=10$ Gb/s, $S=20/30/40$, $B=200$, $p=10\%$, $P=1500$ bytes	55
Εικόνα 42 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμός απώλειας για $R=10$ Gb/s, $S=20/30/40$, $B=200$, $p=10\%$, $P=1500$ bytes	55
Εικόνα 43 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμαπόδοση για $R=10$ Gb/s, $S=20$, $B=200$, $p=5\%/15\%/25\%$, $P=1500$ bytes	56
Εικόνα 44 Προσφερόμενο φορτίο vs καθυστέρηση για $R=10$ Gb/s, $S=20$, $B=200$, $p=5\%/15\%/25\%$, $P=1500$ bytes	57
Εικόνα 45 Ρυθμαπόδοση vs καθυστέρηση για $R=10$ Gb/s, $S=20$, $B=200$, $p=5\%/15\%/25\%$, $P=1500$ bytes	58
Εικόνα 46 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμός απώλειας για $R=10$ Gb/s, $S=20$, $B=200$, $p=5\%/15\%/25\%$, $P=1500$ bytes	58

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ABSTRACT	II
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	IV
<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....</u>	<u>1</u>
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</u>	<u>3</u>
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	3
1.1.1 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ.....	3
1.2 ΓΕΝΙΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	4
1.3 ΜΕΡΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....	6
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ</u>	<u>8</u>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	8
2.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	10
2.4 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	10
2.5 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	12
2.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	14
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ WDM.....</u>	<u>16</u>
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	16
3.2 ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ WDM	18
3.3 ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ	20
3.3.1 WDM ΔΙΚΤΥΑ ΣΗΜΕΙΟΥ ΠΡΟΣ ΣΗΜΕΙΟ (POINT TO POINT LINK)	21
3.3.2 WDM ΔΙΚΤΥΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗΣ (BROADCAST & SELECT)	22
3.3.3 WDM ΔΙΚΤΥΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (WAVELENGTH ROUTED).....	23
3.3.4 ΔΙΚΤΥΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΖΩΝΗΣ ΜΗΚΩΝ ΚΥΜΑΤΟΣ (WAVEBAND ROUTED).....	24
3.3.5 WDM ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (PASSIVE OPTICAL NETWORKS)	24
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΕΝΤΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</u>	<u>26</u>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	26
4.2 ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ.....	26
4.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟ ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	27
4.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ DCNs.....	28
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ CSMA</u>	<u>31</u>
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	31
5.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.....	32

5.3 ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ CSMA	34
---------------------------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ 37

6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	37
6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΩΔΙΚΑ.....	40
6.3 ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	46
6.3.1 ΠΡΩΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	47
6.3.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ.....	50
6.3.3 ΤΡΙΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	53
6.3.4 ΤΕΤΑΡΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ.....	56
6.4 ΠΟΡΙΣΜΑΤΑ	59

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 60

1.1 Ιστορική Ανασκόπηση

Ακόμη από την αρχαιότητα η ανάγκη για επικοινωνία ήταν επιτακτική. Η χρησιμοποίηση του φωτός αποτέλεσε λύση για το θέμα αυτό στους περισσότερους πολιτισμούς. Τα σήματα της φωτιάς και του καπνού χρησιμοποιούνταν για τη μεταβίβαση των πληροφοριών σε στιγμές σημαντικών γεγονότων. Ως και τα τέλη του 18^{ου} αιώνα οποιαδήποτε συσκευή βοηθούσε στη σηματοδότηση χρησιμοποιήθηκε για την τότε επικοινωνία. Το 1792 υλοποιήθηκε σύστημα για την ανάγκη μετάδοσης πληροφοριών με κωδικοποίηση και για αποστάσεις περίπου 100 χιλιομέτρων με χρήση αναμεταδοτών. Ξεκίνησε από τη Γαλλία και μέχρι τα τέλη του 1830 είχε διαδοθεί και σε όλη την υπόλοιπη Ευρώπη. Τα προαναφερθέντα συστήματα του 19^{ου} αιώνα είχαν πολύ περιορισμένη απόδοση σημειώνοντας ρυθμό μετάδοσης δεδομένων B κάτι λιγότερο από 1 bit ανά δευτερόλεπτο ($B < 1 \text{ b/s}$) [1].

1.1.1 Αναγκαιότητα οπτικών ινών

Για διάρκεια περίπου ενός αιώνα χρησιμοποιήθηκαν συστήματα επικοινωνιών με αναλογικές τεχνικές. Πιο συγκεκριμένα, το 1830 τα σήματα καπνού αντικαταστάθηκαν από τον ηλεκτρισμό και ξεκίνησε η εποχή των ηλεκτρικών επικοινωνιών. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αυξήθηκε αισθητά στα 10 b/s με τη χρήση αναμεταδοτών σε αποστάσεις της κλίμακας των 1000 χιλιομέτρων. Έτσι, οι επικοινωνίες σε μεγάλες αποστάσεις ήταν πλέον εφικτές. Με την ανακάλυψη του τηλεφώνου επήλθαν μεγάλες αλλαγές με βασικότερη αυτή που αφορούσε τα ηλεκτρικά συστήματα που μεταδίδονταν με αναλογικό τρόπο και μέσω ενός συνεχώς μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού ρεύματος [2].

Το 1940 είναι γεγονός η λειτουργία του πρώτου συστήματος ομοαξονικών καλωδίων. Επρόκειτο για ένα σύστημα των 3 MHz που μετέδιδε 300 κανάλια φωνής ή εναλλακτικά ένα απλό τηλεοπτικό κανάλι. Όμως οι υψηλές απώλειες καλωδίων που αυξάνονται γρήγορα σε συστήματα συχνοτήτων πάνω από 10 MHz περιόριζε το εύρος ζώνης τέτοιων συστημάτων. Ο παραπάνω περιορισμός αντιμετωπίστηκε τη χρήση ηλεκτρομαγνητικού κύματος συχνότητας 1-10 GHz σε συστήματα επικοινωνίας με μικροκύματα.

Ιστορικά το 1948 εμφανίζεται το πρώτο μικροκυματικό σύστημα με συχνότητα φέροντος στα 4 περίπου GHz. Έκτοτε υπήρξε σημαντική ανάπτυξη τόσο ομοαξονικών αλλά και μικροκυματικών συστημάτων, τα οποία ανταποκρίνονταν σε ρυθμούς μετάδοσης

έως και 100 Mb/s. Το 1975 τοποθετήθηκε το πιο εξελιγμένο ομοαξονικό σύστημα που λειτουργούσε με ρυθμό 274Mb/s [1]. Η απόσταση μεταξύ των αναγκαίων επαναληπτών του συστήματος ήταν μικρή, περίπου του ενός χιλιομέτρου, συνθήκη που επιβεβαίωσε το μειονέκτημα του ακριβού κόστους παρόμοιων συστημάτων. Στα μικροκυματικά συστήματα, παρόλο που η απόσταση μεταξύ των αναμεταδοτών ήταν μεγάλη, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων περιοριζόταν από τη συχνότητα του φέροντος κύματος. Στο σημείο αυτό τονίζεται πως ως μέτρο αξιολόγησης του συστήματος λαμβάνεται το γινόμενο ρυθμού των bits B επί την απόσταση L μεταξύ των επαναληπτών, $B \times L$.

Από το 1950 ως τα τέλη του 20^{ου} αιώνα υπήρξε η δυνατότητα αύξησης της τιμής του γινομένου σημαντικά εάν και μόνο αν γινόταν χρήση του οπτικού κύματος σαν φέρον κύμα. Όμως τότε δεν ήταν διαθέσιμα ούτε τα κατάλληλα μέσα μετάδοσης, αλλά ούτε και η οπτική πηγή. Το πρόβλημα της οπτικής πηγής επιλύθηκε το 1960 με την ανακάλυψη του laser [3]. Οι έρευνες επικεντρώθηκαν στο να βρεθούν τρόποι ώστε να χρησιμοποιηθεί το laser στις οπτικές επικοινωνίες. Ο περιορισμός του φωτός επιτεύχθηκε με τη χρήση μιας ακολουθίας φακών αερίου. Το 1966 προτείνεται η χρήση οπτικών ινών ως μέσο μετάδοσης κωδικοποιημένης πληροφορίας. Όμως εκείνη την εποχή οι απώλειες στις οπτικές ίνες ήταν της τάξεως των 1000 dB/Km και μεγαλύτερων [4] [5].

Έρευνες απέδειξαν το 1970, τη μείωση των απωλειών της οπτικής ίνας στα 20 dB/Km για περιοχές μήκους κύματος περίπου 1μm [6]. Συγχρόνως γινόταν μια παγκόσμια προσπάθεια για την ανάπτυξη οπτικών συστημάτων επικοινωνίας με τη χρήση μιας οπτικής πηγής και οπτικής ίνας με χαμηλές απώλειες [7]. Παρατηρώντας σε βάθος 30 χρόνων την τεχνολογική πρόοδο που σημειώθηκε, επιτεύχθηκε σημαντική αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, 100000 φορές μεγαλύτερη για αποστάσεις έως και 10000 Km. Έτσι λοιπόν, σταδιακά προέκυψε η αύξηση του γινομένου $B \times L$ της τάξεως του 10^7 km × b/sec συγκριτικά με το οπτικό σύστημα πρώτης γενιάς [1].

1.2 Γενιές οπτικών επικοινωνιών

Από το 1975 ως το 2000 υπήρξε τεράστια πρόοδος στα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών και για αυτό το λόγο μπορούμε πλέον να μιλάμε για τέσσερις παλιότερες γενιές οπτικών συστημάτων αλλά και μία πέμπτη η οποία είναι υπό εξέλιξη. Σε κάθε γενιά το γινόμενο $B \times L$ αρχικά αυξάνεται, όμως στη συνέχεια αρχίζει να γίνεται κορεσμένο, όσο η τεχνολογία ωριμάζει. Η πρώτη γενιά των οπτικών συστημάτων λειτουργούσε στα 0.8 μm χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς laser και έγινε διαθέσιμη εμπορικά το 1980, όπου ύστερα από πολλές δοκιμές και προσπάθειες κατέκτησαν το ρυθμό των 45 Mb/s, ενώ η απόσταση

μεταξύ των επαναληπτών κυμαίνονταν στα 10 χιλιόμετρα. Με την προϋπόθεση ότι θα λειτουργούσε ένα οπτικό σύστημα επικοινωνιών σε 1.3 μm μήκους κύματος και με απώλεια λιγότερο από 1dB/Km, θα μπορούσε να αυξηθεί σημαντικά η απόσταση μεταξύ των επαναληπτών. Σε αυτήν την περιοχή μηκών κύματος παρουσιάζεται ελάχιστη διασπορά από τις οπτικές ίνες [1].

Στη συνέχεια, η δεύτερη γενιά συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες έκανε την εμφάνισή της σε ερευνητικό στάδιο το 1980 με ρυθμό μετάδοσης κάτι λιγότερο από 100 Mb/s, γεγονός που οφείλονταν στη διασπορά στις πολύτροπες οπτικές ίνες. Αυτό το τροχοπέδη ξεπεράστηκε με την εύρεση των μονότροπων ινών. Σε ένα πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακό χώρο, υπήρξε μετάδοση δεδομένων με ρυθμό 2 Gb/s σε απόσταση 44 Km με μονότροπες ίνες. Όταν έγινε εμπορικά διαθέσιμη η δεύτερη γενιά οπτικών συστημάτων παρείχε ρυθμό μετάδοσης 1.7 Gb/s με απόσταση ανάμεσα στους επαναλήπτες περίπου στα 50 Km. Οι απώλειες του συστήματος (1.3 μm) και πάλι περιόρισαν την απόσταση των αναμεταδοτών [1][8].

Η οπτική ίνα παρουσίαζε μεγάλη διασπορά γύρω στα 1.55 μm και έτσι η τρίτη γενιά οπτικών συστημάτων με οπτικές ίνες καθυστέρησε αρκετά. Σημειώνεται πως η χρήση του laser ημιαγωγού InGaAsP ήταν αδύνατη διότι εμφανιζόταν διαπλάτυνση του παλμού ως αποτέλεσμα της ταλάντωσης πολλών διαμηκών τρόπων μετάδοσης. Λύση στο ζήτημα αυτό αποτέλεσαν οι ίνες με ολίσθηση στη διασπορά, που σημείωναν ελάχιστη διασπορά στα 1.55 μm . Το 1985 σε εργαστηριακά πειράματα επιτεύχθηκε ρυθμός μετάδοσης δεδομένων έως και 4 Gb/s σε απόσταση 100 Km, ενώ εν τέλει η τρίτη γενιά ήταν εμπορικά διαθέσιμη το 1990 με ταχύτητα 2.5 Gb/s. Η καλύτερη επίδοση των συγκεκριμένων συστημάτων ήταν εφικτή μόνο με τη χρήση οπτικών ινών με ολίσθηση στη διασπορά σε συνδυασμό με laser με διαμήκη τρόπο μετάδοσης. Αξιοσημείωτο ελάττωμα στα 1.55 μm αποτελούσε το γεγονός πως η αναγέννηση του σήματος ήταν περιοδική με τη χρήση ηλεκτρονικών επαναληπτών με τη μεταξύ τους απόσταση να κυμαίνεται στα 60-70 Km [9].

Η τέταρτη γενιά που ακολουθεί αξιοποιεί την οπτική ενίσχυση με σκοπό την μεγαλύτερη απόσταση ανάμεσα στους ενισχυτές και ταυτόχρονα την πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (wavelength division multiplexing -WDM) για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων. Με την χρήση της τεχνικής WDM το 1992 ξεκίνησε μια νέα εποχή για τις οπτικές επικοινωνίες με οπτική ίνα κατά την οποία τα συστήματα κατάφεραν να λειτουργήσουν με ρυθμό 10 Tb/s μόλις το 2001. Η χρήση των ενισχυτών οπτικών ινών με εμπλουτισμένο έρβιο έρχεται να λύσει το πρόβλημα των απωλειών των οπτικών ινών και τοποθετούνταν κάθε 60-80 Km. Το 1996 υπήρξε επιτυχής μετάδοση των

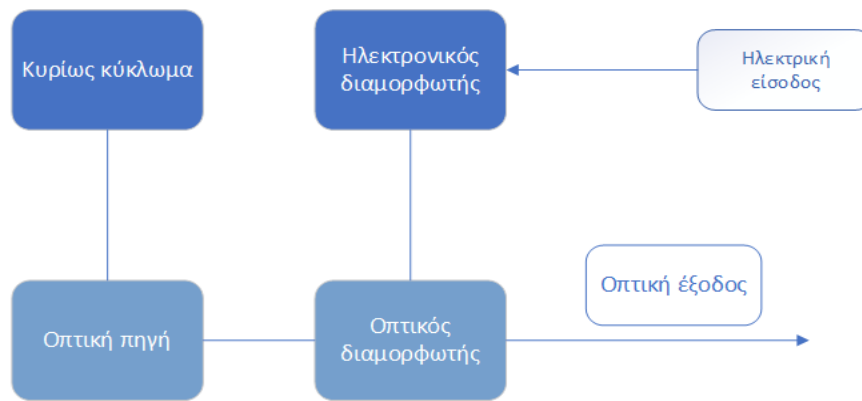
5 Gb/s στα 11300 Km με τη χρήση καλωδίων υποθαλάσσιας ζεύξης ενώ παράλληλα τέθηκε σε λειτουργία και ένα εμπορικό υπερωκεάνιο καλώδιο. Το 1998 τέθηκε σε λειτουργία η ζεύξη των 27300 km οπτικών ινών, που συνέδεε χώρες της Ασίας και της Ευρώπης. Λίγο αργότερα το 2000 υλοποιείται το υποθαλάσσιο καλώδιο το Africa One που κάλυπτε απόσταση 35000 Km, ενώ ένα χρόνο αργότερα επεκτάθηκε και στον Ατλαντικό ωκεανό αλλά και στον Ειρηνικό ωκεανό, εξαιτίας της αυξημένης ανάγκης για υψηλό εύρος ζώνης από τις πολλαπλές εφαρμογές διαδικτύου. Η χωρητικότητα του συστήματος με την μετάδοση πολλών καναλιών αυξήθηκε με την αξιοποίηση της τεχνικής WDM και αποτέλεσε χαρακτηριστικό γνώρισμα των οπτικών συστημάτων της 4^{ης} γενιάς [1][9].

Σκοπός της 5^{ης} γενιάς συστημάτων επικοινωνίας είναι να καταφέρει να αυξήσει το εύρος ζώνης ώστε τα WDM συστήματα να μπορέσουν να λειτουργήσουν σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Η βασική ιδέα είναι η αξιοποίηση καινοτόμων μορφών διαμόρφωσης με τις οποίες η πληροφορία κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας τόσο το πλάτος όσο και τη φάση του οπτικού φορέα. Είναι προφανές πως παρόλο που η οπτική τεχνολογία χρησιμοποιείται σε οπτικά δίκτυα μόνο εδώ και 3 περίπου δεκαετίες, η τεχνολογία έχει παρουσιάσει μεγάλη εξέλιξη, φτάνοντας σε ένα υψηλό στάδιο ωριμότητας [1].

1.3 Μέρη συστήματος οπτικών επικοινωνιών

Ένα γενικό λειτουργικό διάγραμμα ενός συστήματος επικοινωνίας οπτικών ινών απαρτίζεται από έναν οπτικό πομπό, έναν οπτικό δέκτη και ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι, δηλαδή την οπτική ίνα. Το τηλεπικοινωνιακό κανάλι είναι υπεύθυνο για την μεταφορά του οπτικού σήματος από τον πομπό έως τον δέκτη χωρίς να υφίσταται παραμόρφωση. Οι οπτικές ίνες στη θέση του τηλεπικοινωνιακού καναλιού μπορούν να πραγματοποιήσουν μετάδοση του φωτός με χαμηλές απώλειες ισχύος ως 0.2dB/km. Η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος μειώνεται μόλις κατά 1% ύστερα από 100 km. Προφανώς οι απώλειες της οπτικής ίνας καθορίζουν την απόσταση ανάμεσα στους επαναλήπτες [1][8].

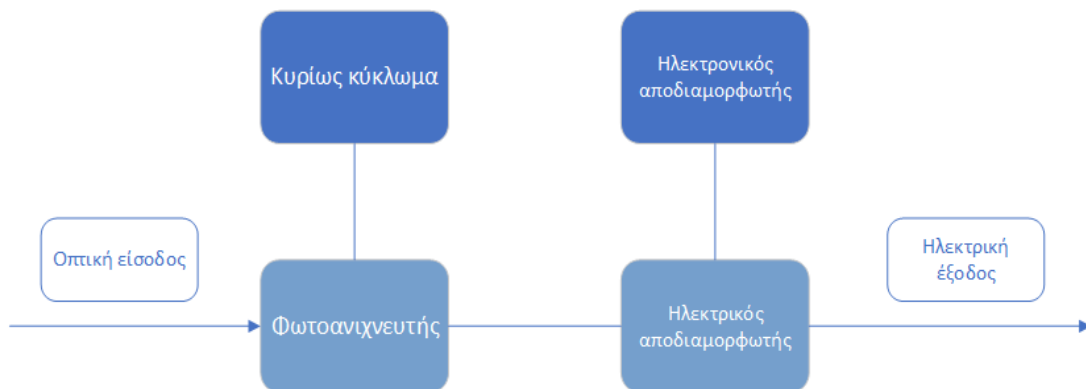
Ο οπτικός πομπός αναλαμβάνει τη μετατροπή του ηλεκτρικού ωφέλιμου σήματος σε οπτική μορφή και στη συνέχεια την εισαγωγή του διαμορφωμένου οπτικού σήματος στην οπτική ίνα. Παρακάτω φαίνεται διαγραμματικά η λειτουργία ενός οπτικού πομπού.



Εικόνα 1 Οπτικός πομπός

Αποτελείται από μία οπτική πηγή, ένα διαμορφωτή και ένα συζεύκτη με το τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Ένας μικροφακός είναι ουσιαστικά ο συζεύκτης, ο οποίος εστιάζει το οπτικό σήμα στο επίπεδο εισόδου της οπτικής ίνας με τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Το οπτικό σήμα προκύπτει από την διαμόρφωση του οπτικού φέροντος κύματος.

Ένας οπτικός δέκτης μετατρέπει το λαμβανόμενο οπτικό σήμα στο άκρο της εξόδου της οπτικής ίνας σε ηλεκτρικό σήμα. Στη συνέχεια αποτυπώνεται διαγραμματικά η λειτουργία ενός οπτικού δέκτη.



Εικόνα 2 Οπτικός δέκτης

Η αποδιαμόρφωση πραγματοποιείται μέσω ενός κυκλώματος λογικής επιλογής που αναγνωρίζει τα bit σαν ‘1’ και ‘0’ ανάλογα με το πλάτος του ηλεκτρικού σήματος. Η ακρίβεια του κυκλώματος αυτού επηρεάζεται από το λόγο του σήματος προς τον θόρυβο SNR του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται στον φωτοανιχνευτή. Μέτρο απόδοσης ενός οπτικού ψηφιακού συστήματος αποτελεί ο ρυθμός εσφαλμένων bit ή αλλιώς bit-error rate, BER [1].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

2.1 Εισαγωγή

Τα οπτικά δίκτυα είναι τα δίκτυα που αξιοποιούν τις οπτικές ίνες ως μέσο μετάδοσης και τα τελευταία 20 χρόνια η ανάπτυξη τους είναι ραγδαία. Οι οπτικές ίνες προτιμώνται ως μέσο μετάδοσης καθώς εξασφαλίζουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης με αποτέλεσμα να είναι εφικτές περισσότερες ταυτόχρονες συνδέσεις και κατ' επέκταση να εξυπηρετείται μεγαλύτερος αριθμός χρηστών. Η διάδοση του διαδικτύου και του παγκόσμιου ιστού και η συνεχώς αυξανόμενη κίνηση συντέλεσαν στην ανάπτυξη των οπτικών δικτύων, λόγω του αυξημένου αριθμού των τελικών χρηστών, αλλά και της αύξησης του ζητούμενου εύρους ζώνης για παροχή σε κάθε χρήστη. Αξίζει να αναφερθεί πως τα οπτικά δίκτυα παρέχουν ασφάλεια, γεγονός άκρως σημαντικό αφού αποτρέπεται σε μεγάλο βαθμό η υποκλοπή συνομιλιών και δεδομένων που μεταφέρονται μέσα από τις οπτικές ίνες. Επιπλέον, μπορούν να μεταφέρουν τα δεδομένα με την ίδια εξασθένιση σε αποστάσεις αρκετά μεγαλύτερες συγκριτικά με τα χάλκινα καλώδια και, επομένως, απαιτούνται οι ενισχυτές για την λειτουργία τους. Σημειώνεται ότι η κίνηση στο διαδίκτυο αυξάνεται συνεχώς, καθώς ευρυζωνικές συνδέσεις DSL (digital subscriber line) παρέχουν εύρος ζώνης έως και 100 Mbps ανά χρήστη, συγκριτικά μεγαλύτερο από εκείνο που παρέχονταν παραδοσιακά από public switched telephone network (PSTN) και integrated services digital network (ISDN) συνδέσεις. Σήμερα η σύγχρονη πρόσβαση των χρηστών γίνεται με την αξιοποίηση των PONs, που θα αναφερθούν και στη συνέχεια, σε οπτικές ίνες που παρέχουν εύρος ζώνης σε κάθε χρήστη έως και 200 Mbps. Η διάδοση υπηρεσιών όπως η τηλεργασία, η τηλεεκπαίδευση κ.ά. επιβάλλει την αύξηση του εύρους ζώνης των εταιρικών συνδέσεων για να καλύπτουν τις αυξημένες ανάγκες [1] [9] .

2.2 Πλεονεκτήματα οπτικών δικτύων

Οι οπτικές ίνες βοήθησαν σημαντικά στην εξέλιξη της κοινωνίας της πληροφορίας. Με το πέρασμα των εποχών άλλαξαν οι τρόποι μετάδοσης της πληροφορίας και πλέον η τηλεόραση, το ραδιόφωνο και το ίντερνετ είναι μόνο μερικοί από τους πολλούς τρόπους επικοινωνίας και μετάδοσης της πληροφορίας που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητά μας. Τα οπτικά δίκτυα φαίνεται να αποτελούν την καλύτερη δυνατή λύση στην επίλυση του προβλήματος για αυξημένο εύρος ζώνης. Τα πλεονεκτήματα τους συγκριτικά με τα

άλλα δίκτυα είναι αξιοσημείωτα και σημαντικά. Μερικά μόνο από αυτά αναγράφονται παρακάτω [10]:

- Μεγάλο εύρος ζώνης: Η οπτική ίνα εξασφαλίζει μετάδοση σε εύρος συχνοτήτων περίπου ίσο με 25 THz ή 25000 GHz για την περιοχή που κυμαίνεται στο 1.5μm. Το εύρος αυτό είναι 1000 φορές μεγαλύτερο από ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων.
- Χαμηλές απώλειες: Η μετάδοση του σήματος με οπτική ίνα αντί της διάδοσης μέσω χάλκινου καλωδίου παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλές απώλειες γεγονός που κάνει εφικτή την μεταφορά των δεδομένων σε τεράστιες αποστάσεις χωρίς να είναι επιτακτική η ανάγκη ύπαρξης ενδιάμεσων επαναληπτών.
- Μειωμένο κόστος: Η κατασκευή ενός οπτικού καλωδίου με ίνα είναι πιο οικονομική, σε σχέση με ένα καλώδιο χαλκού. Οι πάροχοι υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών με χαμηλότερα έξοδα παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες. Έτσι μειώνονται οι ανάγκες απόσβεσης των εξόδων τους, κάτι το οποίο ωφελεί και τον καταναλωτή, καθώς επιβαρύνεται με χαμηλότερες χρεώσεις υπηρεσιών που έχει ανάγκη.
- Μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις: Δεν σημειώνονται σημαντικές απώλειες σήματος και η χρήση φωτός στην μετάδοση των δεδομένων απαιτεί πολύ μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση, συγκριτικά με τα ηλεκτρικά σήματα.
- Υψηλή διαθεσιμότητα: Το πλεονέκτημα αυτό οφείλεται στο γεγονός της ανθεκτικής κατασκευής των καλωδίων οπτικών ινών, γεγονός που μειώνει στο ελάχιστο τη πιθανότητα εξωτερικής βλάβης.
- Αποδοτικότητα: Οι τεχνικές πολυπλεξίας είναι ικανές να αυξάνουν σημαντικά την αποδοτικότητα των οπτικών καλωδίων καθιστώντας εφικτή την παράλληλη μετάδοση πολλαπλών καναλιών.
- Ασφάλεια μεταδόσεων: Οι οπτικές ίνες δεν δημιουργούν γύρω τους ηλεκτρομαγνητικό πεδίο οπότε είναι αρκετά δύσκολη η υποκλοπή του σήματος.

Παρόλα αυτά τα οπτικά δίκτυα παρουσιάζουν παραμορφώσεις στο σήμα που μεταφέρουν εξαιτίας ορισμένων φαινομένων διασποράς, μη γραμμικοτήτων και διπλοθλαστικότητας (birefringence) [11][12]. Τα προβλήματα αυτά όμως επιλύονται μέσω συγκεκριμένης ίνας για την εκμηδένιση της διασποράς. Μειώνεται η μεταδιδόμενη ισχύς για τις μη

γραμμικότητες και δεν τσαλακώνεται η ίνα κατά την τοποθέτησή της, για την διπλοθλαστικότητα [11].

2.3 Κατηγορίες οπτικών δικτύων

Τα σημερινά οπτικά δίκτυα χωρίζονται σε 3 κατηγορίες με βάση την περιοχή που έχουν την δυνατότητα να καλύψουν:

1. Δίκτυα Long-Haul: τα δίκτυα αυτά εκτείνονται σε τεράστιες γεωγραφικές αποστάσεις της τάξεως των χιλιάδων χιλιομέτρων με σκοπό την εξυπηρέτηση εθνικών αλλά και διεθνών φορέων. Συνδέονται μεταξύ τους αλλά και με τα μητροπολιτικά δίκτυα που αναφέρονται παρακάτω. Αρχικά τα συγκεκριμένα δίκτυα βασίστηκαν στην τεχνολογία σύγχρονου οπτικού δικτύου SONET. Τέλος σήμερα χρησιμοποιείται η τεχνολογία OTNs (optical transport networks) αντί για SONET (synchronous optical network) / SDH.
2. Δίκτυα Μητροπολιτικής Περιοχής: τα δίκτυα αυτά μεταφέρουν τη πληροφορία μέσα στην μητροπολιτική δικτυακή περιοχή (μεταξύ πόλεων, νομών ή περιφέρειες). Χρησιμοποιούν σημείου-προς-σημείο τοπολογίες (point-to-point) ή τοπολογίες δακτυλίων (ring topologies) με add/drop πολυπλέκτες (ADMs). Αυτή η κατηγορία δικτύων αναλαμβάνει ενέργειες κρίσιμες. Πρωταρχικό μέλημα είναι η ικανοποίηση των αναγκών που δημιουργούνται χάρη στη δυναμική της συνεχώς αυξανόμενης ευρυζωνικότητας στα δίκτυα μεταφορών μεγάλης απόστασης, ενώ παράλληλα συνεργάζονται τεχνολογίες πρόσβασης για την παροχή υψηλών ταχυτήτων στους τελικούς χρήστες.
3. Δίκτυα Πρόσβασης: Στα δίκτυα πρόσβασης συνδέεται ο τελικός χρήστης μέσω πολλαπλών τεχνολογιών και ρυθμών μετάδοσης δεδομένων.

2.4 Τοπολογίες οπτικών δικτύων

Οι κόμβοι διασυνδέονται μέσω των συστημάτων μεταγωγής. Παρακάτω δίνονται οι τρεις γενικές κατηγορίες τοπολογιών:

1. Point to multipoint – Παθητικά οπτικά δίκτυα (passive optical network-PONs): Η αρχιτεκτονική PON είναι μια τοπολογία σημείου προς πολλά σημεία. Οι παθητικοί διαχωριστές (splitters), τοποθετημένοι σε διάσπαρτα σημεία της διακλάδωσης, δέχονται πρώτοι το οπτικό σήμα που περνάει μέσα από αυτούς.

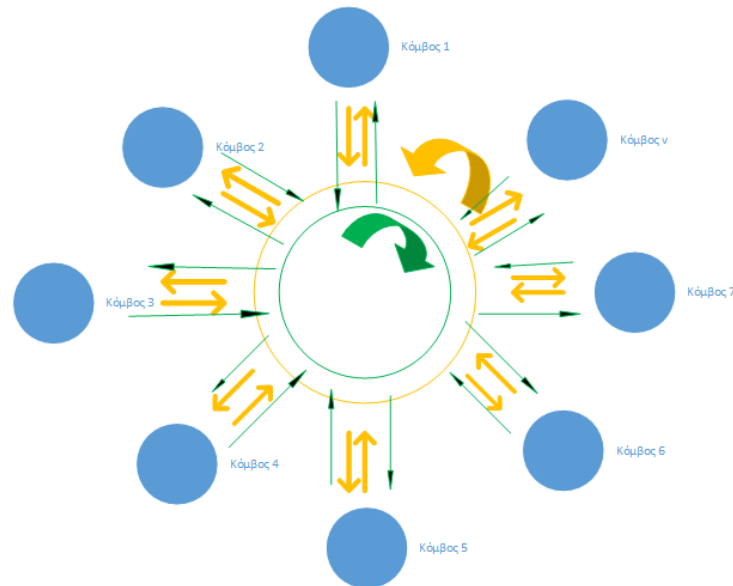
Από το τοπικό κέντρο φεύγει μια οπτική ίνα και στη συνέχεια βρίσκει σύνδεση σε διάφορα σημεία τερματισμού. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται συνδέσεις σημείου προς πολλά σημεία. Τα μοναδικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι οι παθητικοί συζεύκτες και διαιρέτες. Τα PON προτίθενται ως μια αξιόπιστη λύση για τα δίκτυα πρόσβασης, καθώς αποδέχονται τη χρήση κάθε υπηρεσίας ευρείας ζώνης, με συμφέροντες οικονομικά όρους.

2. Point to point – Ενεργός κόμβος (active node): Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός ενεργού δικτύου και ενός παθητικού, είναι πως ο παθητικός splitter αντικαθίσταται από έναν ενεργό κόμβο. Σε αυτή την αρχιτεκτονική ο ενεργός κόμβος τοποθετείται μεταξύ του κεντρικού γραφείου και των πελατών. Στην περίπτωση του κόμβου, αντί της διανομής του εύρους ζώνης μεταξύ των συνδρομητών, παρέχεται στους τελικούς χρήστες μια σύνδεση διαφορετική για τον καθένα, η οποία παρέχει το συνολικό αμφίδρομο εύρος ζώνης [7][13].



Εικόνα 3 Ενεργός κόμβος

3. Ring: Η τοπολογία του δακτυλίου επιτρέπει την κοινή χρήση οπτικού μέσου. Με την μορφή δακτυλίου συνδέονται οι κόμβοι του δικτύου. Παθητικές διατάξεις πολυπλεξίας στο φυσικό επίπεδο αλλά και ενεργά στοιχεία μπορούν να διαχωρίσουν τις κινήσεις.

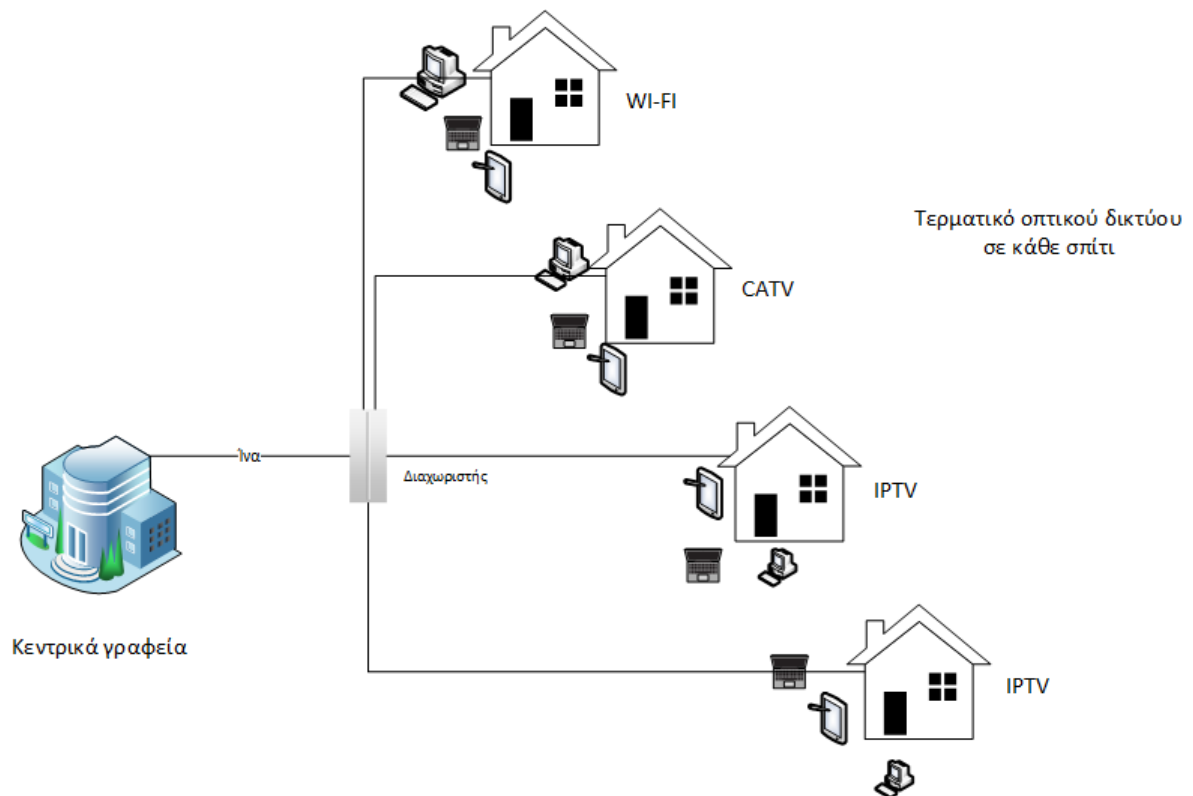


Εικόνα 4 Κόμβος δακτυλίου

2.5 Εξοπλισμός

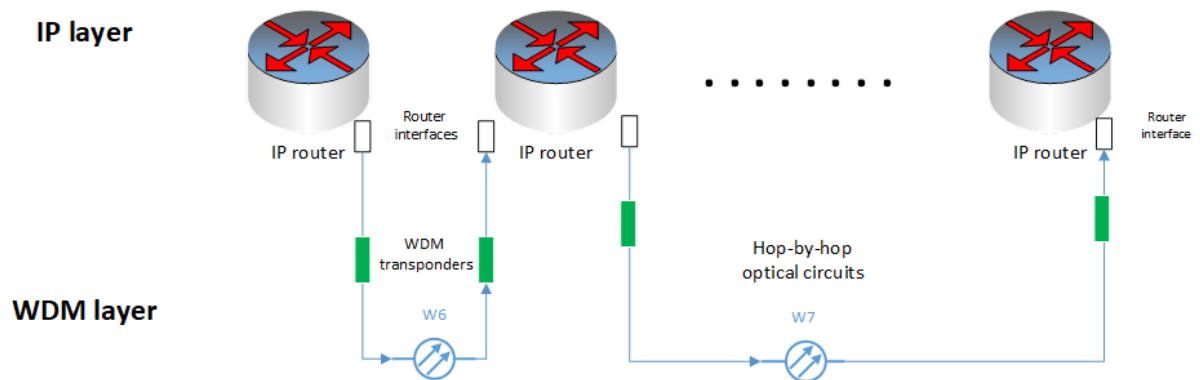
Ο εξοπλισμός των οπτικών δικτύων μπορεί να μελετηθεί διαχωρίζοντάς τον σε δύο κατηγορίες: τον ενεργό και τον παθητικό εξοπλισμό. Στη συνέχεια αναφέρονται οι ορισμοί καθώς και αντίστοιχα κατατοπιστικά σχήματα.

Παθητικός εξοπλισμός: Στον ορισμό του παθητικού δικτύου συμπεριλαμβάνονται όλες οι υποδομές, οι οποίες απαιτούνται για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο διαδίκτυο. Ως παραδείγματα χαρακτηριστικά αυτής της κατηγορίας μπορούν να αναφερθούν οι διαχωριστές, οι οπτικές ίνες κλπ. Στην περίπτωση που γίνεται χρήση κάποιας υπάρχουσας υποδομής, τότε και αυτό υπάγεται στον παθητικό εξοπλισμό.



Εικόνα 5 Παθητικός εξοπλισμός οπτικού δικτύου

Ενεργός εξοπλισμός: Στον ενεργό εξοπλισμό συμπεριλαμβάνεται κάθε στοιχείο που καταναλώνει ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 6 Ενεργός εξοπλισμός οπτικού δικτύου

2.6 Εφαρμογές οπτικών δικτύων

Μεταξύ των κυριότερων εφαρμογών των οπτικών δικτύων συγκαταλέγονται οι παρακάτω:

- Ευρυζωνικές οικιακές εφαρμογές: Τόσο οι εταιρείες παροχής τηλεφωνίας όσο και η καλωδιακή τηλεόραση προσπαθούν να προσφέρουν νέες υπηρεσίες υψηλών ταχυτήτων σε σπίτια και μικρές επιχειρήσεις. Στις εφαρμογές σήμερα περιλαμβάνονται η τηλεόραση με δυνατότητα αλληλεπίδρασης, το βίντεο κατά παραγγελία (video on demand - VoD), το ηλεκτρονικό εμπόριο, η ηλεκτρονική διακυβέρνηση η εκπαίδευση από απόσταση, πολλαπλές εφαρμογές IoT, video streaming, augmented reality applications. Για να γίνουν αυτές οι υπηρεσίες πραγματικότητα οι οπτικές ίνες έφτασαν μέχρι τον καταναλωτή (ίνα ως το πεζοδρόμιο, fiber-to-the-cabinet (FTTC)) και ίνα ως το σπίτι, fiber-to-the-home (FTTH)).
- Ανάκτηση και διανομή ιατρικών εικόνων: Οι εφαρμογές τηλε-ιατρικής απαιτούν τη συνεργασία μεταξύ ιατρών ειδικά για περιοχές υπαίθρου όπου πιθανώς θα υπάρχει έλλειψη ορισμένων ιατρικών ειδικοτήτων. Για να γίνει αυτό εφικτό απαιτούνται σύνδεσμοι επικοινωνίας υψηλών ταχυτήτων μεταξύ των απομακρυσμένων περιοχών. Η μεταφορά έγχρωμων εικόνων μεγέθους 2000×2000 pixels σε πολλές τοποθεσίες προκειμένου να γίνει ένα ιατρικό συμβούλιο απαιτεί δίκτυα υψηλών ταχυτήτων και οι οπτικές ίνες είναι ο επικρατέστερος υποψήφιος για την υλοποίηση αυτών.
- Internet και Παγκόσμιος Ιστός: Η δημοτικότητα των νέων εφαρμογών του παγκόσμιου ιστού και του internet γενικότερα αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό και οι ετήσιες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης ανά χρήστη έχουν δεκαπλασιαστεί. Επίσης, ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό.
- Πολυμεσικές διασκέψεις και εκπαίδευση από απόσταση: Τα επαγγελματικά έξοδα και ο χρόνος που απαιτείται για ένα ταξίδι έχουν μειωθεί χάρη στην εισαγωγή των συνδέσμων υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιούνται για διασκέψεις μέσω βίντεο. Μάλιστα αξίζει να αναφερθεί και η συμβολή των οπτικών δικτύων στις πρόσφατες δυσχαιρείς συνθήκες πανδημίας όπου πολλοί τομείς εργασίας αναγκάστηκαν να λειτουργήσουν από το σπίτι. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την αξιοποίηση εφαρμογών τηλεδιασκέψεων και τηλεεκπαίδευσης. Για να υπάρχει πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που

παρέχουν τα πολυμέσα για απομακρυσμένες συναντήσεις συνεργασίας και αλληλεπιδραστική εκπαίδευση από απόσταση, το δίκτυο θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα παροχής οποιασδήποτε ποιότητας υπηρεσίας που απαιτείται από κάθε τύπο κίνησης.

- Γραφικά και οπτικές αναπαραστάσεις: Οι εφαρμογές γραφικών και οπτικών αναπαραστάσεων χειρίζονται μεγάλο όγκο δεδομένων και έχουν μεγάλες απαιτήσεις εύρους ζώνης. Προκειμένου οι δυνατότητες αυτών των εφαρμογών να είναι διαθέσιμες σε ένα κατανεμημένο περιβάλλον είναι απαραίτητοι οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης και η μικρή καθυστέρηση. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η τρισδιάστατη οπτική αναπαράσταση και η αναπαραγωγή κινουμένων εικόνων κατά την προσομοίωση.
- Οπτικά δίκτυα κέντρων δεδομένων (data center networks): Τα κέντρα δεδομένων στη σημερινή εποχή αποτελούν τον βασικό πυλώνα για υπηρεσίες cloud. Τέτοιες μεγάλες εγκαταστάσεις διαθέτουν διασυνδεδεμένους διακομιστές (servers) για να αποθηκεύουν και να επεξεργάζονται όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες στον παγκόσμιο ιστό. Δημιουργούν έτσι εφαρμογές του cloud και του διαδικτύου καθημερινής χρήσης, όπως για παράδειγμα η κοινοποίηση βίντεο, εικόνων, τα κοινωνικά δίκτυα κλπ. Τα οπτικά δίκτυα βρίσκουν άμεση εφαρμογή στα οπτικά δίκτυα κέντρων δεδομένων.
- Διαδίκτυο των πραγμάτων (internet of things, IoT): Το IoT σηματοδοτεί μια επαναστατική εξέλιξη της τεχνολογίας, ικανοποιώντας πλέον την ανάγκη όλων και «των πάντων». Ο κόσμος της τεχνολογίας άγγιξε την αυτοματοποίηση με την διαχείριση των μηχανών από το cloud και έτσι τα έξυπνα σπίτια, αυτοκίνητα και όχι μόνο αποτελούν πλέον πραγματικότητα. Ως επακόλουθο προκύπτει η αλματώδης αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και της διαχείρισης των δεδομένων που μπορεί να ικανοποιηθεί μόνο από οπτικές δικτυώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ WDM

3.1 Γενικά

Τα οπτικά δίκτυα έως και σήμερα κατέχουν τη πρώτη θέση στις λύσεις απέναντι στο πρόβλημα της τεράστιας ανάγκης για ευρυζωνικότητα, μια ανάγκη που αυξάνεται στις μέρες μας ραγδαία. Οι οπτικές ίνες χάρη στο τεράστιο εύρος συχνοτήτων που παρέχουν μπορούν να μεταφέρουν πληροφορία με πολύ μικρές απώλειες. Το οπτικό σήμα κατατάσσεται στα υψίσυχνα (τάξεως THz) και έτσι η χωρητικότητα μιας οπτικής ίνας μπορεί να φτάσει στα επίπεδα των Tb/s.

Για την πολυπλεξία οπτικών σημάτων προτάθηκαν οι τεχνολογίες διαίρεσης χρόνου και μήκους κύματος γνωστές ως time division multiplexing (TDM) και wavelength division multiplexing (WDM). Η δεύτερη κατηγορία είναι ουσιαστικά η πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας ή frequency division multiplexing (FDM).

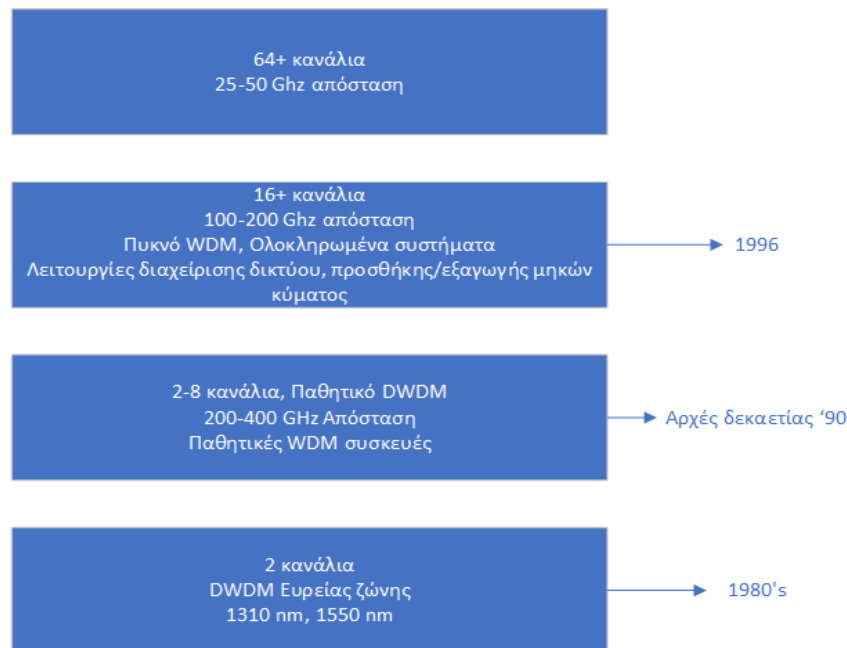
Στο οπτικό πεδίο πραγματοποιούνται οι διαδικασίες τόσο της πολυπλεξίας όσο και της αποπολυπλεξίας των καναλιών δίχως την απαίτηση καμίας μετατροπής από το οπτικό σε ηλεκτρικό αλλά ούτε και αντίστροφα. Η τεχνολογία WDM επιτρέπει την δημιουργία οπτικών δικτύων με τα δεδομένα να μεταδίδονται σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων GB/s.

Ιστορικά με την εμφάνιση της τεχνολογίας WDM, ήταν δυνατή η μετάδοση δεδομένων παράλληλα σε δύο μόνο μήκη κύματος με την προϋπόθεση να μεσολαβεί ανάμεσά τους αρκετά μεγάλη φασματική απόσταση. Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, είναι απαραίτητες ορισμένες βασικές βελτιώσεις στις ήδη υφιστάμενες τεχνολογίες. Η πρόοδος των τεχνολογιών των οπτικών φίλτρων και των τεχνολογιών με τη χρήση κατευθυνόμενου λέιζερ και οι στενές ζώνες συχνοτήτων έκαναν επιτρεπτή την πολυπλεξία για παραπάνω από δύο μήκη κύματος ανά οπτική ίνα και την πυκνή πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (dense wavelength-division multiplexing - DWDM) [10].

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, των εφαρμογών που προσφέρει το διαδίκτυο και ο παγκόσμιος ιστός έχει επιφέρει δραματική αύξηση στις ανάγκες για ευρυζωνικότητα από το δίκτυο, γεγονός που έχει προωθήσει σε μεγάλο βαθμό κομμάτι της έρευνας στο πεδίο του WDM. Τα αμιγώς οπτικά δίκτυα με τεχνολογία WDM και δρομολόγηση κύματος είναι μια ρεαλιστική λύση για τα μελλοντικά δίκτυα ευρείας και μητροπολιτικής περιοχής καθώς και για το διαδίκτυο των επόμενων γενεών. Τα πλεονεκτήματα των δικτύων δρομολόγησης μήκους κύματος αντιπαραβαλλόμενα με αυτά των δικτύων που κάνουν χρήση ψηφιακών

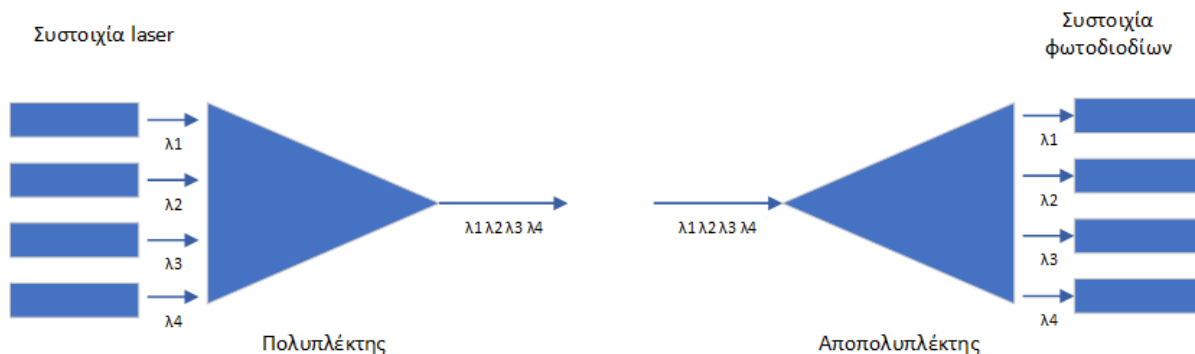
πινάκων διασύνδεσης είναι η διαφάνεια του πρωτοκόλλου και η απλή διαχείριση και επεξεργασία.

Στις αρχές της δεκαετίας του '90 εμφανίζεται για πρώτη φορά η δεύτερη γενιά συστημάτων WDM και αποκαλείται συχνά WDM στενής ζώνης, επειδή γινόταν χρήση από 2-8 κανάλια. Τα συγκεκριμένα κανάλια είχαν μεταξύ τους απόσταση 400 GHz και μετέδιδαν στα 1550 nm. Έπειτα εμφανίστηκαν συστήματα DWDM με 16 έως 40 κανάλια που απέχουν από 100 μέχρι 200 GHz. Ως και το τέλος της δεκαετίας του 1990, η ανάπτυξη των DWDM συστημάτων έκανε πραγματικότητα την πολυπλεξία 64-160 καναλιών με αποστάσεις που είχαν ελαττωθεί κατά πολύ στο ενδιάμεσο.

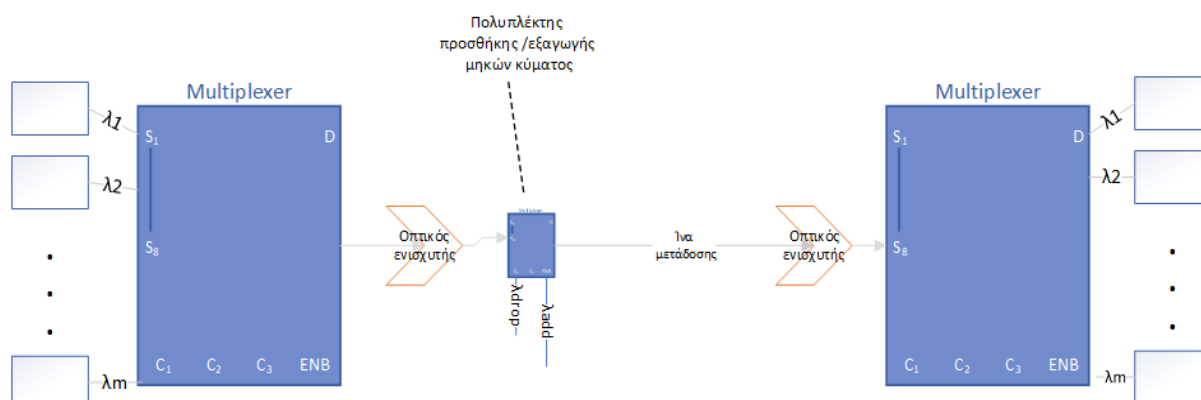


Εικόνα 7 Η εξέλιξη των συστημάτων DWDM

Όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 7, η λειτουργία πολλαπλών μηκών κύματος πραγματοποιείται ταυτόχρονα με την ελάττωση της απόστασης στα μήκη κύματος και με την αύξηση της πυκνότητάς τους. Παρατηρείται εξίσου καλύτερη διευθέτηση του συστήματος χάρη στις λειτουργίες προσθήκης/εξαγωγής μηκών κύματος αλλά και ικανοτήτων για την διαχείριση. Τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα οπτικό δίκτυο μπορεί να είναι τα λέιζερ, οι παθητικοί συζεύκτες αστέρα, αλλά και οι πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες WDM με τους δρομολογητές μήκους κύματος και άλλα.



Εικόνα 9 Λεπτομερές διάγραμμα δομής ενός συστήματος WDM



Εικόνα 8 Διάγραμμα δομής ενός συστήματος μετάδοσης WDM

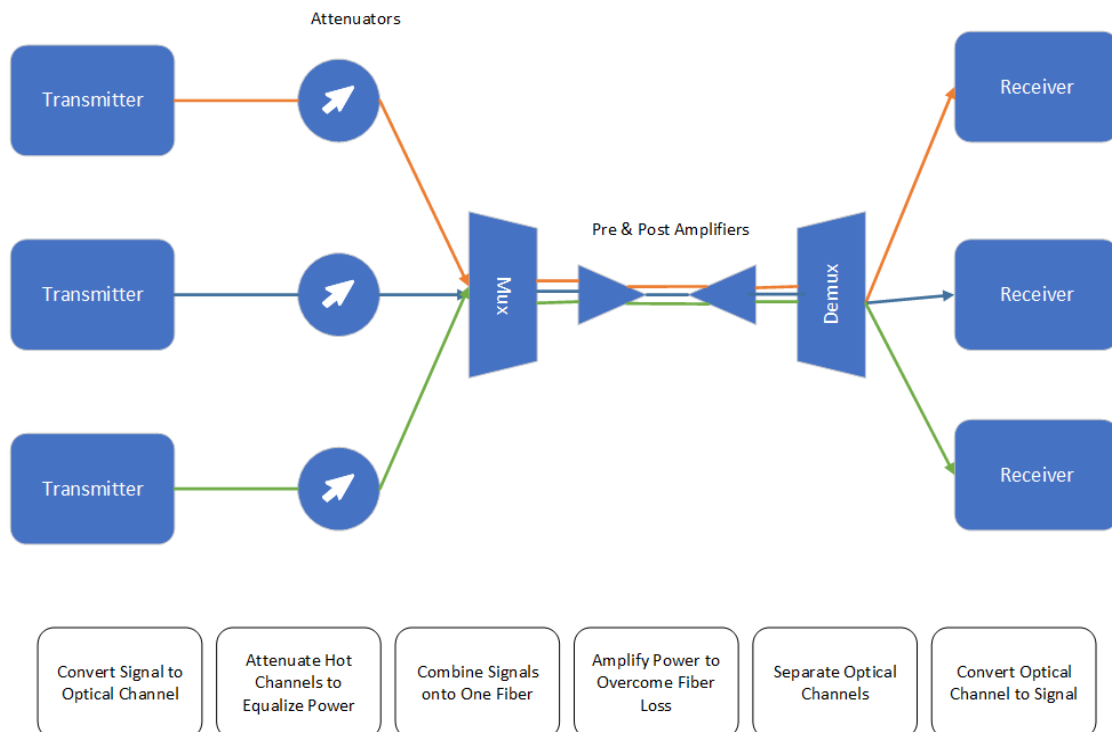
3.2 Βασική αρχή λειτουργίας WDM

Η τεχνική της πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος WDM αξιοποιεί την ευρυζωνικότητα που προσφέρει μια μονότροπη οπτική ίνα. Με τη χρήση της τεχνικής WDM είναι δυνατός ο συνδυασμός πολλαπλών μηκών κύματος μέσα στην ίδια οπτική ίνα. Η δημιουργία των οπτικών ενισχυτών που διέθεταν υψηλό εύρος ζώνης έκανε εφικτή την αξιοποίηση πολυπλεκτών με διαίρεση μήκους κύματος, γεγονός που οδήγησε την πολυπλεξία πολλών μηκών κύματος στην ίδια οπτική ίνα. Η τεχνική του WDM βελτιώνει σημαντικά τις δυνατότητες του οποιουδήποτε υπάρχοντος συστήματος οπτικής τεχνολογίας. Υπάρχουν ορισμένα θέματα που πρέπει να επιλυθούν έτσι ώστε να επιτευχθεί η αύξηση του ρυθμού αλλά και η αποδοτικότητα μεταφοράς δεδομένων. Αυτά θέτουν άκρως αναγκαία την εξεύρεση τεχνικών με καλή συσχέτιση κόστους - απόδοσης. Μια λύση αποτελεί η εγκατάσταση επιπλέον καλωδίων οπτικής ίνας. Παρόλα αυτά η προαναφερθείσα λύση δεν εξασφαλίζει απαραίτητα και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης. Μία άλλη λύση, εξίσου πιθανή, είναι η αξιοποίηση της πολυπλεξίας με τη διαίρεση του χρόνου, που οδηγεί στην αξιοποίηση της χωρητικότητας

της οπτικής ίνας. Η λύση αυτή είναι ναι μεν λογική. Ωστόσο, όχι τόσο αποδοτική. Η πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος είναι μια πιο αποδοτική λύση. Η χωρητικότητα της ίνας αξιοποιείται καλύτερα με την ανάθεση ξεχωριστού μήκους κύματος σε διαφορετικά εισερχόμενα οπτικά σήματα και στην συνέχεια με την πολυπλεξία των σημάτων σε μία και μόνο οπτική ίνα. Τα σήματα που περνούν από τη διαδικασία της πολυπλεξίας με την χρήση της τεχνολογίας WDM ενισχύονται και μετάγονται σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις. Το γεγονός αυτό αυξάνει τόσο τη χωρητικότητα όσο και την αποδοτικότητα.

Στην τεχνική αυτή, οι διακριτές κυματομορφές παίρνουν το σχήμα ενός συνόλου ορθογώνιων φερόντων με τη δυνατότητα διαχωρισμού, δρομολόγησης αλλά και μεταγωγής δίχως την ύπαρξη παρεμβολών. Αυτό φυσικά ισχύει με την προϋπόθεση η οπτική ισχύς να κυμαίνεται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα , ώστε να μην εμφανίζονται μη γραμμικά φαινόμενα. Μέσα σε μία οπτική ίνα μπορούν να μετακινηθούν παράλληλα ακτίνες φωτός διαφορετικών μηκών κύματος που μεταφέρουν διαφορετικές ροές δεδομένων.

Στη παρακάτω εικόνα 10 αποτυπώνεται μια οπτική περιγραφή του συστήματος πολυπλεξίας-αποπολυπλεξίας.



Εικόνα 10 WDM πολυπλέκτης και ενισχυτικές διατάξεις

Ορισμένοι βασικοί παράγοντες που επιδρούν αισθητά την αποδοτικότητα ενός συστήματος WDM είναι οι εξής [10][13]:

- η συνολική διασπορά της οπτικής ίνας,
- η απουσία χαρακτηριστικής ομοιομορφίας στην απολαβή των οπτικών ενισχυτών Erbium-doped fiber amplifier (EDFA) στο πλαίσιο της επιθυμητής ζώνης των μηκών κύματος,
- τα φαινόμενα σκέδασης,
- τα μη γραμμικά φαινόμενα και
- οι αντανakλάσεις εξαιτίας των συγκολλήσεων.

Οι αρχικές εφαρμογές της WDM τεχνικής, βασιζόταν στην μεγάλη απόσταση ανάμεσα στα κανάλια. Τα πρώτα συστήματα, μάλιστα, αξιοποιούσαν μόνο δύο μήκη κύματος, αυτά των 1310 και 1550 nm αντίστοιχα. Η χρησιμοποίηση των EDFA ενισχυτών βοήθησε την ανάπτυξη τεχνικών ελάττωσης των αποστάσεων. Οι συνηθισμένες αποστάσεις στα συστήματα WDM είναι 1000, 400, 200, 100, και 50 GHz ή 8, 3.2, 1.6, 0.8, και 0.4 nm στη περιοχή των 1550 nm. Τα συστήματα WDM οι αποστάσεις των οποίων είναι μικρότερες ή ίσες των 200 GHz ονομάζονται και συστήματα πυκνής πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος – Dense WDM [10][13].

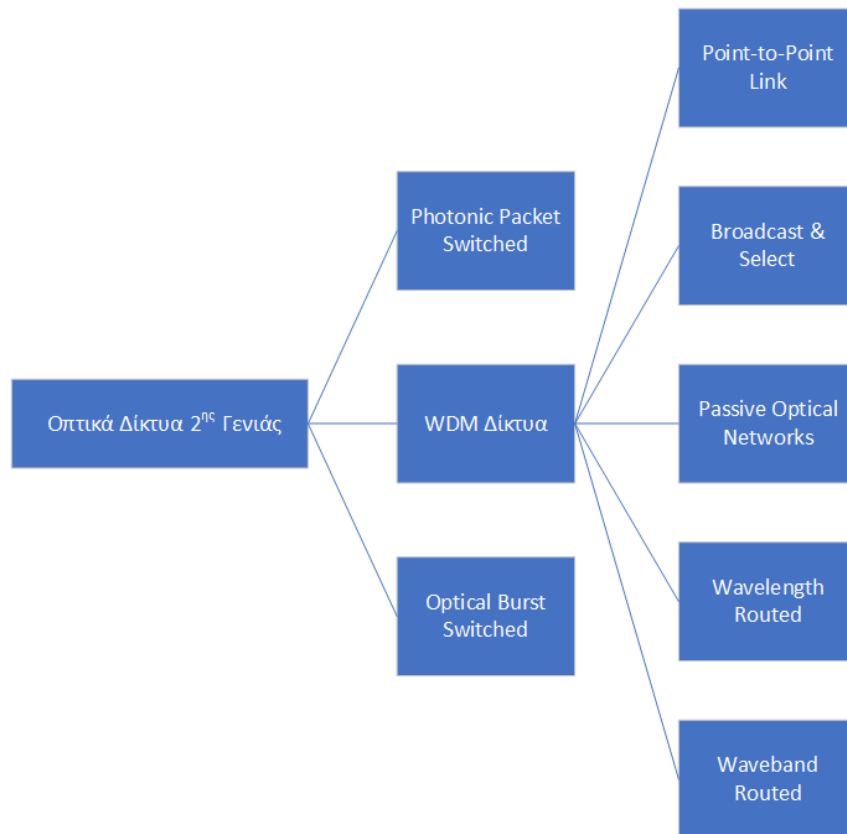
3.3 Οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς

Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς δεν αποτελούν μόνο μια κατηγορία δικτύων που βασίζονται στις οπτικές ίνες και τερματίζονται από ηλεκτρονικά στοιχεία μεταγωγής (switches). Οι διαδικασίες της δρομολόγησης αλλά και της μεταγωγής του δικτύου λαμβάνουν χώρα στο οπτικό πεδίο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αξιοποίηση του εύρους ζώνης.

Μέχρι και σήμερα ορισμένες λειτουργίες του δικτύου γίνονται από ηλεκτρονικά στοιχεία, τουλάχιστον με βάση το τρέχον ανώτατο επίπεδο της τεχνολογικής εξέλιξης.

Όμως, στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούνται τεχνικές WDM για την αξιοποίηση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας και επιδιώκεται όλες οι λειτουργίες του δικτύου να γίνουν στην οπτική περιοχή (μεταγωγή, δρομολόγηση, ενίσχυση κλπ.).

Οι βασικότερες κατηγορίες των οπτικών δικτύων 2ης γενιάς παρατίθενται σχηματικά στην παραπάνω εικόνα 11.



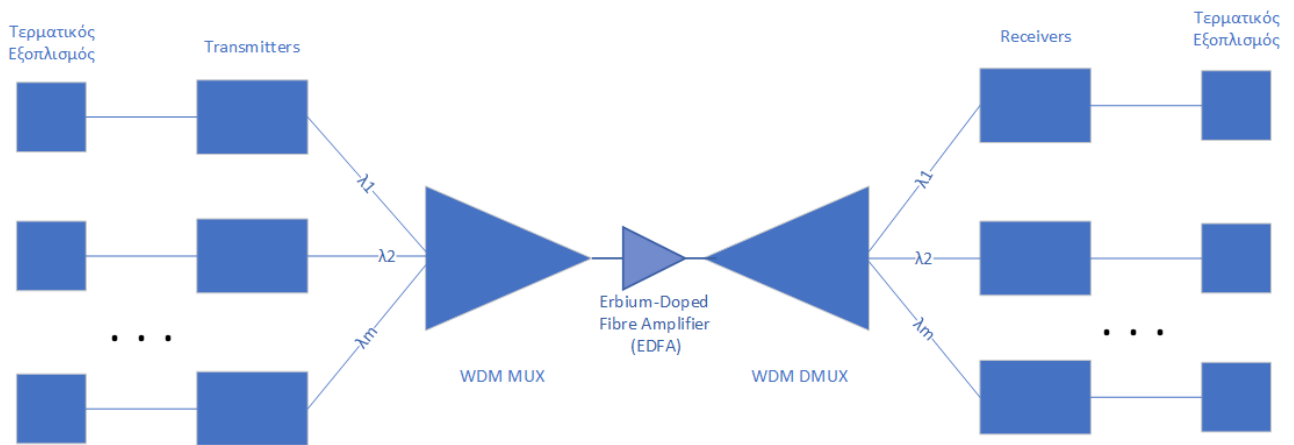
Εικόνα 11 Κατηγορίες Οπτικών Δικτύων 2ης Γενιάς

Έπειτα θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των WDM δικτύων 2ης γενιάς.

3.3.1 WDM Δίκτυα Σημείου προς Σημείο (Point to Point Link)

Η εξέλιξη των απλών μεμονωμένων συνδέσμων σε WDM συνδέσμους σημείου-προς-σημείο είναι το σημείο από το οποίο γίνεται η αρχή για την είσοδο της οπτικής τεχνολογίας WDM στην υπάρχουσα υποδομή πρώτης γενιάς. Η τεχνική WDM επιτρέπει σε δυο κόμβους που επικοινωνούν σε κάθε σύνδεσμο WDM να έχουν τη δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων μέσω της χρήσης πολλαπλών και διαφορετικών καναλιών (μήκη κύματος) ταυτόχρονα. Έτσι ο κάθε κόμβος διαθέτει αρκετές θύρες εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Η επαφή με την οπτική ίνα μπορεί να είναι είτε διπλής κατεύθυνσης είτε θα μπορούσε να υπάρχει ένας WDM σημείου-προς-σημείο σύνδεσμος διπλής οπτικής ίνας, όπου η οπτική ίνα θα αξιοποιούνταν μόνο για τη ροή δεδομένων προς μια κατεύθυνση. Εν ολίγοις, ένας

WDM σύνδεσμος σημείου προς σημείο απαρτίζεται από τα στοιχεία, τα οποία αναπαρίστανται στην εικόνα 12.



Εικόνα 12 Παράδειγμα WDM συνδέσμου σημείου-προς-σημείο

- Δύο κόμβους με αρκετές θύρες εισόδου/εξόδου.
- Ξεχωριστές διεπαφές (interfaces) σε κάθε θύρα που θέτουν εφικτή την επικοινωνία με τη χρήση διαφόρων πρωτοκόλλων πάνω από τον σύνδεσμο.
- Lasers στα δυο άκρα του συνδέσμου με σκοπό την μετάδοση σε διαφορετικά μήκη κύματος.
- Δέκτες για κάθε μήκος κύματος, για τη μετατροπή του σήματος σε ηλεκτρονική μορφή στα άκρα του συνδέσμου.
- WDM Πολυπλέκτες/Αποπολυπλέκτες αμέσως μετά τους πομπούς για την WDM πολυπλεξία και αμέσως πριν την άφιξη του οπτικού σήματος στους δέκτες για την WDM αποπολυπλεξία.
- Ενισχυτές για την ενίσχυση του σήματος στη διαδρομή του από το ένα άκρο στο άλλο.

3.3.2 WDM Δίκτυα Εκπομπής και Επιλογής (Broadcast & Select)

Στα δίκτυα εκπομπής-και-επιλογής η πληροφορία κατευθύνεται προς όλες τις εξόδους ενός συζεύκτη αστέρα και οι αποδέκτες οργανώνονται στο κατάλληλο μήκος κύματος με σκοπό να παραλάβουν τη πληροφορία που προορίζεται για αυτούς. Επειδή παραπάνω από ένας κόμβοι μπορούν να λαμβάνουν σε κοινό μήκος κύματος, υπάρχει δυνατότητα πολυεκπομπής.

Τα δίκτυα εκπομπής-και-επιλογής διαχωρίζονται σε δίκτυα ενός ή σε δίκτυα περισσότερων βημάτων:

- Σε ένα δίκτυο εκπομπής-και-επιλογής ενός βήματος, μέσα από οπτικά στοιχεία μεταγωγής διέρχονται τα δεδομένα μεταδιδόμενα από ένα άκρο σε άλλο. Μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη δεν παρεμβάλλεται κανένας κόμβος μεταγωγής.
- Στα δίκτυα εκπομπής-και-επιλογής πολλών βημάτων, μέσα από ένα συσχετισμό οπτικών και ηλεκτρονικών στοιχείων μεταγωγής διέρχονται τα δεδομένα που μεταδίδονται από ένα άκρο σε κάποιο άλλο άκρο.

3.3.3 WDM Δίκτυα Δρομολόγησης Μήκους Κύματος (Wavelength Routed)

Για την πραγματοποίηση μιας ρεαλιστικής οπτικής δικτύωσης απαιτείται η μεταφορά του τμήματος δρομολόγησης, μεταγωγής αλλά και της γενικότερης δικτυακής ευφυίας στο κομμάτι του οπτικού πεδίου. Γεγονός που συμβαίνει κυρίως στα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength routing networks).

Τα προτερήματα των συγκεκριμένων δικτύων, συγκριτικά με τα δίκτυα εκπομπής και επιλογής, που αναφέρθηκαν νωρίτερα, είναι τα παρακάτω:

1. Είναι διαθέσιμα προς επέκταση σε μεγάλα μεγέθη (wide area network - WANs, backbone).
2. Τα μήκη κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά σε πολλαπλά σημεία του δικτύου στην περίπτωση μετατροπής μήκους κύματος.

Στα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος ένα εξ 'ολοκλήρου οπτικό μονοπάτι που παρέχεται σε ένα ζευγάρι από τελικούς κόμβους και θεωρείται ως μια υψηλής ταχύτητας λογική σύνδεση μεταξύ τους με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων, χαρακτηρίζεται ως μονοπάτι φωτός (lightpath).

Αξίζει να σημειωθούν δύο χαρακτηριστικά των WDM δικτύων δρομολόγησης μήκους κύματος:

1. Συνέχεια μήκους κύματος: κάθε lightpath οφείλει να κάνει χρήση κοινού μήκους κύματος σε όλους τους συνδέσμους από την πηγή μέχρι τον προορισμό (εκτός αν οι ενδιάμεσοι κομβοί είναι ικανοί να μετατρέπουν τα μήκη κύματος).
2. Διακεκριμένη εκχώρηση μήκους κύματος: διακριτά μήκη κύματος σε lightpaths που τους διανέμονται φυσικοί σύνδεσμοι οπτικής ίνας.

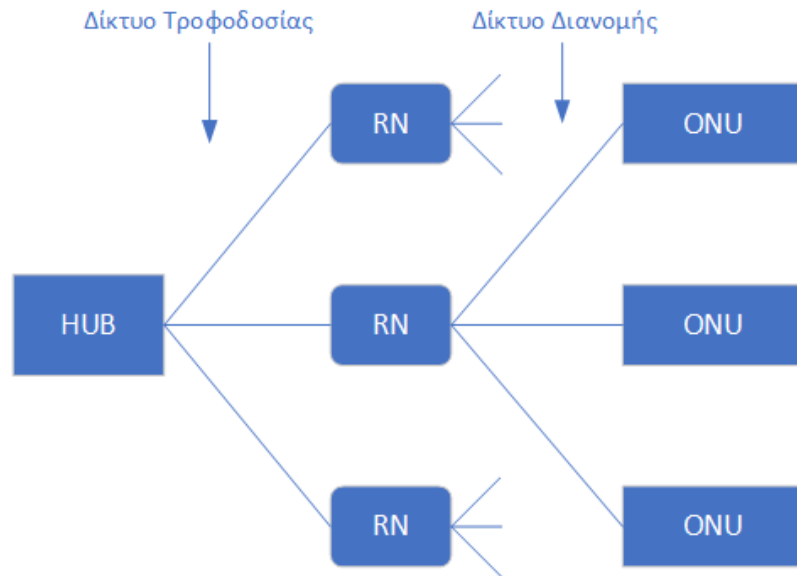
3.3.4 Δίκτυα Δρομολόγησης Ζώνης Μηκών Κύματος (Waveband Routed)

Τα δίκτυα Δρομολόγησης Ζώνης Μηκών Κύματος βρίσκονται κάπου ενδιάμεσα στις δυο προαναφερθείσες κατηγορίες δικτύων, σχετικά με τον έλεγχο των μηκών κύματος. Τα δίκτυα αυτά βασίζονται στην συγχώνευση των μηκών κύματος σε ζώνες από αυτά και η προϋπόθεση από τους κόμβους είναι ο απλός έλεγχος ζωνών με περισσότερα από ένα μήκη κύματος, και όχι ο ξεχωριστός έλεγχος για κάθε μήκος κύματος.

Οποιοδήποτε στοιχείο μεταγωγής λειτουργεί σε μια ζώνη μηκών κύματος και άρα το πλήθος των μεταγωγικών στοιχείων ανά κόμβο δρομολόγησης οφείλει να είναι ίσο με το πλήθος των ζωνών.

3.3.5 WDM Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks)

Τα οπτικά δίκτυα θα πρέπει να τα απαρτίζουν απλές παθητικές συσκευές για παράδειγμα συζεύκτες και παθητικοί δρομολογητές. Αυτού του είδους τα δίκτυα είναι τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (passive optical networks-PONs) τα WDM PONs. Τα συγκεκριμένα οπτικά WDM δίκτυα χρησιμοποιούνται για την εξασφάλιση υψηλού ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στο δίκτυο πρόσβασης εννοώντας το τμήμα που καταλήγει στα σπίτια ή τις επιχειρήσεις ή αλλιώς το «τελευταίο μίλι» (“last mile”) του δικτύου. Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνεται μια πιο γενική αρχιτεκτονική των PONs.



Εικόνα 13 Γενικευμένη αρχιτεκτονική PON

Φαίνεται ο κεντρικός κόμβος (hub) που έχει τερματικό εξοπλισμό, είναι η πηγή της downstream κυκλοφορίας και διάφοροι απομακρυσμένοι κόμβοι (remote nodes- RNs) συνδέονται με αυτή και τοποθετούνται κοντά στους συνδρομητές. Κάθε κόμβος, στη συνέχεια, πραγματοποιεί σύνδεση με διάφορες οπτικές μονάδες του δικτύου (Optical Network Units - ONUs). Κάθε μία από αυτές εξυπηρετεί τουλάχιστον έναν συνδρομητή και γι' αυτό δεν πρέπει να είναι πολύπλοκες. Το δίκτυο από το hub ως τους RNs ονομάζεται δίκτυο τροφοδοσίας, ενώ το δίκτυο από τους RNs στις ONUs δίκτυο διανομής [10][13].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΕΝΤΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Ένα δίκτυο κέντρων δεδομένων συνδέει ένα πλήθος διακομιστών (servers) μεταξύ τους. Για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας και κόστους και να αυξηθεί η χρήση πόρων των δικτύων κέντρων δεδομένων (Data Center Networks - DCN), πολλές νέες αρχιτεκτονικές δικτύων κέντρων δεδομένων που βασίζονται σε οπτικά δίκτυα προτείνονται τα τελευταία χρόνια.

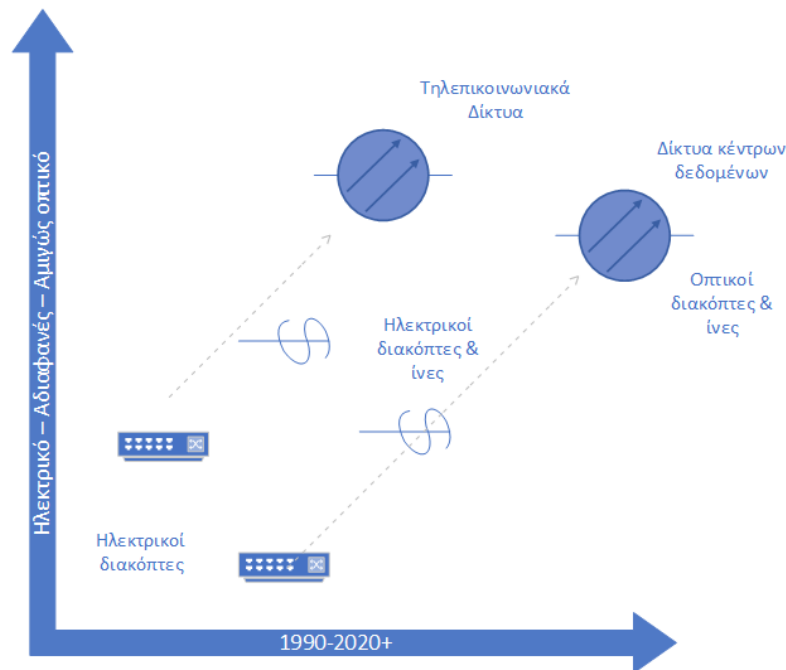
Τα κέντρα δεδομένων είναι πολύ μεγαλύτερα από ό,τι ήταν πριν από δέκα χρόνια, με απαιτήσεις εφαρμογών πολύ διαφορετικές από τις παραδοσιακές εφαρμογές πελάτη-διακομιστή και με υψηλές ταχύτητες εξυπηρέτησης. Αυτό αλλάζει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται και αναπτύσσονται τα DCNs. Μέσα στη τελευταία δεκαετία η συνολική κίνηση των data centers έχει αυξηθεί δραματικά, εξαιτίας της συνεχούς αυξανόμενης διάδοσης των νέων εφαρμογών του Internet, όπως για παράδειγμα το cloud computing, video streaming, social networking και άλλα [15] [16].

Οι σύγχρονες αρχιτεκτονικές δικτύωσης κέντρων δεδομένων αξιοποιούν πλατφόρμες δικτύωσης πλήρους στοίβας και εικονικοποίησης ασφαλείας που υποστηρίζουν ένα πλούσιο σύνολο υπηρεσιών δεδομένων που συνδέουν τα πάντα, ενώ παράλληλα επιτρέπουν την κεντρική διαχείριση και τους λεπτομερείς ελέγχους ασφαλείας [1] [14].

4.2 Οπτικά δίκτυα διασύνδεσης

Το μοντέλο δικτύωσης κέντρων δεδομένων έχει διαφοροποιηθεί σημαντικά με βάση την εξέλιξη της οπτικής τεχνολογίας. Μέχρι τώρα η οπτική τεχνολογία στα δίκτυα κέντρων δεδομένων είχε χρησιμοποιηθεί κυρίως ως μέσο μετάδοσης point-to-point μεταξύ των μεταγωγέων, χρησιμοποιώντας τις οπτικές ίνες και τους πομποδέκτες. Στα DCNs που χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς μεταγωγείς χάνεται πολλή ισχύς στις μετατροπές ηλεκτρικού σε οπτικό (E/O) και οπτικού σε ηλεκτρικό (O/E) στους πομποδέκτες καθώς στη μεταγωγή πακέτων, ενώ οι μετατροπές αποδίδουν επίσης αυξημένο λανθάνοντα χρόνο. Επιπλέον, η καθυστέρηση επιδεινώνεται περαιτέρω λόγω της ηλεκτρικής προσωρινής αποθήκευσης που απαιτείται στο μεταγωγέα για την αντιμετώπιση της σύγκρουσης πακέτων. Οι πλήρως

οπτικές διασυνδέσεις είναι λοιπόν μια πολλά υποσχόμενη λύση προκειμένου να μειωθεί σημαντικά η κατανάλωση ρεύματος στο DCN, αλλά και η καθυστέρηση επικοινωνίας [19].



Εικόνα 14 Ηλεκτρικά σε αμιγώς οπτικά δίκτυα

4.3 Απαιτήσεις για ένα δίκτυο κέντρο δεδομένων

Οι πιο προηγμένες πλατφόρμες δικτύωσης κέντρων δεδομένων συνδέουν πολλαπλούς servers. Παρέχουν κρίσιμες υπηρεσίες για εφαρμογές και δεδομένα, συμπεριλαμβανομένου του αυτοματισμού.

Ας δούμε μερικές από τις απαιτήσεις για μια σύγχρονη πλατφόρμα δικτύωσης κέντρων δεδομένων [1][14]:

- Αυτοματοποίηση: Η επίτευξη ταχύτητας και ευελιξίας στα σύγχρονα κέντρα δεδομένων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αυτοματοποιημένη παροχή υπηρεσιών δικτύωσης για εφαρμογές. Πολύ πιο γρήγορες και πιο αξιόπιστες από έναν ανθρώπινο διαχειριστή, οι σύγχρονες πλατφόρμες δικτύωσης όχι μόνο βρίσκουν τον πιο αποτελεσματικό τρόπο προγραμματισμού ενός δικτύου, εξισορρόπησης φόρτου εργασίας και αυτοματοποίησης χρονοβόρων εργασιών, αλλά ανταποκρίνονται επίσης δυναμικά στις αλλαγές στη χρήση.

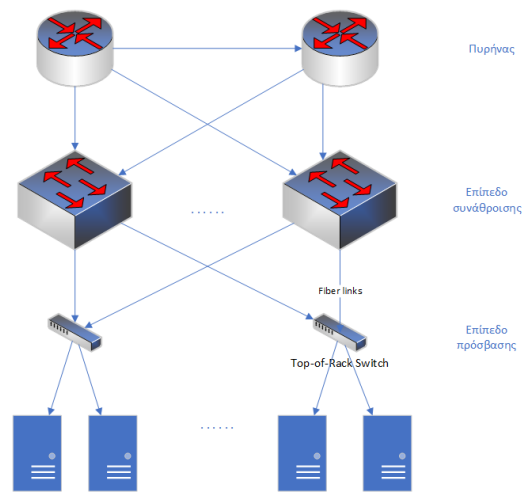
- Συνεπείς πολιτικές: Με τη σύγχρονη δικτύωση κέντρων δεδομένων που είναι υπεύθυνη για την ενοποίηση πόρων από άκρη σε άκρη, η συνεπής εφαρμογή των πολιτικών είναι απαραίτητη.
- Διαφανή πρωτόκολλα: Τυπικά συνδέοντας πόρους που βρίσκονται τόσο εντός των εγκαταστάσεων, στο cloud και στο edge, οι σύγχρονες πλατφόρμες δικτύωσης κέντρων δεδομένων προσφέρουν κεντρική διαχείριση από μια ενιαία κονσόλα.
- Βαθμωτή ασφάλεια: Οι σημερινές πλατφόρμες δικτύωσης κέντρων δεδομένων διαθέτουν συχνά ενσωματωμένους ελέγχους ασφαλείας.
- Παγκόσμια ορατότητα: Οι περισσότερες πλατφόρμες δικτύωσης κέντρων δεδομένων μπορούν να εμφανίσουν μια οπτική αναπαράσταση του δικτύου και των διασυνδέσεών του, γεγονός που καθιστά πολύ ευκολότερη την αντιμετώπιση προβλημάτων δικτύου. Σε αντίθεση με τις παλαιότερες αρχιτεκτονικές που βασίζονταν σε ένα αξιόπιστο δίκτυο, οι σύγχρονες εφαρμογές κέντρων δεδομένων έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με την παρουσία αστοχιών. Ο πρωταρχικός στόχος είναι να περιοριστεί η επίδραση μιας αποτυχίας σε όσο το δυνατόν μικρότερο αποτύπωμα.

4.3 Αρχιτεκτονικές οπτικής διασύνδεσης για τα DCNs

Μια σύγχρονη πλατφόρμα δικτύωσης κέντρων δεδομένων εκτελεί όλες τις υπηρεσίες δικτύου που απαιτούνται για την υποστήριξη παραδοσιακών εταιρικών εφαρμογών εξ ολοκλήρου σε λογισμικό, επιτρέποντας την αυτοματοποίηση των προηγούμενων εργασιών παροχής χειροκίνητων και επιρρεπών σε σφάλματα. Καθιστά επίσης δυνατό σχεδιασμό χωρητικότητας, σχεδιασμό πολιτικής ασφαλείας και αντιμετώπιση προβλημάτων δικτύου.

Στη συνέχεια φαίνεται ένα σχήμα που αποτυπώνει ένα δίκτυο κέντρων δεδομένων. Αυτό παρουσιάζει διαφορετικές ζεύξεις, οι οποίοι κατά γενική ομολογία συνήθως περιλαμβάνουν το επίπεδο πρόσβασης (access tier), το επίπεδο συνάθροισης (aggregation tier), και το επίπεδο του πυρήνα (core tier). Στο επίπεδο πρόσβασης, οι διακομιστές (servers) ομαδοποιούνται στη μονάδα rack και συνδέονται με τους ηλεκτρονικούς διακόπτες ToR (Top of Rack switches). Οι διακόπτες ToR συνδέονται περαιτέρω με τον ηλεκτρονικό διακόπτη ή τους δρομολογητές στην υψηλότερη βαθμίδα (higher tier). Στο σύγχρονο DCN, η οπτική τεχνολογία χρησιμοποιείται κυρίως στη μετάδοση, δηλαδή, οι

οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μεταξύ διακομιστών και διακοπών (server & switch connection) [16] [17] [18] .

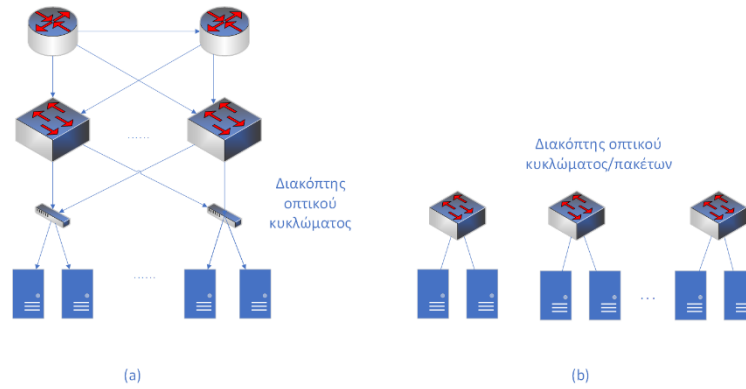


Εικόνα 15 Σύγχρονο δίκτυο κέντρου δεδομένων

Η μείωση του αριθμού των διακοπών και δρομολογητών EPS (electronic packet switch) και η αντικατάστασή τους με τους οπτικούς διακόπτες είναι μία από τις πολλές υποσχόμενες λύσεις. Σε ένα σύγχρονο DCN, οι ηλεκτρονικοί διακόπτες και οι δρομολογητές συνεισφέρουν σημαντικό ποσό (περίπου 30%) της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται από τις συσκευές [19]. Οι οπτικές συσκευές είναι πιο ενεργειακά αποδοτικές σε σύγκριση με το ηλεκτρονικό EPS. Πολλά παθητικά οπτικά εξαρτήματα, όπως ο συζεύκτης και ο απομονωτής, δεν καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια για να υποστηρίξουν κίνηση εξαιρετικά υψηλού εύρους ζώνης. Επιπλέον, με την αντικατάσταση ενός EPS με οπτικούς διακόπτες, απαιτούνται λιγότερες μετατροπές E/O (electrical to optical) και O/E (optical to electrical), γεγονός που μπορεί να μειώσει περαιτέρω την κατανάλωση ρεύματος.

Τα τελευταία χρόνια, στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διαφορετικές αρχιτεκτονικές οπτικής διασύνδεσης για τα DCN. Αυτές οι αρχιτεκτονικές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως υβριδικές και πλήρως οπτικές. Στις υβριδικές αρχιτεκτονικές, χρησιμοποιούνται τόσο το EPS όσο και η οπτική διασύνδεση. Ειδικότερα, το EPS χρησιμοποιείται για τη μετάδοση βραχύβιων ροών κυκλοφορίας (π.χ., mice flows) και ο διακόπτης οπτικού κυκλώματος (Optical Circuit Switched - OCS) χρησιμοποιείται για τη μετάδοση ροών κυκλοφορίας μεγάλης διάρκειας και εύρους ζώνης (π.χ. elephant flows) [1].

Τα τρέχοντα δίκτυα κέντρων δεδομένων που βασίζονται σε μεταγωγείς εμπορευμάτων απαιτούν υπερβολική ποσότητα ενέργειας για να αντιμετωπίσουν αυτήν την αύξηση της επισκεψιμότητας. Τα οπτικά δίκτυα διασύνδεσης εντός DCN αναδείχθηκαν πρόσφατα ως μια πολλά υποσχόμενη λύση που μπορεί να προσφέρει υψηλότερη απόδοση ενώ καταναλώνει μειωμένη ισχύ [19].



Εικόνα 16 Σύγχρονες αρχιτεκτονικές δικτύων κέντρων δεδομένων (α) υβριδικό (β) αμιγώς οπτικό

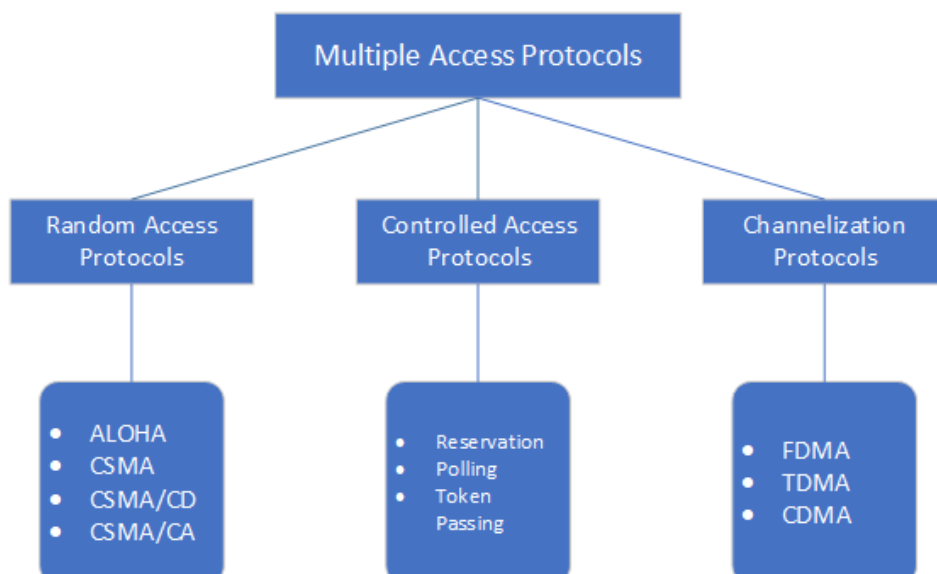
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ CSMA

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης CSMA, καθώς σε αυτό στηρίχθηκε η μελέτη του δικτύου κέντρου δεδομένων.

Το CSMA, ανήκει στη κατηγορία πρωτοκόλλων τυχαίας προσπέλασης και είναι ακρωνύμιο των όρων carrier sense multiple access, δηλαδή πολλαπλή προσπέλαση με ανίχνευση φέροντος.

Το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης CSMA ορίζει ότι ένας σταθμός που θέλει να μεταδώσει, πραγματοποιεί πρώτα ανίχνευση του καναλιού με σκοπό την διαπίστωση για το αν υπάρχει φέρον σήμα. Αν διαπιστωθεί ότι το κανάλι είναι αδρανές ο σταθμός προχωρά στη μετάδοση. Στην αντίθετη περίπτωση συνεχίζεται την ανίχνευση του καναλιού από το σταθμό μέχρι να το βρει αδρανές. Εάν δύο οι περισσότεροι σταθμοί ανιχνεύσουν ένα κανάλι ταυτόχρονα (ή σχεδόν ταυτόχρονα) και το βρουν ελεύθερο, τότε θα προσπαθήσουν να μεταδώσουν όλοι μαζί και θα προκύψει σύγκρουση πακέτων.



Εικόνα 17 Κατηγορίες Πρωτοκόλλων Πολλαπλής Πρόσβασης

Από τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης που αναγράφονται στην εικόνα 23 επιλέχθηκε το CSMA αποκλείοντας τα channelization protocols καθώς και τα controlled access protocols. Τα τελευταία απαιτούν έναν κεντρικό χειριστή, γεγονός που τα καθιστά

εξαρτώμενα από αυτόν. Έτσι αν ο κεντρικός διαχειριστής υποστεί οποιαδήποτε βλάβη γίνεται κατανοητό ότι ολόκληρο το δίκτυο καταρρέει.

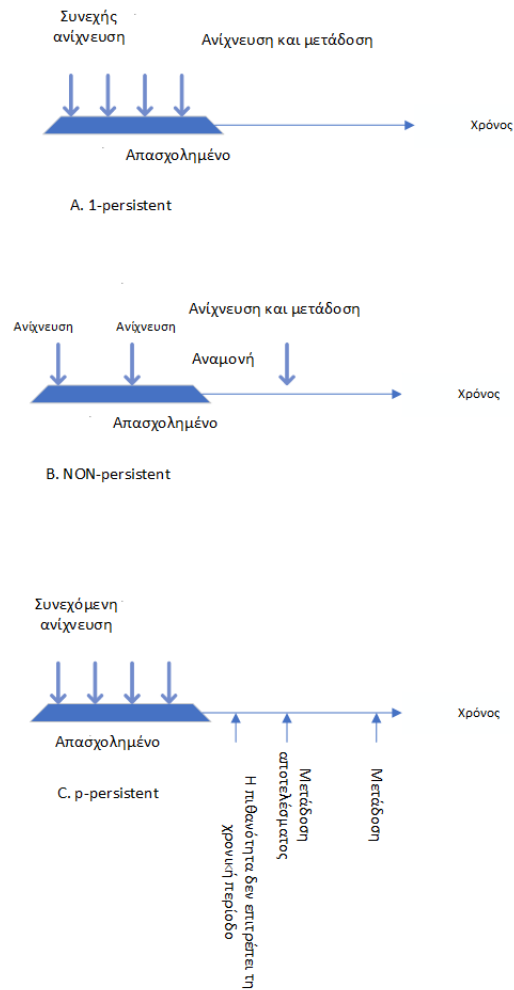
Η κύρια δυσκολία με το πρωτόκολλο carrier sense multiple access/collision avoidance (CSMA/CA) είναι όταν τουλάχιστον δύο συσκευές εκπέμπουν ταυτόχρονα προκαλώντας έτσι συγκρούσεις [20].

5.2 Λειτουργίες πρόσβασης

Οι παραλλαγές του CSMA χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγόριθμους για να καθορίσουν πότε θα ξεκινήσει η μετάδοση στο κοινό μέσο. Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτών των αλγορίθμων είναι το πόσο επιθετικοί ή επίμονοι είναι στην εκκίνηση της μετάδοσης. Ένας πιο επιθετικός αλγόριθμος μπορεί να ξεκινήσει τη μετάδοση πιο γρήγορα και να χρησιμοποιήσει μεγαλύτερο ποσοστό του διαθέσιμου εύρους ζώνης του μέσου. Αυτό είναι συνήθως σε βάρος της αυξημένης πιθανότητας σύγκρουσης με άλλα πακέτα.

1. 1-Persistent: Η συγκεκριμένη λειτουργία πρόσβασης CSMA είναι ένας επιθετικός αλγόριθμος μετάδοσης. Όταν ο κόμβος εκπομπής είναι έτοιμος για μετάδοση, αντιλαμβάνεται το μέσο μετάδοσης για αδράνεια ή απασχολημένο. Εάν είναι σε αδράνεια, τότε μεταδίδει αμέσως. Εάν είναι κατειλημμένο, τότε ανιχνεύει το μέσο μετάδοσης συνεχώς μέχρι να μείνει αδρανές και μετά μεταδίδει το μήνυμα (ένα πλαίσιο) άνευ όρων (δηλαδή με πιθανότητα=1). Αν πρόκειται να συμβεί σύγκρουση, ο αποστολέας περιμένει για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα και επιχειρεί εκ νέου την ίδια διαδικασία. Το 1-persistent CSMA χρησιμοποιείται σε συστήματα Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection (CSMA/CD) συμπεριλαμβανομένου του Ethernet.
2. Non-Persistent: Είναι ένας μη επιθετικός αλγόριθμος μετάδοσης. Όταν ο κόμβος μετάδοσης είναι έτοιμος να μεταδώσει δεδομένα, αντιλαμβάνεται ότι το μέσο μετάδοσης είναι αδρανές ή απασχολημένο. Εάν είναι σε αδράνεια, τότε μεταδίδεται αμέσως. Εάν είναι απασχολημένο, μεταβαίνει στο τελευταίο βήμα τυχαίας αναμονής του 1-persistent CSMA αμέσως πριν επαναλάβει ξανά ολόκληρο τον λογικό κύκλο: δεν επιμένει να ελέγχει το κατειλημμένο κανάλι προσπαθώντας να περάσει τη μετάδοσή του, εξ ου και το όνομα. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την πιθανότητα σύγκρουσης και έχει ως αποτέλεσμα συνολικά υψηλότερη μεσαία απόδοση, αλλά με ποινή μεγαλύτερης αρχικής καθυστέρησης σε σύγκριση με το 1-persistent.

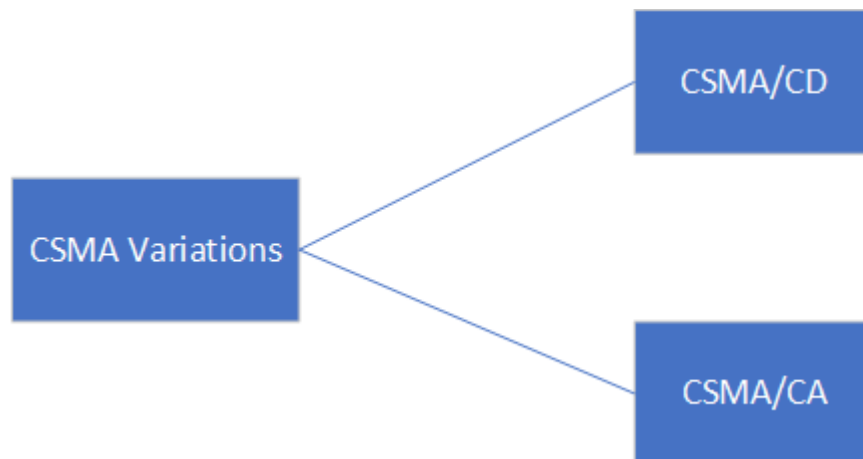
3. P-Persistent: Αυτή η προσέγγιση βρίσκεται μεταξύ των τρόπων πρόσβασης 1-persistent και non-persistent CSMA. Όταν ο κόμβος μετάδοσης είναι έτοιμος να μεταδώσει δεδομένα, αντιλαμβάνεται ότι το μέσο μετάδοσης είναι αδρανές ή απασχολημένο. Εάν είναι σε αδράνεια, τότε μεταδίδεται αμέσως. Εάν είναι κατειλημμένο, τότε ανιχνεύει το μέσο μετάδοσης συνεχώς μέχρι να παραμείνει αδρανές και μετά εκπέμπει με πιθανότητα p . Εάν ο κόμβος δεν εκπέμπει (η πιθανότητα αυτού του συμβάντος είναι $1-p$), περιμένει μέχρι την επόμενη διαθέσιμη χρονική θυρίδα. Εάν το μέσο μετάδοσης δεν είναι απασχολημένο, εκπέμπει ξανά με την ίδια πιθανότητα p . Αυτή η πιθανολογική δέσμευση επαναλαμβάνεται έως ότου μεταδοθεί τελικά το πλαίσιο ή όταν διαπιστωθεί ότι το μέσο είναι απασχολημένο ξανά. Στην τελευταία περίπτωση, ο κόμβος επαναλαμβάνει ολόκληρο τον λογικό κύκλο (ο οποίος ξεκίνησε με την ανίχνευση του μέσου μετάδοσης για αδράνεια ή απασχολημένο) ξανά. Σημειώνεται ότι το $p = 0$ -persistent CSMA είναι διαφορετικό από το non-persistent CSMA. Και τα δύο μπορούν να μεταδώσουν μόνο στην αρχή της διαδικασίας (αν το κανάλι είναι αδρανές), αλλά η συμπεριφορά τους σε ένα κατειλημμένο κανάλι διαφέρει: το μη μόνιμο CSMA δεν επιχειρεί να ανιχνεύσει το κανάλι και επανεκκινεί τον λογικό του κύκλο, ενώ $p = 0$ απαραίτητα κολλάει σε έναν άπειρο βρόχο αναμονής (καθώς έχει μηδενική πιθανότητα μετάδοσης ακόμα κι αν το κανάλι επιστρέψει στο αδρανές).
4. O-Persistent: Σε κάθε κόμβο εκχωρείται μια εντολή μετάδοσης από έναν εποπτικό κόμβο. Όταν το μέσο μετάδοσης βρίσκεται σε αδράνεια, οι κόμβοι περιμένουν τη χρονοθυρίδα τους σύμφωνα με την εκχωρημένη σειρά μετάδοσης. Ο κόμβος που έχει οριστεί για τη μετάδοση εκπέμπει πρώτος αμέσως. Ο κόμβος που έχει εκχωρηθεί για τη μετάδοση του δεύτερου περιμένει μία χρονοθυρίδα (αλλά μέχρι εκείνη τη στιγμή ο πρώτος κόμβος έχει ήδη αρχίσει να εκπέμπει). Οι κόμβοι παρακολουθούν το μέσο για μεταδόσεις από άλλους κόμβους και ενημερώνουν την εκχωρημένη σειρά τους με κάθε ανιχνευόμενη μετάδοση (δηλαδή μετακινούνται μια θέση πιο κοντά στο μπροστινό μέρος της ουράς).



Εικόνα 18 Λειτουργίες πρόσβασης του CSMA

5.3 Παραλλαγές Πρωτοκόλλου CSMA

Υπάρχουν δύο κύριες παραλλαγές του CSMA: CSMA/CD – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection και CSMA/CA – Collision Avoidance.



Εικόνα 19 Παραλλαγές πρωτοκόλλου CSMA

Το CSMA/CD είναι μια παραλλαγή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου το μέσο μπορεί να ακούγεται κατά τη μετάδοση. Επιτρέπει στους σταθμούς να ανιχνεύουν τότε λαμβάνει χώρα παρεμβολή και να διακόπτουν αμέσως τη μετάδοση, στέλνοντας πρώτα ένα σήμα συμφόρησης για να ειδοποιήσουν τους άλλους σταθμούς που μοιράζονται το μέσο της σύγκρουσης, ώστε, αν έχουν κάτι να μεταδώσουν, να περιμένουν πριν εκπέμψουν. Μετά την αναμονή, η μετάδοση συνεχίζεται εάν το μέσο είναι καθαρό, διασφαλίζοντας έτσι ότι το μέσο μοιράζεται δίκαια μεταξύ των σταθμών και εμποδίζοντας οποιονδήποτε σταθμό να μονοπωλήσει την επικοινωνία. Αυτό το πρωτόκολλο δεν χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα λόγω της χρήσης συσκευών σε επίπεδο σύνδεσης, όπως διακόπτες σε δίκτυα ethernet και της χρήσης άλλων πρωτοκόλλων σε άλλους τύπους δικτύων.

Τα βήματα του αλγορίθμου του CSMA/CD είναι:

- Όταν ένα πλαίσιο είναι έτοιμο, ο σταθμός εκπομπής ελέγχει εάν το κανάλι είναι αδρανές ή απασχολημένο.
- Εάν το κανάλι είναι απασχολημένο, ο σταθμός περιμένει έως ότου το κανάλι τεθεί σε αδράνεια.
- Εάν το κανάλι είναι αδρανές, ο σταθμός αρχίζει να εκπέμπει και παρακολουθεί συνεχώς το κανάλι για να ανιχνεύσει σύγκρουση.
- Εάν εντοπιστεί σύγκρουση, ο σταθμός ξεκινά τον αλγόριθμο επίλυσης σύγκρουσης.
- Ο σταθμός επαναφέρει τους μετρητές αναμετάδοσης και ολοκληρώνει τη μετάδοση πλαισίου.

Η άλλη κύρια παραλλαγή του CSMA είναι το CSMA/CA. Σε αυτό το πρωτόκολλο, εάν το μέσο προσδιορίζεται ως καθαρό μετά την ακρόασή του, αναμένει ένας επιπλέον τυχαία επιλεγμένος χρόνος πριν από τη μετάδοση, μειώνοντας έτσι τον αριθμό των συγκρούσεων.

Τα βήματα του αλγορίθμου CSMA/CA είναι:

- Όταν ένα πλαίσιο είναι έτοιμο, ο σταθμός εκπομπής ελέγχει εάν το κανάλι είναι αδρανές ή απασχολημένο.
- Εάν το κανάλι είναι απασχολημένο, ο σταθμός περιμένει έως ότου το κανάλι τεθεί σε αδράνεια.
- Εάν το κανάλι είναι αδρανές, ο σταθμός περιμένει ένα διάστημα και στη συνέχεια στέλνει το καρέ.

- Μετά την αποστολή του καρέ, ρυθμίζει ένα χρονόμετρο.
- Στη συνέχεια, ο σταθμός περιμένει την επιβεβαίωση από τον δέκτη. Εάν λάβει την επιβεβαίωση πριν από τη λήξη του χρονοδιακόπτη, σηματοδοτεί μια επιτυχημένη μετάδοση.
- Διαφορετικά, περιμένει μια χρονική περίοδο υποχώρησης και επανεκκινεί τον αλγόριθμο.

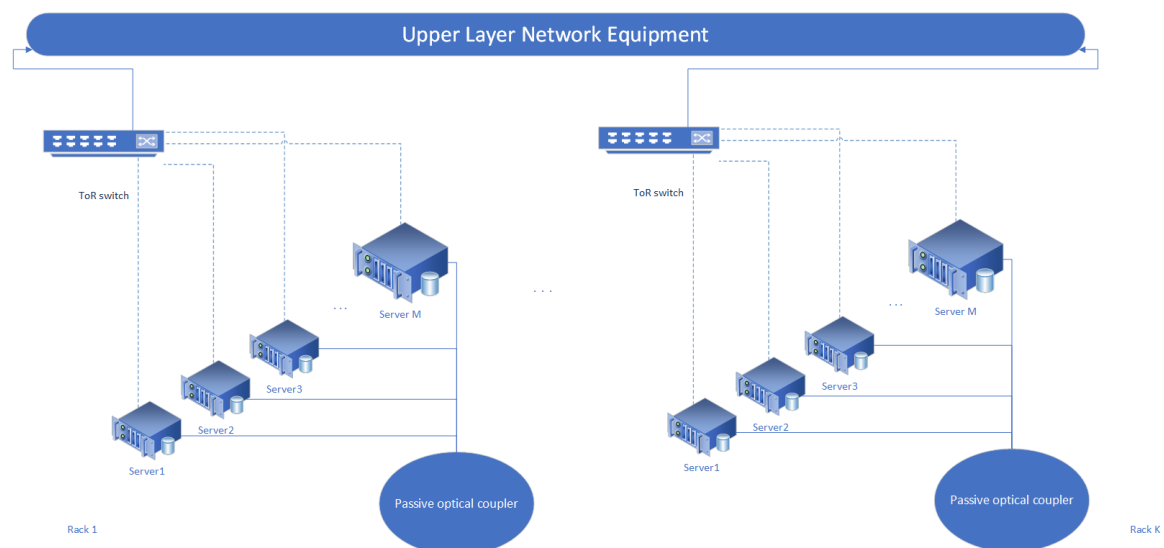
Το CSMA/CD προσπαθεί λιγότερο για την αποφυγή συγκρούσεων. Αντίθετα, το πρωτόκολλο CSMA/CA κατανοεί τις συγκρούσεις ως αυτονόητο και καθιερώνει έναν μηχανισμό για το πώς πρέπει να προχωρήσουν οι συμμετέχοντες στο δίκτυο σε περίπτωση σύγκρουσης, προκειμένου να αποτραπεί η επανεμφάνιση συγκρούσεων αμέσως μετά τη δεύτερη προσπάθεια: μια τυχαία χρονική περίοδος (backoff) ότι οι σταθμοί περιμένουν μετά από μια αποτυχημένη μετάδοση πρέπει, έτσι ώστε και οι δύο εμπλεκόμενοι συμμετέχοντες να μην ξεκινήσουν ξανά την αποστολή ταυτόχρονα, αυτό πρέπει να γίνει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

6.1 Περιγραφή συστήματος

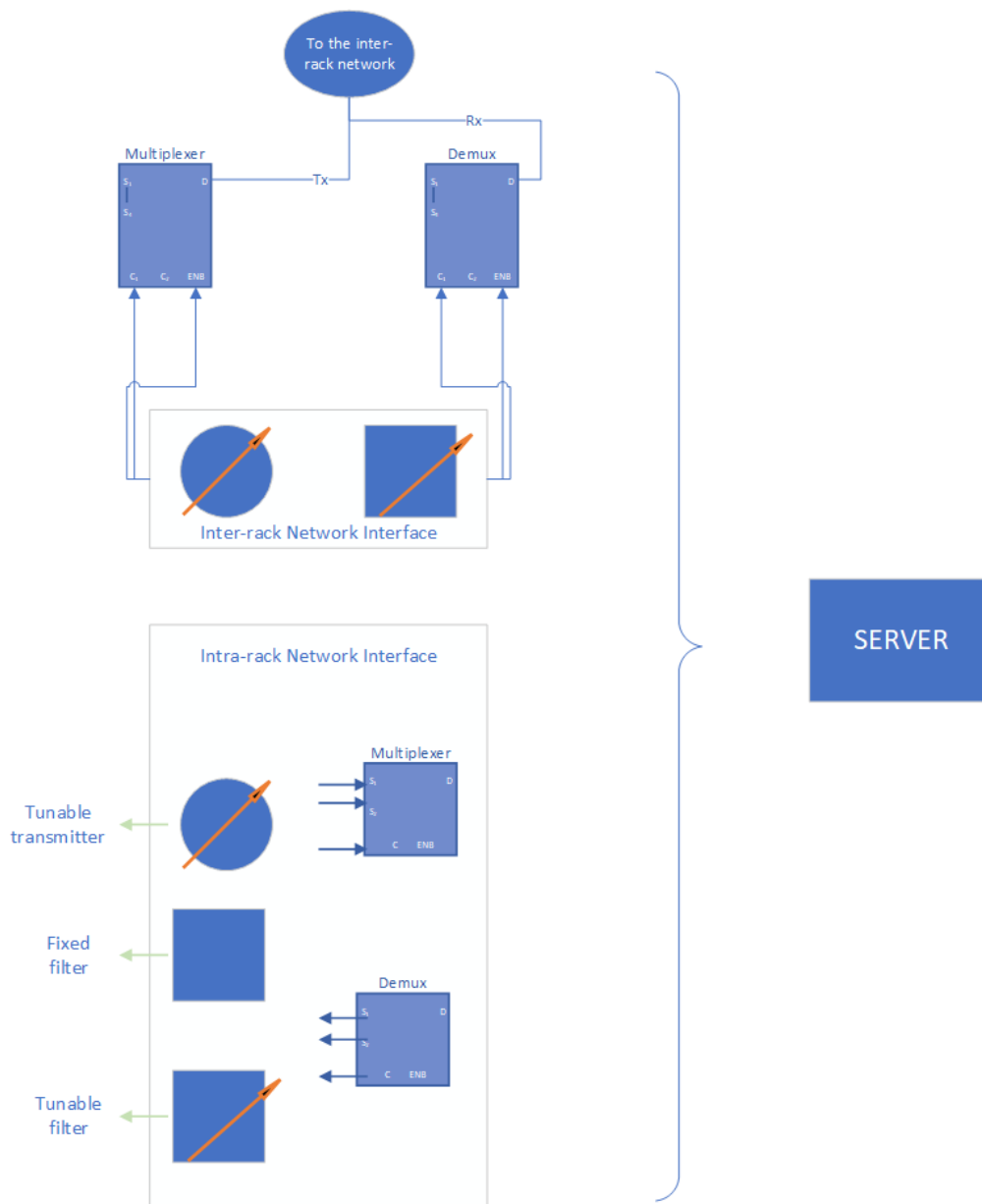
Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας δημιουργήθηκε και ερευνήθηκε ένα δίκτυο με βάση το πρωτόκολλο CSMA/CA αρχιτεκτονικής Broadcast & Select για εφαρμογή σε τοπικό δίκτυο LAN με τοπολογία παθητικού αστέρα. Το δίκτυο μελετά την κίνηση των πακέτων στα 10 Gb/s και σε τελικό στάδιο δίνει αποτελέσματα διαγραμματικά και αριθμητικά για το προσφερόμενο φορτίο, για τις επιτυχείς μεταδόσεις, την καθυστέρηση των πακέτων καθώς και τα πακέτα που δεν κατάφεραν να εισέλθουν στο δίκτυο.

Στην εικόνα 20, με τις μη διακεκομμένες γραμμές αναπαρίστανται η οπτική σύνδεση δεδομένων εντός rack με τον παθητικό οπτικό συζεύκτη ενώ με τις διακεκομμένες γραμμές, η σύνδεση οπτικών δεδομένων inter-rack με τον διακόπτη ToR. Κάθε rack διαθέτει έναν αριθμό από servers. Αν αυτοί οι servers βρίσκονται στο ίδιο rack η επικοινωνία μεταξύ αυτών δεν απαιτεί ToR switch με σκοπό να επιτυγχάνεται η intra-rack επικοινωνία. Αντιθέτως, για την επικοινωνία των servers διαφορετικών rack, απαιτεί την ύπαρξη του ToR switch, με σκοπό την inter-rack επικοινωνία. Στο δίκτυο εντός rack, όπως φαίνεται, υπάρχει ένας παθητικός συζεύκτης, ο οποίος υλοποιεί την επικοινωνία των δεδομένων. Όλοι οι διακομιστές συνδέονται με τον παθητικό συζεύκτη, χάρη σε μια οπτική ίνα.



Εικόνα 20 Σύνδεση οπτικών δεδομένων εντός rack με τον παθητικό οπτικό συζεύκτη & σύνδεση οπτικών δεδομένων με το διακόπτη ToR

Στην εικόνα 21 αποτυπώνεται ένας server στο intra-rack data center. Κάθε διακομιστής διαθέτει μια διεπαφή για την intra-rack επικοινωνία και μία διαφορετική για την inter-rack επικοινωνία. Περιλαμβάνεται ένας οπτικός πομπός, όπου σε αυτόν μπορούν να οργανωθούν τα κανάλια για την intra-rack επικοινωνία. Αντίστοιχα υπάρχει και ένας οπτικός δέκτης. Με σκοπό την προσαρμογή των καναλιών πάνω στην οπτική ίνα του παθητικού συζεύκτη, κάθε server έχει έναν πολυπλέκτη (Multiplexer-MUX) και έναν αποπολυπλέκτη (Demultiplexer-DEMUX). Για την inter-rack επικοινωνία των DCNs υπάρχει πομποδέκτης, ένας πολυπλέκτης και ένας αποπολυπλέκτης για την σύνδεση των DCN με τη χρήση του ToR switch.



Εικόνα 21 Δομή διακομιστή στο DCN εντός rack

Από πρόγραμμα γέννησης πακέτων για κάθε διακομιστή δημιουργούνται αρχεία που περιλαμβάνουν συγκεκριμένο αριθμό πακέτων, τα οποία και μελετώνται. Ένα πακέτο ορίζεται από τον προορισμό του, την πηγή του και το χρόνο γέννησής του, πληροφορίες τις οποίες δίνει το πρόγραμμα γέννησης.

Η απόδοση του συστήματος εξαρτάται από ορισμένες μεταβλητές, τις τιμές των οποίων μεταβάλλουμε με σκοπό την μελέτη του συστήματος. Αυτές είναι οι εξής:

1. Διακομιστές (servers)
2. Μέγεθος buffer (buffer size)
3. Μέγεθος πακέτου (packet size)
4. Πιθανότητα εκπομπής (transmission probability)

Ένας buffer είναι ένα κομμάτι μνήμης που αποθηκεύει πακέτα προσωρινά όταν αποστέλλονται πάρα πολλά δεδομένα σε μια διεπαφή δικτύου.

Η επιλογή μεγέθους πακέτου δικτύου ορίζει το μέγεθος του πακέτου που χρησιμοποιείται σε ολόκληρο το δίκτυο. Τα πακέτα είναι τα κομμάτια δεδομένων σταθερού μεγέθους που μεταφέρουν αιτήματα και αποτελέσματα μεταξύ πελατών και διακομιστών.

Ως πιθανότητα εκπομπής ορίζεται η επί τοις εκατό πιθανότητα του κάθε σταθμού να μεταδώσει το πακέτο που βρίσκεται σε αναμονή προς εκπομπή. Όλοι οι σταθμοί έχουν την ίδια πιθανότητα εκπομπής για κάθε εξομοίωση.

Το κανάλι των 10 Gb/s μελετήθηκε για 4 συγκεκριμένες περιπτώσεις:

1. Servers (S)=20, buffer size (B)=200, packet size (P)=576/1500/3000 bytes, probability (p)=10%.
2. Servers (S)=20, buffer size (B)=50/500/800, packet size (P)=1500 bytes, probability(p)=10%.
3. Servers (S)=20/30/40, buffer size (B)=200, packet size (P)=1500 bytes, probability (p)=10%.
4. Servers (S)=20, buffer size (B)=200, packet size (P)=1500 bytes, probability (p)=5%/15%/25%.

Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι παρακάτω μεταβλητές:

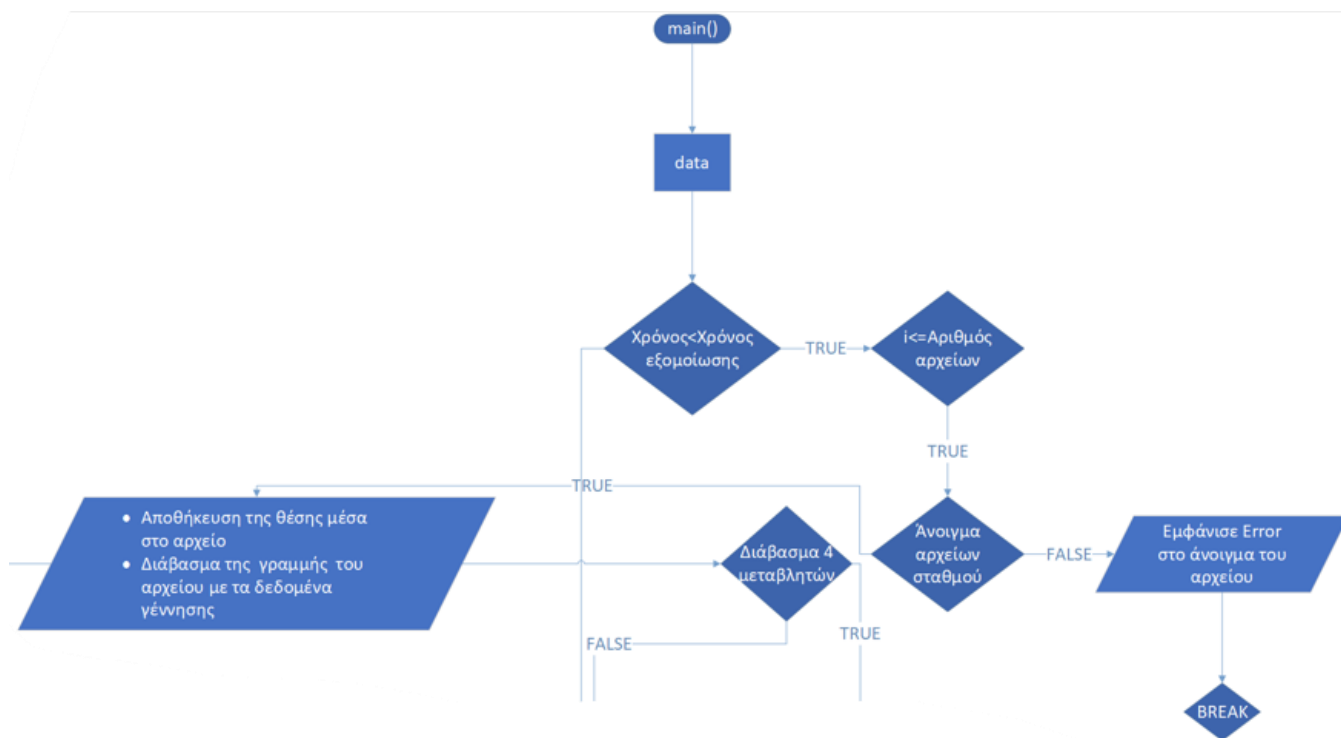
1. Προσφερόμενο φορτίο (offered load)
2. Ρυθμαπόδοση (throughput)
3. Καθυστέρηση (queue delay)
4. Ρυθμός απώλειας (dropping rate)

Το offered load αποτυπώνει το πόσα πακέτα γεννήθηκαν και εισήλθαν στον buffer κάθε σταθμού αναμένοντας να εκπεμφθούν. Για κάθε προσφερόμενο φορτίο, η ρυθμαπόδοση ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των πακέτων που πέρασαν επιτυχώς στο δίκτυο (bits) προς το χρόνο που έγινε αυτό, δηλαδή το χρόνο εξομοίωσης (seconds). Επίσης, για κάθε προσφερόμενο φορτίο, η καθυστέρηση είναι το άθροισμα του αντίστοιχου delay όλων των πακέτων που εκπέμφθηκαν επιτυχώς προς το πλήθος των πακέτων που εκπέμφθηκαν επιτυχώς. Ο ρυθμός απώλειας είναι το άθροισμα των πακέτων που εξαιτίας της πληρότητας του buffer δεν κατάφεραν να εισέλθουν στην ‘ουρά’ αναμονής προς εκπομπή.

Σημειώνεται ότι η μετάδοση ενός πακέτου είναι επιτυχής αν και μόνο αν αποκλειστικά ένας σταθμός έχει επιλέξει να εκπέμψει για δεδομένη χρονική στιγμή και αν το κανάλι δεν είναι κατειλημμένο από προηγούμενη εκπομπή. Σε αντίθετη περίπτωση έχουμε σύγκρουση πακέτων και τελικά καταστρέφονται όλα τα πακέτα.

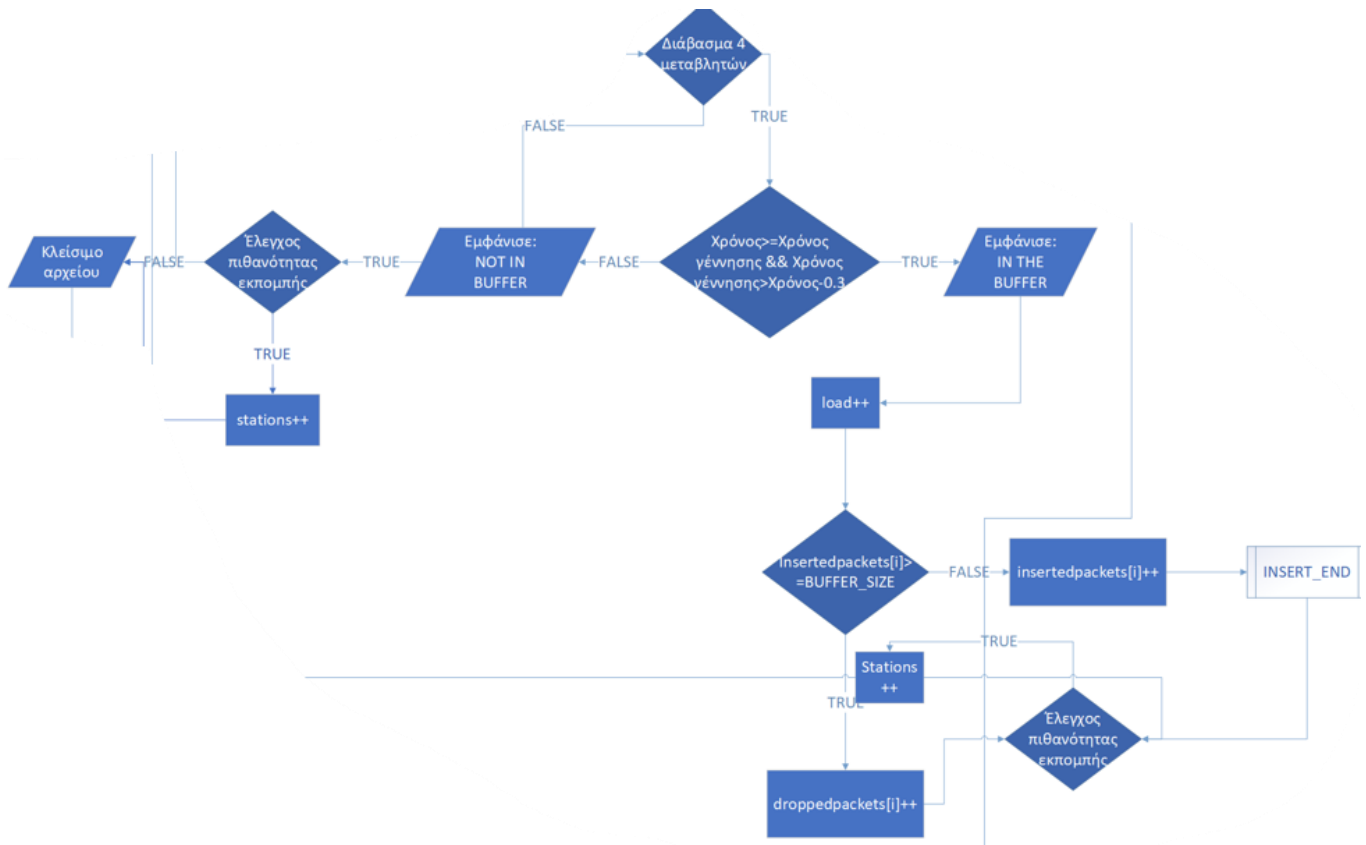
6.2 Περιγραφή κώδικα

Στη συνέχεια επεξηγείται ο κώδικας που δημιουργήθηκε μέσω διαγράμματος ροής τμηματικά (σε 3 μέρη), έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία του δικτύου που προσομοιώθηκε. Αρχικά, αφού οριστούν οι απαραίτητες μεταβλητές που χρειάζονται για την εξομοίωση, ανοίγει η πρώτη επαναληπτική διαδικασία που τρέχει σε συνάρτηση με το χρόνο της εξομοίωσης. Όσο ικανοποιείται η συνθήκη της επαναληπτικής διαδικασίας (for-loop), δηλαδή όσο ο χρόνος εξομοίωσης είναι μεγαλύτερος από τον τρέχοντα, ανοίγει η επόμενη επαναληπτική διαδικασία που τρέχει σε συνάρτηση με τον αριθμό των αρχείων που περιέχουν τα πακέτα. Αν το άνοιγμα του εκάστοτε αρχείου γίνει επιτυχώς, η αμέσως επόμενη εντολή αφορά την αποθήκευση της θέσης μέσα στο αρχείο και το διάβασμα της γραμμής με τις πληροφορίες του πακέτου. Αυτές οι πληροφορίες είναι ο αύξων αριθμός πακέτου (roll number), η πηγή του(source), ο προορισμός του (destination) και τέλος ο χρόνος γέννησής του (generation time). Σε αντίθετη περίπτωση, αν το άνοιγμα του αρχείου δεν είναι εφικτό, τότε ο κώδικας σταματά μέσω της εντολής break.



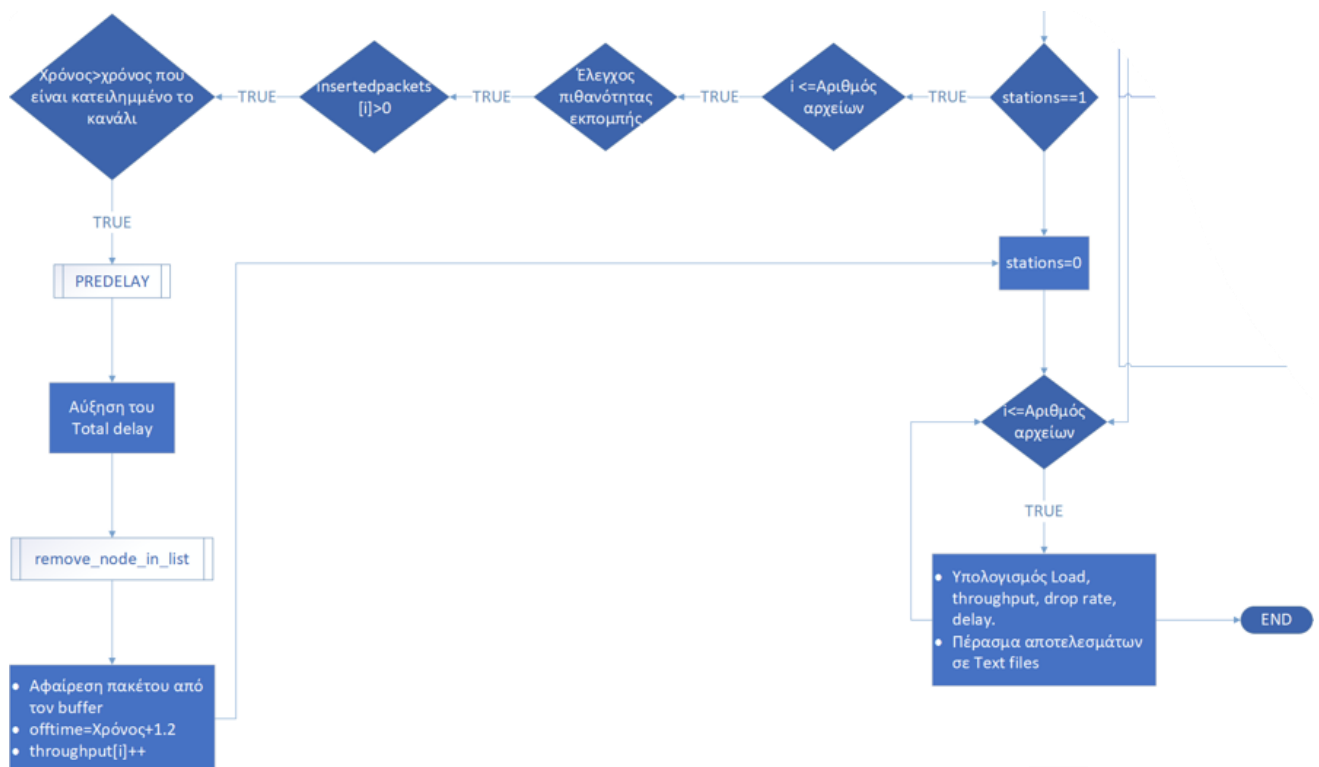
Εικόνα 22 Πρώτο μέρος του κώδικα προσομοίωσης

Στη συνέχεια, αν το διάβασμα των τεσσάρων προαναφερθέντων μεταβλητών γίνει σωστά, ανοίγει η επόμενη εντολή ελέγχου σχετικά με το αν ο χρόνος γέννησης του πακέτου που διαβάστηκε προηγουμένως ανήκει στο timeslot που ελέγχεται τη δεδομένη χρονική στιγμή. Τα timeslot είναι χρονοθυρίδες ή εναλλακτικά μέρη που έχει χωριστεί ο χρόνος εξομοίωσης για να μελετηθεί τμηματικά και στη προκειμένη περίπτωση ελέγχουμε το χρόνο εξομοίωσης ανά 0.3 εκ των 50000 microseconds. Αν ο χρόνος γέννησης ικανοποιεί τη συνθήκη αυτή τότε το αντίστοιχο πακέτο συγκαταλέγεται στο προσφερόμενο φορτίο και έχουμε αύξηση του αντίστοιχου μετρητή κατά ένα πακέτο. Έπειτα, γίνεται επόμενος έλεγχος σχετικά με το αν ο buffer είναι γεμάτος ή όχι. Αν δεν είναι, τότε μέσω συνάρτησης εισάγεται το πακέτο στον buffer και γίνεται έλεγχος εκπομπής, ενώ σε αντίθετη περίπτωση το πακέτο απορρίπτεται και συγκαταλέγεται στα dropped packets, τα οποία και αργότερα αποτελούν τον ρυθμό απώλειας που υπολογίζεται. Αν δεν διαβαστούν τέσσερις μεταβλητές, που σημαίνει ότι θα έχουμε φτάσει στο τέλος του εκάστοτε αρχείου με τα πακέτα, τότε και πάλι ελέγχουμε αν ο σταθμός θέλει να εκπέμψει. Αν αυτό ισχύει τότε αυξάνεται ο μετρητής των σταθμών με πακέτα προς εκπομπή. Έτσι τελειώνει η επαναληπτική διαδικασία του ανοίγματος των αρχείων και μελέτης τους και τα αρχεία κλείνουν ως το επόμενο timeslot.



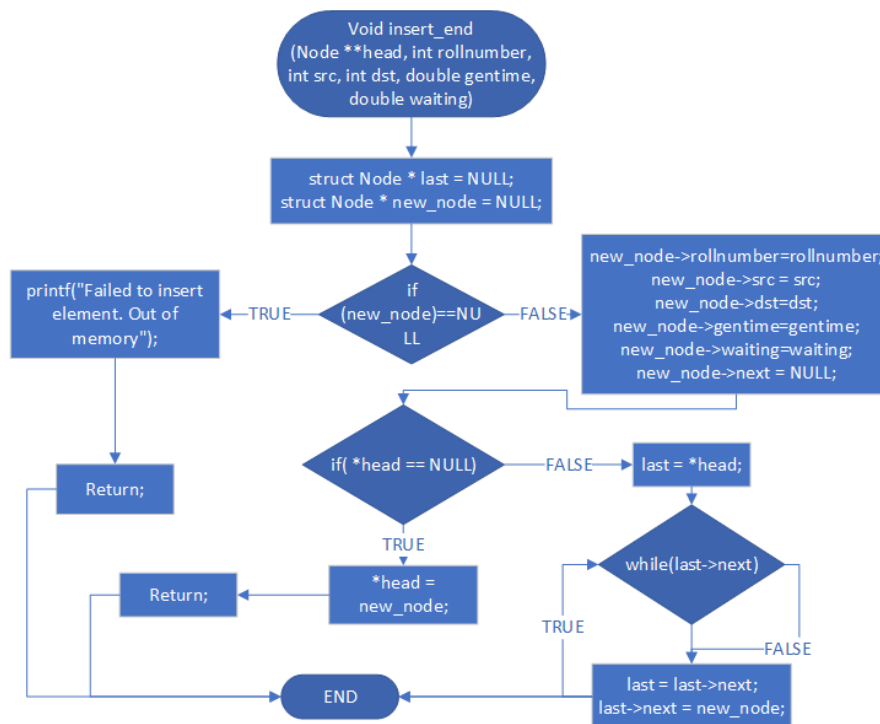
Εικόνα 23 Δεύτερο μέρος του κώδικα προσομοίωσης

Αφού κλείσουν τα αρχεία και προτού αρχίσει το επόμενο timeslot, ελέγχουμε αν υπάρχει ένας και μόνο σταθμός που επιθυμεί να εκπέμψει το πρώτο πακέτο που βρίσκεται στον buffer του. Στην περίπτωση αυτή, διατρέχουμε τα αρχεία εκ νέου με σκοπό να βρεθεί ποιος σταθμός θέλει να εκπέμψει. Με το που βρεθεί ο σταθμός αυτός και αν έχει πακέτο στην πρώτη θέση του buffer του και συγχρόνως το κανάλι δεν είναι κατειλημμένο από προηγούμενη διαδικασία εκπομπής τότε προτού αφαιρεθεί από το buffer το συγκεκριμένο πακέτο, υπολογίζεται το delay που προκύπτει μέσω συνάρτησης και στη συνέχεια διαγράφεται. Ο χρόνος για τον οποίο το κανάλι θα είναι κατειλημμένο ανανεώνεται και αυξάνεται ο μετρητής που υπολογίζει τη ρυθμαπόδοση κατά ένα πακέτο. Έπειτα και αφού ολοκληρώνεται η επαναληπτική διαδικασία για το χρόνο εξομοίωσης γίνεται υπολογισμός του συνολικού προσφερόμενου αριθμού πακέτων, των πακέτων που εκπέμφθηκαν επιτυχώς, των πακέτων που απορρίφθηκαν σε Gb/s και τέλος της συνολικής καθυστέρησης που είχαν σε milliseconds. Τα αποτελέσματα αυτά για κάθε προσομοίωση αποτυπώνονται σε αρχεία text. Έτσι, ολοκληρώνεται ο κώδικας προσομοίωσης για το κανάλι των 10 Gb/s.

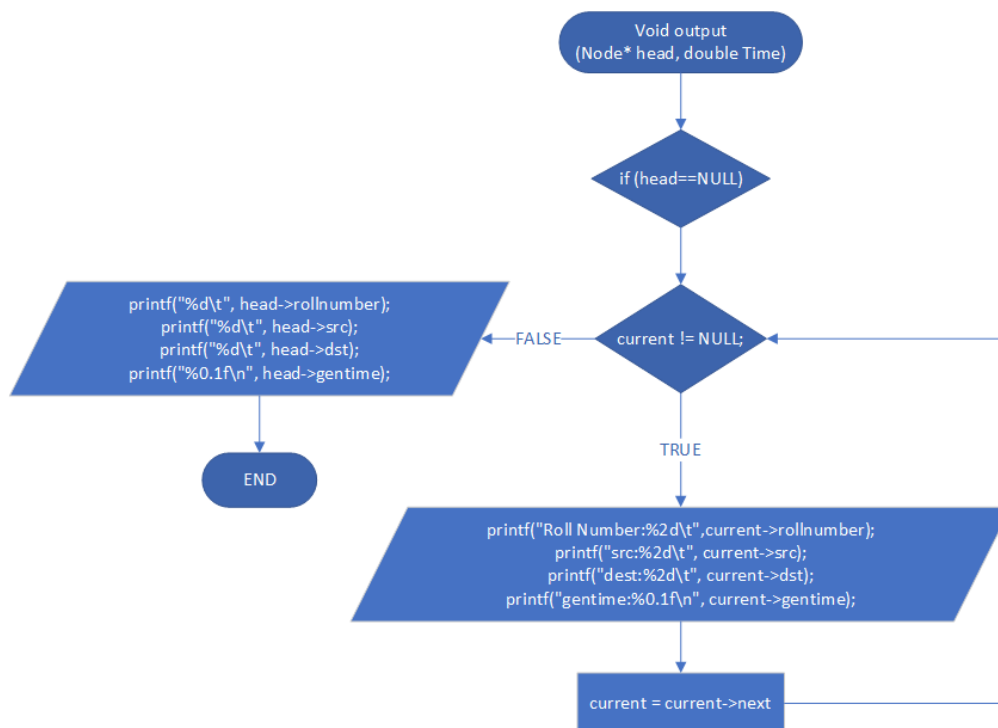


Εικόνα 24 Τρίτο μέρος του κώδικα προσομοίωσης

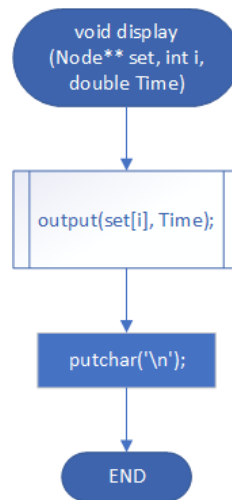
Για την εκτέλεση του κώδικα δημιουργήθηκαν και ορισμένες συναρτήσεις με σκοπό την πιο οργανωμένη ροή του κώδικα κατά την εκτέλεση. Πιο συγκεκριμένα, μια συνάρτηση για την εισαγωγή των πακέτων στον buffer, δύο συναρτήσεις για προαιρετική εμφάνιση του buffer με τη μορφή λίστας, δύο συναρτήσεις για τον υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης από την εισαγωγή του πακέτου στην λίστα ως την πιθανή εκπομπή του και τέλος μια συνάρτηση διαγραφής από τον buffer όταν ένας σταθμός επιλέξει να εκπέμψει το πρώτο πακέτο που βρίσκεται στον αντίστοιχο buffer του. Παρακάτω αποτυπώνονται κατά σειρά τα αντίστοιχα διαγράμματα ροής κώδικα των συναρτήσεων.



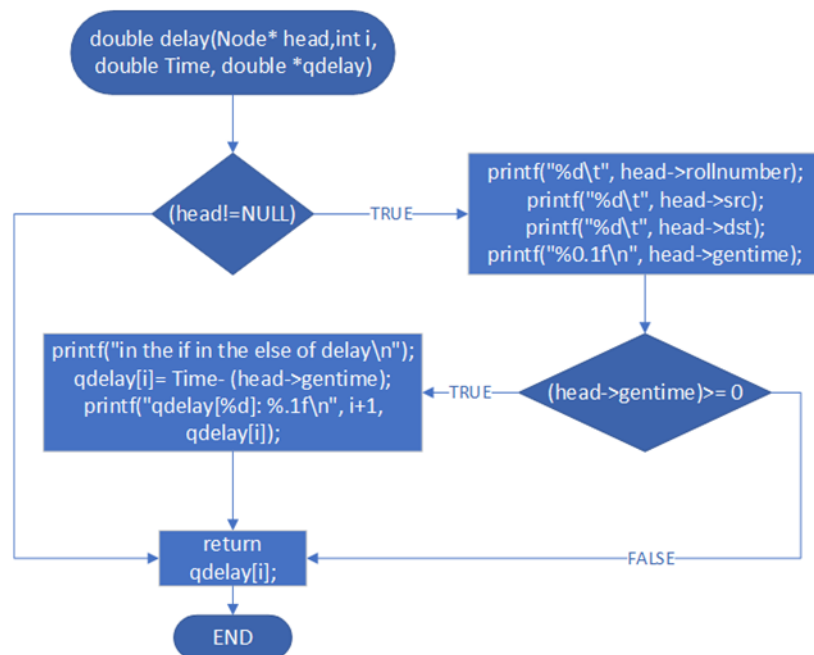
Εικόνα 26 Συνάρτηση εισαγωγής στον buffer



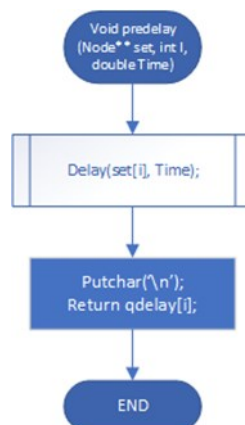
Εικόνα 25 Συνάρτηση output



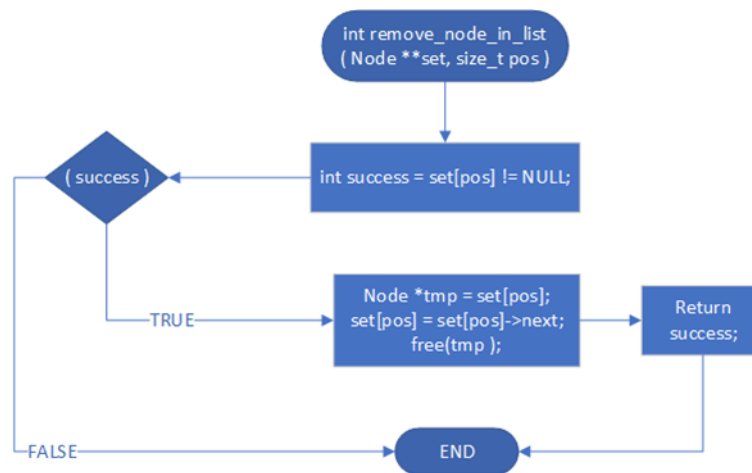
Εικόνα 28 Συνάρτηση display



Εικόνα 27 Συνάρτηση delay



Εικόνα 29 Συνάρτηση predelay



Εικόνα 30 Συνάρτηση διαγραφής από τον buffer

6.3 Απόδοση συστήματος και αποτελέσματα

Η απόδοση του συστήματος μελετήθηκε ξεχωριστά για τις τρεις περιπτώσεις:

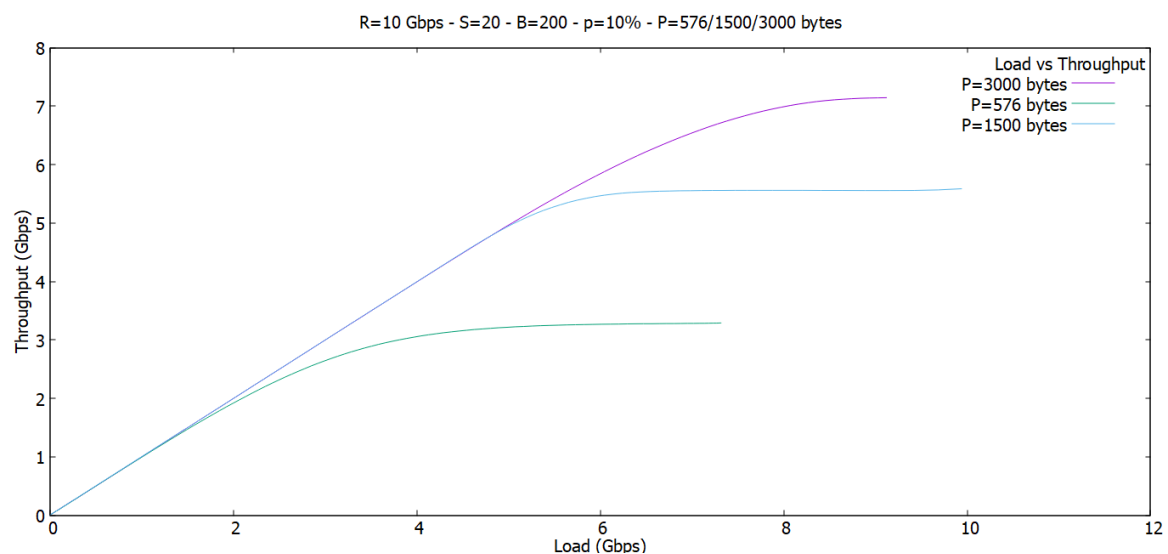
1. Servers=20, buffer size=200, packet size=576/1500 bytes, probability=10%.
2. Servers=20, buffer size=50/500/800, packet size=1500 bytes, probability=10%.
3. Servers=20/30/40, buffer size=200, packet size=1500 bytes, probability=10%.
4. Servers=20, buffer size=200, packet size=1500 bytes, probability=5%/15%/25%.

Αντικείμενο μελέτης αποτέλεσαν τα αποτελέσματα για το προσφερόμενο φορτίο (offered load), τη ρυθμαπόδοση (throughput), για τον ρυθμό με τον οποίο χάνονται τα πακέτα (dropping rate, εν συντομία: drop) και τέλος για τα αποτελέσματα για την καθυστέρηση από την στιγμή που εισέρχονται στον buffer ως την πιθανή εκπομπή τους (delay). Τα αποτελέσματα αυτά μελετήθηκαν μέσω των παρακάτω γραφικών παραστάσεων :

1. Offered load (Gb/s) vs. throughput (Gb/s),
2. Offered load (Gb/s) vs. delay (milliseconds),
3. Throughput (Gb/s) vs. delay (milliseconds),
4. Offered load (Gb/s) vs. dropping rate (Gb/s).

6.3.1 Πρώτη περίπτωση

Στην πρώτη περίπτωση μελέτης του συστήματος ερευνήθηκε το κανάλι για τις διαφορετικές τιμές του μεγέθους των πακέτων προς εξυπηρέτηση. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε το κανάλι για αυξανόμενες τιμές του μεγέθους των πακέτων από 576 σε 1500 και 3000 bytes. Οι πειραματικές δοκιμές δεν ξεπερνούσαν την μέγιστη τιμή των 10 Gb/s για 20 σταθμούς με μέγεθος του εκάστοτε buffer 200 θέσεων και πιθανότητα εκπομπής σταθερή στο 10%. Παρακάτω παρουσιάζονται και σχολιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που αποτυπώνουν τη κίνηση του καναλιού συγκριτικά με τις τιμές που μας αφορούν.

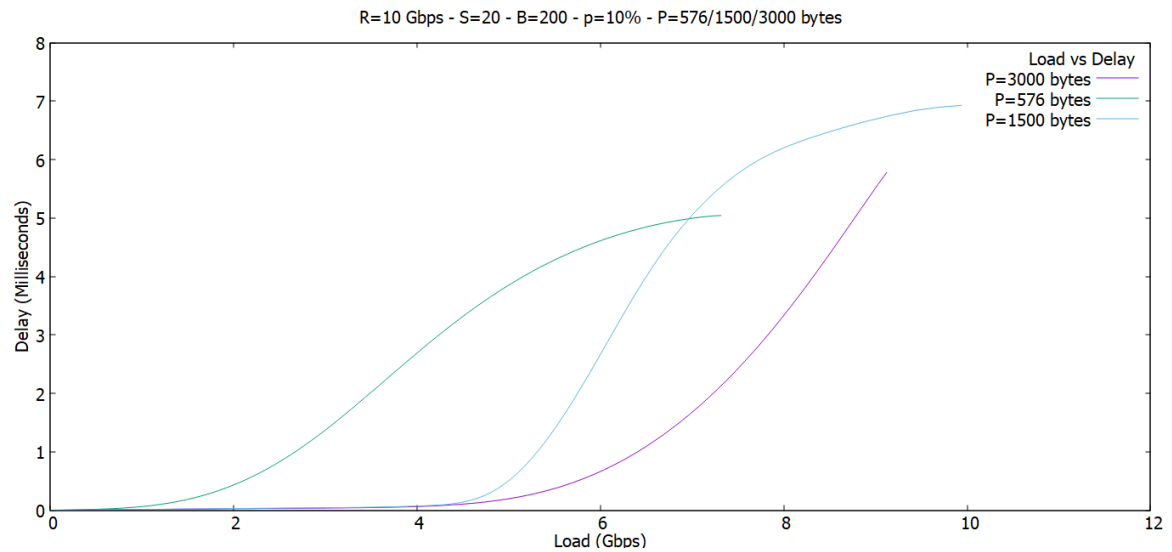


Εικόνα 31 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμαπόδοση για R=10 Gb/s, S=20, B=200, p=10%, P=576/1500/3000 bytes

Όπως φαίνεται από την εικόνα 31 για μεγαλύτερα πακέτα το κανάλι επιτυγχάνει υψηλότερες τιμές throughput για τις ίδιες τιμές του προσφερόμενου φορτίου πακέτων. Παρόλα αυτά όσο περισσότερο φορτίο προσφέρεται από ένα σημείο και μετά η τιμή του throughput σταθεροποιείται γύρω από μία τιμή που είναι και η μέγιστη. Δηλαδή, από εκείνο το σημείο και έπειτα, όσο το load αυξάνεται, το throughput παραμένει σταθερό. Αυτό συμβαίνει διότι πραγματοποιούνται συγκρούσεις που εμποδίζουν την εκπομπή των πακέτων, αφού αυτή είναι και η λογική του πρωτοκόλλου.

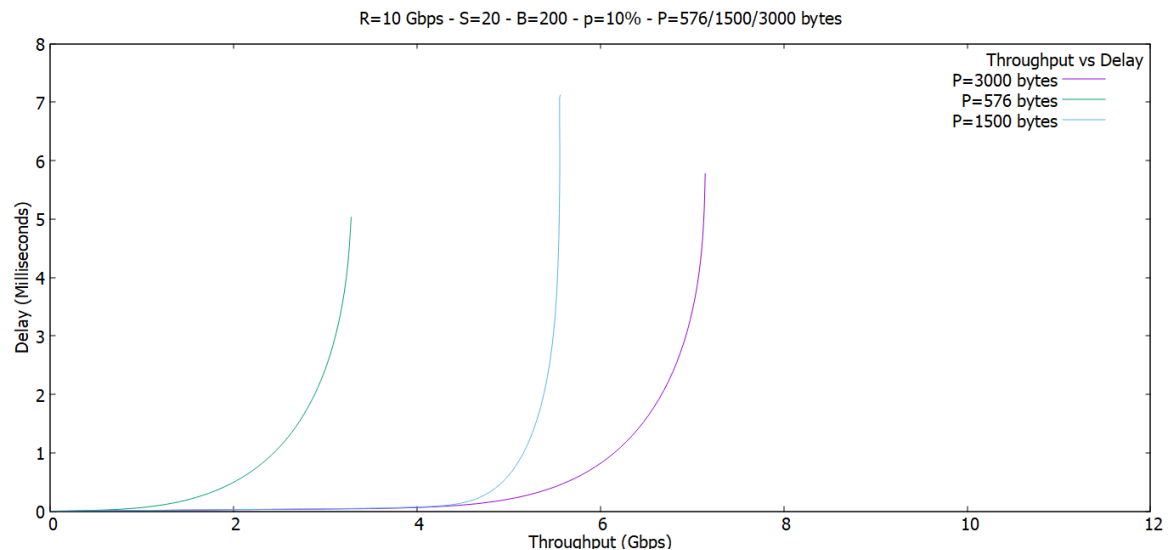
Στη συνέχεια μελετήθηκε το προσφερόμενο φορτίο σε συνδυασμό με την καθυστέρηση που παρουσιάζεται ώσπου να εξυπηρετηθεί το φορτίο αυτό (load vs delay). Παρακάτω αποδίδεται η αντίστοιχη γραφική παράσταση. Παρατηρείται ότι όσο μικρότερα πακέτα 'πέφτουν' στο δίκτυο τόσο μεγαλύτερο delay παρουσιάζεται. Αυτό συμβαίνει διότι όσο περισσότερα πακέτα εισέρχονται στο δίκτυο οι συγκρούσεις αυξάνονται οπότε δεν

πραγματοποιούνται εκπομπές πακέτων και έτσι η καθυστέρηση τους είναι λογικό να αυξάνεται.



Εικόνα 32 Προσφερόμενο φορτίο vs καθυστέρηση για R=10 Gb/s, S=20, B=200, p=10%, P=576/1500/3000 bytes

Έπειτα αναλύθηκαν σε μία γραφική παράσταση οι τιμές του throughput και του delay (throughput vs delay) που απέδωσε το κανάλι για το χρόνο εξομοίωσης και για το ίδιο προσφερόμενο φορτίο.

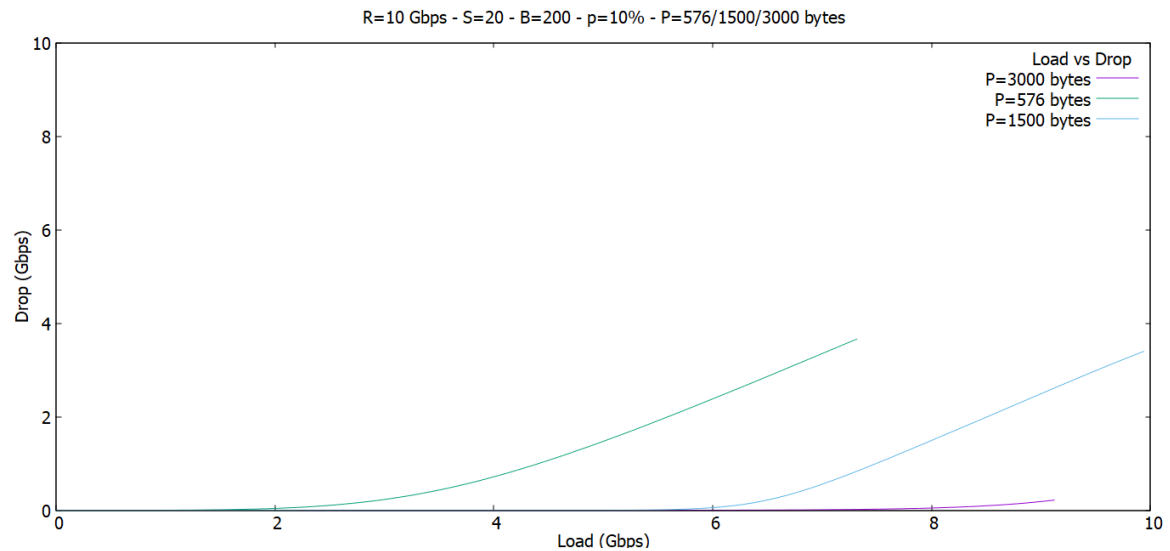


Εικόνα 33 Ρυθμαπόδοση vs καθυστέρηση για R=10 Gb/s, S=20, B=200, p=10%, P=576/1500/3000 bytes

Όπως φαίνεται και στη γραφική παράσταση της εικόνας 33, για μεγαλύτερο μέγεθος πακέτων και όσο περισσότερο φορτίο εξυπηρετείται από το δίκτυο, η καθυστέρηση τείνει να απειρίζεται από ένα σημείο και μετά. Βέβαια το σημείο αυτό ‘καθυστερεί’ όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του φορτίου που εξυπηρετείται και φαίνεται ότι από εκεί και

έπειτα το δίκτυο δεν μπορεί να αυξήσει το throughput του, εφόσον προφανώς οι buffers είναι γεμάτοι, άρα και οι συγκρούσεις αυξάνονται, οπότε τελικά δεν υφίστανται εκπομπές.

Τελευταία γραφική παράσταση που μελετήθηκε ήταν αυτή του προσφερόμενου φορτίου με τον ρυθμό που χάνονται τα πακέτα σε μια σύνδεση δικτύου (offered load vs dropping rate) και φαίνεται παρακάτω.

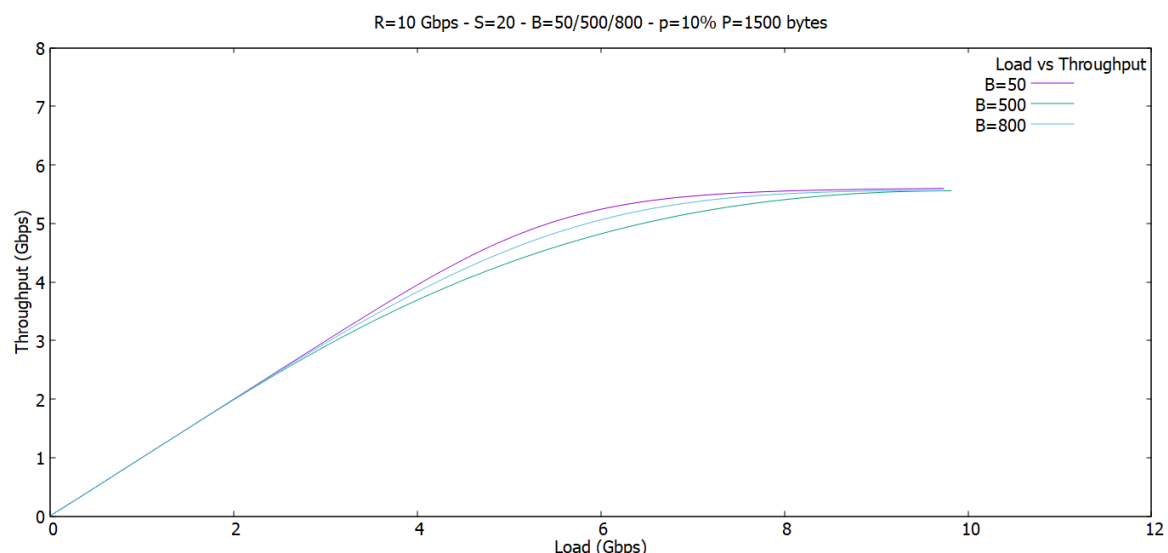


Εικόνα 34 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμός απώλειας για R=10 Gb/s, S=20, B=200, p=10%, P=576/1500/3000 bytes

Όπως φαίνεται (εικόνα 34), για μεγαλύτερες τιμές πακέτων, όσο περισσότερο φορτίο απασχολεί το δίκτυο, το dropping rate έχει την τάση να μειώνεται συγκριτικά με μικρότερες τιμές των πακέτων. Μάλιστα για την τιμή των 3000 bytes το dropping rate είναι σχεδόν μηδενικό για όλες τις δυνατές τιμές του προσφερόμενου φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι στα μεγαλύτερα πακέτα, όπως φαίνεται και στην γραφική παράσταση του load vs throughput, σημειώνεται υψηλό throughput, οπότε και ο buffer διαθέτει θέσεις αναμονής και έτσι είναι ελάχιστα μόνο τα πακέτα τα οποία χάνονται. Αντίθετα, στα μικρά πακέτα που το throughput είναι χαμηλότερο, καταλαβαίνουμε ότι λαμβάνουν χώρα περισσότερες συγκρούσεις, έτσι περισσότερα πακέτα παραμένουν στους buffers, οι οποίοι γεμίζουν και όσα νέα θέλουν να εισαχθούν, αναγκαστικά χάνονται.

6.3.2 Δεύτερη περίπτωση

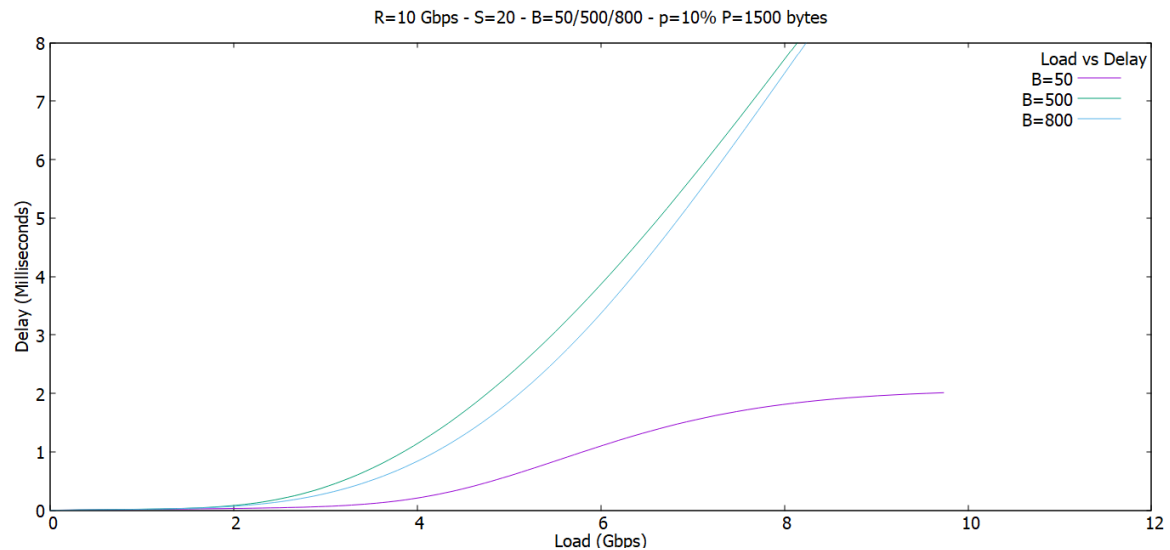
Προχωρώντας στην δεύτερη περίπτωση μελέτης του συστήματος ερευνήθηκε το κανάλι για τις διαφορετικές τιμές του μεγέθους των buffer, οι οποίοι με την προγραμματιστική λογική της λίστας ‘αποθηκεύουν’ προσωρινά τα πακέτα που είναι προς εξυπηρέτηση από το δίκτυο. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε το κανάλι για αυξανόμενες τιμές του buffer από 50 σε 500 και 800 θέσεις. Οι πειραματικές δοκιμές δεν ξεπερνούσαν την μέγιστη τιμή των 10 Gb/s για 20 σταθμούς με μέγεθος πακέτου σταθερά στα 1500 bytes και πιθανότητα εκπομπής επίσης σταθερή στο 10%. Παρακάτω παρουσιάζονται και σχολιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που αποτυπώνουν τη κίνηση του καναλιού συγκριτικά με τις τιμές των όρων load, throughput, delay και Dropping rate που μας αφορούν.



Εικόνα 35 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμαπόδοση για $R=10$ Gb/s, $S=20$, $B=50/500/800$, $p=10\%$, $P=1500$ bytes

Στην παραπάνω γραφική παράσταση Load vs Throughput (εικόνα 35) παρατηρούμε ότι δεν παίζει κάποιο ρόλο το μέγεθος του buffer στο πόσα πακέτα θα εκπεμφθούν στην κάθε περίπτωση ανάλογα με το προσφερόμενο φορτίο. Η τιμή του buffer είναι ανεξάρτητη και δεν επηρεάζει τον ρυθμό με τον οποίο εκπέμπονται τα πακέτα. Φαίνεται, μάλιστα, ότι το μέγιστο που μπορεί να εκπεμφθεί είναι περίπου 6 Gb/s και αυτό για προσφερόμενο φορτίο από περίπου 6 Gb/s και πάνω.

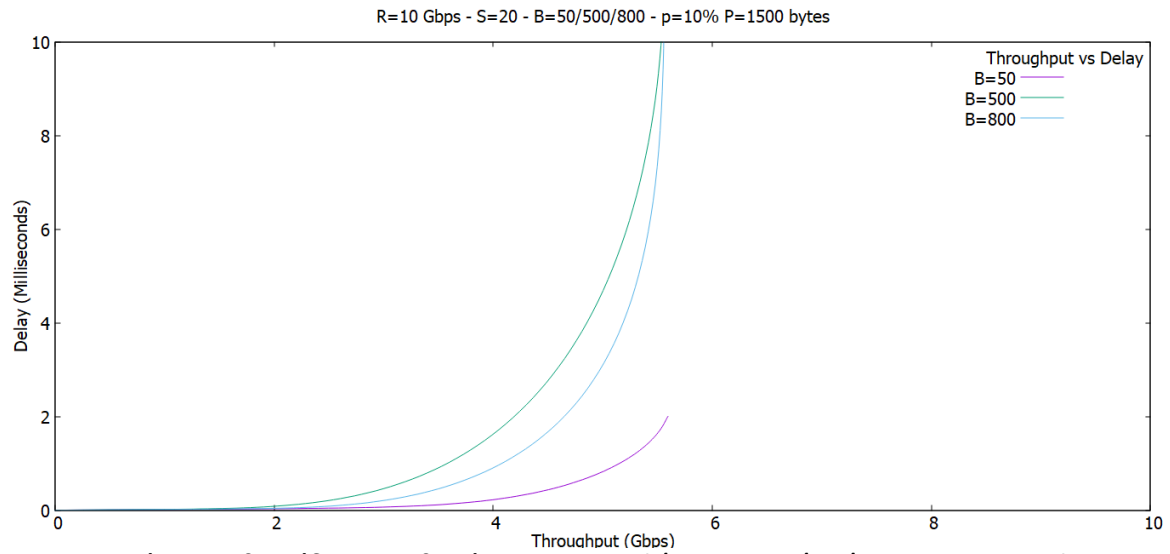
Προχωρώντας αποτυπώνεται σε συνδυαστική γραφική παράσταση το προσφερόμενο φορτίο με την καθυστέρηση που προκύπτει για τα πακέτα (εικόνα 36).



Εικόνα 36 Προσφερόμενο φορτίο vs καθυστέρηση για R=10 Gb/s, S=20, B=50/500/800, p=10%, P=1500 bytes

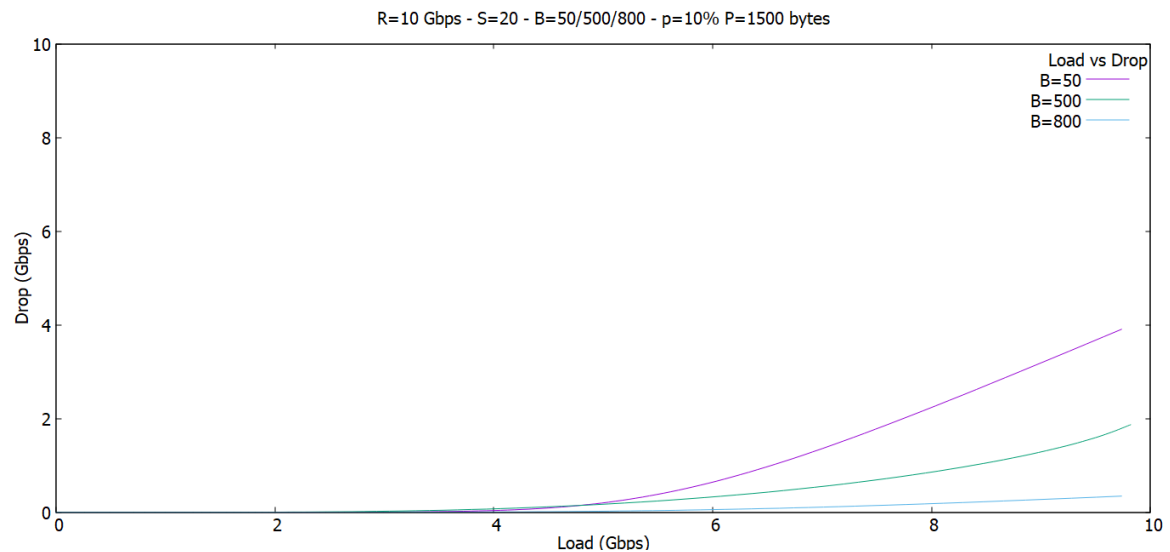
Παρατηρείται ότι για μικρής χωρητικότητας buffer και όσο περισσότερο φορτίο δέχεται το δίκτυο το delay αρχικά αυξάνεται και στη συνέχεια σχεδόν σταθεροποιείται μέχρι και το μέγιστο εισερχόμενο φορτίο των 10 Gb/s περίπου στα 2 milliseconds. Σε αντίθεση με μεγαλύτερης χωρητικότητας buffer, είτε για 500 είτε για 800 ‘θέσεις’ όπου παρατηρούμε ότι το delay τείνει να αυξάνεται από πολύ μικρές τιμές του load και μάλιστα με μεγάλο ρυθμό. Αυτό είναι λογικό καθώς όσο περισσότερα πακέτα βρίσκονται σε έναν buffer αναμονής τόσο περισσότερο θα πρέπει να αναμένουν ώσπου να εξυπηρετηθούν και πιθανόν να εκπεμφθούν. Όσο μεγαλύτερος είναι ο buffer, τόσο μεγαλύτερο delay έχουμε, διότι προσφέρει τη δυνατότητα να βρίσκονται περισσότερα πακέτα στην αναμονή προς εκπομπή. Καταλαβαίνουμε ότι – και θα γίνει και στη συνέχεια εμφανές – για μικρότερο buffer size, θα χάνονται περισσότερα πακέτα λόγω πληρότητας, οπότε και λιγότερα θα είναι σε αναμονή προς εξυπηρέτηση, μειώνοντας έτσι την εκάστοτε καθυστέρησή τους.

Έπειτα παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις throughput vs delay και load vs Dropping rate.



Εικόνα 37 Ρυθμαπόδοση vs καθυστέρηση για R=10 Gb/s, S=20, B=50/500/800, p=10%, P=1500 bytes

Φαίνεται από την εικόνα 37 ότι όσο περισσότερα πακέτα εξυπηρετούνται από το δίκτυο μελέτης η καθυστέρηση τείνει να αυξάνεται κατά πολύ. Αναλογικά με τη χωρητικότητα του buffer, και συγκεκριμένα για μεγάλες τιμές του, η αύξηση της καθυστέρησης παρατηρείται από νωρίς δηλαδή για αρκετά μικρές τιμές του throughput. Όταν το throughput σταθεροποιείται και έπειτα, το delay τείνει να αυξάνεται ραγδαία, διότι έχουν προκύψει συγκρούσεις, άρα δεν υφίστανται εκπομπές πακέτων και έτσι όσα είναι στην αναμονή προς εκπομπή, καθυστερούν.



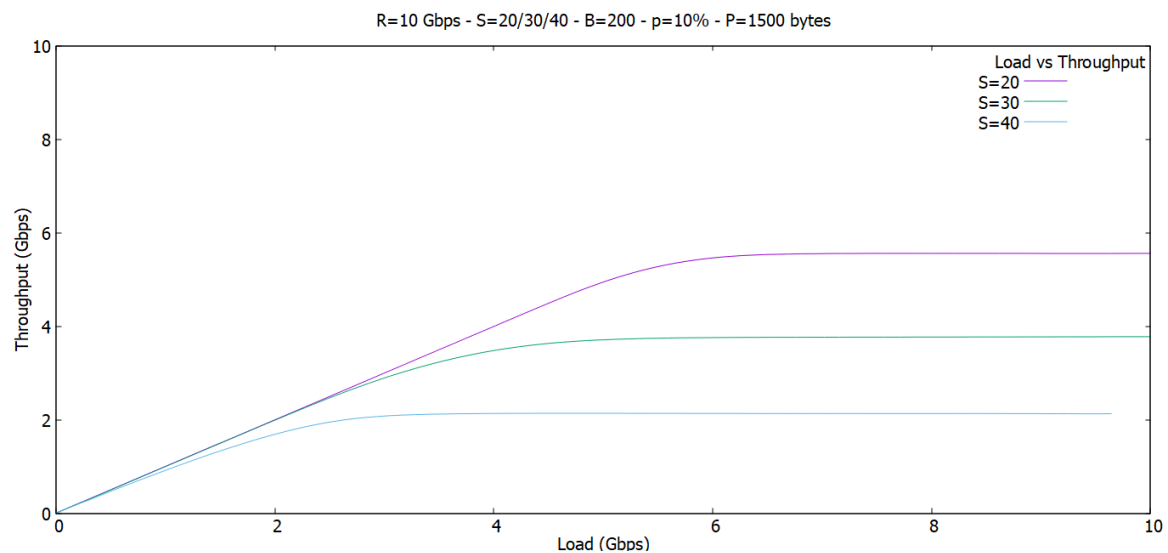
Εικόνα 38 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμός απώλειας για R=10 Gb/s, S=20, B=50/500/800, p=10%, P=1500 bytes

Στη παραπάνω γραφική παράσταση στην εικόνα 38 βλέπουμε ότι για μικρής χωρητικότητας buffer και όσο αυξάνεται το προσφερόμενο φορτίο, ο ρυθμός με τον οποίο χάνονται τα πακέτα που δεν μπαίνουν στον εκάστοτε buffer αυξάνεται. Ενώ αντίθετα, αν πρόκειται για μεγαλύτερους buffer και μεν χάνονται πακέτα, αλλά με πολύ μικρότερο ρυθμό. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσες περισσότερες θέσεις διαθέτει μια ‘ουρά αναμονής’, τόσο μεγαλύτερο αριθμό πακέτων μπορεί να δεχτεί, οπότε και είναι όλο και λιγότερα τα οποία εισέρχονται εκτός δικτύου.

6.3.3 Τρίτη περίπτωση

Για την ανάλυση της τρίτης περίπτωσης μελέτης του συστήματος ερευνήθηκε το κανάλι για τις διαφορετικές τιμές των servers, που προωθούν τα πακέτα στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε το κανάλι για 20, 30 και τέλος 40 servers. Οι πειραματικές δοκιμές δεν ξεπερνούσαν την μέγιστη τιμή των 10 Gb/s με μέγεθος πακέτου σταθερά στα 1500 bytes, μέγεθος buffer ίσο με 200 και πιθανότητα εκπομπής επίσης σταθερή στο 10%.

Παρακάτω αποτυπώνεται η γραφική παράσταση του προσφερόμενου φορτίου Load σε συνδυασμό με τον ρυθμό των πακέτων που εξυπηρετούνται τελικά από το δίκτυο (Load vs Throughput).

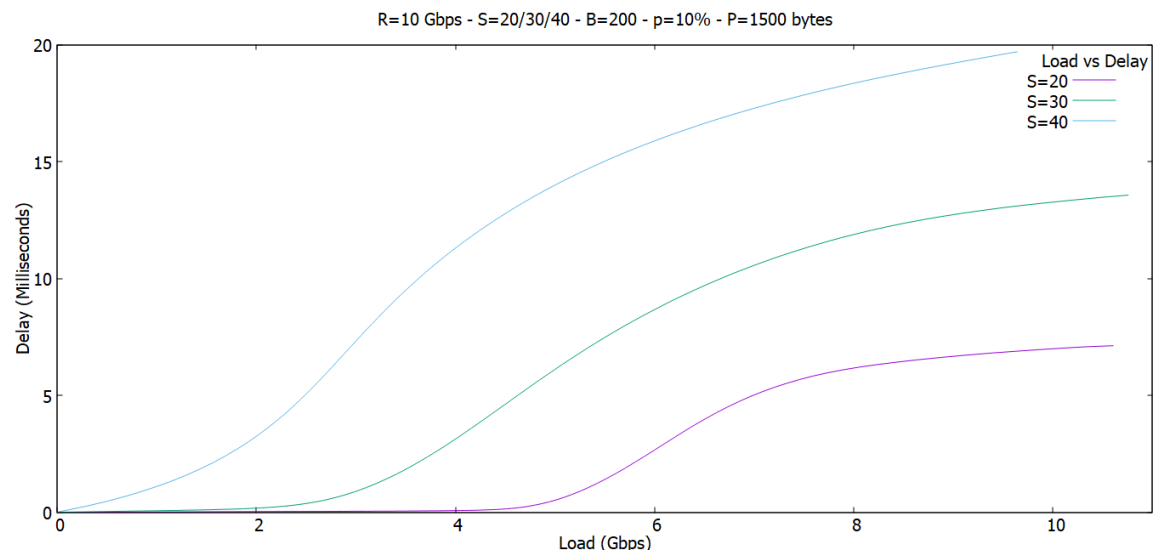


Εικόνα 39 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμαπόδοση για R=10 Gb/s, S=20/30/40, B=200, p=10%, P=1500 bytes

Παρατηρούμε ότι όσοι περισσότεροι servers προωθούν πακέτα στο δίκτυο, τόσο μικρότερη τιμή έχει το max throughput από το οποίο και μετά σταθεροποιείται η τιμή αυτή ακόμα και αν αυξάνεται το προσφερόμενο φορτίο. Είναι λογικό αυτό βέβαια καθώς γίνεται αντιληπτό ότι η απόδοση του δικτύου πέφτει όταν αυτό υπερφορτώνεται παραπάνω από όσο μπορεί να αντέξει. Σημειώνεται επίσης ότι το δίκτυο έχει βασιστεί στο πρωτόκολλο

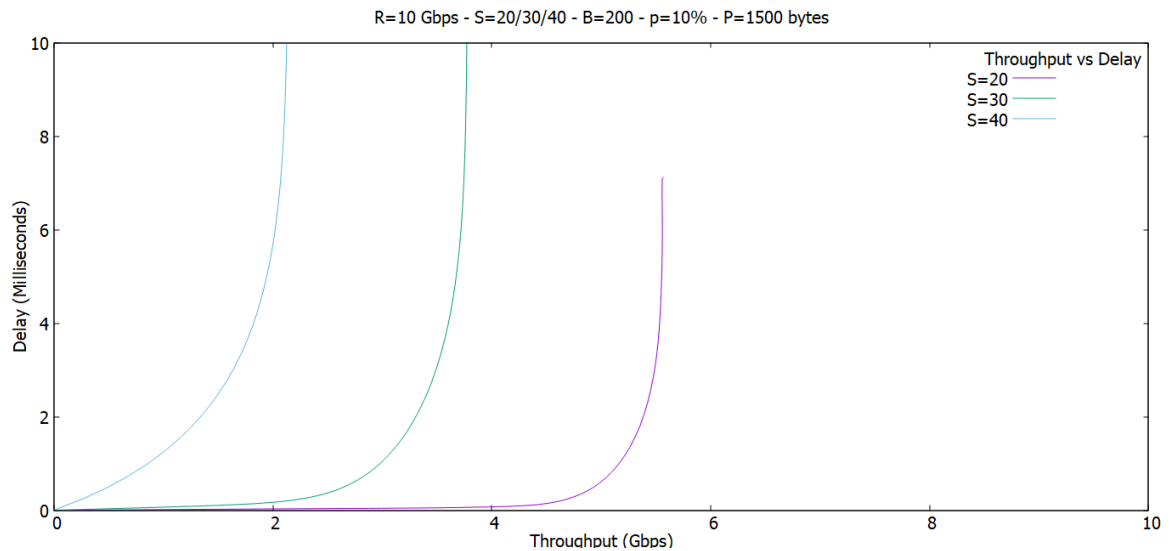
του CSMA/CA, δηλαδή εξετάζονται και αποφεύγονται οι συγκρούσεις. Οπότε όσοι περισσότεροι servers τόσες περισσότερες συγκρούσεις, και άρα λιγότερες εκπομπές. Αυτό φαίνεται και από τη σταθεροποίηση του throughput, λόγω των συγκρούσεων. Αντίθετα για λιγότερους servers, οι συγκρούσεις είναι φυσικά λιγότερες, για αυτό και παρατηρείται μεγαλύτερο max throughput, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι παρουσιάζεται διαφορετική συμπεριφορά – αντίστοιχα, δηλαδή, μετά το σημείο του max throughput προκύπτει σταθεροποίηση αυτού και πάλι λόγω συγκρούσεων.

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τη γραφική παράσταση του προσφερόμενου φορτίου με την καθυστέρηση των πακέτων ώσπου αυτά να εξυπηρετηθούν. Αυτή φαίνεται παρακάτω.



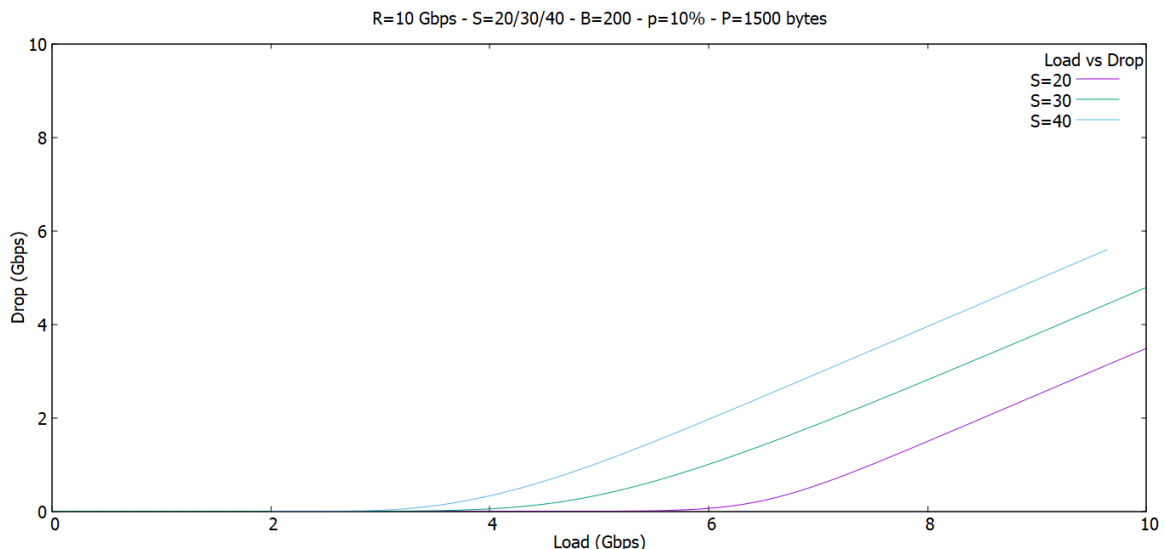
Εικόνα 40 Προσφερόμενο φορτίο vs καθυστέρηση για R=10 Gb/s, S=20/30/40, B=200, p=10%, P=1500 bytes

Είναι εμφανές ότι για περισσότερους servers οι τιμές του delay αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό. Όσο περισσότερα πακέτα απαιτούν να εξυπηρετηθούν από το δίκτυο, η αναμονή αυξάνεται καθώς το κανάλι παραμένει κατειλημμένο για μεγαλύτερη διάρκεια χρόνου. Το γεγονός ότι το πρωτόκολλο που μελετάμε αποφεύγει τις συγκρούσεις εξηγεί την αύξηση του delay όσο αυξάνεται το προσφερόμενο φορτίο στο δίκτυο, εφόσον για να εξυπηρετηθεί ένα πακέτο δεν θα πρέπει το κανάλι να είναι κατειλημμένο από τη διαδικασία εκπομπής ενός άλλου πακέτου.



Εικόνα 41 Ρυθμαπόδοση vs καθυστέρηση για R=10 Gb/s, S=20/30/40, B=200, p=10%, P=1500 bytes

Στη γραφική παράσταση της εικόνας 41 παρατηρείται ότι για μεγάλο αριθμό των servers όσο αυξάνεται ο ρυθμός με τον οποίο εξυπηρετούνται τα πακέτα, τόσο γρηγορότερα αυξάνεται το delay με την τάση να 'απειρίζεται' καθώς κυλάει ο χρόνος της εξομοίωσης και λειτουργεί το δίκτυο. Λόγω των συγκρούσεων που συμβαίνουν το throughput σταματά να αυξάνεται και δεν πραγματοποιεί το κανάλι εκπομπές. Έτσι η καθυστέρηση των πακέτων προς εκπομπή στους buffers προφανώς από αυτό το σημείο και μετά αυξάνεται με αρκετά μεγάλο ρυθμό



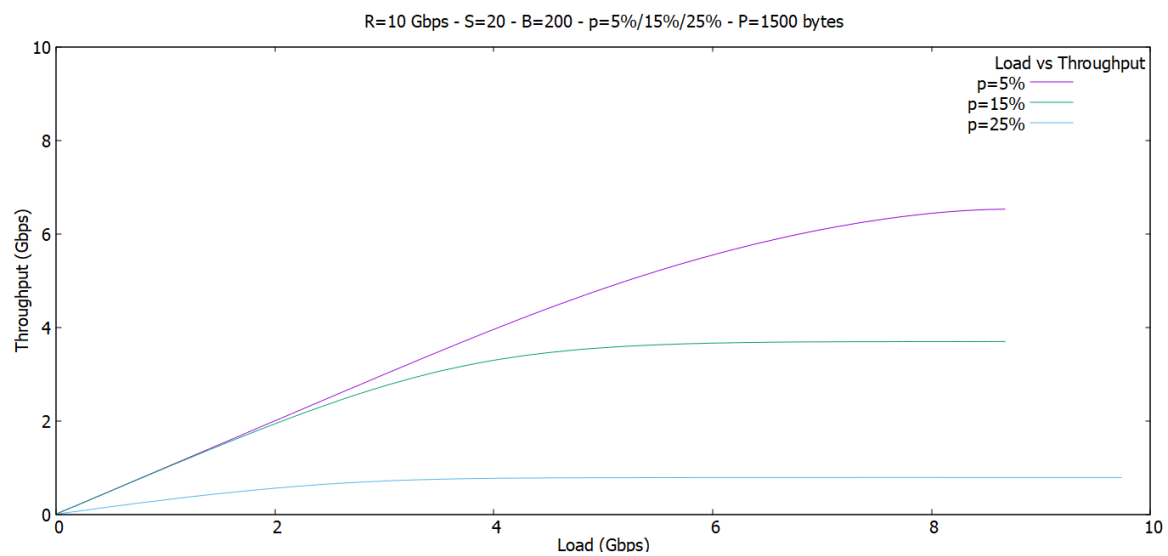
Εικόνα 42 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμός απώλειας για R=10 Gb/s, S=20/30/40, B=200, p=10%, P=1500 bytes

Στην παραπάνω γραφική παράσταση (εικόνα 42) αποτυπώνεται το προσφερόμενο φορτίο σε συνδυασμό με τον ρυθμό που χάνονται τα πακέτα κατά τη διάρκεια της

εξομοίωσης. Συμπεραίνουμε το προφανές, ότι για περισσότερους servers τα πακέτα που γίνονται dropped είναι περισσότερα για ίδιο προσφερόμενο φορτίο σε δεδομένη στιγμή της εξομοίωσης. Ο ρυθμός με τον οποίο χάνονται τα πακέτα από το δίκτυο έχει την τάση να αυξάνεται όσο αυξάνεται και το προσφερόμενο φορτίο και καθώς ο χρόνος κυλά. Δεν σταθεροποιείται, δηλαδή, παρά μόνο η καμπύλη του κινείται εκθετικά αυξανόμενα.

6.3.4 Τέταρτη περίπτωση

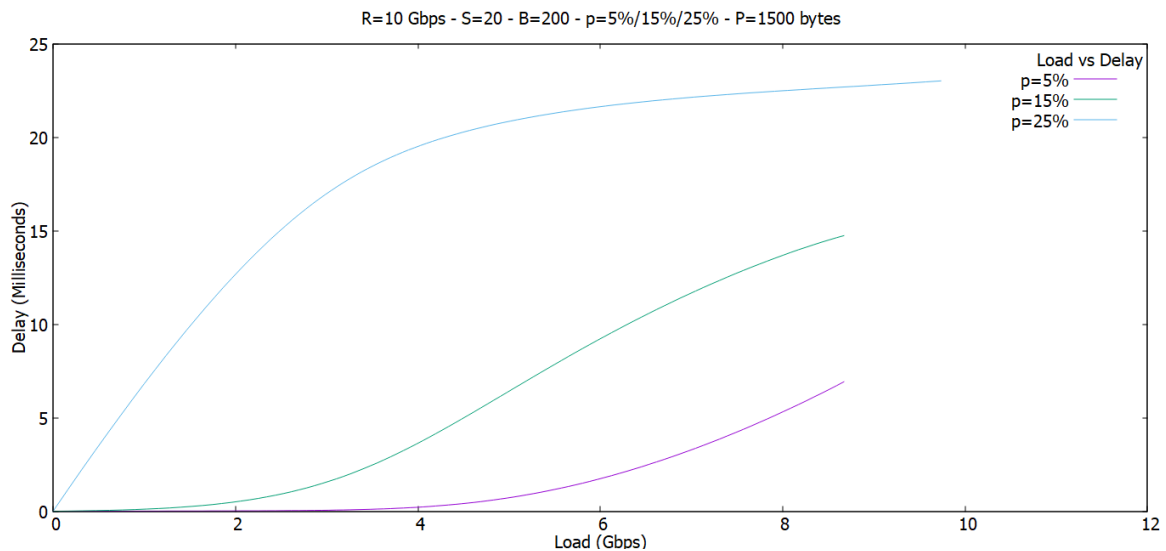
Στην τέταρτη και τελευταία περίπτωση μελετήθηκε το δίκτυο για διαφορετικές πιθανότητες εκπομπής των πακέτων. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκαν οι πιθανότητες των 5%, 15% και τέλος 25% για τα πακέτα που προσφέρονταν στο δίκτυο και στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των: load vs throughput, load vs delay, throughput vs delay και load vs drop με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του καναλιού.



Εικόνα 43 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμαπόδοση για R=10 Gb/s, S=20, B=200, p=5%/15%/25%, P=1500 bytes

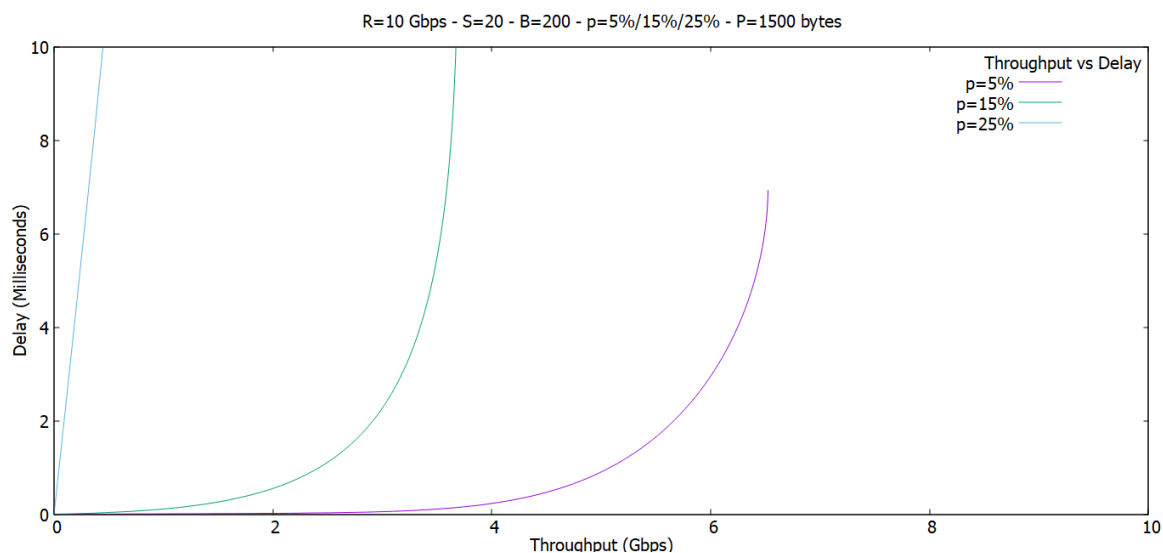
Όπως φαίνεται από τη παραπάνω γραφική παράσταση στην εικόνα 43, είναι εύκολο να συμπεράνει κανείς ότι για μικρή πιθανότητα εκπομπής το max throughput είναι μεγαλύτερο από ότι για μεγαλύτερες τιμές της πιθανότητας αυτής. Αυτό συμβαίνει διότι προκύπτουν λιγότερες συγκρούσεις με χαμηλή πιθανότητα εκπομπής και κατ' επέκταση το κανάλι εκπέμπει πακέτα χωρίς να συγκρουστούν και να καταστραφούν οπότε και το throughput αυξάνεται.

Σε συνέχεια της παραπάνω διαπίστωσης αποτυπώνεται στη γραφική του load με το delay των πακέτων ότι για μεγαλύτερες τιμές της πιθανότητας εκπομπής, η καθυστέρηση των πακέτων προς εκπομπή είναι μεγάλη. Σε αντίθεση με χαμηλές πιθανότητες εκπομπής που παρατηρείται ότι η γραφική παράσταση αποτυπώνεται με τη μορφή εκθετικής ξεκινώντας από μικρές τιμές delay. Προφανώς όσο αυξάνεται η πιθανότητα εκπομπής, προκύπτουν στο δίκτυο και περισσότερες συγκρούσεις. Έτσι, είναι λογικό να μην εκπέμπονται πακέτα, οπότε και η συνολική καθυστέρηση αυτών που αναμένουν στο buffer να είναι μεγάλη και να αυξάνεται.



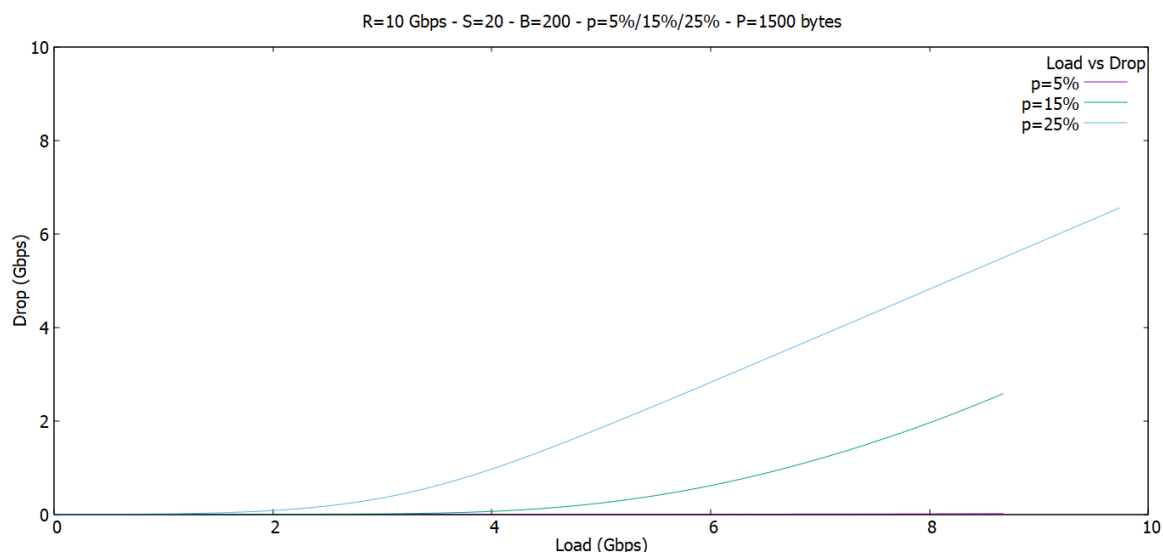
Εικόνα 44 Προσφερόμενο φορτίο vs καθυστέρηση για R=10 Gb/s, S=20, B=200, p=5%/15%/25%, P=1500 bytes

Έπειτα, στη γραφική παράσταση throughput vs delay στην εικόνα 45 βλέπουμε ότι για μεγαλύτερες πιθανότητες εκπομπής η καθυστέρηση των πακέτων αυξάνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό. Σε αντίθεση με πιο μικρές τιμές της πιθανότητας, όπου ναι μεν το delay αυξάνεται αλλά με όχι και τόσο γρήγορο ρυθμό. Για μεγαλύτερη πιθανότητα εκπομπής, οι συγκρούσεις είναι περισσότερες, οπότε δεν γίνονται εκπομπές και έτσι η αυξημένη καθυστέρηση των πακέτων είναι συνέπεια αυτού.



Εικόνα 45 Ρυθμαπόδοση vs καθυστέρηση για $R=10\text{ Gb/s}$, $S=20$, $B=200$, $p=5\%/15\%/25\%$, $P=1500\text{ bytes}$

Τέλος, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του προσφερόμενου φορτίου σε συνδυασμό με τον ρυθμό απώλειας των πακέτων (load vs drop).



Εικόνα 46 Προσφερόμενο φορτίο vs ρυθμός απώλειας για $R=10\text{ Gb/s}$, $S=20$, $B=200$, $p=5\%/15\%/25\%$, $P=1500\text{ bytes}$

Όπως φαίνεται δεν υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στο παραπάνω γράφημα. Όμως είναι εμφανές ότι για μικρές τιμές της πιθανότητας εκπομπής, ο ρυθμός με τον οποίο χάνονται τα πακέτα είναι ελάχιστος έως και μηδενικός, όπως π.χ. για πιθανότητα εκπομπής ίση με 5%. Για αυτή την πιθανότητα εκπομπής οι συγκρούσεις προφανώς είναι ελάχιστες, οπότε δεν υπάρχει καθυστέρηση στην εκπομπή τους και κατά συνέπεια ελάχιστα είναι αυτά τα οποία θα χαθούν στην προσπάθειά τους να εισέλθουν στον buffer αναμονής.

6.4 Πορίσματα

Με βάση τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις ανά περίπτωση μελέτης του συστήματος απορρέουν ορισμένα συμπεράσματα σχετικά με το ιδανικό σενάριο λειτουργίας ενός δικτύου. Είναι πιο αποτελεσματικό το δίκτυο αυτό να έχει ελάχιστη καθυστέρηση διάδοσης, γεγονός που ισχύει στα τοπικά δίκτυα, δηλαδή σε ίδιο rack όπου οι servers οι οποίοι ενώνονται μέσω οπτικής ίνας απέχουν μόνο μερικά εκατοστά. Δεν θα ήταν αποτελεσματικό δηλαδή οι servers που θα απαρτίζουν το δίκτυο αυτό να σημειώνουν κάποια μακρινή απόσταση. Έτσι, το propagation delay είναι πάρα πολύ μικρό και τελικά είναι εφικτή η διαδικασία του carrier sensing, δηλαδή πριν γίνει η μετάδοση των δεδομένων το πρωτόκολλο ‘περιμένει’ τα σήματα δικτύου στο φορέα-μέσο. Εάν ανιχνευτεί ένας φορέας, ο κόμβος περιμένει να τελειώσει η μετάδοση σε εξέλιξη πριν ξεκινήσει τη δική του μετάδοση. Χρησιμοποιώντας το CSMA, πολλοί κόμβοι μπορούν, με τη σειρά τους, να στέλνουν και να λαμβάνουν στο ίδιο μέσο. Οι μεταδόσεις από έναν κόμβο λαμβάνονται γενικά από όλους τους άλλους κόμβους που συνδέονται με το μέσο.

Επιπλέον συνάγεται το συμπέρασμα ότι για ένα παρόμοιο δίκτυο των 10 Gb/s ένας ιδανικός αριθμός για servers θα ήταν 20, καθώς το σύστημα αποδίδει έτσι τα μέγιστα, κρατώντας σε χαμηλές τιμές μεταβλητές όπως το delay και το Dropping rate. Συνδυαστικά, η πιθανότητα εκπομπής θα έπρεπε, επίσης, να κινούνταν σε χαμηλά επίπεδα, της τάξεως του 5-15%. Έτσι, ο ρυθμός απώλειας των πακέτων θα ήταν οριακά μηδενικός και η καθυστέρηση τους ελάχιστη εξίσου. Όσον αφορά το μέγεθος των πακέτων που θα εξυπηρετούνται από το υπάρχον δίκτυο παρατηρείται ότι οι αποδόσεις του δικτύου είναι καλύτερες όταν ‘πέφτουν’ σε αυτό πακέτα μεγαλύτερου μεγέθους (της τάξεως των 3000 bytes και ίσως και μεγαλύτερα). Αντίθετα για μικρότερα πακέτα παρατηρήθηκε ότι και ο ρυθμός εκπομπής είναι χαμηλός αλλά και το Dropping rate. Σημειώνεται βέβαια ότι σε ότι αφορά το delay παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές, οπότε για να εξισορροπηθεί και αυτή η μεταβλητή ίσως ήταν καλύτερη μια μέση λύση, δηλαδή πακέτων των 1500-2000 bytes. Τέλος, το μέγεθος του buffer που ‘φιλοξενεί’ τα σε αναμονή πακέτα προς εκπομπή είναι μια μεταβλητή που ορίζεται ανάλογα με το τι επιδιώκεται. Στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει το να μη χάνονται αρκετά πακέτα θα πρέπει η τιμή του buffer size να είναι μεγάλη, πράγμα το οποίο θα οδηγήσει στην αύξηση της καθυστέρησης των πακέτων. Αν μας ενδιαφέρει το αντίθετο, δηλαδή η μικρή καθυστέρηση και όχι το πόσα πακέτα χάνονται, αν χάνονται, θα οριστεί μια μικρή τιμή για το buffer size, γεγονός που θα οδηγήσει σε υψηλό Dropping rate.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Agrawal, G. P. (2022, September 14). *Fiber Optic Communication Systems, 4Th Edition [Jan 01, 2018] Govind P. Agrawal*. Wiley India.
2. M. P. Fok and C. Shu., IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 14, 587 (2005).
3. M. D. Pelusi, V. G. Ta'eed, L. Fu, et al., IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 14, 529 (2008).
4. M. D. Pelusi, F. Luan, S. Madden, D.Y. Choi, D. A. Bulla, B. Luther-Davies, and B. J. Eggleton, IEEE Photon. Technol. Lett. 22, 3 (2010).
5. G. P. Agrawal, Applications of Nonlinear Fiber Optics, 2nd Edition, Academic Press, Boston (2008).
6. D. B. Mortimore, J. Lightwave Technol. 6, 1217 (1988).
7. G. P. Agrawal, Lightwave Technology: Components and Devices (Wiley, New York, 2004).
8. S.Tanenbaum, A. D. J. (2022, September 14). *Computer Networks.Fifth Edition*.
9. H. Biilow and G. Veith, Electron. Lett. 29, 588 (1993).
10. Papadimitriou, G., I., Tsimoulas, P. A., Obaidat, M. S., & Pomportsis, A. S. (2007, December 10). *Multiwavelength Optical LANs* (1st ed.). Wiley.
11. Optical fiber communications Principles & Practice J.M.Senior 3rd Edition.
12. Ahmad, Z., & Rahman, A. M. (2022). Plastics in Waveguide Application. *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*, 295-315. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00163-2>
13. Α.Σ. Πομπόρτσης, “Εισαγωγή στις Σύγχρονες Τεχνολογίες Επικοινωνιών”, εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2009.
14. Y. Cheng, “Optical Interconnects for Next Generation Data Centers”, 2019, ISBN 978-91-7873-108-4.
15. L. Wosinska, R. Lin, Y. Cheng and J. Chen, "Optical network architectures and technologies for datacenters," 2017 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM), 2017, pp. 111-112, doi: 10.1109/PHOSST.2017.8012675.

16. Kachris, Christoforos & Tomkos, Ioannis. (2013). Optical interconnection networks for data centers. 19-22.
17. Y. Cheng, M. Fiorani, R. Lin, L. Wosinska and J. Chen, "POTORI: a passive optical top-of-rack interconnect architecture for data centers," in *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, no. 5, pp. 401-411, May 2017, doi: 10.1364/JOCN.9.000401.
18. M. Xu, C. Liu and S. Subramaniam, "PODCA: a passive optical data center network architecture," in *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 4, pp. 409-420, April 2018, doi: 10.1364/JOCN.10.000409.
19. Kachris, Christoforos & Tomkos, Ioannis. (2013). Optical interconnection networks for data centers. 19-22.
20. Sarode, Sambhaji & Bakal, Jagdish. (2017). A Slotted CSMA/CA of IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks: A Priority Approach. *International Journal of Computer Trends and Technology*. 44. 33-38. 10.14445/22312803/IJCTT-V44P106.
21. N. J. Doran and D. Wood, *Opt. Lett.* 13, 56 (1988).
22. Y. Zheng and X. Sun, "Dual MAC Based Hierarchical Optical Access Network for Hyperscale Data Centers," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 7, pp. 1608-1617, 1 April, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2959882.
23. Cai Y, Yao Z, Li T, Luo S, Zhou L. SD-MAC: Design and evaluation of a software-defined passive optical intrarack network in data centers. *Trans Emerging Tel Tech*. 2019; e3764.
24. A. Kumar and A. Aggarwal, "Analysis of DCNS anti-collision protocol with contiguous channel allocation," 2016 Ninth International Conference on Contemporary Computing (IC3), 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/IC3.2016.7880265.
25. Nguyen, Tien & Baccelli, François & Zhu, Kai & Subramanian, Sundar & Xinzhou, Wu. (2013). A performance analysis of CSMA based broadcast protocol in VANETs. *Proceedings - IEEE INFOCOM*. 2805-2813. 10.1109/INFOCOM.2013.6567090.
26. Younus, Muhammad & Haque, A.K.M Fazlul & Islam, Md. (2015). Performance Analysis of CSMA/CA in Wireless Local Area Network. *International Journal of Computer Applications*. 120. 43-48. 10.5120/21266-3870.

27. P.A. Baziana, G. Drainakis, E. Sykas, "Software-defined optical intra-data center network and access control Strategy, Optical Switching and Networking", Volume 45, 2022, 100679, ISSN 1573-4277, <https://doi.org/10.1016/j.osn.2022.100679>.
28. Computer networking: a top-down approach / James F. Kurose, University of Massachusetts, Amherst, Keith W. Ross, NYU and NYU Shanghai.
29. Ιάκωβος Στ. Βενιέρης (Μάρτιος 2012). ΔΙΚΤΥΑ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ: Τεχνολογίες και Εφαρμογές με Έμφαση στο Διαδίκτυο, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
30. P. Baziana, "Performance Evaluation Analysis of an Unslotted Transmission Mechanism in Optical Intra-Data Center Networks," 2022 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 2022, pp. 54-59, doi: 10.1109/BlackSeaCom54372.2022.9858229.
31. P. Baziana, "Optical Control Connectivity and Access Technique Study for a Software-Defined Intra-Rack Data Center Network," 2021 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS), 2021, pp. 1-6, doi: 10.23919/SPECTS52716.2021.9639300.
32. William Stallings, "Επικοινωνίες Υπολογιστών & Δεδομένων", Αθήνα, Ελλάδα, Τζιόλας, 2003.
33. Μπαζιάνα Περιστέρα (2008, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)), "Αρχιτεκτονικές ελέγχου και τεχνικές μετάδοσης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης οπτικών WDM δικτύων".
34. P. A. Baziana, "Software-Defined Optical Local Area Network Architecture and Priority Traffic Performance Analysis," 2022 Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM), 2022, pp. 767-777, doi: 10.23919/ANNSIM55834.2022.9859381.
35. J. Chen and L. Wosinska, "Photonics in Intra-Datacenter Networks: Architecture and Future Developments," 2021 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), 2021, pp. 1-3.