



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΕ ΠΥΡΙΤΙΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΟΣΘΕΝΗ Α. ΖΩΓΡΑΦΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΗΡΑΚΛΗΣ ΑΒΡΑΜΟΠΟΥΛΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΕ ΠΥΡΙΤΙΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΟΣΘΕΝΗ Α. ΖΩΓΡΑΦΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΗΡΑΚΛΗΣ ΑΒΡΑΜΟΠΟΥΛΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την2013.

ΗΡΑΚΛΗΣ
ΑΒΡΑΜΟΠΟΥΛΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΟΥΖΟΥΝΟΓΛΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΔΕΡΒΟΣ.....
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2013

.....

ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ Α. ΖΩΓΡΑΦΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ & ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Copyright © Δημοσθένης Α. Ζωγράφος, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι ακαδημαϊκές μου υποχρεώσεις στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ του Εθνικού Μετσοβείου Πολυτεχνείου. Η διεξαγωγή της έγινε σε συνεργασία με το Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών το οποίο είναι πολύ γνωστό για το ερευνητικό του έργο καθώς και το υψηλής στάθμης έμπυχο δυναμικό που διαθέτει.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω ιδιαίτερα στον Καθηγητή κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο, υπεύθυνο του εν λόγω εργαστηρίου για την ευκαρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του και να επιστεγάσω με τον καλύτερο τρόπο τις σπουδές μου.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα και βασικό μέλος του εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών Παρασκευά Μπακόπουλο για την αμέριστη βοήθειά και συμβολή του όποτε αυτή εκρίνετο αναγκαία.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Λέοντα Σταμπουλίδη (πρώην μέλος του εργαστηρίου) για την επίσης σημαντική βοήθειά του στις αρχές αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους οι οποίοι με τον τρόπο τους συνεισέφεραν στην πραγματοποίηση ενός από τους σημαντικότερους στόχους μου: πρώτα απ όλα τη Λένια που άναψε τη φλόγα για να ακολουθήσω αυτόν δρόμο, δεύτερον τον Δημήτρη για την σημαντική του βοήθεια λίγο πριν τις κατατακτήριες εξετάσεις, τον Θείο μου τον Γιάννη που χάσαμε τόσο νωρίς αλλά φρόντισε για τις τρεις σημαντικότερες άδειες μου στη διάρκεια της θητείας μου, τους Γονείς μου, εκτός πολλών άλλων για την οξυδέρκειά και την προνοητικότητα τους να στείλουν έγκαιρα ταξί στο Κέντρο Ναυτικής Εκπαίδευσης του Πόρου, την αδερφή μου Αλίκη για την σημαντική συμβολή της στην επιμέλεια της διπλωματικής εργασίας και τέλος στον Καθηγητή ΕΜΠ Κύριο Κυριάκο Σπυρόπουλο ο οποίος με στήριξε πολύ, ηθικά και έμπρακτα καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο όλα αυτά τα χρόνια.

Δημοσθένης Α. Ζωγράφος

Αθήνα, Μάρτιος 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
2	ΦΩΤΟΝΙΚΟΣ ΜΕΤΑΓΩΓΕΑΣ BOOM	20
2.1	Μονάδα οπτικής μεταγωγής 8X8	23
2.2	Μονάδα Οπτικής Μεταγωγής 4x4	26
3	ΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	27
3.1	Δικτυακή κίνηση στο Διαδίκτυο & αύξηση χωρητικότητας	27
3.2	Δικτυακές εφαρμογές και χρήσεις συστημάτων BOOM	31
3.3	Εφαρμογή & προοπτικές στα Data Centers νέας γενεάς	35
3.4	Εφαρμογή και προοπτικές στα Μητροπολιτικά (Metro) Δίκτυα Ethernet	37
3.4.1	Εφαρμογές της πλατφόρμας μεταγωγής BOOM στα σύγχρονα δίκτυα	41
3.5	Προοπτικές στα δίκτυα κορμού DWDM	44
3.5.1	Το Εθνικό Οπτικό Δίκτυο της Telecom Italia	44
3.6	IP Δίκτυα Κορμού	47
3.6.1	Αρχιτεκτονική δικτύου κορμού TELECOM ITALIA	48
3.6.2	Αρχιτεκτονική Router Virtualization	51
3.7	Οπτική Μεταγωγή σε Δρομολογητές IP Κορμού	55
3.7.1	Αρχιτεκτονική Ηλεκτρονικού Δρομολογητή Κορμού	59
3.7.2	Προώθηση πακέτων (data packet forwarding) και διαδικασία δρομολόγησης	61
3.7.3	Εσωτερική αρχιτεκτονική της μήτρας μεταγωγής	63
3.7.4	Μελλοντικές Προοπτικές για την πλατφόρμα BOOM	69
4	ΑΠΟΨΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	77
4.1	Γενικές επισημάνσεις	77
4.1.1	Κατανάλωση ισχύος σε δρομολογητές	79
4.1.2	Κατανάλωση ισχύος σε δρομολογητές BOOM	82
4.1.3	Συνολική κατανάλωση πλατφόρμας BOOM	83
5	ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	87
5.1	Τεχνο-οικονομική ανάλυση για συμβατικούς δρομολογητές δικτύου κορμού	87

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ _____ 991

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ _____ 92

Περίληψη

Η ολοένα αυξανόμενη απαίτηση σε ταχύτητα και χωρητικότητα των δικτύων που απορροούν από τη χρήση εξειδικευμένων έως καθημερινών υπηρεσιών, επιτάσσει την εφαρμογή νέων τεχνολογιών που θα μπορέσουν να αντέξουν το “βάρος” των διακινούμενων δεδομένων αλλά και την δυνατότητα επεξεργασίας τους. Τα δίκτυα WDM καθώς και η τεχνολογία Μεταγωγής Κυκλώματος, φαίνεται ότι έχουν ολοκληρώσει τον σκοπό τους και είναι πλέον αναγκαίο να προχωρήσουμε ένα βήμα παραπάνω στα Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτου. Η νέα αυτή τεχνολογία, βασίζεται σε κόμβους στους οποίους ενσωματώνονται όλες οι νέες δυνατότητες διαμέσου επιμέρους διεργασιών σχεδιασμένες σε Οπτικό επίπεδο.

Στην διπλωματική αυτή παρουσιάζεται ένας ιδανικός οπτικός μεταγωγέας ικανός να πραγματοποιήσει την βασική λειτουργία δρομολόγησης πακέτων αλλά και τα συγκριτικά στοιχεία με συμβατικούς δρομολογητές.

Στο 1^ο Κεφάλαιο, γίνεται μία εισαγωγή σχετική με την υπάρχουσα κατάσταση έτσι ώστε να γίνουν κατανοητά τα σημεία τριβής των απερχόμενων τεχνολογιών καθώς και τι απαιτείται από τις επερχόμενες.

Στο 2^ο Κεφάλαιο, γίνεται μία γενική παρουσίαση του οπτικού μεταγωγέα και τα επιμέρους τμήματα από τα οποία αποτελείται.

Στο 3^ο Κεφάλαιο, παραθέτονται τα σημεία εφαρμογής της οπτικής μεταγωγής έτσι ώστε να γίνει σαφές γιατί πραγματικά χρειάζεται να προχωρήσουμε σε αυτήν.

Στο 4^ο Κεφάλαιο, πραγματοποιείται μία εκτενής αναφορά σχετικά με ένα πολύ σημαντικό στοιχείο το οποίο έχει αρχίσει να διέπει εύλογα πολλές από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και δεν θα μπορούσε να είναι τίποτα άλλο από την κατανάλωση ενέργειας.

Στο 5^ο Κεφάλαιο, παραθέτονται στοιχεία για μία οικονομοτεχνική ανάλυση χρήσης του οπτικού μεταγωγέα αλλά και των οικονομοτεχνικών πλεονεκτημάτων του σε σχέση πάντα με τους μεταγωγείς που απαρτίζουν τα σημερινά δίκτυα.

Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο έχουν καταγραφεί κάποια σημαντικά συμπεράσματα τα οποία μπορούν να δώσουν χρήσιμες κατευθύνσεις για την έναρξη του επόμενου τεχνολογικού εγχειρήματος αλλά και σκεπτικισμό για το αμέσως επόμενο

Λέξεις Κλειδιά

AOWC: All Optical Wavelength Converter
CAPEX: Capital Expenditure
CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor
CO: Central Office
CPE: Customer Premises Equipment
CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing
DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing
EML: Electro-absorption modulated laser
FSR: Free Spectral Range
FPGA: Field Programmable Gate Array
InP: Φωσφορούχο Ίνδιο
IP: Internet Protocol
MPLS: Multiprotocol label switching
MRR: Micro ring resonator
MSPP: Multi-service provisioning platform
MSTP: Multi-service transport platform
NRZ: No Return to Zero
OBS: Optical Burst Switching
OCh: Optical Channel
OOK: On Off Keying
OPEX: Operational Expenditure
OPS: Optical Packet Switching
OSI: Open Systems Interconnection
OTN: Optical Transport Network
PIC: Photonic Integrated Circuit
QoS: Quality of Service
ROADM: Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
SDH: Synchronous Digital Hierarchy
Si: Πυρίτιο
SOI: Silicon on Insulator
VoD: Video on Demand
WAN: Wide Area Networks
UDWDM: Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing

Abstract

The ever-increasing demands on network speed and capacity of arising from the use of specialized or even daily servicew to accentuate the application of new technologies to be able to withstand the "burden" of data traffic, but also the ability to be processed. WDM networks and switching circuit technology seems to have completed its purpose and is no longer necessary thus we need to go one step further in Optical Packet Switched Networks. This new technology is based on nodes that incorporate all the new features through specific processes designed and implemented on the optical level.

In this thesis is presented an ideal optical switch able to carry out the basic function of routing packets as well as comparative data with conventional routers.

The first chapter is an introduction on the current situation in order to understand the friction points of outgoing and current technologies and what is required of the upcoming.

The second chapter is an overview of the optical switch and the individual parts of which is composed.

In the third chapter it is put forward the most important applications of this technology so that it becomes clearer why we really need to move on.

In the fourth chapter is performed a comprehensive reference on one very important element that has begun to govern reasonably many human activities and could not be anything other than energy consumption.

In the fifth chapter we have a feasibility analysis using the optical switch and the economical advantages compared to the switches that make up today's networks.

Finally, in the sixth chapter there are recorded some important conclusions which can provide useful guidance for the start of the next technology project and skepticism about the immediately succeeding one.

Key Words

AOWC: All Optical Wavelength Converter
CAPEX: Capital Expenditure
CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor
CO: Central Office
CPE: Customer Premises Equipment
CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing
DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing
EML: Electro-absorption modulated laser
FSR: Free Spectral Range
FPGA: Field Programmable Gate Array
InP: Φωσφορούχο Ίνδιο
IP: Internet Protocol
MPLS: Multiprotocol label switching
MRR: Micro ring resonator
MSPP: Multi-service provisioning platform
MSTP: Multi-service transport platform
NRZ: No Return to Zero
OBS: Optical Burst Switching
OCh: Optical Channel
OOK: On Off Keying
OPEX: Operational Expenditure
OPS: Optical Packet Switching
OSI: Open Systems Interconnection
OTN: Optical Transport Network
PIC: Photonic Integrated Circuit
QoS: Quality of Service
ROADM: Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
SDH: Synchronous Digital Hierarchy
Si: Πυρίτιο
SOI: Silicon on Insulator
VoD: Video on Demand
WAN: Wide Area Networks
UDWDM: Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξέλιξη και η ευρεία αποδοχή της τεχνολογίας IP (Internet Protocol) ως καταλληλότερη για την ανταλλαγή δεδομένων αλλά και την παροχή αναρίθμητων υπηρεσιών έχει οδηγήσει τους Τηλεπικοινωνιακούς Παρόχους στην υιοθέτηση νέων ιδεών και πρακτικών σε ό,τι αφορά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση σύγχρονων δικτύων. Με τη σειρά τους οι ιδέες αυτές έλαβαν σάρκα και οστά ως απαιτήσεις της σύγχρονης αγοράς των τηλεπικοινωνιών και δεν άργησαν να μετουσιωθούν σε κοινά αποδεκτές προδιαγραφές διά μέσου συνεργειών διαφόρων οργανισμών (ITU, IETF, 3GPP κλπ.) , κατασκευαστών (vendors) , τηλεπικοινωνιακών εταιρειών - παρόχων (operators) , ομάδων εργασίας (work groups) αλλά και μεμονωμένων εργαστηρίων (labs). Το επόμενο βήμα δεν ήταν άλλο απ' την αναπαραγωγή των προδιαγεγραμμένων ιδεών και την δημιουργία μίας εννιαίας πλατφόρμας που οδηγεί στην ενοποίηση, και την παγκοσμιοποίηση όλων των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και μοιραία στην σύγκλιση μεταξύ των σταθερών και κινητών επικοινωνιών που αποτελεί και τον ακρογωνιαίο λίθο των Δικτύων Νέας Γενεάς.

Η συνεχής αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης παρά το γεγονός ότι διάγουμε μία περίοδο οικονομικής κρίσης είναι ο βασικός λόγος για τον οποίο παρατηρείται έντονη κινητικότητα σε ό,τι αφορά την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων μετάδοσης. Οι κατασκευαστές επενδύουν ολοένα και περισσότερα στην ανάπτυξη και τον σχεδιασμό νέων συστημάτων με βασική επιδίωξη την μείωση της κατανάλωσης η οποία θα αποτελέσει την ειδοποιό διαφορά εν συγκρίσει με τα συστήματα των τελευταίων δεκαετιών.

Απ' την πλευρά τους οι Τηλεπικοινωνιακοί Πάροχοι δεν μένουν αμέτοχοι σε αυτό το εγχείρημα και συμμετέχουν ενεργά με το να εντοπίζουν τις απαιτήσεις της αγοράς και να διαβλέπουν τις τρέχουσες αλλά και τις μελλοντικές τάσεις οι οποίες με τη σειρά τους τροφοδοτούν την βιομηχανία με ιδέες και εφόσον είναι υλοποιήσιμες κατασκευαστικά, οικονομικά και επιχειρηματικά ακολουθούν την γραμμή παραγωγής και εν τέλει εφαρμόζονται μέχρι ένας νέος κύκλος ιδεών να επισκιάσει την τρέχουσα τεχνολογία. Ασφαλώς ο αένας αυτός κύκλος πραγματοποιείται σε ένα έντονα ανταγωνιστικό περιβάλλον, χαρακτηρίζεται από την πρόκληση της μείωσης των οικονομιών κλίμακος, την μείωση του απαιτούμενου χώρου στα τηλεπικοινωνιακά κέντρα (Central Offices – CO) και την μείωση της κατανάλωσης και της θερμότητας που εκλείουν τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Τα παραπάνω γίνονται εντονότερα όσο αυξάνονται οι απαιτήσεις για το λεγόμενο εύρος ζώνης (bandwidth). Σε ό,τι αφορά το θέμα της κατανάλωσης και στα πλαίσια μίας ενιαίας προσπάθειας για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων φιλικών προς το περιβάλλον προδιαγράφεται μία σημαντική στροφή προς τις Οπτικές Επικοινωνίες οι οποίες εκτός των μεγάλων τεχνικών δυνατοτήτων τους, πληρούν επιπλέον τις προαναφερθείσες περιβαλλοντικές προϋποθέσεις.

Σήμερα, εκ των πραγμάτων η μετάβαση στα οπτικά συστήματα (CWDM, DWDM) αποτελεί την καλύτερη λύση σε ό,τι αφορά τις υψηλές απαιτήσεις εύρους ζώνης, την μείωση του κόστους αλλά και την καταναλισκόμενη ισχύ. Τα τρία αυτά κριτήρια απουσίαζαν προ τριακονταετίας όταν οι οπτικές ίνες προτοεμφανίσθηκαν με αποτέλεσμα η χρήση τους να επικεντρωθεί σε ερευνητικό επίπεδο αφού η μόνη τηλεπικοινωνιακή εφαρμογή την δεκαετία του 70 περιοριζόταν στην βασική τηλεφωνική κλήση η οποία δεν απαιτούσε (και δεν απαιτεί) τίποτε παραπάνω από τα 64KB μίας δισύρματης γραμμής.

Ο ρόλος της οπτικής τεχνολογίας στα συστήματα δρομολόγησης (high capacity routers) δεν έχει ακόμη διασαφηνηθεί παρά το γεγονός ότι έχουν δαπανηθεί αρκετά χρόνια έρευνας από εξειδικευμένους επιστήμονες και μηχανικούς οι οποίοι με την σειρά τους διατείνονται τις απεριόριστες δυνατότητές της. Το ενδιαφέρον τώρα εστιάζεται στην κατασκευή φωτονικών τσιπ (ολοκληρωμένων κυκλωμάτων) κλίμακας κάποιων mm που οδηγούν σε χωρητικότητες της τάξεως του Tb/s ενώ στο κοντινό μέλλον της τάξεως μερικών Pb/s. Παράλληλα το βασικό μέλημα των κατασκευαστών είναι η σημαντική μείωση ισχύος που θα καταναλίσκεται απ' τα εν λόγω συστήματα.

Αποτελεί κοινό τόπο το γεγονός ότι ο όγκος δεδομένων (Internet video, P2P κλπ) που μεταφέρεται από τα σύγχρονα δίκτυα πολλαπλασιάζεται με γοργούς ρυθμούς και ενδεικτικά θα αναφέρουμε ότι μέσα στο 2012 ήταν της τάξεως των 1500 Pbytes/μήνα ενώ στα τέλη του 2015 θα φτάσει περί τα 6500 Pbytes/μήνα παγκοσμίως. Ωστόσο η τρομακτική αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης μπορεί μεν να σηματοδοτεί την τεχνολογική και κοινωνική εξέλιξη δεν παύει όμως να επιφέρει επιπτώσεις με σημαντικότερες αυτές που πλήττουν το περιβάλλον. Ειδικότερα το 2007 το 2% των παγκόσμιων ρύπων (ήτοι 830 εκατομύρια τόνοι CO₂) αποδίδονται στις τηλεπικοινωνιακές δραστηριότητες ενώ για το 2020 η πρόβλεψη ανέρχεται σε 4%. Ποιο συγκεκριμένα το 57% θα προέρχεται από τους προσωπικούς υπολογιστές, τα περιφερειακά και τους εκτυπωτές, το 25% από τηλεπικοινωνιακές υποδομές και ηλεκτρονικά συστήματα ενώ το υπόλοιπο 18% θα οφείλεται στα Data Centers. Συνολικά αυτό μεταφράζεται σε 1,43 δις τόνοι CO₂.

Ωστόσο η πρόκληση είναι αρκετά μεγάλη αν αναλογισθεί κανείς τους πολλούς τεχνικούς και φυσικούς περιορισμούς που προκύπτουν από τον αναλογικό χαρακτήρα των οπτικών φαινομένων αλλά και του γεγονότος ότι το φως περιορίζεται σε μία πολύ μικρή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (400-700 nm).

Η εξέλιξη των μονολιθικών και υβριδικών τεχνικών ολοκλήρωσης σε InP (Φωσφορούχο Ίνδιο) και Si (Πυρίτιο) βρίσκεται αυτή τη στιγμή σε ένα μεταβατικό στάδιο το οποίο οδηγεί με ταχείς ρυθμούς στην ανάπτυξη φωτονικών συστημάτων μετάδοσης υψηλής κλίμακας (systems on chip). Αναφορικά με την συμβατότητα μεταξύ CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) και Φωτονικής τεχνολογίας καθώς και της μείωσης του κατασκευαστικού κόστους αλλά και της κατανάλωσης, αρκετά ζητήματα εξακολουθούν να βρίσκονται υπό συζήτηση. Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει αναφορά στα Φωτονικά

κυκλώματα τα οποία χρησιμοποιούν Πυρίτιο (Si) το οποίο με τη σειρά του αποτελεί την βάση για τις σύγχρονες ηλεκτρονικές εφαρμογές δημιουργώντας έτσι ένα κοινό κατασκευαστικό σημείο αναφοράς για τις δύο συμπληρωματικές τεχνολογίες.

Η χρήση πυριτίου ως βάση υβριδικών κυκλωμάτων είναι αυτή η οποία με τη σειρά της επιτρέπει την χρήση 6 και 8-ιντσών SOI (silicon-on-insulator) πλακιδίων (wafers) για την κατασκευή ολοκληρωμένων πλακετών αλλά και την βέλτιστη χρήση μικρών πλακιδίων InP 2 ιντσών. Από πλευράς επιδόσεων οι χαμηλών απώλειών (0.1 dB/cm) κυματοδηγοί πυριτίου εγγυώνται υψηλές επιδόσεις σε βασικές λειτουργίες όπως φιλτράρισμα (filtering), πολυπλεξία/αποπολυπλεξία, (multiplexing/demultiplexing) και σύζευξη (coupling). Παρά τις εξαιρετικές ιδιότητες των παθητικών στοιχείων με βάση το πυρίτιο, η κατασκευή αντίστοιχων ενεργών στοιχείων (φωτοδιόδων, πηγών laser, διαμορφωτών) παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες ιδιαίτερα στην περιοχή μηκών κύματος 1,55 μm που κυρίως ενδιαφέρει στις τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων, καθώς στην περιοχή αυτή λειτουργεί ο οπτικός ενισχυτής ερβίου. Έτσι αν και στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί πρόσφατα τέτοια ενεργά στοιχεία με βάση το πυρίτιο, αυτά κατά κανόνα απαιτούν ιδιαίτερα πολύπλοκες διαδικασίες κατασκευής και συχνά επιτυγχάνουν κατώτερη απόδοση από τα αντίστοιχα υλικά III-V όπως το InP. Αντίθετα, οι λειτουργίες μετατροπής O-H (Οπτικό-Ηλεκτρικό) και H-O (Ηλεκτρικό-Οπτικό) όπως ανίχνευση, αναγέννηση και διαμόρφωση σήματος μπορούν να πραγματοποιηθούν εάν εκμεταλλευθούμε τις δυνατότητες του InP οι οποίες φτάνουν σε πολύ υψηλές συχνότητες. Το μειονέκτημα του InP έγκειται στις αυξημένες απώλειες των κυματοδηγών καθώς και στο υψηλό κόστος του υλικού.

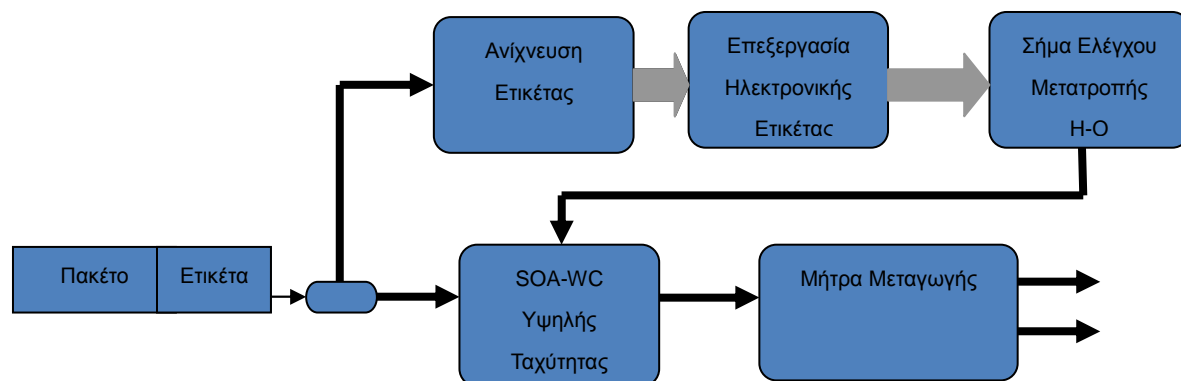
Όπως προκύπτει από τη θεώρηση των ιδιοτήτων των δύο κυριότερων υλικών ολοκλήρωσης στις οπτικές τηλεπικοινωνίες (Si και InP) πρόκειται για δύο συμπληρωματικές τεχνολογίες. Ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων τους με σκοπό τη δημιουργία σύνθετων οπτικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων κατάλληλων για μαζική παραγωγή αποτελεί το αντικείμενο εντατικής έρευνας ανά τον κόσμο. Στην Ευρώπη, μία από τις κυριότερες ερευνητικές πρωτοβουλίες προς την κατεύθυνση αυτή είναι το Ευρωπαϊκό έργο BOOM [Ολοκληρωμένα φωτονικά στοιχεία σε μικρο και νάνο-κλίμακα χρησιμοποιούμενα σε συστήματα υψηλής χωρητικότητας Tb/s] το οποίο αποσκοπεί στην πραγματοποίηση ενός πρωτοποριακού βήματος με την εξέλιξη της πλατφόρμας SOI και την υβριδική ολοκλήρωση ενεργών στοιχείων InP πάνω σε πλακέτες SOI. Ο συνδυασμός πυριτίου και InP μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση και να αυξήσει παράλληλα την απόδοση αποτελώντας έτσι ένα σύστημα νέας γενεάς πολλά υποσχόμενο για τις τρέχουσες και μελλοντικές εφαρμογές σε ό,τι αφορά τα ολοκληρωμένα συστήματα μετάδοσης υψηλών ταχυτήτων.

Βάσει όλων των παραπάνω θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μία ευρεία συζήτηση και ανάλυση των απαιτήσεων, μελλοντικών εφαρμογών, τάσεων, προοπτικών αλλά και τεχνο-οικονομικών ζητημάτων που αίρουνται από τις βασικές αρχές που συνιστούν το συγκεκριμένο εγχείρημα (BOOM) καθώς επίσης και από αυτές που διέπουν την φυσική

λειτουργία των φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Ειδικότερα ο σκοπός του συγκεκριμένου Ευρωπαϊκού προγράμματος είναι ο σαφής διαχωρισμός μεταξύ των τεχνολογικών δυσκολιών-περιορισμών, η προώθηση όλων των πιθανών προοπτικών, η δημιουργία μίας νέας ολοκληρωμένης πλατφόρμας και παράλληλα η δημιουργία ενός ισοζυγίου των δυνατών και των εφικτών δράσεων.

2 ΦΩΤΟΝΙΚΟΣ ΜΕΤΑΓΩΓΕΑΣ BOOM

Η βασική αρχή που διέπει έναν δρομολογητή BOOM ο οποίος βασίζεται σε πλατφόρμα SOI και φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα InP εδράζεται στις εξής δομικές λειτουργίες: μετατροπέας O/H υπέρ-υψηλής ταχύτητας (ultra fast O/E conversion), εξαγωγή και ανίχνευση O/H (Οπτικής/Ηλεκτρονικής) ετικέτας (label detection) και δημιουργία σήματος ελέγχου (control signal generation), όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:

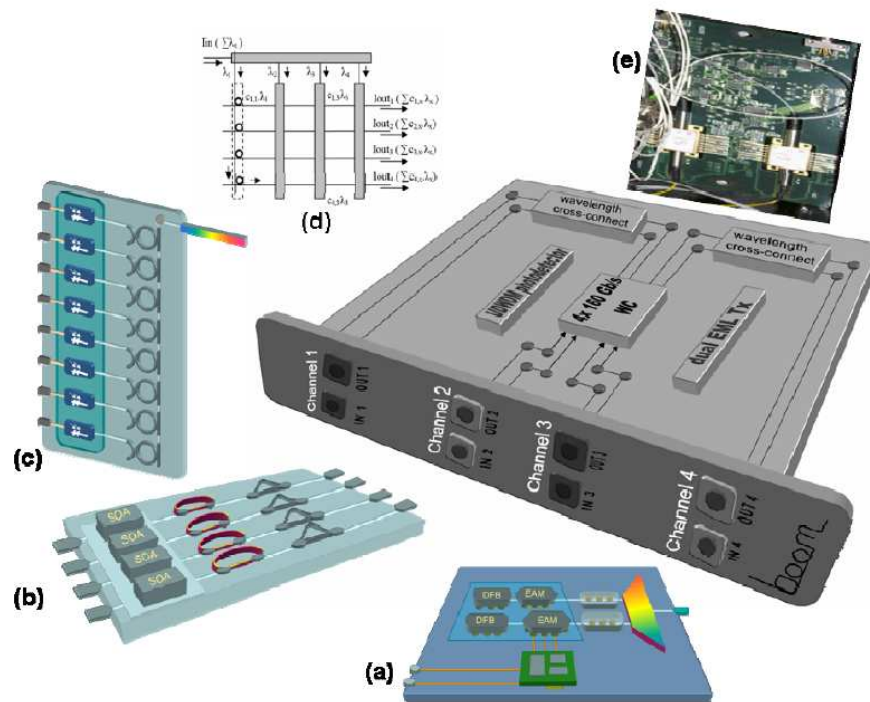


Σχήμα 1: Μεταγωγή οπτικών πακέτων βάσει αρχιτεκτονικής BOOM

Οι βασικές λειτουργίες οι οποίες παρουσιάζονται στην εν λόγω μελέτη είναι οι ακόλουθες (Σχήμα 1):

- Μετατροπή μήκους κύματος υπέρ-υψηλής ταχύτητας (ultra-fast all-optical wavelength conversion) ^[11],
- Εξαγωγή-ανίχνευση ετικέτας και δημιουργία σήματος ελέγχου ^[12],
- Κυματοδηγοί Πυριτίου χαμηλών απωλειών (0.1 dB/cm) για υψηλές επιδόσεις παθητικών λειτουργιών (οπτική-οπτική/O-O) όπως φιλτράρισμα, πολυπλεξία/αποπολυπλεξία και σύζευξη ^[13],
- O-H και H-O λειτουργίες όπως δημιουργία σήματος και διαμόρφωση, -πλεονεκτήματα χρήσης της υψηλής συχνότητας λειτουργίας του InP ^[14]
- Τεχνολογία ολοκλήρωσης Triplex για την υλοποίηση ROADM και επιμέρους λειτουργιών ^[15].

Οι παραπάνω λειτουργίες και οι αντίστοιχες μονάδες στις οποίες ενσωματώνονται, αποτελούν ένα Ολοκληρωμένο Υβριδικό Σύστημα SOI το οποίο πραγματοποιεί μεταγωγή μήκους κύματος και δρομολόγηση οπτικών πακέτων με ταχύτητες που φτάνουν τα 160 Gb/s.



Σχήμα 2: Μεταγωγέας BOOM και επιμέρους μονάδες: a. EML λέιζερ b. Διάταξη μετατροπέα μήκου κύματος c. UDWDM φωτοδέκτης d. Σταυροειδής μικρό-δακτύλιος μήκους κύματος e. Εσωτερική άποψη των PCB πλακετών.

Η αρχιτεκτονική που θεωρήθηκε στη μελέτη, βασίζεται στην τεχνική αμιγούς οπτικής δρομολόγησης που προτάθηκε πρόσφατα με μικρές απλοποιήσεις ώστε να αποφεύγεται η ανάγκη χρησιμοποίησης οπτικών μανταλωτών (flip-flops), καθώς οι τελευταίοι αποτελούν καθαρά ερευνητικό θέμα και δεν έχουν άμεση εφαρμογή σε πραγματικά συστήματα. Η δομή του πακέτου που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τα ακόλουθα πεδία ^[16]: το ωφέλιμο φορτίο (payload) το οποίο έχει σταθερή χρονική διάρκεια και περιέχει 160 Gb/s, OOK (On-Off Keying) παλμούς Gauss και οι οπτικές ετικέτες που με την σειρά τους είναι προσδεδμενες σε υποφέροντα (sub-carriers) πολυπλεγμένα οπτικά σήματα ^[12]. Στην απλούστερη περίπτωση η οπτική ετικέτα είναι ένας απλός (label swapping) NRZ (Non return to zero) οπτικός παλμός ενώ στην αντίθετη περίπτωση ένα σύνολο πολλαπλών (label stripping) NRZ παλμών διάρκειας ίσης με 1 ns, η οποία είναι αρκετή να ενεργοποιήσει ένα οπτικό κύκλωμα flip-flop ή μία γεννήτρια ηλεκτρικών παλμών. Η οπτική ετικέτα υπεισέρχεται στο πακέτο σαν ένα προσωρινό αναγνωριστικό στοιχείο (header) με χρονοδιακόπτη (time guard). Μία ρεαλιστική πρόταση θα μπορούσε να είναι ένα πακέτο διάρκειας 6.8 ns με ωφέλιμο φορτίο 3.9 ns (78 bytes) επί συνόλου 147.06 πακέτων ανά δευτερόλεπτο (ρυθμός μεταγωγής).

Όπως φαίνεται παραπάνω στο Σχήμα 1 τα οπτικά πακέτα καταφθάνουν στον μεταγωγέα και διαχωρίζονται σε δύο μέρη ακολουθώντας αντίστοιχα δύο διαφορετικούς δρόμους.

Στον πρώτο δρόμο, το εισερχόμενο πακέτο περνάει δια μέσω της Μονάδας Επεξεργασίας Ετικέτας (label processing unit) και η οποία αρχίζει με την διαδικασία αναγνώρισης ετικέτας (label detection). Εφόσον οι ετικέτες βρίσκονται πολύ κοντά η μία με την άλλη απαιτείται ένας UDWDM φωτό-ανιχνευτής ώστε να μπορεί να τις διαχωρίζει. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα περιλαμβάνει την μονάδα αποπολύπλεξης MRR (Micro Ring Resonator – Αντηχείο Μικρο Δακτυλίου) με δυνατότητα διαχωρισμού μήκους κύματος ανά 0.1 nm, συνοδευόμενη από ένα σύστημα ολοκληρωμένων ανιχνευτών 10 GHz για την ανίχνευση του ωφέλιμου φορτίου. Η οπτική ετικέτα ενεργοποιεί μία ηλεκτρική μονάδα επεξεργασίας (π.χ FPGA) η οποία γεννά ένα ηλεκτρικό σήμα διάρκειας ελαφρώς μεγαλύτερης του οπτικού πακέτου. Το σήμα αυτό εν συνεχεία ενισχύεται με μικροκυματικό ενισχυτή 10 GHz και τροφοδοτεί ένα laser τύπου EML (electro-absorption modulated laser) το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του μετατροπέα μήκους κύματος ώστε να επιτύχει υψηλή ταχύτητα μετατροπής μήκους κύματος σε λειτουργία οπτικών πακέτων. Ο αριθμός των laser EML αντιστοιχεί στον συνολικό αριθμό μηκών κύματος που υποστηρίζονται από κάθε κανάλι ανά θύρα (output port), καθώς για κάθε πακέτο δεδομένων ενεργοποιείται το laser το οποίο εκπέμπει στο επιθυμητό μήκος κύματος μετατροπής. Το laser EML πρέπει να παράγει παλμικά οπτικά σήματα της τάξεως των 100 ps rise/fall times, που αποσκοπεί σε σχετικά μικρές μπάντες ασφαλείας (guard-bands) και μέχρι 50 dB on/off ποσοστό για την επίτευξη χαμηλής διαφωνίας (crosstalk) στην έξοδο.

Στον δεύτερο δρόμο, το εισερχόμενο πακέτο αποστέλεται στο ενεργό στοιχείο μετατροπής που αποτελείται από έναν μετατροπέα AOWC (All Optical Wavelength Converter) που τροφοδοτείται από το σήμα που παράγεται από το laser EML, το οποίο ακολουθείται με τη σειρά του από έναν αποπολυπλέκτη μήκους κύματος για να επιλέξει τελικά την αντίστοιχη θύρα εξόδου. Ο AOWC είναι βασισμένος στο μη γραμμικό οπτικό chirp σε ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή SOA και αποτελείται από έναν SOA και ένα περιοδικό κτενωτό (comb) φίλτρο για το φιλτράρισμα του chirp. Η Ελεύθερη Φασματική Περιοχή FSR (Free Spectral Range) του περιοδικού φίλτρου πρέπει να είναι ίση με το διάστημα μεταξύ των καναλιών του EML. Υποθέτοντας ότι ο SOA έχει ένα εύρος ζώνης 3 dB ASE 30 nm, το πακέτο μπορεί να μετατραπεί και να καθοδηγηθεί σε 7 διαφορετικά μήκη κύματος που χωρίζονται σε διαστήματα των 4 nm. Η διαμόρφωση αυτή πραγματοποιείται για να ερευνήσει τη δυνατότητα σειριακής διασύνδεσης του οπτικού AOWC στα 160 Gb/s. Η μελέτη δυνατότητας σειριακής διασύνδεσης βασίστηκε στα αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος που εστιάζει στην απόδοση μεταγωγής του AOWC αγνοώντας άλλες πηγές υποβάθμισης του σήματος, π.χ. λόγω μετάδοσης.

Ωστόσο κατά τις δοκιμαστικές προσομοιώσεις μετάδοσης παρατηρήθηκαν προβλήματα στο οπτικό σήμα όπως η διεύρυνση παλμού και η διακύμανση πλάτους^[17]. Η 3R αναγέννηση απετέλεσε μια επιλογή για να λυθούν αυτά τα ζητήματα αλλά δυστυχώς αυτή

η λύση δεν ήταν πρακτικά εφικτή με αποτέλεσμα να εγκαταλειφθεί. Πράγματι, ένας γρήγορος SOA είναι μια ελκυστική επιλογή για να διατηρηθεί το πλάτος παλμού με το ελάχιστο δυνατό κόστος ^[18] ^[19]. Με αυτήν την επιλογή, ο αριθμός των εν σειρά μονάδων/κόμβων μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω εάν χρησιμοποιηθεί ένα οπτικό φίλτρο περιορισμού προκειμένου να μετριασθεί η διακύμανση πλάτους προκαλούμενη από τη διαδικασία AOWC. Επιπλέον εάν η σειριακή διασύνδεση θέτει κάποιο όριο στον αριθμό κόμβων ανά οπτικό μεταγωγέα, οι παράλληλες αρχιτεκτονικές είναι αποδοτικές και πρακτικές με την ελάχιστη δυνατή πολυπλοκότητα. Βάσει των ανωτέρω η απόδοση SOA της τάξεως των 8 μηκών κύματος μπορεί να θεωρηθεί εφικτή. Αυτό που περιγράφηκε παραπάνω αποτελεί μίαν στοιχειώδη δομική μονάδα: μία θύρα εισόδου και 4/8 θύρες εξόδου, μονό-κατευθυντικό στοιχείο μεταγωγής με δυνατότητα ≈ 150 Mp/sec. Η ενσωμάτωση τεσσάρων ή οκτώ μονάδων σε μία μητρική κάρτα τύπου SOI σημαίνει 4x4 ή 8x8 συνολικό αριθμό οπτικών μεταγωγέων.

Ιδανικά εάν συγκεντρώσουμε τις επιμέρους μονάδες σε μία ή περισσότερες κάρτες (συνδεδεμένες παράλληλα ή εν σειρά σε ένα δίκτυο Benes) που διαθέτουν όλους τους απαραίτητους μηχανισμούς ελέγχου, επεξεργαστική ισχύ, χρονοπρογραμματιστές και στοιχεία προσωρινής αποθήκευσης οδηγούμαστε σε μία πολύπλοκη μονάδα οπτικής μεταγωγής υψηλής χωρητικότητας και ταχύτητας με δυνατότητες δρομολόγησης οπτικών πακέτων.

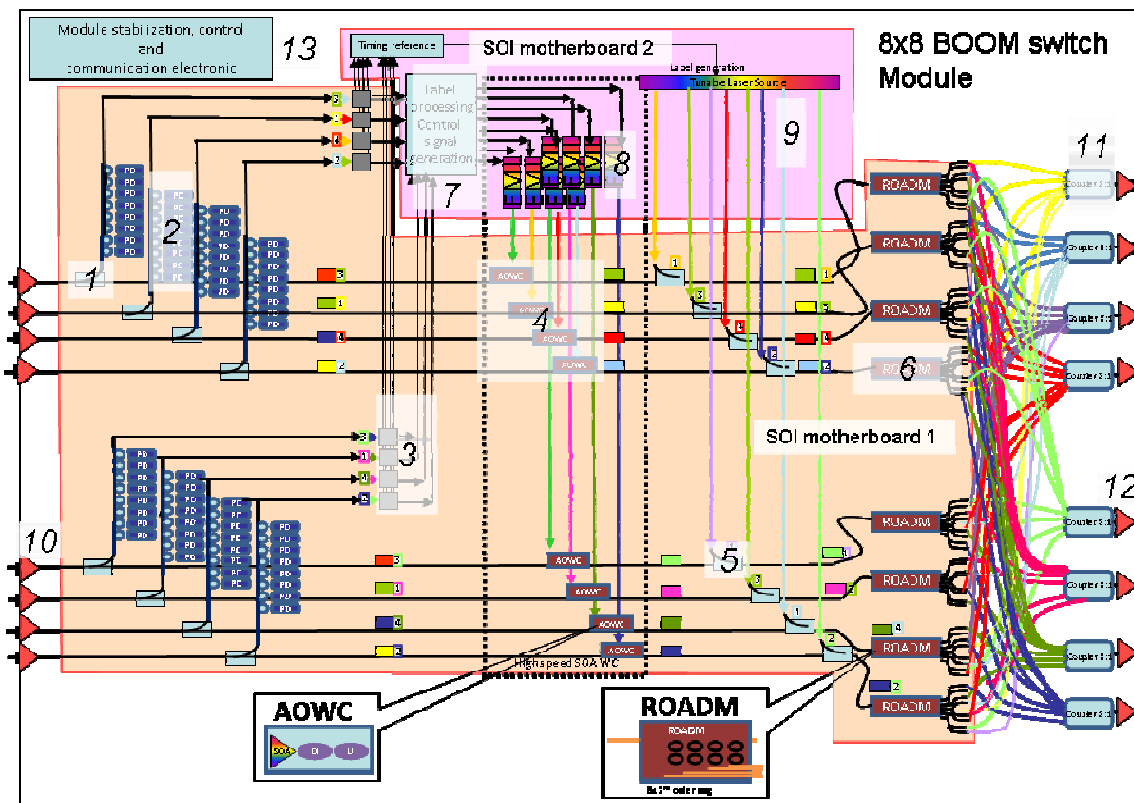
2.1 Μονάδα οπτικής μεταγωγής 8X8

Στο παρόν πραγματοποιείται μία εκτενής ανάλυση μίας πρότυπης οπτικής μονάδας μεταγωγής καθώς και εκτιμήσεις σε ό,τι αφορά τα ζητήματα καταναλώσεως ισχύος.

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική αποτελεί ένα σημείο αναφοράς και μόνον, και δεν αποτελεί απαραίτητως την βέλτιστη λύση από σχεδιαστικής απόψεως. Αποτελείται από οκτώ ίδιες στοιχειώδεις δομικές μονάδες (Σχήμα 1) με μία οπτική θύρα εισόδου και οκτώ θύρες εξόδου, τοποθετημένες εν παραλλήλω και ενσωματωμένες σε μια εννιαία μητρική κάρτα SOI, που περιλαμβάνει τον απαραίτητο μηχανισμό ηλεκτρονικού ελέγχου, σταθεροποίησης και επεξεργασίας. Η συνολική ρυθμαπόδοση είναι 1280 Gb/s με ένα συνολικό ποσοστό πακέτων 1176 Mp/sec. Η εσωτερική αρχιτεκτονική της μονάδας 8X8 (Σχήμα 3) περιλαμβάνει:

- 2 ολοκληρωμένες πλατφόρμες SOI:
 - Μητρική κάρτα SOI - 1: χρησιμοποιείται για σηματοδότηση με 88 πλεξίδες οπτικής ίνας για την εισαγωγή στοιχείων (8), παραγωγή στοιχείων (64), αντλητικού laser AOWC (8) εγγραφή ετικετών (8), σήματα ελέγχου ετικετών
 - Μητρική κάρτα SOI - 2: χρησιμοποιείται για την περαιτέρω επεξεργασία και τη δημιουργία νέων ετικετών με 16 οπτικές πλεξίδες για τα αντλητικά laser OAWC (8) και εγγραφή ετικετών (8)
- Έλεγχος, σταθεροποίηση και ηλεκτρονική επικοινωνία -13

- Ενισχυτές -10, -12 EDFA εισαγωγής/παραγωγής - (ενδεχομένως ενσωματωμένοι στην ίδια μονάδα)
- Παθητικά στοιχεία όπως 8x1 οπτικοί συζεύκτες για συλλογή οπτικών σημάτων του ίδιου μήκους κύματος.
- Παθητικά στοιχεία στο υπόστρωμα SOI:
 - 8 οπτικοί 1x2 συζεύκτες, ένας για κάθε γραμμή εισαγωγής, για να διαχωρίσει τις ετικέτες από τα δεδομένα
 - 8 οπτικοί 2x1 συζευκτες, ένας για κάθε γραμμή παραγωγής, για να προσθέσει τις ετικέτες στα αντίστοιχα στοιχεία -5
 - 8 ROADMs ένα για κάθε γραμμή παραγωγής ως επιλεκτικό διακόπτη μήκους κύματος με 1 είσοδο και 8 χρωματισμένες εξόδους -6-
 - 8 UDWDMs, ένα για κάθε γραμμή εισαγωγής για την επιλογή -2- ετικετών.
- Δυναμικό υβριδικό στοιχείο ενσωματωμένο σε υπόστρωμα SOI:
 - 8 σειρές ετικετών ανιχνευτών φωτός και ηλεκτρονικά TIA, ένα για κάθε γραμμή εισαγωγής -3-
 - 8 AOWC (γρήγορο SOA ακολουθούμενο από φίλτρο για chirp), ένα για κάθε γραμμή, που λειτουργεί σε οκτώ πιθανά μήκη κύματος που αντιστοιχίζονται στις οκτώ διαφορετικές θύρες εξόδου -4-.
- Η μητρική κάρτα SOI 2 περιλαμβάνει:
 - ολοκληρωμένα κυκλώματα IC (FPGA) για την παραγωγή χρονικής αναφοράς, την επεξεργασία ετικετών, το συντονισμό λέιζερ, την παραγωγή παραθύρου μεταγωγής και οδήγηση του EML laser -7-
 - 8 (διάταξη CW λέιζερ) /ρυθμιζόμενα EML, ένα ανά οπτική γραμμή, για την παραγωγή σημάτων παλμικού σήματος άντλησης AOWC -8-
 - 8 ρυθμιζόμενα λέιζερ, ένα για κάθε θύρα εξόδου , για τη νέα γενεά ετικετών -9-.



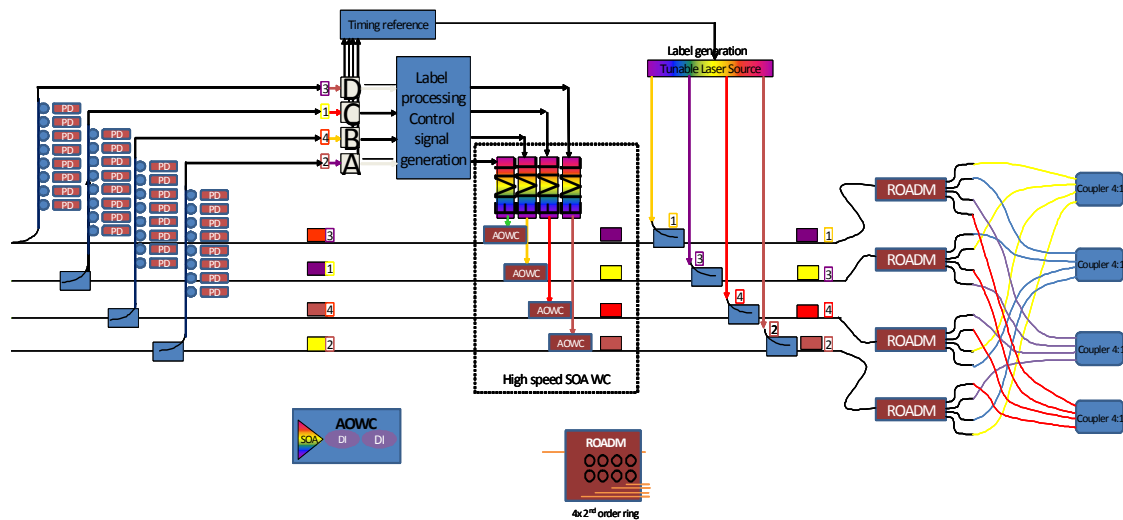
Σχήμα 3: Λεπτομερής αρχιτεκτονική 8x8 οπτικού μεταγωγέα.

Ο οπτικός μεταγωγέας θεωρείται ως μία αμιγώς αυτόνομη οντότητα, με οκτώ (8) πλεξίδες οπτικών εισόδων και οκτώ (8) πλεξίδες εξόδων καθώς και αντίστοιχες ηλεκτρικές φυσικές εισόδους και εξόδους, για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, την δυνατότητα ελέγχου και την επικοινωνία.

Ο κύριος σκοπός για την κατασκευή του 8x8 οπτικού μεταγωγέα (στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος BOOM) είναι ναδειχθεί ότι η μία πλατφόρμα SOI μπορεί να παρέχει μικρότερα και περισσότερο αποδοτικά φωτονικά στοιχεία που επιτυγχάνουν υψηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά στοιχεία. Εισάγει επίσης όλες τις απαραίτητες τεχνικές για να πραγματοποιηθεί η μέγιστη δυνατή απόδοση του σχεδίου, όπως η ενσωμάτωση SOA σε μία διάταξη SOI καθώς και τη διασύνδεση οπτικών φίλτρων. Η τεχνολογία αυτή αναμένεται να προσδώσει νέες δυνατότητες στον σχεδιασμό και την κατασκευή νέων φωτονικών δρομολογητών που βασίζονται στην δρομολόγηση μήκους κύματος.

2.2 Μονάδα Οπτικής Μεταγωγής 4x4

Η αρχιτεκτονική είναι η ίδια που περιγράφηκε ήδη στην προηγούμενη παράγραφο με μοναδική διαφορά την ύπαρξη τεσσάρων θυρών αντί οκτώ (Σχήμα 4). Η πολυπλοκότητα μειώνεται κατά έναν παράγοντα δύο (2), γεγονός που καθιστά τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική οικονομικά πιό προσιτή περιορίζοντας όμως την ευρύτητα εφαρμογής της [17].



Σχήμα 4: Λεπτομερής αρχιτεκτονική 4x4 οπτικού μεταγωγέα

3 ΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

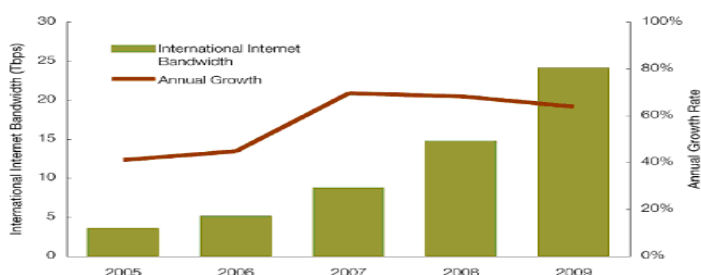
Στις επόμενες παραγράφους παραγράφους παρουσιάζονται οι εφαρμογές οπτικών μεταγωγών και της πλατφόρμας υβριδικής ολοκλήρωσης BOOM όπου γίνεται εκτενής αναφορά στην ανάλυση κίνησης, την εσωτερική αρχιτεκτονική ενός στοιχείου BOOM καθώς και στις επιμέρους εφαρμογές σε δίκτυα METRO Ethernet, δίκτυα κορμού τύπου DWDM και IP DWDM.

3.1 Δικτυακή κίνηση στο Διαδίκτυο & αύξηση χωρητικότητας

Προσφάτως η παγκόσμια οικονομία βίωσε μία πρωτόγνωρη συρρίκνωση οδηγώντας σε ύφεση τις επιμέρους οικονομίες των περισσότερων κρατών. Παρά την ύφεση αυτή το Διαδίκτυο εξακολουθεί να εξαπλώνεται και να γιγαντώνεται ολοένα και περισσότερο. Ο όγκος δεδομένων που διακινείται στο διαδίκτυο αυξάνεται συνεχώς και σε πολλά αναπτυσσόμενα κράτη το ποσοστό αύξησης είναι πολλές φορές τριπλάσιο. Οι πάροχοι που ελέγχουν τα δίκτυα κορμού, με τη σειρά τους αναπατοκρίνονται σε μεγάλο βαθμό στην νέα αυτή πρόκληση με κατασκευή νέων υποδομών ικανές να επωμιστούν το βάρος αυτό.

Η ετήσια έρευνα του TeleGeography καταγράφει γενικά τις επεκτάσεις των δικτύων κορμού Διαδικτύου όπως επίσης τον μέγιστο αλλά και τον μέσο σταθμικό όρο σε ό,τι αφορά τον διακινούμενο όγκο δεδομένων. Σημειωτέον από το 2007 η ετήσια ποσοστιαία αύξηση επέκτασης των δικτύων αυτών έχει υπερβεί το 60%. Το 2009 το συνολικό διατιθέμενο εύρος ζώνης αυξήθηκε κατά 64% ως αποτέλεσμα των επιμέρους επεκτάσεων από την πλευρά των παρόχων. Πιο συγκεκριμένα οι πάροχοι αύξησαν την συνολική διατιθέμενη χωρητικότητα από 8.7 Tbps το 2007 σε 9.4 Tbps το 2009.

International Internet Bandwidth, 2005–2009



Σχήμα 5: Συνολικό εύρος ζώνης που διατέθηκε από το 2005 έως το 2009 [20]. Ιστόγραμμα που απεικονίζει την ετήσια χρήση εύρους ζώνης για υπηρεσίες διαδικτύου που δρομολογούνται εκτός εθνικών δικτύων

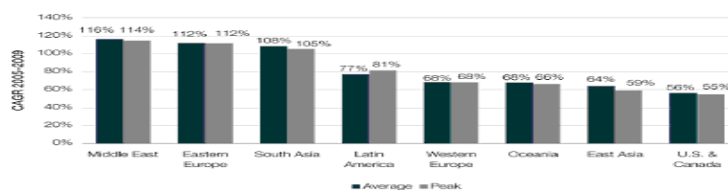
Ωστόσο ο εν γένει αυξανόμενος αυτός ρυθμός παρουσιάζει και σημάδια επιβράδυνσης όπως μπορεί να φανεί στο σχήμα (Σχήμα 5). Στην πραγματικότητα, η αύξηση επιταχύνθηκε το 2009, δεδομένου ότι η μέση κυκλοφορία αυξήθηκε 74%, αρκετά παραπάνω από το 55% αύξησης όπως αυτή μετρήθηκε το 2008. Ο όγκος μέγιστης κυκλοφορίας αυξήθηκε κατά 79% το 2009, έναντι 61% το 2008. Επιπλέον η Νότια Ασία, η Μέση Ανατολή, και η Ανατολική Ευρώπη παρουσίασαν εντονότερες και γρηγορότερες αυξητικές τάσεις. Μεταξύ 2005 και 2009, στις περιοχές αυτές, οι πάροχοι δοκιμάστηκαν αρκετά αφού η μέγιστη και μέση διεθνής κίνηση του δικτύου αυξάνονταν περισσότερο από 100% ετησίως.

Η κίνηση του δικτύου είχε μικρότερη αύξηση στις δρομολογήσεις εντός Αμερικής ενώ αντίθετα ήταν μεγαλύτερη σε ότι αφορούσε τις διεθνείς δρομολογήσεις και συνδέσεις. Για τις κορυφαίες 20 Αμερικανικές διαδικτυακές συνδέσεις-δρομολογήσεις η μέση κίνηση τους αυξήθηκε κατά 36% μεταξύ 2008 και 2009, ενώ η μέγιστη κυκλοφορία αυξήθηκε κατά 33%. Η χωρητικότητα δικτύων αυξήθηκε κατά 37% , κάτι το οποίο συμβαδίζει με την αντίστοιχη αύξηση του διακινούμενου όγκου πληροφοριών.

Ο ρυθμός αύξησης του διακινούμενου όγκου πληροφοριών υπερέβη την αντίστοιχη αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων, με συνέπεια μια μετριότατη άνοδο στα ποσοστά επαναχρησιμοποίησης για πρώτη φορά από το 2006 (Σχήμα 7). Εντούτοις, για τα ποσοστά επαναχρησιμοποίησης των δικτύων κορμού, κατά καιρούς έχουν γίνει προβλέψεις οι οποίες αναφέρονται ακόμη και σε σενάρια κατάρρευσης λόγω της υπέρμετρης αύξησης της ζήτησης δεδομένων αλλά και απουσίας επενδύσεων. Στην πραγματικότητα σήμερα τα δίκτυα κορμού απέχουν από ένα τέτοιο καταστροφικό σενάριο και κάτι λιγότερο από το ένα τέταρτο των παρόχων επιτρέπει την οριακή χρήση των πόρων των δικτύων τους με ό,τι αυτό συνεπάγεται.

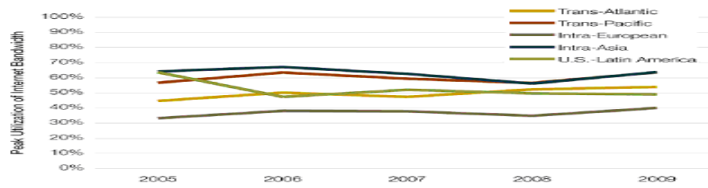
Ο αυξανόμενος ρυθμός ζήτησης βοηθά να αντισταθμίσει τη συνεχή πτώση των τιμών διαδικτύωσης, οι οποίες έχουν μειωθεί κατά 20 έως 30% ετησίως από το 2007 και μετά.

Average and Peak Traffic Growth by Region, 2005–2009 (CAGR)



Σχήμα 6: Μέσοι και μέγιστοι όροι αύξησης ανά περιοχή. Διάγραμμα που απεικονίζει την ετήσια χρήση εύρους ζώνης για υπηρεσίες διαδικτύου που δρομολογούνται εκτός εθνικών δικτύων μεταξύ των επιμέρους κόμβων διασύνδεσης ανά ευρύτερη περιοχή.

Peak Utilization by Route, 2005-2009



Σχήμα 7: Μέγιστη χρήση πόρων για διεθνείς δρομολογήσεις. Διάγραμμα που απεικονίζει την ετήσια μέγιστη χρήση εύρου ζώνης για υπηρεσίες διαδικτύου που δρομολογούνται εκτός εθνικών δικτύων.

Επιπλέον αναγνωρίζεται ευρέως ότι η κυκλοφορία στα δίκτυα μετάδοσης επόμενης γενεάς θα κατακλυσθεί σταδιακά από δεδομένα. Αυτό οφείλεται στην προοδευτική ενσωμάτωση πολλών εφαρμογών και υπηρεσιών που θα βασίζονται στο πρωτόκολλο Διαδικτύου (IP). Δεδομένου ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά της διακίνησης δεδομένων είναι μάλλον διαφορετικά από εκείνα της παραδοσιακής μετάδοσης φωνής, (για την οποία τα δίκτυα TDM έχουν άλλωστε σχεδιασθεί) θα τεθούν οι σημαντικές τεχνικές απαιτήσεις προκειμένου να πραγματοποιηθούν αντίστοιχες σημαντικές αλλαγές στις πλατφόρμες ελέγχου δικτύων που βελτιστοποιούν τα κυκλώματα υπηρεσιών και μετάδοσης όπως αυτά θα πραγματοποιούνται πλέον στην βάση του πρωτοκόλου IP.

Εστιάζοντας, για παράδειγμα, στο δίκτυο μετάδοσης της Telecom Italia, σήμερα το φορτίο πληροφοριών που μεταφέρεται στο οπτικό στρώμα αυξάνεται πολύ γρήγορα λόγω της αύξησης της μετάδοσης πληροφοριών σε εθνικό αλλά και διεθνές επίπεδο που διασχίζει την Ιταλία από το Νότο έως τον Βορρά ^[21]. Είναι αξιοσημείωτο ότι η Ιταλία διαθέτει πολλές υποβρύχιες υποδομές μετάδοσης πληροφοριών πολλές από τις οποίες καταλήγουν στην Σικελία και από εκεί οδεύουν προς την Βόρειο Ιταλία όπου βρίσκεται το Πανευρωπαϊκό κέντρο ή αλλιώς το σημείο εξόδου προς την υπόλοιπη Ευρώπη. Τα πρόσθετα διεθνή δίκτυα πελατών παρουσιάζονται στο Σχήμα 8 και το Σχήμα 9.



Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση υποβρυχίου συστήματος μετάδοσης που καταλήγει στον κόμβο της Σικελίας.



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση δρομολόγησης δεδομένων προς διεθνές Ευρωπαϊκό δίκτυο κορμού.

Τέλος, η μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας αποτέλεσμα της εγχώριας χονδρικής αγοράς και των σημαντικότερων πελατών & επιχειρήσεων αναμένεται να αυξηθεί επίσης στο κοντινό μέλλον. Οι μακροπρόθεσμες εκτιμήσεις θα μπορούσαν να κάνουν λόγο για αναξιοπιστία σε ότι αφορά την μετάδοση πληροφοριών, εντούτοις:

- Εάν εξετάσουμε ένα ετήσιο ποσοστό αύξησης διακινούμενων δεδομένων της τάξεως του 25%, το συνολικό φορτίο θα είναι περίπου 55 Tbit/s το 2020.

- Ακόμη το υψηλότερο ποσοστό αύξησης κυκλοφορίας, μέχρι και 40% το χρόνο, μπορεί να στηριχθεί με την εισαγωγή μιας υποδομής νέας γενεάς με επιμέρους φωτονικές λειτουργίες μέσα στην επόμενη δεκαετία.

Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα, να μπορούμε να εκμεταλλευθούμε το δίκτυο βάσει πρόβλεψης διακίνησης φορτίου για το 2011 περί το 30% σε ότι αφορά φορείς OCh και 11% από την άποψη του εύρους ζώνης (που αναφέρεται σε ένα πλήρες δίκτυο 40 Gbit/s OCh), με μια μέγιστη χωρητικότητα δικτύου περίπου 130 Tbit/s, συνεπώς το εν λόγω σύστημα μπορεί να δεχθεί αύξηση του φορτίου της τάξεως του 35% το χρόνο για τα επόμενα 10 έτη.

3.2 Δικτυακές εφαρμογές και χρήσεις συστημάτων BOOM

Ένα σύστημα BOOM πρακτικά εισάγει και καθιερώνει την χρήση SOI ως υβριδική πλατφόρμα ενοποίησης καθώς και νέες τεχνικές ολοκλήρωσης για την κατασκευή και τοποθέτηση III-V συσκευών ^[22].

Πολλές από τις μεγαλύτερες εταιρείες κατασκευής συστημάτων πυριτίου έχουν πραγματοποιήσει μακρόπρόθεσμες επενδύσεις στην έρευνα για την χρήση πυριτίου και σε άλλες τεχνολογίες, όπως οι οπτικές επικοινωνίες. Αυτό το πεδίο, γνωστό ως Φωτονική Πυριτίου (silicon photonics) έχει ως στόχο να παράσχει φθηνά δομικά στοιχεία πυριτίου που μπορούν να ενσωματωθούν για την παραγωγή οπτικών προϊόντων που επιλύουν πραγματικά προβλήματα επικοινωνίας για τους ίδιους τους τελικούς καταναλωτές.

Η Φωτονική Πυριτίου είναι μια προσπάθεια έρευνας και ανάπτυξης η οποία αναμένεται να επιφέρει την επανάσταση στις υπολογιστικές πλατφόρμες κατασκευάζοντας οπτικά στοιχεία με την χρήση παραδοσιακών τεχνικών CMOS. Το πυρίτιο είναι το βασικότερο υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή ημιαγωγών σήμερα απλά γιατί έχει πολλές επιθυμητές ιδιότητες. Για παράδειγμα, το πυρίτιο είναι άφθονο, φθηνό, εύκολο να κατεργασθεί και με συμπεριφορά πλήρως κατανοητή που περιγράφεται από την Φυσική των ημιαγωγών. Το πυρίτιο είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο υλικό για την φωτονική τεχνολογία και η σημαντικότητά του στηρίζεται σε μία βασική ιδιότητα: είναι διαπερατό σε υπέρυθρα μήκη κύματος τα οποία χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες .

Η εισαγωγή των φωτονικών λειτουργιών στα σύγχρονα δίκτυα πακέτων δεδομένων θα οδηγήσει δυνητικά στη μείωση της πολυπλοκότητας των επι μέρους συστημάτων, του κόστους αλλά και στην κατανάλωση ενέργειας. Ακόμα κι αν μια πλήρης αντικατάσταση των ηλεκτρονικών στοιχείων με τα αντίστοιχα οπτικά δεν καταστεί εφικτή στο άμεσο μέλλον (λόγω της ισχυρής δυνατότητας των ψηφιακών ηλεκτρονικών συστημάτων που χρησιμοποιούν εξαιρετικά μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης και αποδεδειγμένα υψηλού κόστους κυκλώματα ακόμη και για στοιχειώδεις λειτουργίες), κάποια ενδιάμεσα στοιχεία ή υπο-λειτουργίες θα μπορούσαν κάλλιστα να υλοποιηθούν .

Η έννοια των φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (PIC) για πρώτη φορά περιγράφεται το 1969 από τους S. Miller όταν επινόησε τον όρο «ολοκληρωμένη οπτική». Προϊόντα αυτού του είδους κυκλοφόρησαν στην αγορά στα τέλη της δεκαετίας του 90, όταν το πρώτο PLC (Planar Lightwave Circuit) έκανε το ντεμπούτο του.

Όλα τα οπτικά ή παθητικά "Ο-Ο" PIC ονομάζονται επίσης Φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλωμάτα. Η ολοκλήρωση αυτή αναφέρεται στην παθητική λειτουργία ενός κυματοδηγού, ενός φίλτρου, ενός διακόπτη ή ενός πολυπλέκτη. Το υλικό για αυτούς τους τύπους PIC είναι συνήθως το διοξειδίο του πυριτίου, καθώς και οι εμπορικές πατέντες που προσφέρονται από την JDSU, την NeoPhotonics και άλλες εταιρείες. Η ολοκλήρωση των Φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με υβριδικές μεθόδους και χρήση ενεργών στοιχείων όπως για παράδειγμα μία φωτοδίοδος PIN. Η τεχνική UDWDM που χρησιμοποιούν οι απο-πολυπλέκτες σε συνδυασμό με τις συστοιχίες φωτοδίοδων αναπτύχθηκε στο πλαίσιο ανάπτυξης ενός συστήματος BOOM με σκοπό να ανταγωνισθεί αυτήν ακριβώς την εναλλακτική. Η τεχνολογία micro ring είναι το νέο στοιχείο αυτών των απο-πολυπλεκτών, αντικαθιστώντας κατ' ουσίαν δομές τύπου AWG. Στην πραγματικότητα, ένας αποπολυπλέκτης BOOM UDWDM αποτελείται από μια σειρά συνδεδεμένων MRR (αντηχείων μικρο-δακτυλίου) που βασίζονται με την σειρά τους σε μία πλατφόρμα SOI nanowire κυματοδηγού ^[23].

Επιπλέον, ένα πολυπλέκτης (MUX) είναι απαραίτητος σε μία υλοποίηση BOOM για την αναβάθμιση της ταχύτητας ενός πομπού με την υλοποίηση συστοιχιών. Επίσης ο πολυπλέκτης θα βασίζεται στην τεχνολογία των 4μm της πλατφόρμας SOI ενώ ο σχεδιασμός χαμηλών επιπέδων απωλειών είναι εφικτός σε αυτή την τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί μετατροπή μεγέθους του πεδίου (spot-size conversion) κατά την μετάβαση από το κυματοδηγό και την περιοχή ελεύθερης διάδοσης του συζεύκτη τύπου αστέρα ^[24].

Το 2004, η Infinera ξεκίνησε την εμπορική διάθεση σε μεγάλη κλίμακα οπτοηλεκτρονικών ή αλλιώς Ο-Ε Φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Αυτά επιτρέπουν την ολοκλήρωση των ενεργών οπτοηλεκτρονικών λειτουργιών όπως τα λέιζερ, ρυθμιστές και ανιχνευτές PIN. Το υλικό που έχει επιλεγεί είναι το Φωσφορούχο Ίνδιο (InP), χάρη στην ικανότητά του να επεξεργάζεται το φως στο ηλεκτρομαγνητικό 'παράθυρο' που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες.

Ο τύπος ολοκλήρωσης (μονολιθικός ή υβριδικός) είναι μια άλλη σημαντική παράμετρος για την κατηγοριοποίηση των PIC: μονολιθική ολοκλήρωση σημαίνει ότι όλες οι οπτικές λειτουργίες πραγματοποιούνται πάνω στο ίδιο υλικό που τοποθετούνται τα πλακίδια (wafers) καθώς και στην ίδια βάση. Υβριδική ολοκλήρωση έχουμε όταν δύο διαφορετικά υλικά στα οποία πραγματοποιούνται αντίστοιχα διαφορετικές οπτικές λειτουργίες συνδέονται μεταξύ τους.

Η Infinera έχει επιλέξει τη μονολιθική μέθοδο για τον σχεδιασμό των Φωτονικών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων χρησιμοποιώντας InP ως υπόστρωμα του ημιαγωγού. Το InP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σύνολο των λειτουργιών του PIC και έτσι η μονολιθική ολοκλήρωση επιτυγχάνεται στα πλαίσια μίας και μόνο κατασκευαστικής διαδικασίας.

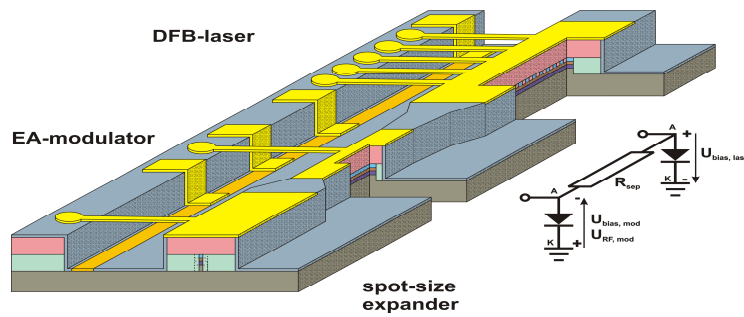
Το μειονέκτημα είναι ότι το InP είναι ένα «εξωτικό» υλικό και είναι σαφώς πιο δαπανηρό από το πυρίτιο. Η ολοκλήρωση με χρήση πυριτίου αποτελεί μία ιδιαίτερη περιοχή ενδιαφέροντος ακόμη και για τους καταξιωμένους κατασκευαστές στην παγκόσμια αγορά. Αυτή απετέλεσε την τελική επιλογή για την κοινοπραξία BOOM, η οποία προτείνει μια υβριδική πλατφόρμα ενοποίησης.

Ένας μετατροπέας τύπου AWOC καθώς και η μονάδα τατραπλασιασμού μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα αυτόνομο στοιχείο για επαναπρογραμματιζόμενες μονάδες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ουδέτερες κάρτες σε μονάδες τύπου OCX και να λύσουν έτσι το πρόβλημα της επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος.

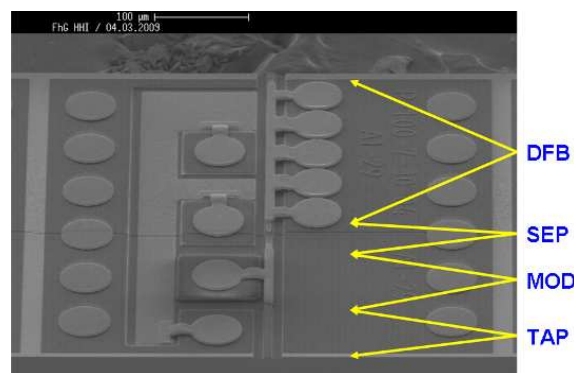
Ο μετατροπέας AWOC ως αυτόνομο στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να εφαρμοσθεί σε πολλές περιπτώσεις όπως μία Πανεπιστημιούπολη (π.χ. data center, campus network) σε δίκτυα Metro Ethernet λόγω του τύπου διαμόρφωσης που είναι RZ (ή NRZ αποτέλεσμα μετατροπής), αντί για διαμόρφωση φάσης, η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη σε μεγάλες αρχιτεκτονικές που καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις καθώς και ταχύτητες άνω των 40 Gbit / s.

Η περίπτωση του Metro είναι ιδιαίτερα ελκυστική λαμβάνοντας υπ' όψιν το γεγονός ότι ένας περιορισμένος αριθμός διασυνδεδεμένων μονάδων μπορεί να επιτευχθεί, αφού οι μεγάλες σε μήκος αλυσωτές διασυνδέσεις δεν μπορούν πρακτικά να εφαρμοστούν.

Ένα στοιχείο EML, αποτελείται από ένα DFB laser, έναν EA (electro absorption) διαμορφωτή, έναν spot size expander και έναν κυματοδηγό, τα οποία συνιστούν τα βασικά συστατικά για την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου πομποδέκτη TX / RX (PIC) σε ότι αφορά την πρόσβαση σε δίκτυα LAN και MAN. Για την υλοποίηση του μικροκυματικού ενισχυτή που αναπτύσσει δύο επίπεδα τάσης ή ρεύματος στην οπτική συσκευή (που αντιστοιχούν στα δύο ψηφιακά επίπεδα του ηλεκτρικού σήματος εισόδου) προτείνεται η χρήση της εμπορικά διαθέσιμης 0,25 μm IHP τεχνολογίας SiGe BiCMOS. Ο διαμορφωτής-οδηγός θα πρέπει να παρέχει 2Vpp (peak to peak) εύρος τάσης για τον διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης (EA) στα 10Gbps και θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε ένα φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα με εφαρμογές στα συστήματα πρόσβασης και Metro Ethernet.

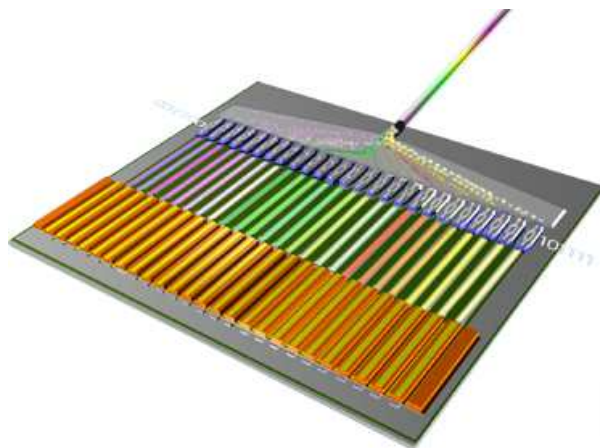


Σχήμα 10: Σχηματική απεικόνιση αρχιτεκτονικής BOOM EML μονολιθικής ολοκλήρωσης με χρήση spot-size expander & optical power booster.



Σχήμα 11: SEM εικόνα ενός EML chip με παθητικό spot-size expander.

Αρχίζοντας από τις βασικές λειτουργίες ενός EML (ρυθμιζόμενο ολοκληρωμένο λέιζερ με οδηγό και οπτικό διαμορφωτή) τα μεγάλης κλίμακας φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα πυριτίου είναι εύκολο να σχεδιασθούν. Ένα παράδειγμα απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 12 : Απεικόνιση ενός μελλοντικού οπτικού εκπομπού πυριτίου [25]

Τέλος, θα πρέπει να εξεταστεί η απο-πολύπλεξη UWDM καθώς και η διάταξη φωτοδιόδων.

Ενώ το UWDM στοιχείο είναι ειδικά σχεδιασμένο (όσον αφορά τις προδιαγραφές) για την εφαρμογή σε συστήματα BOOM, παρόμοια στοιχεία μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν σε πολλές περιπτώσεις, στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, όπως σε αισθητήρες (αντηχείο συντονισμού το οποίο είναι ευαίσθητο στις μεταβολές του περιβάλλοντος) και φασματογράφους.

Για πολλές από αυτές τις εφαρμογές ο αριθμός των οπτικών καναλιών είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Βάσει της τρέχουσας προδιαγραφής (5 nm FSR, ανάλυση 0,1 nm) απαιτούνται τουλάχιστον 50 κανάλια. Το όριο απευθύνεται πιθανότατα σε ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου που απαιτούνται για την ευθυγράμμιση όλων των καναλιών (μικρορύθμιση + / - 0.5nm για κατασκευαστικές ανακρίβειες).

Για υψηλότερες ταχύτητες διαμεταγωγής (+10 GHz), το εύρος ζώνης του αντηχείου , φυσικά, θα πρέπει να αυξηθεί αναλόγως. Ωστόσο, αυτό μειώνει την σχεδιαστική και κατασκευαστική πολυπλοκότητα.

Αυτή τη στιγμή οι φωτοανιχνευτές σχεδιάζονται για σχετικά χαμηλές ταχύτητες (2 GHz είναι επαρκής για την εξαγωγή ετικέτας (label), ενώ τα 10 GHz, αποτελούν τον στόχο για τα σχέδια 2ης γενεάς). Ωστόσο οι ανιχνευτές υψηλής ταχύτητας (+40 GHz) έχουν δοκιμασθεί επιτυχώς σε πλατφόρμα πυριτίου (nanophotonics) και διαφαίνεται ότι το στοιχείο αυτό μπορεί μελλοντικά να χρησιμοποιηθεί ως front end στοιχείο υψηλής ταχύτητας.

3.3 Εφαρμογή & προοπτικές στα Data Centers νέας γενεάς

Τα data centers στην εποχή μας έρχονται αντιμέτωπα ολοένα και περισσότερο με τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων εφαρμογών . Τα Οπτικά συστήματα με την σειρά τους έχουν αποδείχθει ιδιαίτερα αποδοτικά σε ότι αφορά τις ταχύτητες μετάδοσης και το υψηλό διαθέσιμο εύρος ζώνης. Η πρόοδος αυτή στην οπτική επιστήμη αποσκοπεί εν μέρει στην αντιμετώπιση των σύγχρονων αυτών αναγκών και απαιτήσεων. Οι οπτικές διασυνδέσεις έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό σε συστήματα υπερυπολογιστών ^[26] αντικαθιστώντας τα ευρέως διαδεδομένα ηλεκτρικά καλώδια με προφανή πλεονεκτήματα: κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων, χαμηλότερο βάρος και μικρότερος όγκος.

Ωστόσο, παρά την πρόσφατη επιτυχία, και την εμπορική χρήση των οπτικών μεταγωγών σε μικρές αποστάσεις (<100m) η χρήση τους σε δίκτυα δεδομένων προς το παρόν δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα. Κατ'επέκτασιν οι υψηλές επιδόσεις των

Υπολογιστικών Συστημάτων με Πολύ-πύρηνους επεξεργαστές περιορίζονται στα επίπεδα του αντίστοιχου δικτύου κορμού.

Σήμερα ολοένα και περισσότερα δεδομένα που αποθηκεύονται σε data centers για χρήση online, οδηγούν σε αύξηση του αριθμού των μεμονωμένων servers καθώς και την αύξηση του αριθμού των servers που απαιτούνται για κάθε ένα data center. Ο αριθμός των servers σε ένα μεγάλο data center πλησιάζει τις 100.000, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση και για εύρος ζώνης, ιδιαίτερα για εφαρμογές βίντεο κατά παραγγελία (VoD: Video On Demand) σε πραγματικό χρόνο, επεξεργασία βίντεο, χρηματοπιστωτικές υπηρεσίες, τηλεϊατρική, ιατρική απεικόνιση, αποθήκευση και επιστημονικούς υπολογισμούς^[27].

Παράλληλα με την ανάγκη αύξησης της χωρητικότητας εμφανίζεται και ένα άλλο ζήτημα αυτό της κατανάλωσης ενέργειας των δικτύων υπολογιστών. Είναι ζήτημα κοινωνικής ευθύνης πρωτίστως αλλά και μείωσης του κόστους και σε κάθε περίπτωση η βιομηχανία αλλά και οι πάροχοι να κινηθούν με διαφορετικό τρόπο απ'ότι στο πρόσφατο παρελθόν σε ότι αφορά την διαχείριση πυκνότητας ισχύος^[28]. Το 2006, το σύνολο των servers και data centers υπολογίστηκε ότι κατανάλωσαν το 1,5% της ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ, το οποίο αριθμητικά σημαίνει τον διπλασιασμό το ποσοστού σε σχέση με το έτος 2000^[29].

Τα νεότερου τύπου data centers απαιτούν ταχύτερη πρόσβαση σε αποθηκευμένα δεδομένα και είναι πολύ συχνό το φαινόμενο να ενσωματώνονται σε μεγάλα υπολογιστικά συστήματα και δικτυακούς κόμβους. Ωστόσο, στις περιπτώσεις μεγάλου όγκου δεδομένων, back-up και redundancy (πλεονάζον σύστημα ασφαλείας) τα data centers περιλαμβάνουν συνήθως κόμβους αποθήκευσης (storage nodes), καθώς και συστοιχίες δίσκων (disk arrays). Σε ένα κέντρο υπερυπολογιστών, το σύνολο των δεδομένων που μεταφέρεται μεταξύ Η/Υ, σταθμών εργασίας, server & disk arrays μπορεί συχνά να φτάνει σε επίπεδα από 100 terabytes έως 100 petabytes. Συνήθως η μεταφορά αυτών των ποσών πληροφορίας διαρκεί χρονικά περισσότερο απ'ότι η επεξεργασία αυτή καθ'αυτή περιορίζοντας έτσι τις επιδόσεις της εκάστοτε εφαρμογής ειδικά όταν ο αντίστοιχος κόμβος μπορεί να περιέχει συγκεκριμένο αριθμό disk arrays [30]. Απλοί υπολογισμοί δείχνουν ότι σε ένα τυπικό data center με 10 GbEthernet συνδέσεις, θα χρειαστούν περίπου 22 ώρες για να μεταφερθεί ένα αρχείο 100 TByte από τον δίσκο αποθήκευσης μέχρι το σημείο επεξεργασίας (υπολογιστικό σύστημα ή κόμβος).

Αυξάνοντας μόνο την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων το πρόβλημα δεν μπορεί να επιλυθεί καθώς σε αυτήν την περίπτωση δεν λαμβάνεται υπ'όψιν το εύρος ζώνης (bandwidth) ή οποιαδήποτε παρεμπόδιση (congestion) προς τους μεταγωγείς (switches).

Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο πραγματικός χρόνος στο βίντεο (real time video), το οποίο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που σχετίζονται με την επιτήρηση και τον έλεγχο διαφόρων δραστηριοτήτων από την πλευρά του χρήστη. Αναλυτικότερα τα εισερχόμενα δεδομένα βίντεο αναπαράγονται σε επιμέρους ενότητες και αναλύονται και εν συνεχεία

προωθούνται για την μεταξύ τους συγχώνευση έτσι ώστε να αποτελέσουν ένα συγκεκριμένο και καθορισμένο γεγονός (event) εν μέσω κάποιας συγκεκριμένης διεργασίας (task) το οποίο θα μπορεί να αναγνωρισθεί ως Real Time Video. Η ενδοεπικοινωνία μεταξύ των επιμέρους διεργασιών έχει την ακόλουθη ιδιαιτερότητα: τα κανάλια μετάδοσης βίντεο απαιτούν αρκετά υψηλό εύρος ζώνης σε σχέση με αυτά που μεταδίδουν τα αποτελέσματα ανάλυσης των διεργασιών.

Οι έρευνες αποδεικνύουν ότι τα Αμιγώς Οπτικά Δίκτυα ή Δίκτυα Οπτικής Μεταγωγής είναι ελπιδοφόρα και πολλά υποσχόμενα για την επίτευξη υψηλότερου εύρους ζώνης δικτύου. Αν και η έρευνα είναι ακόμη εν εξελίξει, η εμπορευματοποίηση παρεμποδίζεται από την έλλειψη οπτικών τεχνολογιών buffering και την ανάγκη για υψηλότερο βαθμό ολοκλήρωσης των οπτικών στοιχείων ^[31, 32, 33].

Αναγνωρίζοντας το ισοζύγιο μεταξύ ηλεκτρικών και οπτικών τεχνολογιών, αρκετές ερευνητικές ομάδες έχουν προτείνει την ανάπτυξη υβριδικών ηλεκτρικών / οπτικών δικτύων με στόχο να βελτιστοποιηθεί η χρήση των οπτικών και ηλεκτρικών τεχνολογιών σε όλο το εύρος λύσεων που παρέχονται αυτή τη στιγμή στην τηλεπικοινωνιακή αγορά. Αυτή είναι και η θέση του Patrick Gelsinger, Αντιπροέδρου της Intel, ο οποίος ισχυρίζεται στην ιστοσελίδα της ερευνητικής ομάδας τεχνολογίας ^[25] ότι *"η οπτική Σήμερα είναι μια εξειδικευμένη τεχνολογία. Αύριο θα αποτελεί την βασική κατασκευαστική μέθοδο για κάθε τσίπ που σχεδιάζεται"*.

3.4 Εφαρμογή και προοπτικές στα Μητροπολιτικά (Metro) Δίκτυα Ethernet

Σήμερα η τεχνολογία Metro κινείται και εξελίσσεται προς μία κατεύθυνση ιδιαίτερα πολύπλοκης αρχιτεκτονικής προκειμένου να ανταποκριθεί στην μεγαλεπίβολη υποσχεσή της για σχεδόν άπειρο εύρος ζώνης στο δίκτυο κορμού αλλά και τις υπερυψηλές ταχύτητες στα δίκτυα πρόσβασης.

Σημειωτέον ότι ο παραπάνω στόχος μπορεί να ακούγεται υπερβολικός όμως εάν αναλογισθεί κανείς ότι ο όγκος πληροφοριών που συγκεντρώνεται και δρομολογείται μέσω μίας υποδομής Metro προς τον βασικό κορμό του διαδικτύου, διπλασιάζεται κάθε 3-6 μήνες, με ταυτόχρονη χρήση διαφόρων πρωτοκόλων και αύξησης της πολυπλοκότητας του δικτύου βελτιώνονται ταυτόχρονα οι παρεχόμενες υπηρεσίες. Επιπλέον οι σχεδιαστές δικτύων Metro θα πρέπει να δώσουν ιδιαίτερη προσοχή στην ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας (QoS) που αποτελεί ζήτημα πρωτίστης σημασίας. Λαμβάνοντας υπ'όψιν τον μεγάλο όγκο πληροφοριών που διακινείται ταχύτατα μεταξύ των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, οι μηχανικοί σχεδιασμού δικτύων θα πρέπει να αναπτύξουν αρχιτεκτονικές οι οποίες εξασφαλίζουν την σωστή κατανομή των πόρων και διανομή δεδομένων έτσι ώστε να εγγυάται η αξιόπιστη λειτουργία της εκάστοτε υπηρεσίας. Ωστόσο τα παραπάνω οδηγούν με την σειρά τους σε προβλήματα, με σημαντικότερο απ'όλα την ηυξημένη κίνηση δεδομένων στο δίκτυο. Πρέπει επίσης να

επισημανθεί ότι η Ευρωπαϊκή αγορά τηλεπικοινωνιών ακολουθεί με καθυστέρηση τις εξελίξεις για πολλούς λόγους: ένας από αυτούς είναι ότι οι προαναφερθείσες υπηρεσίες και εφαρμογές έχουν προκαλέσει κορεσμό στη αγορά χωρίς όμως να έχουν εξαντλήσει τα αποθέματα εύρους ζώνης των αντίστοιχων δικτύων. Αντιστρόφως οι επενδύσεις και τα κεφάλαια που απαιτούνται για να εκκινήσουν την ζήτηση και την υιοθέτηση νέων ευρυζωνικών εξακολουθούν να είναι υψηλά.

Στο πλαίσιο αυτό, η εξέλιξη των δικτύων μετάδοσης είναι πιθανό να οδηγήσει αντίστοιχα σε νέες βελτιωμένες και ανταγωνιστικές λύσεις σε ότι αφορά τα σύγχρονα δίκτυα:

- Τη βελτιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων δικτυακών πόρων (μείωση αρχικού κεφαλαίου - CAPEX)
- Τη μείωση των λειτουργικών δαπανών (μείωση λειτουργικών εξόδων - OPEX)
- Τη βελτίωση της ποιότητας, της αποτελεσματικότητας στην παροχή υφιστάμενων και νέων υπηρεσιών (αύξηση και δημιουργία νέων πηγών εσόδων).

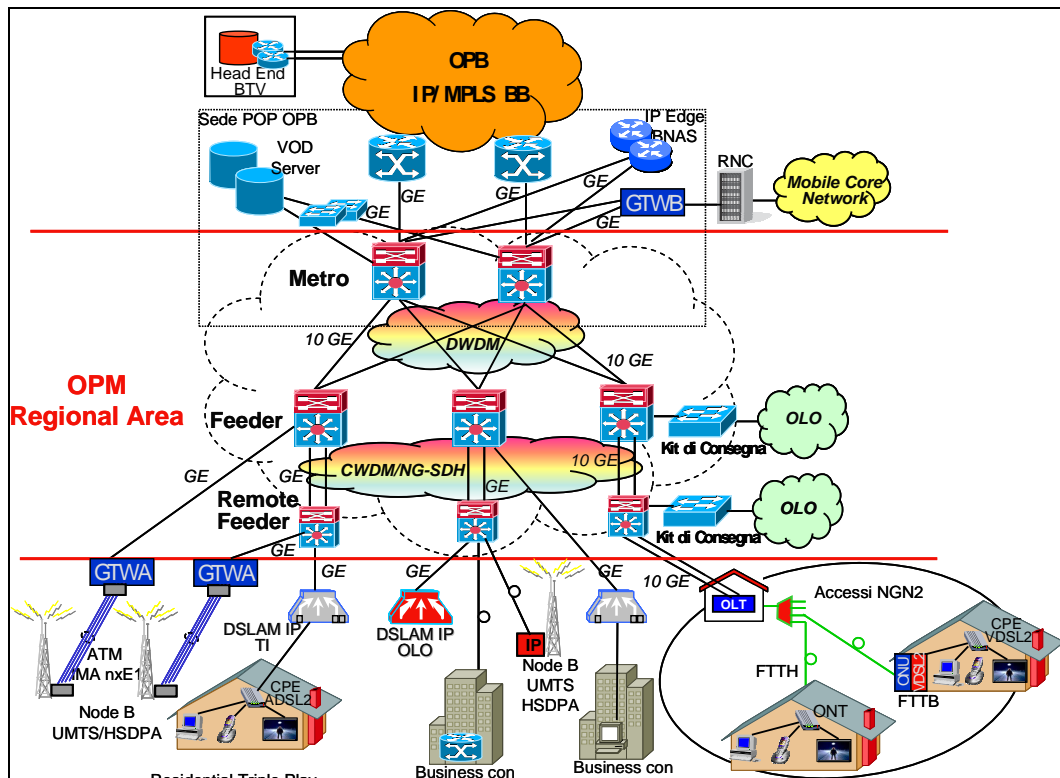
Θα πρέπει εδώ να επισημάνουμε ότι ένα μέρος της αγοράς ανθίσταται στην νέα αυτή τεχνολογία για του ακόλουθους λόγους: Όταν ένας πελάτης χρησιμοποιεί μια δοκιμασμένη και αποτελεσματική λύση είναι μάλλον εύλογο να εμμένει σε αυτήν και να μην ενδιαφέρεται για την αντικατάστασή της. Επιπλέον υπάρχει μια ισχυρή τάση να αναβάλλονται οι μεγάλες επενδύσεις για τις νέες δικτυακές υποδομές ενώ οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών αναμένουν συνήθως για την ειδοποιό διαφορά μία νέας τεχνολογίας δηλαδή μία ή περισσότερες υπηρεσίες που θα δικαιολογήσουν την υψηλή επένδυση κάτι το οποίο οι Αγγλοσάξωνες αποκαλούν killer application. Σχετικά με τα πρωτόκολλα, IP, Ethernet και SDH θεωρούνται πάντα οι καλύτερες επιλογές, επειδή είναι ευρέως διαδεδομένα, έχουν διεισδύσει στην αγορά και τους κατασκευαστές και επιπλέον είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικά για πολλούς λόγους που δεν θα σχολιασθούν στο παρόν.

Ο τρόπος ούτως ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της ευρυζωνικής πρόσβασης και παροχής υπηρεσιών βασισμένες στο internet, είναι οι εκάστοτε φορείς-πάροχοι να κινηθούν προς άλλες υπηρεσίες IP, όπως για παράδειγμα Video Broadcasting, VoIP τηλεφωνία, σύγχρονες υπηρεσίες.

Σημειωτέον ότι τα "All-IP δίκτυα" παρέχουν όλες τις υπηρεσίες IP υπό μορφή πακέτων, καθώς και άλλες τεχνολογίες δικτύων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση πακέτων, όπως για παράδειγμα Ethernet σε συνδυασμό με πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM). Παρά το όνομα τους, 'All-IP δίκτυα' πρέπει να τονισθεί ότι η υλοποίηση αυτών των δικτύων απαιτεί πολύ περισσότερα από μία τεχνολογία πακέτων και πολύ περισσότερα από το γνωστό πρωτόκολλο IP.

Μια σημαντική συνιστώσα μετάδοσης πληροφορίας είναι η τεχνική WDM, η οποία πολλαπλασιάζει τη βασική χωρητικότητα των οπτικών ινών. Η τεχνολογία WDM έχει πολλά περιθώρια σε ότι αφορά τα συνεργαζόμενα πρωτόκολλα τα οποία δραστηριοποιούνται σε υψηλότερα επίπεδα βάσει του OSI (Open Systems Interconnection), συνήθως όμως η μορφή Ethernet επιλέγεται. Ανεξάρτητα από τον

φορέα μετάδοσης των πακέτων, το Ethernet, υποστηρίζεται ολόενα και περισσότερο τόσο στην επιμέρους διασύνδεση των δικτύων όσο και στην διαχείριση αυτών καθώς επίσης και η μετεξέλιξη του που ακούει στο όνομα MPLS (multiprotocol label switching) και το οποίο υποβοηθεί την λειτουργία του Ethernet οργανώνοντας το δίκτυο σε λογικά επίπεδα ειδικότερα όταν πρόκειται για Μητροπολιτικά Δίκτυα (WAN:Wide Area Networks)



Σχήμα 13: Αρχιτεκτονική Metro Δικτύου Telecom Italia

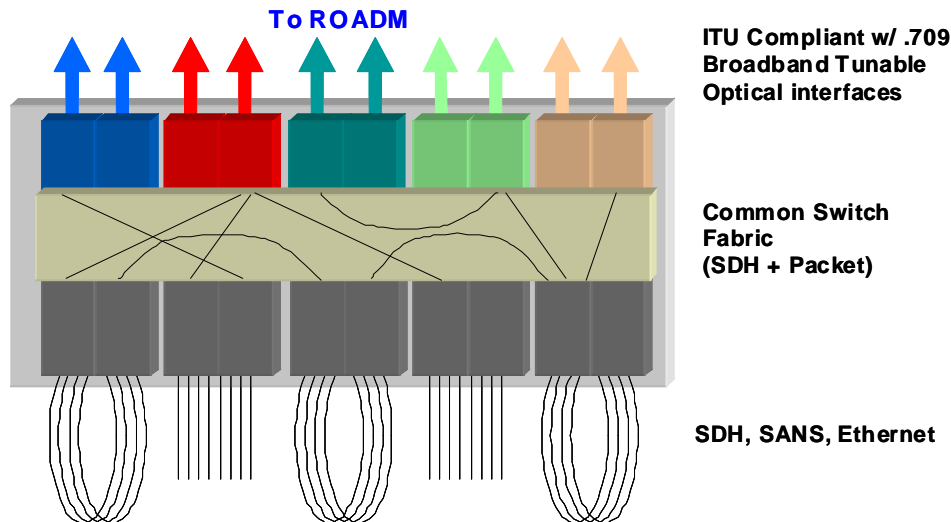
Οι εκάστοτε κυρίαρχοι πάροχοι (incumbent operators) εστιάζουν στην λεγόμενη σύγκλιση (convergence) των διαφορετικών στρωμάτων (network layers) καθώς και την αρχιτεκτονική (Σχήμα 13), γεγονός που αποτελεί γενικότερη τάση στον χώρο των τηλεπικοινωνιών.

Η σύγκλιση αυτή επιφέρει όπως αναμενόταν πολλές επιμέρους αλλαγές στα εξής:

- Σύγκλιση δικτύου: συγχωνεύει δίκτυα κινητής τηλεφωνίας με τα σταθερά δίκτυα που χρησιμοποιούνται για οικιακή ευρυζωνική χρήση, Ethernet, επιχειρηματικές υπηρεσίες, ακόμη και στη μετάδοση μέσω του δικτύου κορμού.
- Σύγκλιση εξοπλισμού: ενσωματώνει διαφορετικές λειτουργίες στο στρώμα δικτύου (όπως για παράδειγμα, την επεξεργασία πακέτων, αύξηση χωρητικότητας, οπτική μεταγωγή) - σε ένα ενιαίο είδος δικτυακού εξοπλισμού.
- Σύγκλιση υπηρεσίας: καθιστά πολλαπλές υπηρεσίες προσβάσιμες από οποιαδήποτε τερματική συσκευή - για παράδειγμα, τηλέφωνο, τηλεόραση, Η/Υ.

Σήμερα σε επίπεδο εξοπλισμού, το κυρίαρχο προϊόν οπτικής τεχνολογίας σε δίκτυα

Metro είναι η πλατφόρμα υπηρεσιών MSPP (multi-service provisioning platform) ή MSTP (multi-service transport platform) , η οποία βασίζεται σε NG-SDH (Next Generation SDH), και περιλαμβάνει Ethernet, καθώς και WDM χαρακτηριστικά. Ο εξοπλισμός αυτός αποτελεί ένα συνδυασμό της NG-SDH τεχνολογίας και της μεταγωγής Ethernet.



Σχήμα 14: SDH σταυροειδής σύνδεση (cross-connect) και μήτρα μεταγωγής πακέτων σε πλατφόρμα MSPP.

Συνήθως χρησιμοποιούνται σαν μονάδες συγκέντρωσης πακέτων στα σημεία εισόδου του δικτύου τα οποία με την σειρά τους υφίστανται μεταγωγή αναλόγως με την υπηρεσία που ζητείται. Είναι ευρέως διαδεδομένο για εταιρικές λύσεις και δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και ειδικότερα των δικτύων μετάδοσης (backhaul).

Η τεχνική WDM (WDM dense με 80 κανάλια, και WDM coarse, συνήθως κάτω από 16 κανάλια για δίκτυα Metro) διευρύνει τη χωρητικότητα των καλωδίων οπτικών ινών μειώνοντας έτσι το κόστος αλλά και την πιθανή αγορά και εγκατάσταση νέων οπτικών ινών για αναβάθμιση της χωρητικότητας. Επίσης η χρήση της οπτικής μεταγωγής συνεισφέρει στην ανά bit μείωση κόστους και προσφέρει δυναμικά ταχύτερη απόκριση από οποιαδήποτε άλλη γνωστή έως τώρα τεχνολογία.

Η βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών αποτυπώνεται στις εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης όπως IPTV και IGMP snooping, και αναμένεται η μετάδοση πακέτων να διαδραματίσει μείζονα ρόλο στην εξέλιξη της τεχνολογίας Metro.

Οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών χρειάζεται να λάβουν υπ'όψιν τους όλους τους παραπάνω παράγοντες όταν αποφασίζουν για την αρχιτεκτονική του δικτύου δηλαδή τον αριθμό των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε κάθε στρώμα ξεχωριστά, τον βαθμό συγκέντρωσης (aggregation) των πακέτων, καθώς και τον βαθμό παρέμβασης σε τοπικό (local) ή κεντρικό (centralized) επίπεδο προκειμένου η πληροφορία να επεξεργασθεί αναλόγως. Σήμερα υπάρχει μία εμφανής τάση η μετάδοση πακέτων να

πραγματοποιείται από διαδικτυακούς κόμβους (internet exchanges) αλλά και εξυπηρετητές-διακομιστές (servers) (συμπεριλαμβανομένης και της peer-to-peer κυκλοφορίας), διευρύνοντας έτσι το πλεονέκτημα της συγκέντρωσης πληροφορίας στο 2ο επίπεδο (OSI layer 2 – Data Link) έναντι των εναλλακτικών της τοπικής μεταγωγής (local switching) και της δρομολόγησης σε επίπεδο 3 (OSI layer 3 – Networking).

Κάθε περίπτωση πρέπει να αξιολογηθεί μεμονωμένα και προσεκτικά. Πολλά εξαρτώνται από τη γεωγραφία, την κίνηση, την υπάρχουσα υποδομή και την κατανομή του προσωπικού. Η ισορροπία μεταξύ όλων αυτών των παραγόντων τελικά οδηγεί επιχειρήσεις σε διαφορετικές λύσεις, χρησιμοποιώντας συχνά περισσότερες από μία υλοποιήσεις μέσα στο ίδιο δίκτυο.

3.4.1 Εφαρμογές της πλατφόρμας μεταγωγής BOOM στα σύγχρονα δίκτυα

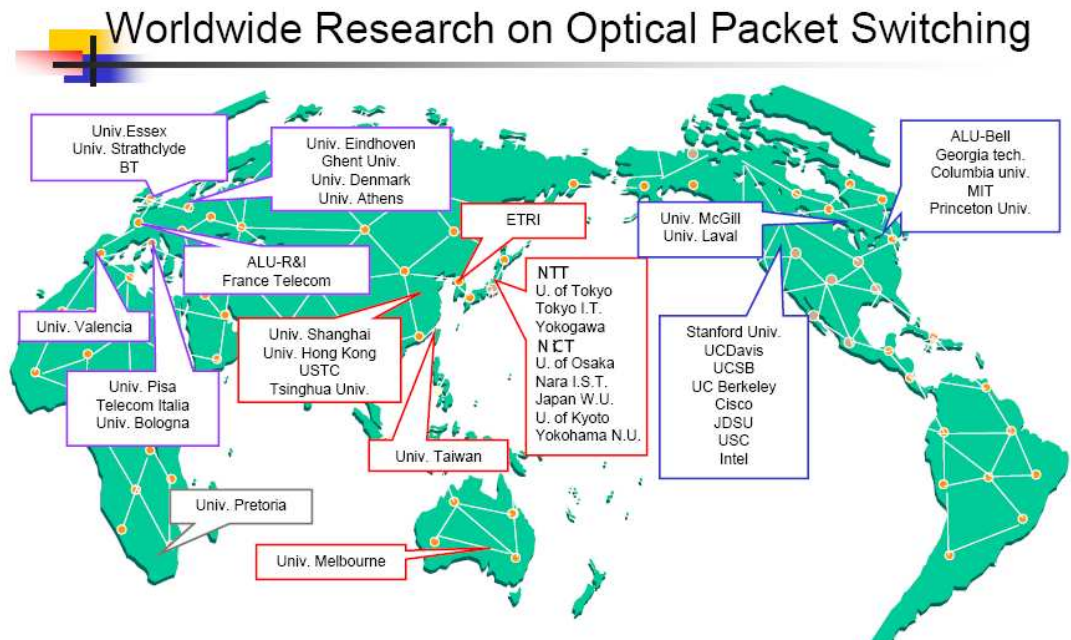
Τα δίκτυα Metro αποτελούν ιδιαίτερα πολύπλοκες τεχνολογίες οι οποίες ουσιαστικά κυριαρχούνται από το Ethernet όπου οι βασικές λειτουργίες (συγκέντρωση πακέτων, συγχρονισμός, διανομή, έλεγχος ποιότητας) υλοποιούνται μέσω ηλεκτρονικών μερών. Τα οπτικά με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μετάδοση IP και Ethernet πακέτων και την ομαδοποίηση επιμέρους οπτικών ινών κάτω από μία λογική οντότητα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ευελιξία στο οπτικό στρώμα, θα συμβάλει στη δημιουργία οπτικών καναλιών για L2 (layer 2) διασυνδέσεις, την βέλτιστη χρήση του εύρους ζώνης και διαδικασίας συγκέντρωσης των πακέτων.

Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να βελτιστοποιήσουν την υποδομή του δικτύου σε περιπτώσεις εφαρμογών που απαιτούν όπως προείπαμε υψηλό εύρος όπως η IPTV όπου θα μειώσει το κόστος διαχείρισης multicast σε οπτικά δίκτυα τύπου Metro. Η τεχνολογία L2 tunnelling εξακολουθεί να είναι τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος (circuit switched oriented) ακόμη και εάν χρησιμοποιηθεί σε ένα δίκτυο τεχνολογίας μεταγωγής πακέτων (packet switched oriented) συμπαρασύροντας όλα τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της.

Η Οπτική μεταγωγή και δρομολόγηση πακέτων αποτελεί το άκρο αυτής της διαδικασίας και είναι αντικείμενο μελέτης από πολλές επιστημονικές ομάδες σε όλο τον κόσμο (Σχήμα 15).

Η αναζήτηση για εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης π.χ IPTV, απαντάται σε ορισμένους πρότυπους πιλοτικούς κόμβους βάσει ιδιαίτερων αρχιτεκτονικών από διάφορους προμηθευτές προκειμένου να αποδείξει τη αναγκαιότητα και τις δυνατότητες των οπτικών δικτύων. Ένας από αυτούς τους προμηθευτές είναι η εταιρεία Yokogawa, η οποία συμμετέχει ενεργά στον σχεδιασμό οπτικών δικτύων με χρήση πακέτων από το 2000. Προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία της εισαγωγής οπτικών κόμβων νέας γενεάς, η

οποία φαίνεται να είναι σε θέση βολής μέχρι το 2015, η Yokogawa έχει καταφέρει εν τω μεταξύ να αναπτύξει ένα προϊόν οπτικής μεταγωγής πακέτων και το οποίο διατίθεται ήδη στην αγορά.



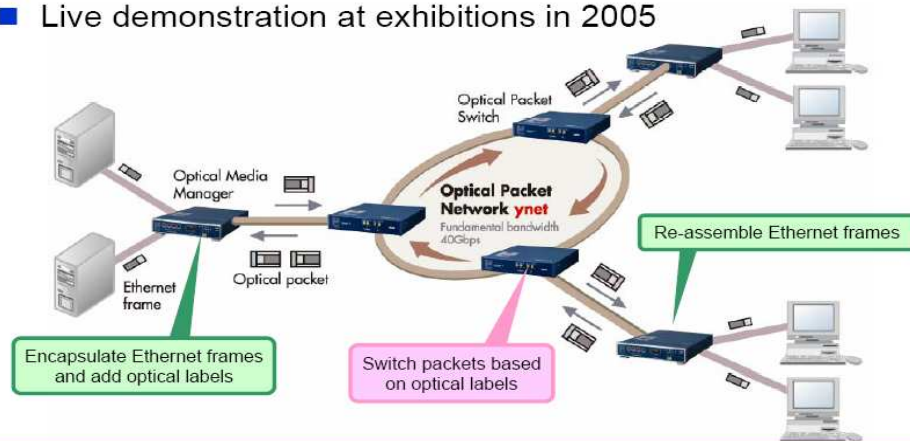
Σχήμα 15: Παγκόσμια έρευνα στην Οπτική Μεταγωγή Πακέτων ^[34]

Η προαναφερθείσα λύση παρουσιάστηκε σε διάφορα συνέδρια και εκθέσεις, και ήταν έτοιμη να δοκιμαστεί σε πιλοτικά προγράμματα σε συνεργασία με κάποιους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Στο οπτικό δίκτυο κορμού το οποίο αναπτύχθηκε από την Yokogawa έχουν υλοποιηθεί τέσσερις οπτικές μονάδες μεταγωγής με χρήση δύο επίπεδων κυματοδηγών που βασίζονται σε υπόστρωμα φωσφορούχου ινδίου. Η μονάδα μεταγωγής, είναι συμβατή με τεχνικές διαμόρφωσης μεγάλων αποστάσεων, με χρόνο μεταγωγής περίπου 1,4 ns, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος, μέσω της μπάντας C. Ο χρόνος μεταγωγής καθιστά τις λύσεις συμβατές με τα εκάστοτε (ιδιοκατασκευή – proprietary) οπτικά πακέτα με χρήση ενός Optical Media Manager που ενσωματώνει τις λειτουργίες συγκέντρωσης (aggregation) πακέτων Ethernet, προσωρινής αποθήκευσης (buffering) και ενθυλάκωσης (encapsulation) οπτικών πακέτων, δημιουργία οπτικών ετικετών (label generation) και μετάδοσης πακέτων (packet transmission) στους κόμβους μεταγωγής (Σχήμα 16).

Optical Packet Network ynet™

YOKOGAWA

- World's first practical optical packet network system
- Optical packet transmission w/o OE conversion
- Live demonstration at exhibitions in 2005



Yokogawa Electric Corp., Photonics Business Headquarters
October 23, 2007

Nature Photonics
Technology Conference

4

Σχήμα 16: Αρχιτεκτονική Οπτικού Δικτύου Μεταγωγής πακέτου από την Yokogawa [34]

Εκτός των άλλων η προσέγγιση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για την πλατφόρμα BOOM. Οι κόμβοι οπτικής μεταγωγής τύπου BOOM μπορούν να εισαχθούν σε μια μητροπολιτική αρχιτεκτονική σε περιορισμένο αριθμό κόμβων, όπου τα εκάστοτε πακέτα καταλήγουν σε ένα σύστημα διαχείρισης (Optical Data Manager), που υλοποιεί όλες τις λειτουργίες σε ανώτερο επίπεδο (Ethernet, IP aggregation, buffering, resource management, multicast).

Η πλατφόρμα μεταγωγής BOOM μπορεί να παραλληλισθεί με τον κόμβο οπτικής μεταγωγής τύπου Yokogawa, όπου η ταχύτητα μεταγωγής είναι 160 Gbit/s, αντί των 40 Gbit/s.

Ακολουθώντας πιστά τις κατευθυντήριες γραμμές αυτής της αρχιτεκτονικής, πρέπει να τονισθεί ότι μία ιδιοκατασκευή τρίτου σε θέματα τεχνικής διαμόρφωσης και ρυθμό μετάδοσης δεδομένων αποτελεί μία αποδεκτή επιλογή. Δεν πρέπει επίσης να παραγνωρίζουμε το γεγονός ότι η απαίτηση για υψηλό εύρος ζώνης αποτελεί βασικό παράγοντα στην περίπτωση της υπηρεσίας βίντεο HD (High Definition) μεταξύ των διακομιστών βίντεο (video distribution servers) ή κόμβους διανομής περιεχομένου (content delivery node).

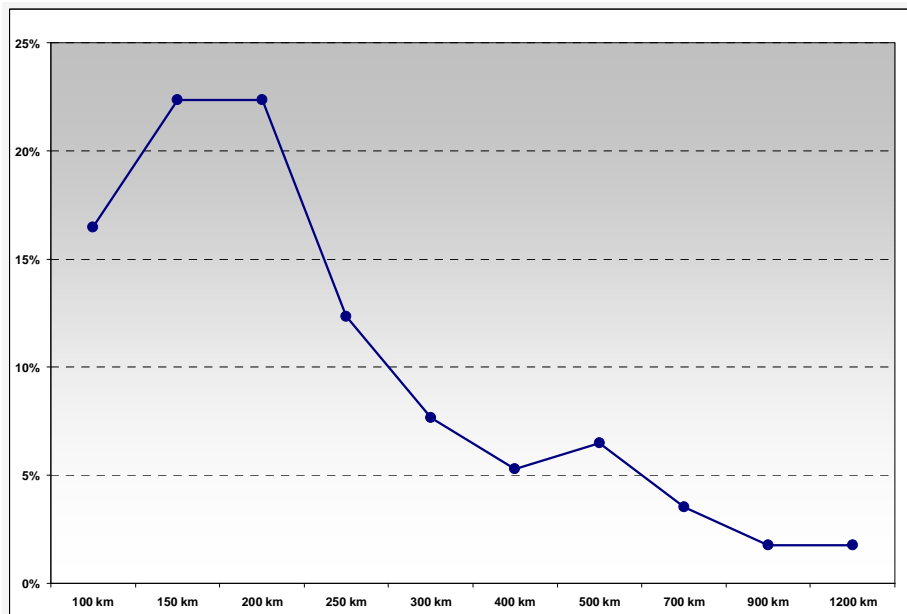
3.5 Προοπτικές στα δίκτυα κορμού DWDM

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο όσον αφορά την πρόβλεψη της κίνησης των πακέτων, οι πάροχοι Τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, όπως π.χ η Telecom Italia έχουν διαπιστώσει μια σημαντική αύξηση της σε επίπεδο εθνικού δικτύου κορμού, λόγω της αύξησης της κυκλοφορίας IP πακέτων σε συνδυασμό με την επέκταση των δικτύων άλλων παρόχων, την αύξηση των χρηστών (οικιακών και εταιρικών) καθώς και της μεταφοράς υπηρεσιών από αυτούς. Ωστόσο ενώ τα σύγχρονα συστήματα DWDM θα μπορούσαν κάλλιστα να στηρίξουν αυτό το πλεόνασμα φορτίου, το υψηλό κόστος της χωρητικότητας ανά οπτικό κανάλι (OCh – Optical Channels) καθώς και η περιορισμένη ευελιξία της ήδη εγκατεστημένης υποδομής τελικά περιορίζει τη δυνατότητα να προσφέρει υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας και μετάδοσης με χαμηλό κόστος.

3.5.1 Το Εθνικό Οπτικό Δίκτυο της Telecom Italia

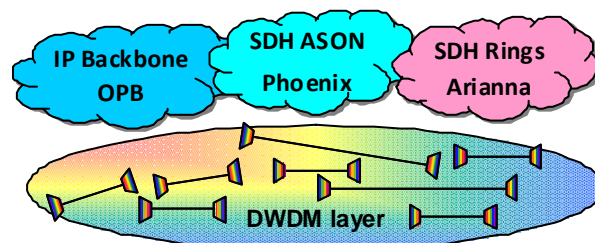
Το παραδοσιακό δίκτυο κορμού της Telecom Italia αποτελεί ένα δίκτυο εθνικής εμβέλειας το οποίο καλύπτει μεγάλες αποστάσεις και συνδέει τις μεγάλες πόλεις της Ιταλίας. Αποτελείται από τρία επίπεδα: το φυσικό επίπεδο οπτικών ινών, τα συστήματα DWDM, και τα δίκτυα SDH και IP. Όσον αφορά την υποδομή οπτικών ινών, τρεις τύποι ινών απαντώνται: α) ίνα παλαιάς γεννεάς σύμφωνα με την σύσταση ITU-T G.653, β) βελτιωμένη για μονοκάναλο SDH (πολύ χαμηλές τιμές εξασθένησης και διασποράς), η οποία σημειωτέον δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές WDM, γ) ίνα νεώτερης γεννεάς βάσει της σύστασης ITU-T G.655, βελτιωμένη για νέες τεχνολογίες WDM και ίνα ITU-T G.652, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στα πλαίσια των περιφερειακών δικτυακών υποδομών και η οποία παρέχει άριστες υπηρεσίες σε συνδυασμό με την τεχνολογία WDM.

Στις αρχές του 2009 περίπου 170 DWDM συστήματα ήταν ενεργά, σε σύνολο συνδέσεων 40.000 χιλιομέτρων. Η γραφική παράσταση στο σχήμα 17 αναπαριστά την κατανομή του μήκους συνδέσεων της συγκεκριμένης υπηρεσίας. Οι παλαιότερες συνδέσεις έχουν τα μικρότερα μήκη (τα περισσότερα συστήματα είναι μικρότερα των 400 χλμ). Από το 2006 και μετά άρχισαν να αυξάνονται σημαντικά οι εγκαταστάσεις τεχνολογίας DWDM τρίτης γεννεάς ULH με μήκος έως και 1200 χιλιομέτρων άνευ ηλεκτρικού αναγεννητή.



Σχήμα 17 :Κατανομή μήκους οπτικών συνδέσεων στην Telecom Italia ^[21].

Προς το παρόν, το οπτικό επίπεδο της Telecom Italia αποτελείται από μια σειρά point-to-point συστημάτων DWDM, που λειτουργούν σε 2,5 και 10 Gbit/s για μήκος κύματος, χωρίς οπτικές λειτουργίες μεταγωγής. Όλες οι λειτουργίες μεταγωγής λαμβάνουν χώρα στα υψηλότερα επίπεδα του δικτύου, δηλαδή SDH και IP.



Σχήμα 18: Εγκατεστημένη DWDM υποδομή. Το οπτικό επίπεδο αποτελείται από τον server των IP και SDH client δικτύων.

Δύο είναι οι βασικοί περιορισμοί σε ότι αφορά τη δομή του εν λόγω οπτικού επιπέδου: πρώτον, τα περισσότερα αιτήματα κίνησης απαιτούν με τη σειρά τους περισσότερους πόρους με αποτέλεσμα τη συνένωση των 2 ή 3 DWDM συστημάτων με ηλεκτρική αναγέννηση αυξάνοντας κατά συνέπεια το κόστος των OCh και κατ' επέκτασιν τον χρόνο παραμετροποίησής τους. Δεύτερον, η έλλειψη των μηχανισμών προστασίας στο επίπεδο DWDM επιτρέπει εκτροπή της κυκλοφορίας στα οπτικά κανάλια σε περίπτωση βλάβης ή και για λόγους συντήρησης του δικτύου.

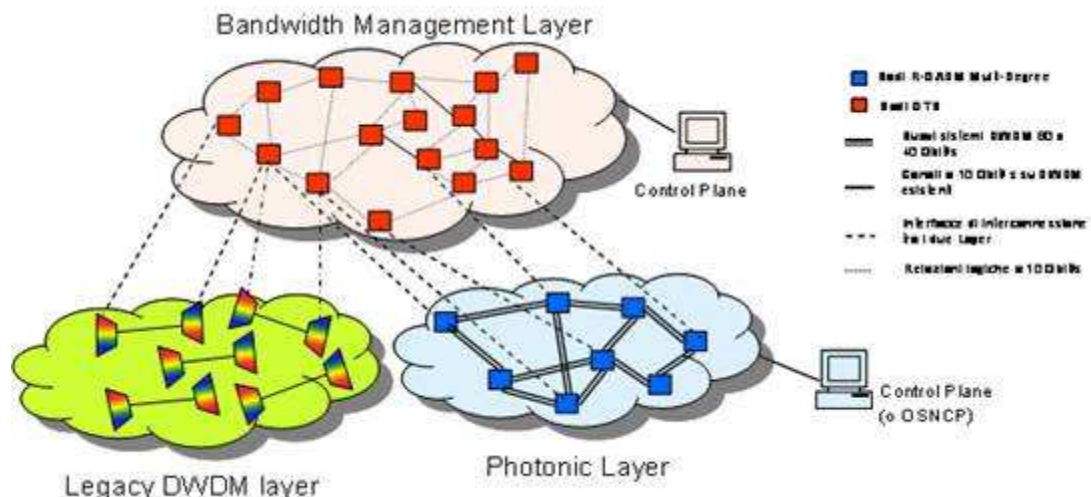
Και οι δύο περιορισμοί μπορούν να αρθούν με την ανάπτυξη ενός νέου δικτύου κορμού βασισμένο σε λειτουργίες οπτικού επιπέδου, όπως και επανασχεδιασμού λειτουργιών δρομολόγησης, προστασία και αποκατάσταση οπτικών συνδέσεων σε συνδυασμό με τις εύκολες διαδικασίες O&M (Operation & Maintenance).



Σχήμα 19: Βασικός σχεδιασμός Φωτονικού Δικτύου.

Οι λειτουργίες δρομολόγησης στο νέο οπτικό δίκτυο κορμού θα πρέπει να σχεδιασθούν με μεταγωγείς OXC βασισμένους σε διακόπτες επιλογής μήκους κύματος (WSS). Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά της οπτικής διαδρομής είναι ότι η πολυπλοκότητα και η κατανάλωση ισχύος των διακοπών δεν εξαρτάται από το ρυθμό bit που μεταφέρονται από τα οπτικά μονοπάτια στην μονάδα του χρόνου. Με ηλεκτρικές τεχνολογίες, η αλλαγή γίνεται πιο δύσκολη και καταναλώνεται περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια, καθώς ο ρυθμός δεδομένων αυξάνεται.

Επιπλέον, τα νέα Φωτονικά δίκτυα κορμού πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τα μελλοντικά σενάρια εξέλιξης της τεχνολογίας ήτοι τα διαφορετικά μήκη κύματος τα οποία θα καθιερώνονται στις εκάστοτε νέες τεχνολογίες μεταγωγής πακέτων και μεταγωγής των δικτύων.



Σχήμα 20: Πολυ-επίπεδη αρχιτεκτονική Φωτονικού Δικτύου.

Δυστυχώς, ένα τέτοιο απαιτητικό περιβάλλον δικτύου (Σχήμα 20) καθιστά τη συνολική μετάβαση σε συστήματα τύπου BOOM μάλλον δύσκολη, κυρίως λόγω του περιορισμού της χρησιμοποιούμενης διαμόρφωσης OOK (On Off Keying) και της περιορισμένης δυνατότητας τα συστήματα να υποστηρίξουν σειριακή διασύνδεση. Η τεχνική quad-AOWC δεν μπορεί να συνδυασθεί με G.709 καθ' ότι διαμορφώνεται υψηλός ρυθμός δεδομένων αδυνατώντας να παράσχει λειτουργίες ROADM. Επιπλέον, η μήτρα μεταγωγής απαιτεί OTN (Optical Transport Network) και λειτουργίες που είναι διαθέσιμες μόνο στον ηλεκτρικό τομέα.

3.6 IP Δίκτυα Κορμού

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η εφαρμογή μίας πλατφόρμας BOOM στο φωτονικό δίκτυο κορμού DWDM δεν είναι σκόπιμη, από αυτό το σημείο και στο εξής θα επικεντρωθούμε στην εφαρμογή της σε οπτικά υπόσυστήματα που είναι ενσωματωμένα με τη σειρά τους σε IP συστήματα.

Τα IP πακέτα αποτελούν το σημαντικότερο είδος πληροφορίας το οποίο θα απασχολήσει περισσότερο από κάθε άλλο στο μέλλον, τα δίκτυα οπτικής μεταγωγής. Αναμφισβήτητα οι IP υπηρεσίες υπήρξαν η κύρια πηγή της κίνησης του δικτύου ειδικότερα κατά την τελευταία δεκαετία. Πιο πρόσφατα άλλες υπηρεσίες, όπως η φωνή μέσω TDM, αλλά και τα δίκτυα δεδομένων που παρείχαν ιδιωτικές υπηρεσίες και μισθωμένες γραμμές (leased lines) τώρα προσφέρονται όλο και περισσότερο μέσω της τεχνολογίας IP και η συμπληρωματική τάση η οποία βαίνει αυξανόμενη είναι αυτή που οδηγεί προς την σταδιακή εγκατάλειψη των παραδοσιακών υποδομών σε ό,τι αφορά τις εν λόγω υπηρεσίες.

Πριν από μια δεκαετία η κίνηση πακέτων IP στο δίκτυο ήταν “απλά μια άλλη υπηρεσία”, και οι διεπαφές (interfaces) του δρομολογητή (router) κορμού διοχετεύονταν σε ένα οπτικό δίκτυο SONET / SDH. Σήμερα οι διεπαφές αυτές λειτουργούν σε ρυθμούς δεδομένων των 10 Gb/s ή 40 Gb/s, και είναι άμεσα συνδεδεμένες με το δίκτυο μεταφοράς WDM. Μάλιστα η ταχύτητα σύνδεσης μεταξύ IP δρομολογητών κορμού που γειτνιάζουν συχνά ξεπερνά τα 100 Gb/s, σε δίκτυα μεγάλης εμβέλειας και πολυπλοκότητας.

Η υπεροχή της τεχνολογίας IP ως ποσοστό του συνολικού όγκου της κίνησης του δικτύου συνεπάγεται ότι το συνολικό κόστος του δικτύου θα επηρεασθεί σε μεγάλο βαθμό από την αρχιτεκτονική του δικτύου, τον IP δρομολογητή αυτόν καθ’αυτόν καθώς και την παραμετροποίηση του συστήματος, αλλά και το κόστος δρομολογητή. Παράλληλα, μεταξύ αρχιτεκτονικής IP και οπτικού εξοπλισμού μπορεί να διαδραματισθεί ένας πολύ σημαντικός ρόλος στη βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους του δικτύου.

Μετατρέποντας πακέτα IP άμεσα σε WDM κανάλια, παρακάμπτοντας έτσι τα στρώματα μεταφοράς SDH και ATM, μπορεί να επέλθει μια σημαντική βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Το προσφάτως προτεινόμενο MPLS πρωτόκολλο επιτρέπει το IP-over-WDM, παρέχοντας μήκος κύματος σε κανάλια μεταγωγής με παρόμοιο τρόπο όπως ακριβώς η επικέτα μεταγωγής για τα επιμέρους μονοπάτια του MPLS ^[43].

Σήμερα η μεταγωγή IP πακέτων γίνεται σε ηλεκτρονικούς ή αλλιώς συμβατικούς δρομολογητές.

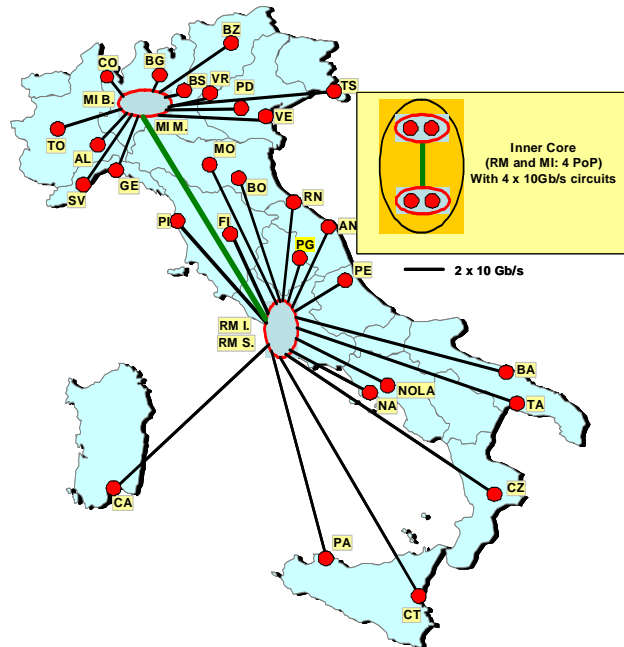
3.6.1 Αρχιτεκτονική δικτύου κορμού TELECOM ITALIA

Στο Σχήμα 21 απεικονίζεται η δομή των διασυνδέσεων μεταξύ των δρομολογητών (routers) στο δίκτυο κορμού της Telecom Italia. Όπως φαίνεται στο σχήμα η τοπολογία είναι διπλού αστέρα με έναν αστέρα ο οποίος ονομάζεται εσωτερικός κορμός (inner core) (Σχήμα 22) - μεταξύ των δύο κόμβων (node)- και έναν αστέρα που αποτελεί τον εξωτερικό κορμό (core) για τη διασύνδεση των περιφερειακών POP (Points of Presence) εντός του εσωτερικού κορμού.

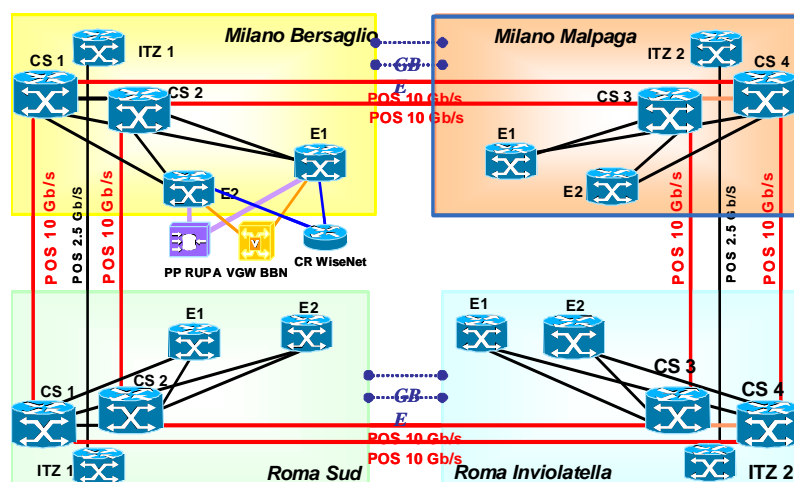
Όλες οι θύρες των δρομολογητών έχουν O/H ή H/O μετατροπείς οι οποίοι διασυνδέονται με PtP (point to point – σημείο προς σημείο) συνδέσεις σε ξεχωριστά μήκη κύματος και ξεχωριστά οπτικά μονοπάτια φωτός διαμέσου 40 οπτικών καναλιών 10 Gbit/s έκαστο με πολυπλεξία DWDM .

Σε ό,τι αφορά τη διασύνδεση μεταξύ των δρομολογητών και των συστημάτων DWDM, στην Telecom Italia δεν υπάρχει καμία ένδειξη ενδιαφέροντος για την υλοποίηση IP δικτύου βασιζόμενου σε DWDM τεχνολογία. Αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο βασικούς λόγους, ο πρώτος είναι το γεγονός ότι οι δρομολογητές DWDM POS (Point of Service)

είναι πολύ ακριβοί σε σχέση με αναμεταδότες DWDM καθώς και μικρών αποστάσεων (short haul) διεπαφές POS και το δεύτερον είναι ότι εάν τα δύο επίπεδα καταρρεύσουν για κάποιο λόγο, εύλογα θα εκλείψουν οι λειτουργίες διαχείρισης και εντοπισμού σφαλμάτων.



Σχήμα 21: Αρχιτεκτονική δικτύου κορμού της Telecom Italia. Εδώ απεικονίζεται η τοπολογία 32 Backbone POPs (Point of Presence) τα οποία είναι διασυνδεδεμένα με δύο κεντρικά gateway POPs με διάταξη διπλού αστέρα.

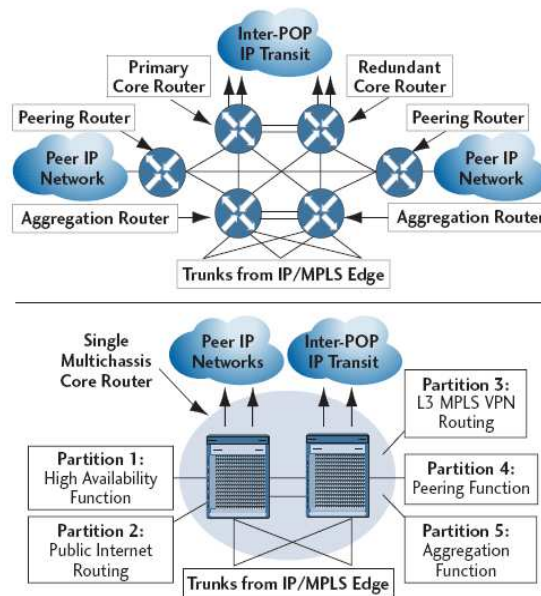


Σχήμα 22: Τα POP του εσωτερικού κορμού (inner core) της υποδομής IP (της Telecom Italia) έχουν υλοποιηθεί σε μορφή κυβικής τοπολογίας έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η ανθεκτικότητα του δικτύου αλλά και ο διαχωρισμός δρομολογητών κορμού (core routers) που εξυπηρετούν την λεγόμενη "transit traffic" και των δρομολογητών άκρου (edge routers) που εξυπηρετούν με τη σειρά τους "IP-access side traffic".

Επειδή το POP είναι ένας πολυλειτουργικός κόμβος (σημείο συνάθροισης όλων των πελατών σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή και πύλη διέλευσης δεδομένων κάθε κατηγορίας), η αρχιτεκτονική μπορεί να είναι ιδιαίτερα περίπλοκη και ο αριθμός των επιμέρους συστημάτων εξαιρετικά υψηλός, με πολλές διασυνδέσεις εντός των φυσικών ορίων του POP (Σχήμα 22).

Με κύριο στόχο την απλοποίηση της αρχιτεκτονικής, την κατανομή των πόρων, την εξοικονόμηση δαπανών κεφαλαίου - CAPEX (μείωση του αριθμού επιμέρους συστημάτων) και λειτουργικών δαπανών - OPEX (κατανάλωση ενέργειας, ψύξης, απαγωγή θερμότητας) οι πάροχοι υπηρεσιών προσπαθούν να εδραιώσουν την POP αρχιτεκτονική και την εφαρμογή τεχνολογιών virtualization ^[44] (Σχήμα 23).

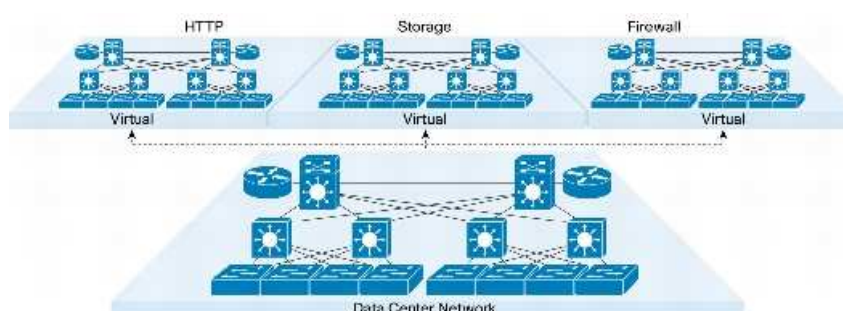
Όπως αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο τα ανωτέρω οδηγούν αναγκαστικά στην αύξηση του μεγέθους του δικτύου δρομολογητών αρχιτεκτονικής multishelf με τεράστιο αριθμό θυρών ταυτόχρονα όμως με πολύ μεγάλη δυνατότητα μεταγωγής.



Σχήμα 23: Virtualization & POP αρχιτεκτονική σε δίκτυο κορμού

3.6.2 Αρχιτεκτονική Router Virtualization

Ιστορικά, η αρχιτεκτονική virtualization εχρησιμοποιήτο πολύ πιο συχνά στα data centers από ότι στα POP. Η τεχνική αυτή όταν εφαρμόζεται σε ένα data center αναφέρεται σε εφαρμογές και διακομιστές εφαρμογών, όπως το HTTP και SAP. Επειδή ο διατεθέμενος χώρος στο ικρύωμα (rack) είναι εξαιρετικά πολύτιμος, η προσθήκη επιπλέον διακομιστών καθώς και κάθε είδους επέκταση χωρίς αύξηση του διαθέσιμου χώρου είναι πέρα για πέρα επιθυμητή.



Σχήμα 24: Τεχνολογία Virtualization σε Data Center.

Ωστόσο, διάφοροι παράγοντες, όπως το περιβάλλον και οι πρόσφατες εξελίξεις σε ότι αφορά τις νεότερες τεχνικές και τεχνολογίες, έχουν διευρύνει το φάσμα των δυνατοτήτων της αρχιτεκτονικής τύπου virtualization πέρα από τα data centers και προς την κατεύθυνση των POP ενός παρόχου τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Οι High-end δρομολογητές απαιτούν σημαντικά ποσά ισχύος και ψύξης μόνο για τις βασικές λειτουργίες, έτσι η αρχιτεκτονική virtualization μπορεί να προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας με την προσθήκη απλών στοιχείων στον υπάρχοντα εξοπλισμό. Τα πλεονεκτήματα θα μπορούσαν να συνοψιστούν ως εξής:

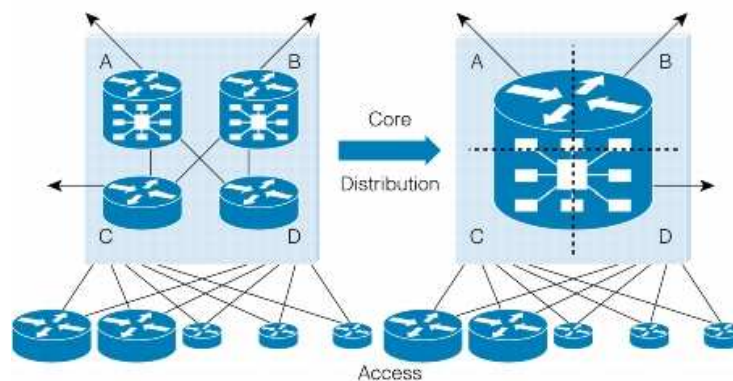
- μείωση CAPEX από την αγορά λιγότερων πλαισίων (chassis),
- μείωση OPEX από την εγκατάσταση λιγότερων πλαισίων και την απλοποίηση της τοπολογίας,
- μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, χρησιμοποιώντας λιγότερο ηλεκτρικό ρεύμα.

Οι στόχοι αυτοί πρέπει να συμπίπτουν με τις υφιστάμενες απαιτήσεις της σταθερότητας, την ανοχή και την απομόνωση των υπηρεσιών.

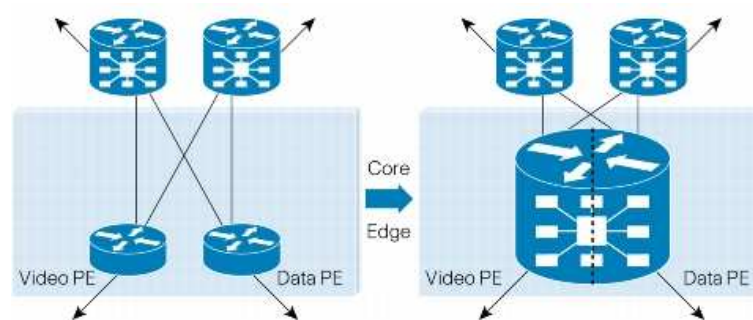
Οι λόγοι που οδηγούν στην αρχιτεκτονική Virtualization σε επίπεδο POP είναι συνήθως οι ακόλουθοι δύο:

- Ενοποίηση των πολλαπλών στρωμάτων σε ότι αφορά την τοπολογία δρομολόγησης (routing) βλέπε σχήμα 25.

- Ενοποίηση των πολλαπλών δικτύων (δίκτυα δεδομένων και βίντεο) εντός του ίδιου δικτύου του παρόχου, βλέπε σχήμα 26.



Σχήμα 25: Υλοποίηση επιπέδων POP



Σχήμα 26: Υλοποίηση δικτύου POP

Σε κάθε περίπτωση, το σύνολο των χαρακτηριστικών μπορεί να είναι πολύ διαφορετικό μεταξύ των δύο εικονικών δρομολογήσεων (virtual routing). Για παράδειγμα, ένας πάροχος και ένα άκρο παροχής (CPE) έχουν πολύ διαφορετικούς ρόλους στα πλαίσια ενός δικτύου, και ταυτόχρονα ένας δρομολογητής σε ένα δίκτυο δεδομένων είναι πιθανό να έχει διαφορετικές απαιτήσεις για την εκάστοτε παρεχόμενη υπηρεσία. Επειδή το POP είναι το σημείο συγκέντρωσης όλων των χρηστών - πελατών εντός μίας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής, ο αριθμός των γειτνιαζόντων (adjacencies) δρομολογήσεων είναι αρκετά μεγάλος και κατά συνέπεια είναι μεγάλος ο αριθμός των λογικών θυρών (UDP/TCP ports) που απαιτείται, καθώς και οι πλήρεις διαδρομές (routes) εντός του Διαδικτύου που θα εγκατασταθούν μεταξύ των σημείων δρομολόγησης. Επιπλέον, αυτές οι συσκευές συναθροίζουν την κίνηση των δεδομένων στα χαμηλά στρώματα του δικτύου, με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις εύρους ζώνης είναι εξαιρετικά υψηλές.

Αν και ο βαθμός εικονικής δρομολόγησης ποικίλλει, στο παρόν θα επικεντρωθούμε στον λεγόμενο Hardware-Isolated Virtual Router (HVR) ο οποίος πρακτικά είναι περιορισμένος σε ότι αφορά την ανάθεση πόρων εντός του δικτύου βάσει κατασκευαστικών μηχανισμών τους οποίους δεν μπορεί να υπερβεί σε αντίθεση με τους Software-Isolated Virtual Routers (SVR) οι οποίοι κατά περίπτωση μπορούν να παραμετροποιηθούν με την βοήθεια του εκάστοτε Firmware.

Στην προσέγγιση HVR δεν υπάρχει ανταλλαγή ή διαμοιρασμός σε επίπεδο ελέγχου ή σε επίπεδο διαχείρισης δικτυακών πόρων. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι τα επίπεδα αυτά είναι ενσωματωμένα στο λογισμικό του συστήματος.

Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των HVRs.

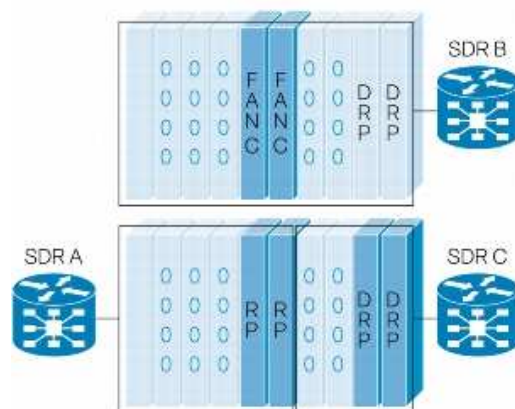
Κατηγορία	HVR
Επίπεδο ελέγχου διαθέσιμων πόρων (CPU, μνήμη)	Αποκλειστικό
Επίπεδο δεδομένων (μηχανή προώθησης πακέτων, ουρές αναμονής)	Αποκλειστικό
Επιμέρους συστήματα πλαισίου (τροφοδοτικό, απαγωγείς θερμότητας, εσωτερική μητρική)	Διαμοιραζόμενα
Διαχείριση, παραμετροποίηση	Αποκλειστικό
Διασυνδέσεις μεταξύ Virtual Routes	Εξωτερικές
Δυνατότητα επέκτασης πλαισίου (δρομολόγηση)	Ανάλογη της αύξησης των δρομολογήσεων

Πίνακας 1. Σύγκριση αρχιτεκτονικών Virtualized Routing

Μια βασική προϋπόθεση για την υλοποίηση αυτού του είδους δρομολογητή είναι ότι οι θεμελιώδεις πτυχές της λειτουργίας του δεν θα πρέπει να υποβαθμισθούν, ως αποτέλεσμα της εφαρμογής του virtualization, καθώς η ευελιξία και η ανοχή σε σφάλματα είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία λειτουργίας του. Μια διακοπή ή αποσύνδεση σε μια εικονική οντότητα δρομολόγησης (προγραμματιζόμενης ή δυναμικής), δεν πρέπει επ' ουδενί λόγο να έχει αντίκτυπο και στις υπόλοιπες. Με HVRs, η απαίτηση αυτή πληρείται σχετικά εύκολα. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε HVR ενσωματώνει ένα επίπεδο ελέγχου και διαχείρισης πόρων δεδομένων, τα οποία είναι εξ ολοκλήρου αφιερωμένα σε αυτή τη λειτουργία με αποτέλεσμα να μην απαιτείται λεπτομερής σχεδιασμός για τις μονάδες διαχείρισης πόρων. Τα HVRs συνήθως απαιτούν εξωτερικές συνδέσεις, η οποίες μπορούν να αυξήσουν το σύνολο των απαιτούμενων δαπανών σε ότι αφορά τη συνολική λύση, ταυτόχρονα όμως παρέχουν μια σαφή και άκρως προσδιορισμένη HVR

αρχιτεκτονική η οποία είναι συμβατή σε επίπεδο λειτουργίας με οποιοδήποτε άλλο άκρο (router) .

Προκειμένου να αντιμετωπισθεί η απαίτηση για υψηλό εύρος ζώνης και η παρουσία του επιπέδου ελέγχου σε δίκτυα παροχής υπηρεσιών, οι δύο μεγαλύτεροι παίκτες της αγοράς, ήτοι CISCO και Juniper, περιλαμβάνουν την τεχνολογία HVR στα πλαίσια της τεχνικής τους υποστήριξης. Δύνανται να παρέχουν πλήρη απομόνωση μεταξύ των virtualized routes μέσω της χρήσης των Καταναμημένων Επεξεργαστών Δρομολόγησης (DRPs) για την δημιουργία επιπλέον διαθέσιμων πόρων στο επίπεδο ελέγχου. Τα HVRs σαν οντότητες βρίσκονται εντός μίας κάρτας η οποία ενσωματώνει ειδικούς επεξεργαστές δρομολόγησης HVR .Παρακάτω στο Σχήμα 27 απεικονίζεται η ανάπτυξη SDRs σε ένα Cisco CRS-1 δρομολογητή με firmware Cisco IOS XR .



Σχήμα 27: Παράδειγμα ανάπτυξης SDR σε Cisco CRS-1/16

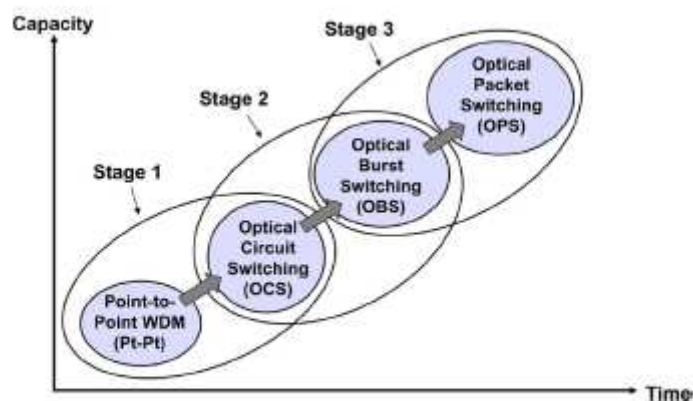
Η κατάμηση του δρομολογητή με αυτόν τον τρόπο επιτρέπει την δυνατότητα επέκτασης σε επίπεδο πλαισίου αλλά και σε επίπεδο ελέγχου και δρομολόγησης. Κάθε HVR διατηρεί μια ξεχωριστή παραμετροποίηση και διαχειρίζεται τις δικές του διασυνδέσεις ανεξάρτητα από τους άλλους HVR εντός του ικρυώματος (cabinet). Υποστηρίζουν, επίσης, ξεχωριστές διαδικασίες δρομολόγησης, προώθησης, και πίνακες γεινίασης (adjacency tables). Στην πραγματικότητα, τα μόνα μέρη του ικρυώματος που μοιράζονται είναι τα συστήματα αερισμού και απαγωγής θερμότητας και οι παροχές ηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή μονάδες που απαιτούν ελάχιστους πόρους και μηχανισμούς ελέγχου (κυριώς περιβάλλοντος).

3.7 Οπτική Μεταγωγή σε Δρομολογητές IP Κορμού

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι κόμβοι ενός δικτύου κορμού περιλαμβάνουν μια σειρά από μεγάλους συμβατικούς δρομολογητές οι οποίοι διασυνδέονται μέσω ενός DWDM οπτικού δικτύου. Ωστόσο η δρομολόγηση τύπου Virtualization αυξάνει τη ζήτηση σε επίπεδο δικτυακών πόρων εξαντλώντας έτσι τις δυνατότητες και τα όρια των δρομολογητών.

Έτσι λοιπόν η κατάσταση που επικρατεί στην πλειοψηφία των δικτύων είναι ότι υπάρχει το δίκτυο IP που αποτελεί τον βασικό κορμό και το οποίο συνεχώς εξελίσσεται από Pt - Pt (Point to point) WDM (χρησιμοποιώντας WDM συνδέσεις μεταξύ των δρομολογητών) σε δίκτυο Οπτικής Μεταγωγής (optical circuit switched –OCS) προσφέροντας επιπλέον λειτουργικές δυνατότητες. Ένα επιχείρημα που χρησιμοποιείται πολύ συχνά από τους υποστηρικτές της οπτικής μεταγωγής στα δίκτυα κορμού είναι ότι η οπτική τεχνολογία εκ των πραγμάτων δύναται να προσφέρει πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα.

Το επόμενο στάδιο του σεναρίου που φαίνεται στο σχήμα 28 είναι η εξέλιξη στη λεγόμενη οπτική μεταγωγή ριπής (OBS). Ενώ το τελευταίο στάδιο αυτής της μετάβασης περιλαμβάνει την εξέλιξη από OBS στην οπτική μεταγωγή πακέτων (OPS), στην οποία τα οπτικά πακέτα μεταγίνονται και αποθηκεύονται προσωρινά σε οπτική μορφή πριν από τη μετάδοσή τους στον επόμενο κόμβο του δικτύου. Αυτός είναι ο τελικός στόχος σε ότι αφορά την εφαρμογή της Οπτικής Μεταγωγής.



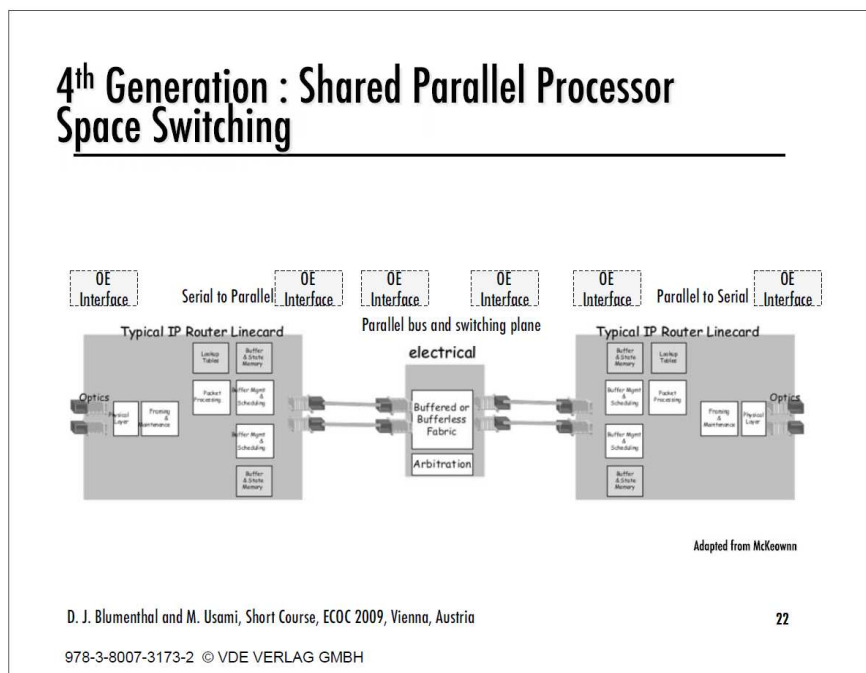
Σχήμα 28: Στάδια εξέλιξης της τεχνολογίας Οπτικής Μεταγωγής σε DWDM δίκτυα ^[42]

Αν και τα πρώτα δύο στάδια είναι πλήρως προσδιορισμένα και βρίσκονται εν εξέλιξη όλα τα υπόλοιπα είναι ακόμα στο στάδιο της έρευνας και αναμφισβήτητα πολλά τεχνικά ζητήματα είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιλυθούν επί του παρόντος, όπως είναι το ενεργειακό και η βελτιστη λειτουργία των νέων αυτών συστημάτων δρομολόγησης.

Ίσως, μία εύλογη ενδιάμεση εφαρμογή των οπτικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεταγωγής να μπορούσε να στηριχθεί στην εξέλιξη της εσωτερικής αρχιτεκτονικής με την χρήση ικρυωμάτων πολλών θέσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 29 - 30– παραδόσεις από Blumenthal ECOC 2009 [2]).

Στο Σχήμα 29 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική της τρέχουσας τεχνολογίας δρομολογητών (ονόματι 4ης γενιάς): προκειμένου να αντιμετωπισθεί η ανάγκη ζήτησης φυσικών θυρών υψηλής χωρητικότητας (40Gbit/s ή περισσότερο στο εγγύς μέλλον). Σε γενικές γραμμές κάθε ξεχωριστή θέση πλαισίου (σασί) περιλαμβάνει επιμέρους κάρτες αλλά και ξεχωριστή εσωτερική μήτρα μεταγωγής συνδεδεμένες με οπτικό μέσο σε διάταξη Αστέρα όπου η κεντρική μήτρα μεταγωγής αποτελεί το σημείο αναφοράς.

Επιπλέον, η υψηλή απόδοση μεταγωγής που απαιτείται (αρκετά Tbit/s) επιβάλλει παράλληλη επεξεργασία για τη δρομολόγηση πακέτων και επεξεργασία της IP επικεφαλίδας (IP header).



Σχήμα 29: Παρουσίαση δρομολογητών κορμού τύπου multi-shelf (πολλαπλών πλαισίων) [2]

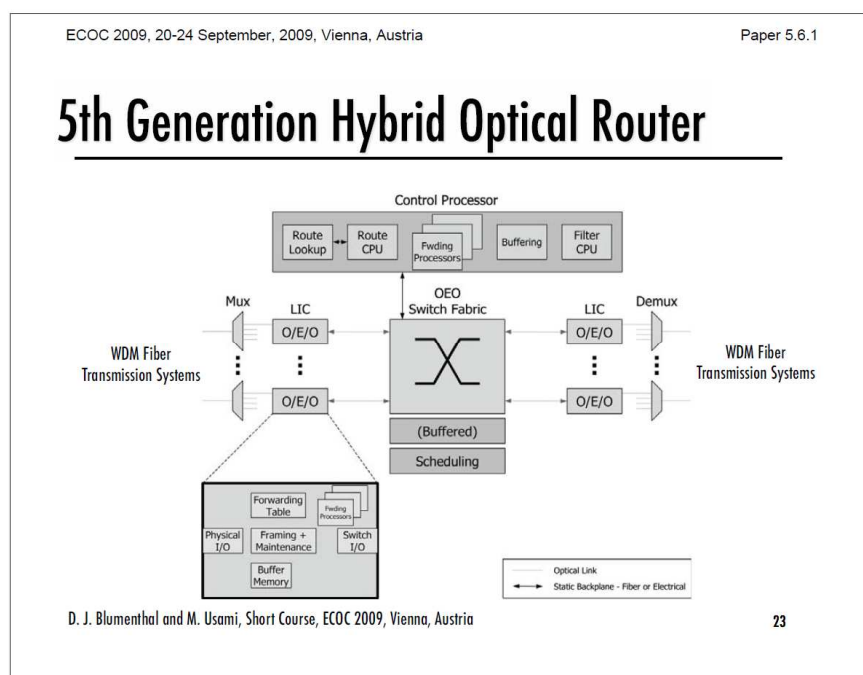
Το επόμενο βήμα (Σχήμα 30) θα είναι λογικά η υποκατάσταση της εσωτερικής μήτρας μεταγωγής (ή μέρους της) με την ελπίδα να μειώσει το λεγόμενο ενεργειακό αποτύπωμα της σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας καθώς και να αυξήσει ταυτόχρονα την χωρητικότητα της.

Η γενικότερη αρχιτεκτονική θα πρέπει λίγο έως πολύ να προσομοιάζει με την αντίστοιχη αρχιτεκτονική των δρομολογητών νέας γενιάς, τροποποιημένη δε σε ότι αφορά την

διασύνδεση μεταξύ των πλαισίων (chassis -shelves) (πιθανώς συνδέσεις υψηλής ταχύτητας μέσω οπτικής ίνας και σημαντική αύξηση του ρυθμού διαμεταγωγής).

Σε ότι αφορά το Οπτικό buffering εξακολουθεί να αποτελεί ζήτημα υπό διερεύνηση, προς το παρόν όμως οι λύσεις μετατροπής O / H / O σειριακής διάταξης σε παράλληλη καθώς και η χρήση ηλεκτρονικού buffering, φαίνεται πως είναι αρκετά προσιτές και αποτελεσματικές [2].

Επιπλέον θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν PICs σε ότι αφορά τις κάρτες διεπαφών (interface cards) καθώς και την διασύνδεση μεταξύ των επί μέρους πλαισίων.

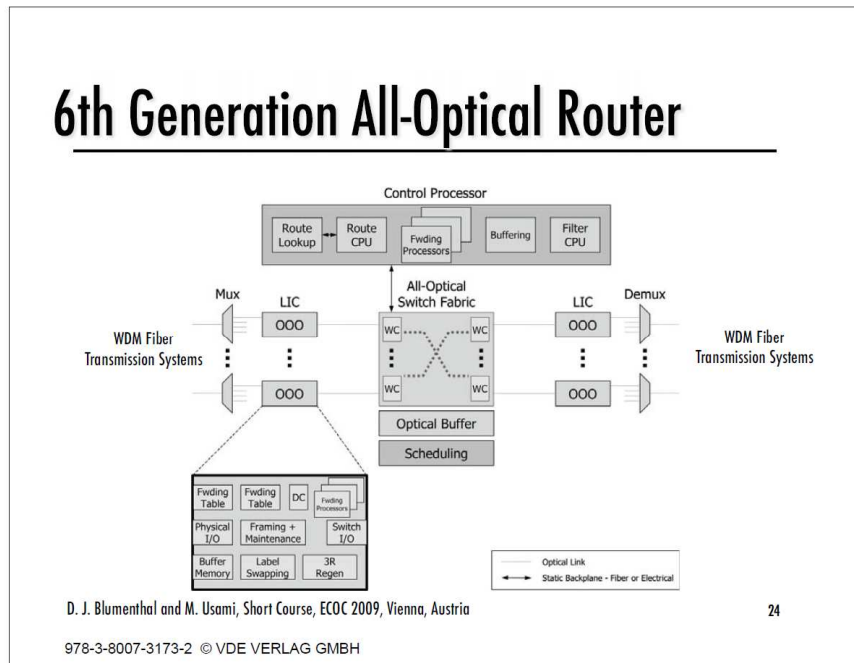


Σχήμα 30: Υβριδικό Οπτικό-Ηλεκτρονικό σύστημα δρομολόγησης: σημείωση – οπτική μήτρα μεταγωγής [2].

Το τελικό εξελικτικό στάδιο θα μπορούσε να είναι ένας πλήρως οπτικός δρομολογητής κορμού (Σχήμα 31).

Αυτό βέβαια είναι ένα πολύ πιο περίπλοκο εγχείρημα όπου τα βασικότερα ζητήματα είναι αυτό της μετάδοσης δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις (η προβληματική έγκειται σε θέματα φάσης, πλάτους, τεχνικής διαμόρφωσης, FEC-Forward Error Correction, ψηφιακή επεξεργασία, δυνατότητα σειριακής διασύνδεσης, χρήση αμιγώς οπτικών αναγεννητών κλπ.) καθώς και όλα τα προβλήματα που σχετίζονται με την οπτική μεταγωγή (πολύ υψηλή κλίμακα ολοκλήρωσης των οπτικών λειτουργιών, επεξεργασίας επικεφαλίδας,

buffering σε κάρτες και την ίδια την μήτρα μεταγωγής, contention rate, διαχείρισης και αξιολόγησης των επιδόσεων κλπ.) πρέπει να αντιμετωπισθούν ταυτόχρονα.



Σχήμα 31: Στάδιο ολοκλήρωσης: all optical core router (αμιγώς οπτικός δρομολογητής)^[2].

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα ανωτέρω, η πλατφόρμα BOOM, όπως πραγματικά έχει σχεδιασθεί, δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτό το τελικό στάδιο όπου απαιτούνται άλλοι είδους λύσεις, για παράδειγμα η αναγέννηση οπτικού σήματος ή/και η μετατροπή βάσει των ίδιων τεχνολογιών ολοκλήρωσης που χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη (κοινοπραξία APACHE)^[41]. Όλες αυτές οι λύσεις δυνητικά εφαρμόζονται στην υβριδική πλατφόρμα BOOM SOI, οι αξιολογήσεις αυτές όμως είναι πέρα από το αντικείμενο της παρούσας μελέτης.

Αντιθέτως, η πλατφόρμα μεταγωγής BOOM είναι η καταλληλότερη για το ενδιάμεσο στάδιο όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 30.

Ως εκ τούτου, σε ό, τι ακολουθεί θα εξετάσουμε αυτή την λύση ξεκινώντας από μια πιο λεπτομερή περιγραφή της εσωτερικής αρχιτεκτονικής των δρομολογητών κορμού που χρησιμοποιούνται προς το παρόν με σκοπό να καταλήξουμε σε μια πρόταση αρχιτεκτονικής που περιλαμβάνει την πλατφόρμα BOOM κατάλληλα σχεδιασμένη για την αντιμετώπιση των ζητημάτων κατανάλωσης ενέργειας αλλά και τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης.

3.7.1 Αρχιτεκτονική Ηλεκτρονικού Δρομολογητή Κορμού

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει μία σύντομη περιγραφή της εσωτερικής αρχιτεκτονικής διαφόρων δρομολογητών που χρησιμοποιούνται ευρέως στην παγκόσμια αγορά και που εφαρμόζουν virtualization.

Ο δρομολογητής Cisco CRS-1 είναι ένα σύστημα δρομολόγησης που μπορεί να υποστηρίξει έως και 92 terabits ανά δευτερόλεπτο (Tbps), δηλαδή υποστηρίζει έως 1152 κάρτες εκ των οποίων κάθε διεπαφή 40 Gbps .

Το Cisco CRS-1 περιλαμβάνει δύο σημαντικά στοιχεία: πλαίσια (chassis) με κάρτες διεπαφών (interface cards) και πλαίσια με μήτρες μεταγωγής (switching cards). Με βάση αυτά τα δύο δομικά στοιχεία του συστήματος, ο Cisco CRS-1 μπορεί να διαμορφωθεί με δύο τρόπους: ένα ενιαίο σύστημα-πλαίσιο το οποίο αποτελεί ένα αυτόνομο σύστημα (compact system) ή ένα σύστημα πολλαπλών πλαισίων (modular cascading system) (Σχήμα 32).

Ένα ενιαίο σύστημα-πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από ένα ενιαίο σασί & κάρτες διεπαφών, ενώ διατίθεται σε 4, 8, ή 16 υποδοχές (slots) στις οποίες τοποθετούνται οι κάρτες. Το ενιαίο πλαίσιο παρέχει χωρητικότητα μεταγωγής 320 Gbps, 640 Gbps, ή 1,2 Tbps (αμφίδρομη 1x16x40x2) και 4, 8, ή 16 διαθέσιμες υποδοχές για κάρτες διεπαφής των 40-Gbps.

Ένα σύστημα πολλαπλών πλαισίων είναι δομημένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα επιμέρους πλαίσια να είναι πλήρως διασυνδεδεμένα ανά μεταξύ τους (full mesh topology) ή να συνδέονται σε ένα κεντρικό πλαίσιο (star topology) – εναλλακτικά μπορούμε να έχουμε μικτές τοπολογίες αναλόγως αναγκών και περιορισμών. Επιπλέον το εκάστοτε σύστημα-πλαίσιο μπορεί να θεωρηθεί απολύτως αυτόνομο (stand alone node) και να διαθέτει τόσο την κεντρική μήτρα μεταγωγής όσο και τις αντίστοιχες κάρτες διεπαφής για την επικοινωνία του με άλλα συστήματα αλλά και τον έξω κόσμο. Αντιθέτως το σύστημα μπορεί εναλλακτικά να έχει άλλη μορφή και να διαθέτει μόνον κάρτες διεπαφής και στην ουσία να υπάγεται σε κάποιον κεντρικό κόμβο (centralized node) με τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Ένα σύστημα πολλαπλών πλαισίων μπορεί να επεκταθεί έως και 92 Tbps, και να προστεθούν έως και 72 κάρτες διεπαφής (με υποστήριξη έως και 1152 κάρτες, 40Gbps η κάθε μία). Η μέγιστη ταχύτητα (αμφίδρομη), είναι μέχρι 92 Tbps

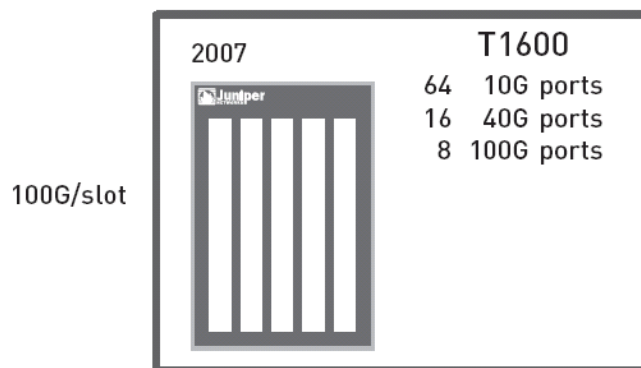
(72x16x40x2).



Σχήμα 32: CISCO CRS portfolio

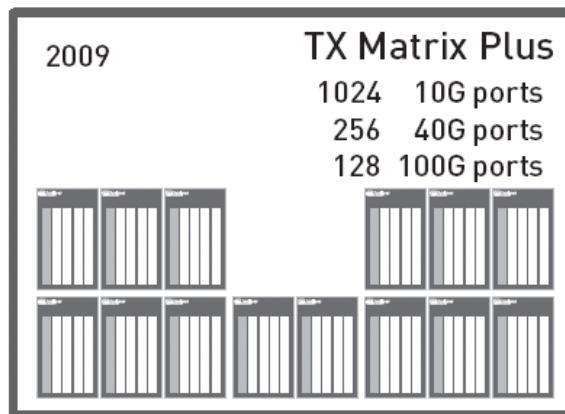
Η Juniper έχει αναπτύξει το δρομολογητή T1600 εννιαίου πλαισίου, υψηλής χωρητικότητας 100 gigabit / second ανά υποδοχή.

Σε ένα πλαίσιο T1600 δεκαέξι υποδοχές είναι διαθέσιμες για θύρες (ports) 40G και διαθετεί έως οκτώ θύρες των 100G, για μέγιστη αμφίδρομη χωρητικότητα (throughput) 1.6T.



Σχήμα 33: T1600 διαθέσιμες line κάρτες

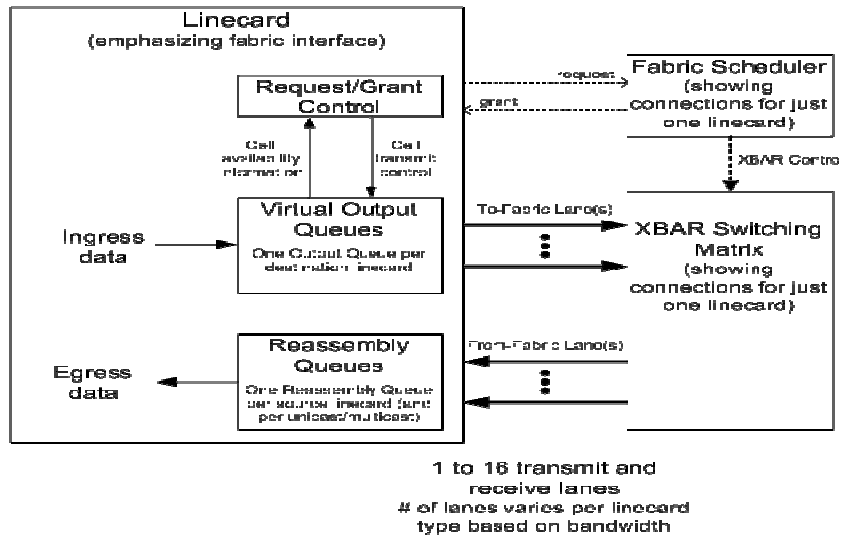
Η λύση Juniper Τέξας Matrix Plus διαθέτει έναν κεντρικό κόμβο μεταγωγής και δρομολόγησης που συνδέει έως και 16 T1600 πλαίσια σε μια ενιαία οντότητα δρομολόγησης (Σχήμα 34). Η μέγιστη ταχύτητα (αμφίδρομη), είναι μέχρι 25.6 Tbps (16x8x100x2).



Σχήμα 34: T1600 διαθέσιμες μήτρες μεταγωγής

3.7.2 Προώθηση πακέτων (data packet forwarding) και διαδικασία δρομολόγησης

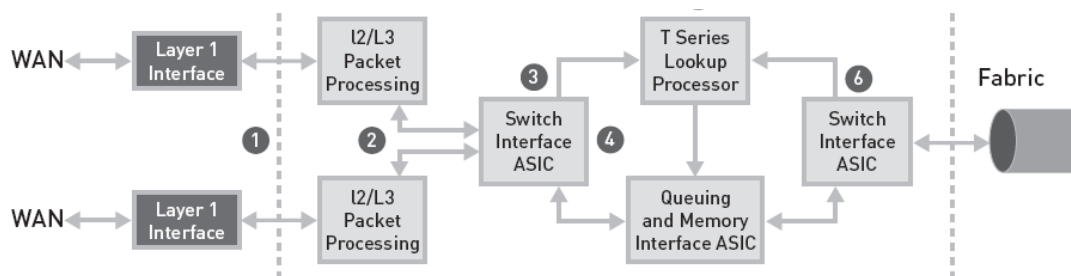
Όταν ένα πακέτο εισέρχεται σε έναν δρομολογητή, υποδιαιρείται σε επιμέρους κελιά (cells), αυτά με τη σειρά τους εγγράφονται στην μνήμη εισόδου (ingress memory) του συστήματος και εν συνεχεία γίνεται αναζήτηση του δρόμου (route) που πρέπει να ακολουθήσει η συγκεκριμένη πληροφορία αφού πρώτα αφιχθή στην μήτρα μεταγωγής και τελικά στην κάρτα διεπαφής όπου εκ νέου θα γίνει εγγραφή στην μνήμη εξόδου (egress memory). Ομοίως πραγματοποιείται μία νέα αναζήτηση του δρόμου (route) βάσει της επικεφαλίδας (header) που φέρει το εκάστοτε πεδίο και οδηγείται στην έξοδο του συστήματος αφού πρώτα τα κελιά συνενώνονται για να αποτελέσουν ξανά ένα επί μέρους πακέτο και να αποσταλλεί στον προορισμό του στο ευρύτερο δίκτυο. Σημειωτέον κάθε κελί CISCO έχει ορισμένο μήκος της τάξεως των 136 bytes.



Σχήμα 35: Διαδικασία δρομολόγησης

Κάθε κάρτα εισόδου και εξόδου αποτελείται ουσιαστικά από δύο μέρη, μία οπτική μονάδα που αντιπροσωπεύει το εμπρόσθιο άκρο (front end) της κάρτας (που ονομάζεται Μονάδα PLIM για CISCO ή PIC για Juniper) και μια άλλη μονάδα που πραγματοποιεί την επεξεργασία πακέτων (MSC για τη CISCO ή PFE για Juniper, Σχήμα 35).

Οι μονάδες PLIM ή PIC πραγματοποιούν την επεξεργασία πακέτων τόσο σε Φυσικό επίπεδο (Physical Layer – Layer 1) όσο και σε επίπεδο Διασύνδεσης (Data Link Layer – Layer 2). Μπορούν επίσης να εκτελέσουν όλες τις λειτουργίες που απαιτούνται για την πλατφόρμα δρομολόγησης ώστε να λαμβάνει και να μεταδίδει πακέτα από και προς το δίκτυο (Σχήμα 36).



Σχήμα 36: Αρχιτεκτονική δρομολόγησης σε δίκτυο JUNIPER

Η μήτρα μεταγωγής παρέχει εσωτερική διασύνδεση μεταξύ των διαφόρων καρτών. Σε ένα απλό σύστημα ενός πλαισίου η μήτρα μεταγωγής παρέχει διασύνδεση μεταξύ των καρτών που βρίσκονται μέσα στο ίδιο το πλαίσιο.

Σε ένα σύστημα πολλαπλών πλαισίων ωστόσο, η μήτρα μεταγωγής παρέχει διασύνδεση μεταξύ όλων των καρτών που είναι εγκατεστημένες στο σύνολο των επιμέρους πλαισίων που απαρτίζουν τον κόμβο δρομολόγησης. Η μήτρα μεταγωγής διαιρείται σε επίπεδα

(οκτώ παράλληλα επίπεδα μεταγωγής για CISCO δρομολογητές, ενώ για JUNIPER δρομολογητές πέντε παράλληλα επίπεδα μεταγωγής) που χρησιμοποιούνται για την ομοιόμορφη κατανομή της κίνησης των πακέτων. Επίσης μέσω αυτών των επιπέδων πραγματοποιείται η μεταγωγή και δρομολόγηση πακέτων προς τις κάρτες εξόδου (egress). Κάθε επίπεδο μεταγωγής είναι ανεξάρτητο από τα άλλα και δεν απαιτείται κανένας συγχρονισμός μεταξύ τους. Ανάλογα με το αν μία μήτρα μεταγωγής λειτουργεί σε σύστημα μονού πλαισίου (standalone) ή πολλαπλών πλαισίων χρησιμοποιείται και ο αντίστοιχος τύπος μήτρας.

3.7.3 Εσωτερική αρχιτεκτονική της μήτρας μεταγωγής

Ο πιο διαδεδομένος και αποδοτικός τύπος μήτρας μεταγωγής είναι αυτός ο οποίος πραγματοποιεί το λεγόμενο πολυεπίπεδο (multistage) buffering σε μεγάλο αριθμό θυρών (ports). Για μεταγωγείς (switches) με εκατοντάδες έως χιλιάδες πόρτες η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική είναι πέρα για πέρα αναγκαία αφού ο ρυθμός αύξησης του κόστους είναι μικρότερος του τετραγωνικού. Η αρχιτεκτονική Benes αποτελεί σε αυτή την περίπτωση την βέλτιστη οικονομική και τεχνική λύση σε ότι αφορά την λειτουργία της μήτρας μεταγωγής απαλάσσοντάς την από τις τυχαίες “συγκρούσεις” πακέτων. Το βασικό χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής Benes είναι ότι θεωρείται Non-blocking: όταν η σύνδεση μεταξύ δύο σημείων δρομολογείται μέσω ενός συγκεκριμένου δρόμου, για την ίδια σύνδεση μπορεί εναλλακτικά να δρομολογηθεί μέσω κάποιου άλλου δρόμου για την αποφυγή “συγκρούσεων” πακέτων προκαλώντας προβλήματα αποκλεισμού των πακέτων και σωρευτικά μεγάλες καθυστερήσεις. Ωστόσο οι συνδέσεις δύο σημείων μέσω πολλαπλών δρόμων (multipath routing) μπορεί να προκαλέσει άλλου είδους προβλήματα στο δίκτυο τα οποία όμως μπορούν σχετικά εύκολα να περιορισθούν. Η αρχιτεκτονική Benes μπορεί επίσης να απλοποιηθεί σε μία άλλη αρχιτεκτονική που ονομάζεται Αρχιτεκτονική Clos.

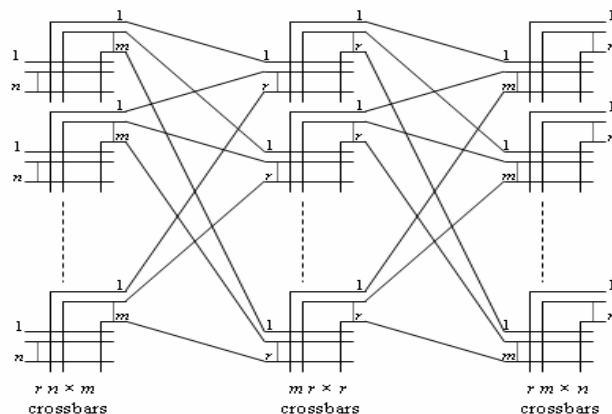
Ένα δίκτυο Clos είναι ένα δίκτυο μεταγωγής πολλαπλών βαθμίδων. Τα δίκτυα Clos απαιτούνται όταν οι φυσικές ανάγκες μεταγωγής κυκλώματος υπερβαίνουν την μέγιστη δυνατή χωρητικότητα του σταυροειδή διακόπτη (crossbar switch). Το βασικό πλεονέκτημα του δικτύου Clos είναι ότι ο αριθμός των διασταυρούμενων σημείων που απαιτούνται (που απαρτίζουν κάθε σταυροειδή διακόπτη) μπορεί να είναι πολύ λιγότερα από ό, τι το σύνολο του συστήματος μεταγωγής εάν αυτό υλοποιείτο με έναν μοναδικό σταυροειδή διακόπτη (crossbar).

Τα δίκτυα Clos διαθέτουν τρεις φυσικές βαθμίδες: τη βαθμίδα εισόδου, την ενδιάμεση βαθμίδα και την βαθμίδα εξόδου. Κάθε βαθμίδα αποτελείται από έναν αριθμό σταυροειδών διακοπών (βλέπε σχήμα 37). Κάθε κλήση εισαγωγής εντός της βαθμίδας εισόδου μπορεί να δρομολογηθεί μέσω οποιουδήποτε από τους διαθέσιμους διακόπτες που βρίσκονται στην ενδιάμεση βαθμίδα και να διασταυρωθεί στον σχετικό διακόπτη της

βαθμίδας εξόδου. Ο διακόπτης μεσαίας βαθμίδας θεωρείται διαθέσιμος όταν οι αντίστοιχες συνδέσεις από την βαθμίδα εισόδου προς την ενδιάμεση βαθμίδα και από την ενδιάμεση βαθμίδα προς την βαθμίδα εξόδου είναι ελεύθερες.

Τα δίκτυα Clos ορίζονται από τρεις ακεραίους αριθμούς n , m , και r των οποίων η σημασία θα περιγραφεί. Κάθε διακόπτης βαθμίδας εισόδου έχει m αριθμό εξόδων, ενώ αντίστοιχα η μεσαία βαθμίδα έχει επίσης m αριθμό εισόδων. Ο αριθμός n αναπαριστά τον αριθμό των πηγών που τροφοδοτούν r διακόπτες βαθμίδας εισόδου. Υπάρχει ακριβώς μία σύνδεση μεταξύ ενός διακόπτη της βαθμίδας εισόδου και ενός διακόπτη της ενδιάμεσης βαθμίδας. Επίσης υπάρχουν r διακόπτες βαθμίδας εξόδου κάθε μία με m και n εισόδους και εξόδους αντίστοιχα. Κάθε διακόπτης μεσαίας βαθμίδας συνδέεται άπαξ με κάθε διακόπτη βαθμίδας εξόδου.

Αν $m \geq n$ το δίκτυο Clos γίνεται non-blocking με δυνατότητα αναδιάταξης, το οποίο σημαίνει ότι όταν ένας διακόπτης βαθμίδας εισόδου δεν χρησιμοποιείται μπορεί να συνδεθεί σε μία αχρησιμοποίητη έξοδο διακόπτη βαθμίδας εξόδου. Στην περίπτωση όμως αυτή οι υπάρχουσες κλήσεις πρέπει να αναδιαταχθούν με βάση έναν νέο διακόπτη της ενδιάμεσης ή κεντρικής βαθμίδας του δικτύου Clos.

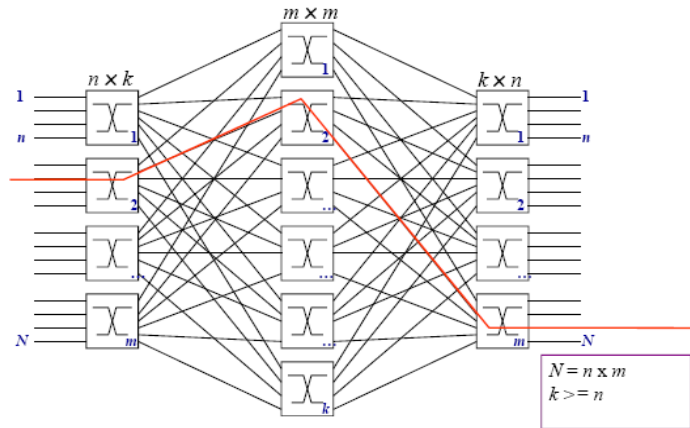


Σχήμα 37: Δομή ενός Δικτύου Clos

Στο Σχήμα 37 απεικονίζεται ένα δίκτυο Clos τριών βαθμίδων. Το πλεονέκτημα ενός δικτύου Clos είναι ότι η σύνδεση μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού θυρών εισόδου και εξόδου μπορεί να γίνει με τη χρησιμοποίηση ενός μικρού αριθμού διακοπών. Στο Σχήμα 37, αναπαριστάται ο αριθμός των πηγών που τροφοδοτούν κάθε έναν από τους m διακόπτες της βαθμίδας εισαγωγής. Έτσι λοιπόν, υπάρχει ακριβώς μία σύνδεση μεταξύ κάθε διακόπτη βαθμίδας εισόδου και κάθε διακόπτη ενδιάμεσης βαθμίδας και κάθε διακόπτης ενδιάμεσης βαθμίδας συνδέεται ακριβώς μία φορά με κάθε διακόπτη βαθμίδας εξόδου.

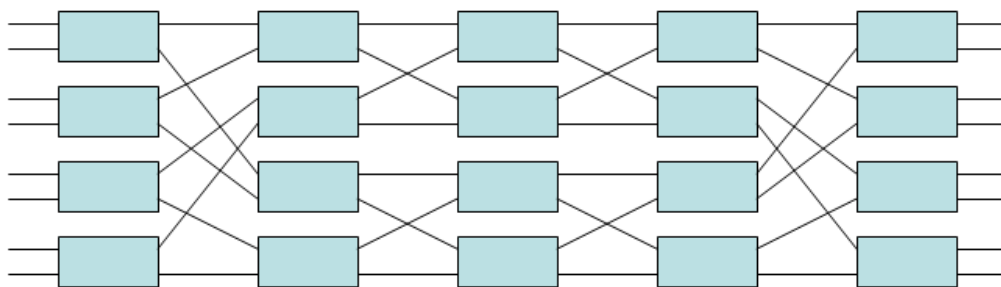
Μπορεί να αποδειχθεί ότι με $k \geq n$, το δίκτυο Clos μπορεί να είναι non-blocking όπως ένας σταυροειδής διακόπτης. Έτσι για κάθε σύνδεση δύο σημείων εισόδου-εξόδου υπάρχει ένας και μόνον δρόμος διαμέσου της ενδιάμεσης βαθμίδας.

Αν $k \geq 2n-1$, μια νέα σύνδεση μπορεί πάντα να προστεθεί χωρίς εκ νέου ρύθμιση. Για την προσθήκη μιας νέας σύνδεσης, δεν θα υπάρχει καμία ανάγκη για αναδιάταξη των υφιστάμενων συνδέσεων εφ'όσον ο αριθμός των διακοπών ενδιάμεσης βαθμίδας είναι αρκετά μεγάλος.



Σχήμα 38: Δομή ενός non blocking δικτύου Clos.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τα δίκτυα Clos μπορούν επίσης να γενικευθούν σε κάθε περίπτωση που χρησιμοποιείται μονός αριθμός βαθμίδων. Με την αντικατάσταση της ενδιάμεσης βαθμίδας με ένα επιπλέον δίκτυο Clos 3 βαθμίδων, προκύπτει ουσιαστικά ένα νέο δίκτυο Clos 5 βαθμίδων. Επαναλαμβάνοντας τα ανωτέρω μπορούμε να έχουμε αντίστοιχα δίκτυα Clos 7,9,11 κλπ.. βαθμίδων.

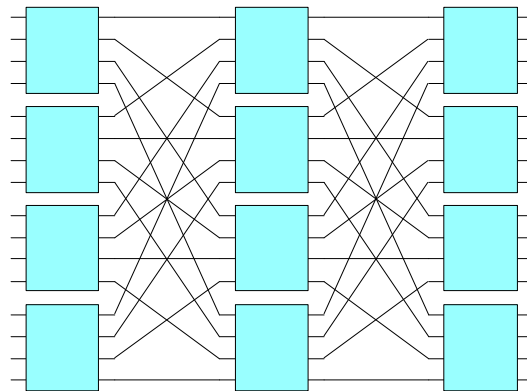


Σχήμα 39: Δίκτυα Clos με περισσότερες από 3 βαθμίδες.

Μια εκ νέου αναδιάταξη ενός non-blocking δικτύου Clos με $m = n = 2$ γενικά ονομάζεται δίκτυο Beneš. Ο αριθμός των εισόδων και εξόδων είναι $N = r \times n = 2r$. Τα δίκτυα αυτά έχουν $2\log_2 N - 1$ βαθμίδες, η κάθε μία περιέχει $N / 2, 2 \times 2$ διασταυρούμενους διακόπτες και χρησιμοποιούνται συνολικά $N\log_2 N - N / 2, 2 \times 2$ διακόπτες. Οι τρεις κεντρικές

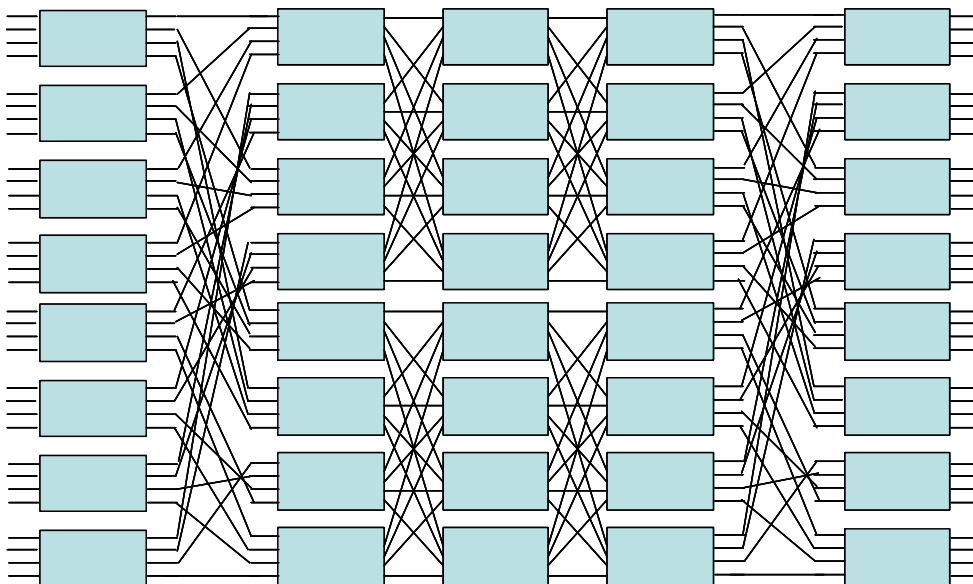
βαθμίδες αποτελούνται από δύο μικρότερες δηλαδή 4×4 δίκτυα Benes, ενώ στην κεντρική βαθμίδα, κάθε 2×2 διακόπτης μπορεί να θεωρηθεί ως ένα 2×2 δίκτυο Benes. Αυτό το παράδειγμα τονίζει επομένως την επαναληπτική κατασκευή αυτού του τύπου δικτύου.

Εάν χρησιμοποιούνται διακόπτες 4×4 , ένα δίκτυο Clos 3 βαθμίδων μπορεί να πραγματοποιηθεί όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 40.



Σχήμα 40: Δίκτυα Clos networks με 4×4 διακόπτες.

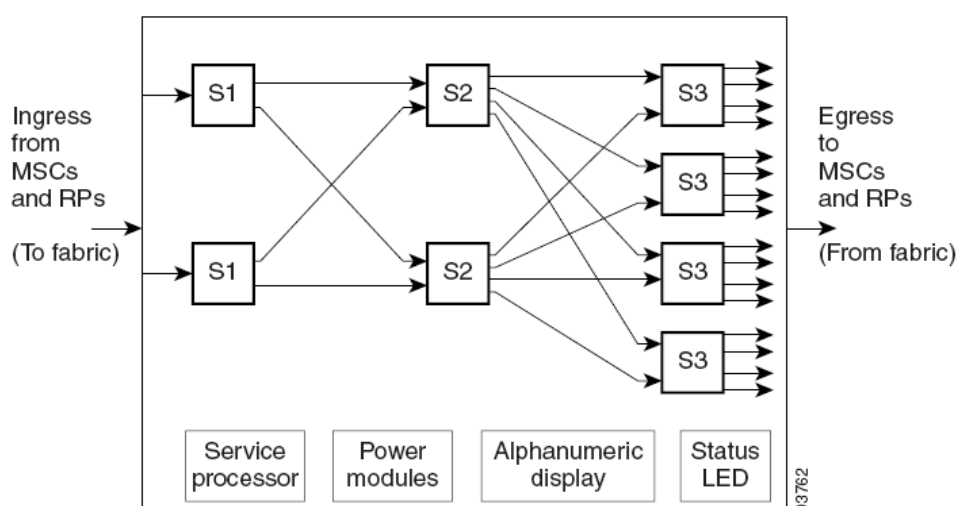
Ένα non-blocking δίκτυο Clos με αναδιάταξη με $m = n = 4$ και $r = 8$, αφού $N = r \times n = 32$ εισόδους και εξόδους, γίνεται από $2\log_2 8 - 1$ βαθμίδες (5 βαθμίδες).



Σχήμα 41: Δίκτυα Clos με 32 θύρες εισόδου, διάταξη 5 βαθμίδων 4×4 διακοπών,

Για δρομολογητές CISCO και JUNIPER η μήτρα μεταγωγής είναι σχεδιασμένη βάσει της Αρχιτεκτονικής Benes και διατίθεται σε πολλούς τύπους καρτών.

Ανάλογα με το αν έχουμε σύστημα ενός πλαισίου ή πολλαπλών, προσαρμόζονται και οι ανάλογες κάρτες μεταγωγής. Στην περίπτωση του συστήματος ενός πλαισίου (standalone) ο μεταγωγέας πραγματοποιεί τις λειτουργίες και των τριών βαθμίδων ενώ στο σύστημα πολλαπλών πλαισίων η κεντρική κάρτα μεταγωγής είναι αυτή που τις πραγματοποιεί έναντι όλων των υπολοίπων που είναι εγκατεστημένοι στον κόμβο.



Σχήμα 42: Εσωτερική αρχιτεκτονική της κάρτας μεταγωγής.

Αρκετά δομικά στοιχεία της κάρτας μεταγωγής συμμετέχουν στην περάτωση των λειτουργιών των τριών βαθμίδων (S1,S2 & S3). Κάθε βαθμίδα εκτελεί διαφορετικές λειτουργίες – η κατανομή τους πραγματοποιείται από τις βαθμίδες S1 & S2 ενώ η δρομολόγηση από τις S2 & S3.

Ειδικότερα:

- Βαθμίδα 1 (S1)-Κατανέμει την κίνηση στην βαθμίδα 2 του επιπέδου μεταγωγής. Τα στοιχεία της βαθμίδας 1 λαμβάνουν τα κελιά (cells) από τις θύρες και τα κατανέμουν στην βαθμίδα 2. Η κατανομή αυτή γίνεται με τον κλασικό αλγόριθμο Round-Robin.
- Βαθμίδα 2 (S2)-Πραγματοποιεί την μεταγωγή αυτή καθ' αυτή με διπλασιασμό ταχύτητας (2X), καθώς και το πρώτο στάδιο του multicasting. Τα στοιχεία της βαθμίδας 2 λαμβάνουν τα κελιά από την βαθμίδα 1 και τα δρομολογούν κατά περίπτωση:
 - Κάρτα εξόδου σε περίπτωση συστήματος ενός πλαισίου
 - Κάρτα διεπαφής εξόδου σε περίπτωση συστήματος πολλαπλών πλαισίων
- Βαθμίδα 3 (S3)- Πραγματοποιεί την μεταγωγή αυτή καθ' αυτή με διπλασιασμό ταχύτητας (2X), και εκτελεί ένα δεύτερο επίπεδο multicasting. Τα στοιχεία της βαθμίδας 3

λαμβάνουν τα επιμέρους κελιά από την Βαθμίδα 2 και τα δρομολογούν προς την κατάλληλη κάρτα εξόδου.

Παρέχει την απαιτούμενη χωρητικότητα μεταγωγής για κάθε κάρτα διεπαφής , ενώ η μήτρα μεταγωγής είναι απαραίτητο να διαθέσει επιπλέον εύρος ζώνης λόγω της πλεονάζουσας πληροφορίας (cell overhead) καθώς επίσης και μηχανισμούς buffering & αποφυγής υπερφόρτωσης των γραμμών (congestion avoidance). Το τελευταίο μπορεί να συμβεί όταν πολλά δεδομένα εισέρχονται στην μήτρα μεταγωγής και ταυτόχρονα χρειάζεται να δρομολογηθούν στην ίδια κάρτα εξόδου. Τυπικά, μικρή υπερφόρτωση πάντα υφίσταται στις βαθμίδες S1 & S2 λόγω του περιορισμένου ή ανύπαρκτου Contention Rate για μεμονωμένες συνδέσεις, ωστόσο λόγω του multicasting (από την βαθμίδα 2 στην 3) τα κελιά μπορούν να υποστηριχθούν από την ίδια διαδρομή προς την έξοδο.

Για να μειωθεί η πιθανότητα καθυστέρησης των πακέτων δεδομένων από την βαθμίδα S2 προς τη βαθμίδα S3 σε χρονικές περιόδους συμφόρησης, η μήτρα μεταγωγής τα επεξεργάζεται με διπλάσια ταχύτητα.

Ο μηχανισμός Buffering χρησιμοποιείται και αυτός στις βαθμίδες S2 και S3 ούτως ώστε να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα στην περίπτωση που ο διπλασιασμός της ταχύτητας επεξεργασίας δεν είναι αρκετός. Προκειμένου τα κελιά να μην αφιχθούν με άτακτο τρόπο πραγματοποιείται μία αναδιάταξη τους πριν αυτά επανενωθούν και σχηματίσουν τα λεγόμενα πακέτα δεδομένων. Επίσης για να περιορισθεί ο βαθμός Buffering ένας μηχανισμός ρύθμισης της κίνησης δεδομένων χρησιμοποιείται προκειμένου να επιβραδύνει το ρυθμό μετάδοσης πακέτων προς τον εκάστοτε προορισμό. Τα αντίστοιχα μηνύματα μεταφέρονται στην επικεφαλίδα του κελιού.

Για δρομολογητές Cisco CRS πολλαπλών πλαισίων , οι εσωτερικές συνδέσεις της μήτρας μεταγωγής πραγματοποιούνται μεταξύ διασυνδέσεων των καρτών τύπου S13 & S2 που αποτελούνται από 72 πολύ-ρυθμικές οπτικές ίνες των 2.5 Gbit/s (Σχήμα 43). Κάθε οπτική μονάδα διασύνδεσης μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 9 διατάξεις οπτικών καλωδίων ανά πλαίσιο επιτρέποντας την επιμέρους σύνδεση τριών πλαισίων.



Σχήμα 43: Οπτική διάταξη.

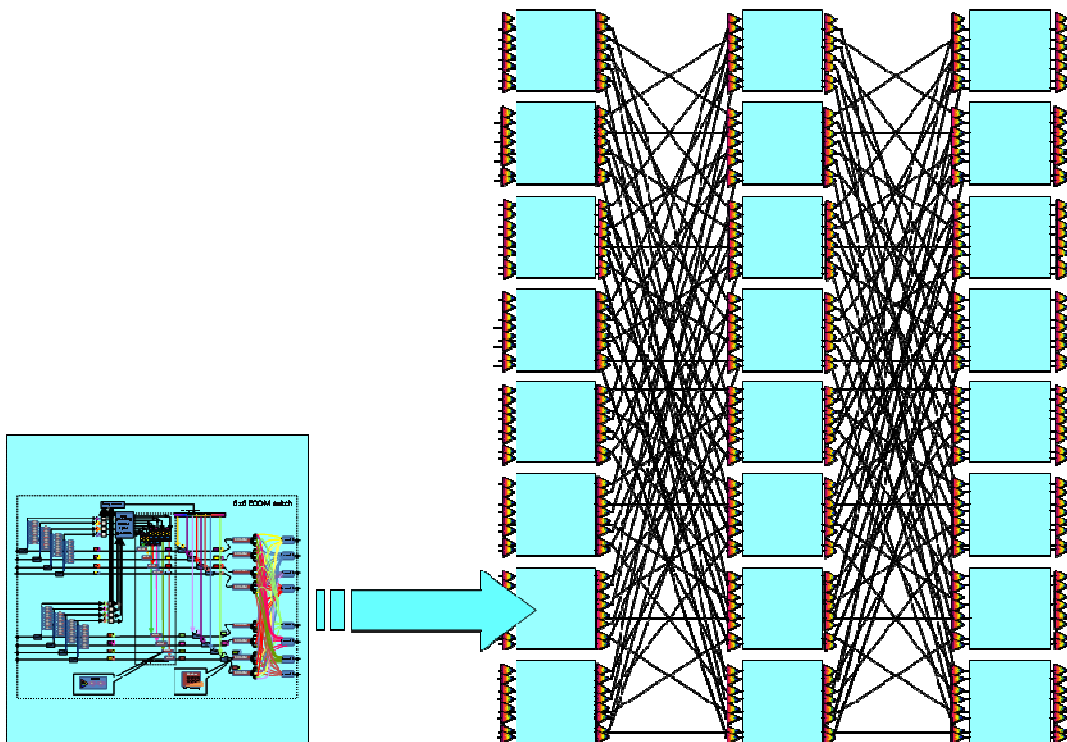
3.7.4 Μελλοντικές Προοπτικές για την πλατφόρμα BOOM

Η αρχιτεκτονική της μήτρας μεταγωγής του δρομολογητή που απεικονίζεται στην προηγούμενη παράγραφο είναι το μοντέλο αναφοράς για την περιγραφή της μήτρας μεταγωγής BOOM.

Θα επικεντρωθούμε τώρα στην αρχιτεκτονική μεταγωγής BOOM ενώ όλες οι άλλες λειτουργίες δρομολογητή θα πρέπει να θεωρούνται οι ίδιες με ένα συμβατικό ο οποίος ακολουθεί τις συνήθεις τεχνικές επεξεργασίας και μεθόδους.

Η βασική μονάδα που περιγράφεται στην παράγραφο 2.1.1 είναι μία μονάδα διακόπτη 8x8, που απεικονίζεται με τη σειρά της στο Σχήμα 3. Συνδυάζοντας μία μονάδα μεταγωγής 8x8 σε μια αρχιτεκτονική δικτύου Clos και έναν οπτικό μεταγωγέα 64x64 μπορεί να επιτευχθεί εκ νέου μία non-blocking διάταξη με τρεις βαθμίδες.

Μία δομή τριών βαθμίδων είναι συμβατή με τις προδιαγραφές μίας μονάδας 8x8 συστήματος όσον αφορά την δυνατότητα σειριακής διασύνδεσης των AOWC. Εξ αιτίας των υψηλών απωλειών των παθητικών στοιχείων τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο της μονάδας, η οπτική ενίσχυση με EDFA είναι απαραίτητη πριν και μετά την διαδικασία μεταγωγής. Οι EDFA δεν είναι ενσωματωμένοι στην πλατφόρμα SOI, συνδέονται όμως κλιμακωτά στις εισόδους και εξόδους των οπτικών συνδέσεων. Η χαμηλή κατανάλωση ισχύος αλλά και το περιορισμένο μέγεθος αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες για την κατάλληλη επιλογή του καλύτερου EDFA που θα χρησιμοποιηθεί στην μονάδα μεταγωγής.



Σχήμα 44: Εσωτερική αρχιτεκτονική μήτρας μεταγωγής 64x64.

Η αρχιτεκτονική της μήτρας μεταγωγής 64x64 απεικονίζεται στο Σχήμα 44. Θεωρώντας ότι κάθε είσοδος είναι ένα ανεξάρτητο μήκος κύματος με ωφέλιμο φορτίο σε 160 Gbit / s, η απόδοση είναι 10,24 Terabit / s. Η μήτρα μεταγωγής λειτουργεί προς μία κατεύθυνση, έτσι ώστε μία άλλη διαστάσεων 64x64 να λειτουργεί προς την αντίθετη κατεύθυνση με συνολική απόδοση 20,5 Terabit / s. Η μήτρα μεταγωγής BOOM έχει απόδοση συγκρίσιμη με την μήτρα μεταγωγής JUNIPER. Μία ανάλογη σύγκριση με τη μήτρα μεταγωγής CISCO παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

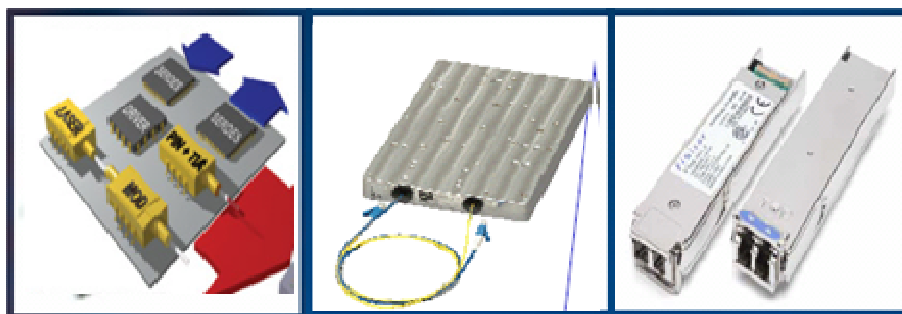
	CISCO	JUNIPER	BOOM_φάση 1	BOOM_φάση 2
Συνολική ρυθμαπόδοση (Tbit/s)	92	25	20.5	20.5
Ρυθμαπόδοση/πλαίσιο (Gbit/s)	640	800	640	1280
Ταχύτητα μεταγωγής μητρικής full duplex (Gbit/s)	80	100	NA	NA
OC768 κάρτες/πλαίσιο	16	16	16	32
100GbE κάρτες/πλαίσιο	---	8	8	12
Πολλαπλών πλαισίων: Κάρτες διεπαφής/ πλαίσιο	72	16	16	8
Πολλαπλών πλαισίων: Κάρτα διεπαφής/πλαίσιο επέκτασης	16	16	16	32

Πίνακας 2. Σύγκριση μεταξύ δρομολογητών CISCO, JUNIPER & BOOM

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται δύο διαφορετικές επιλογές (που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικά χρονικά πλαίσια σε ότι αφορά την ανάπτυξη του προϊόντος) για την αρχιτεκτονική δρομολογητή BOOM. Στην 1^η επιλογή, που ονομάζεται Φάση 1, η απόδοση της γραμμής του δρομολογητή BOOM θεωρήθηκε να είναι η ίδια με την απόδοση της γραμμής του δρομολογητή CISCO. Βάσει αυτής της υπόθεσης, δεκαέξι υποδοχές για κάρτες των 40G είναι διαθέσιμες για κάθε κάρτα διεπαφής του πλαισίου και συνολικά δεκαέξι κάρτες διεπαφής ανά πλαίσιο κατ' ανώτατο όριο επιτρέπονται για την διαμόρφωση ενός συστήματος πολλαπλών πλαισίων.

Η δεύτερη επιλογή εξετάζει το βασικό πλεονέκτημα της μείωσης των διαστάσεων των καρτών 40G και την εισαγωγή 100 καρτών. Αυτό θα οδηγήσει σε ένα μεγαλύτερο αριθμό καρτών ανά πλαίσιο (δηλ. 32 κάρτες / πλαίσιο στα 40 G, 12 στους 100 G) και ένα πολύ μικρό αριθμό καρτών διεπαφής πλαισίου στη διαμόρφωση συστήματος πολλαπλών πλαισίων.

Είναι σημαντικό να ληφθεί υπ' όψιν ότι μία σημαντική μείωση του συντελεστή κλίμακας είναι επιτεύξιμη στις κάρτες διεπαφής, θεωρώντας ότι η εξέλιξη της τεχνολογίας οδηγεί πάντα προς διεπαφές με μειωμένο μέγεθος και κατανάλωση ενέργειας. Ιστορικά αυτή η διαδικασία ήταν επιτυχής από την εποχή των πομποδεκτών 10G, των οποίων οι αρχικές διαστάσεις είχαν μειωθεί στο 2% του αρχικού μεγέθους, όταν ο πομποδέκτης MSA 300 PIN είχε ήδη τυποποιηθεί, ενώ αργότερα, επιτεύχθηκε ένας παράγοντας μείωσης της τάξεως του 10 με την εισαγωγή του στοιχείου XFP pluggable, οδηγώντας σε ένα μέγεθος που τώρα είναι 0,2% του αρχικού αναμεταδότη (Εικόνα 45). Η ίδια διαδικασία ακολουθείται στους αναμεταδότες 40G.



Εικόνα 45: Εξέλιξη του πομποδέκτη 10G από MSA 300 PIN σε XFP.

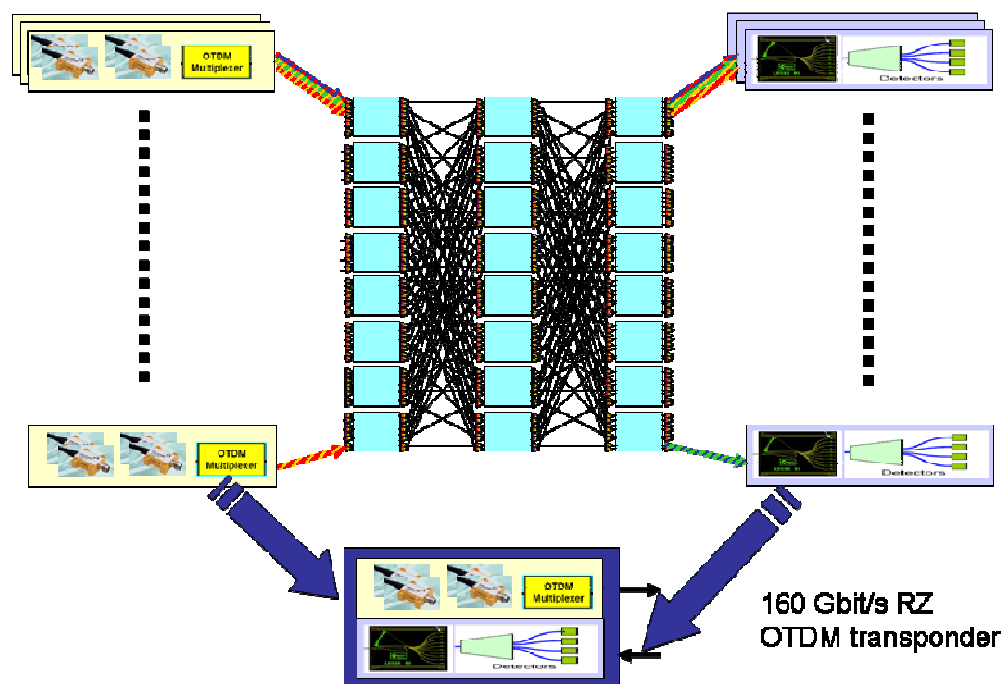
Μια ενδεχόμενη μείωση των διαστάσεων των καρτών διεπαφής θα οδηγήσει αλυσιδωτά σε βελτιωμένη απόδοση του ίδιου του πλαισίου στο οποίο βρίσκεται εγκατεστημένη. Ένα throughput της τάξεως των 1,28 Tb/s είναι σκόπιμο λαμβάνοντας υπ' όψιν τον χρόνο που απαιτείται για την εμπορική ανάπτυξη ενός δρομολογητή με ενσωματωμένες φωτονικές λειτουργίες, όπως προτείνεται για τον δρομολογητή BOOM.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 44 η non-blocking μήτρα μεταγωγής 64x64, που λειτουργεί με ωφέλιμο φορτίο 160 Gbit/s, μπορεί να επιτευχθεί με 48 στοιχειώδεις υπόμονάδες που

αποτελούνται από τις μονάδες της μήτρας μεταγωγής διαστάσεων 8x8 που περιγράφεται στην παράγραφο 2.1.1.

Προκειμένου να δημιουργηθούν 160 Gbit /s οπτικά πακέτα και να δρομολογηθούν σε μία μήτρα μεταγωγής 64x64, απαιτείται ο σχεδιασμός κάρτας αναμεταδότη OTDM, καθώς και η προσαρμογή του στην μήτρα μεταγωγής. Ο ρόλος του αναμεταδότη OTDM είναι να δημιουργήσει οπτικά πακέτα κατάλληλης μορφής ώστε να είναι εφικτή η μεταγωγή τους από τη μονάδα 64x64 αλλά και δυνατός ο έλεγχός τους όταν δρομολογούνται σε όλη την μήτρα μεταγωγής.

Λογικά, μία κάρτα OTDM έχει τον ίδιο στόχο με τις S13 κάρτες σε αρχιτεκτονική CISCO, δηλαδή, η λήψη πακέτων από την μεσαία βαθμίδα που συνδέεται με τις κάρτες διεπαφής και διασύνδεσης με τη μήτρα μεταγωγής. Στην έξοδο της μήτρας μεταγωγής, συλλέγονται τα οπτικά πακέτα, και εν συνεχεία μετατρέπονται σε ηλεκτρική μορφή, και διαβιβάζονται στο backplane μέχρι την έξοδό τους από την κατάλληλη κάρτα διεπαφής.

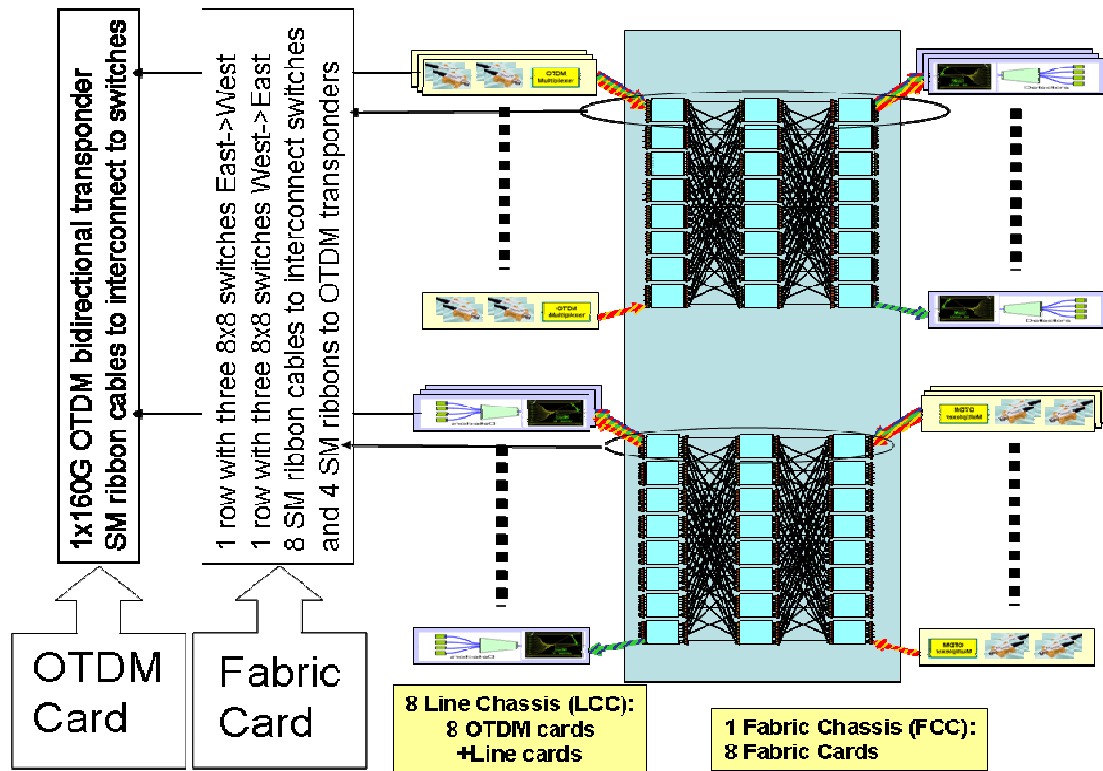


Σχήμα 46: Αρχιτεκτονική μήτρας μεταγωγής, που περιλαμβάνει πομποδέκτες τύπου 64 OTDM RZ των 160 Gbit/s για δημιουργία και έλεγχο οπτικών πακέτων.

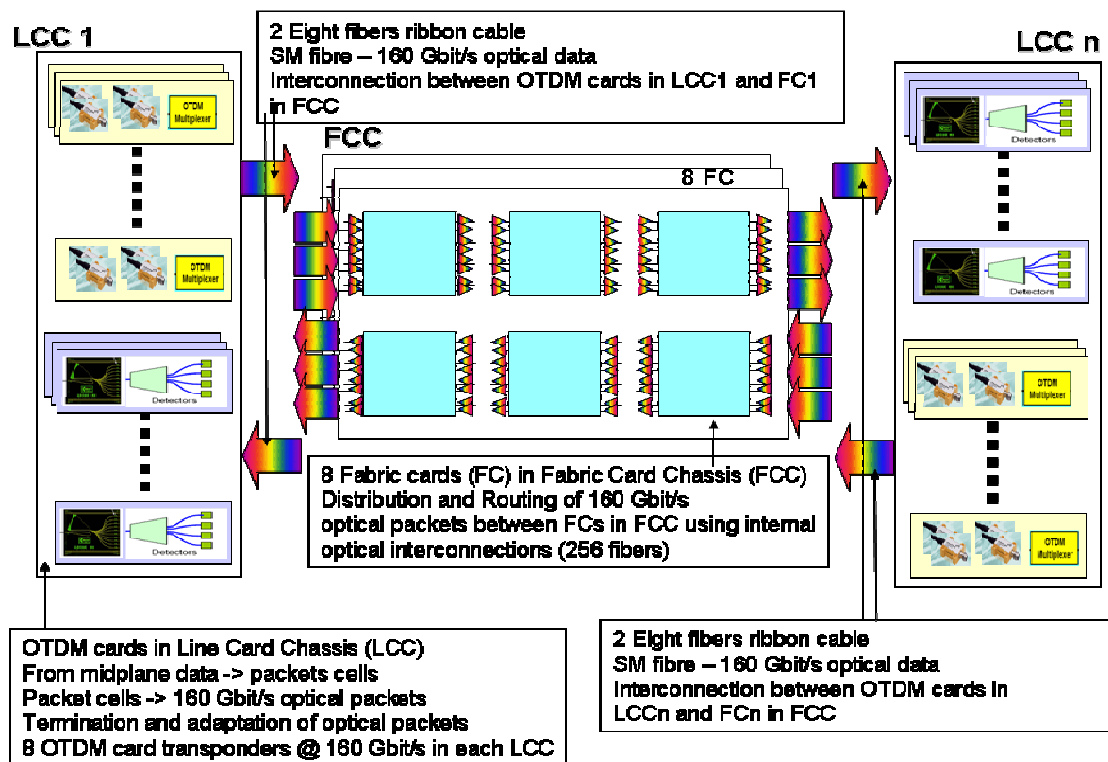
Ο σχεδιασμός των καρτών OTDM είναι έξω από το αντικείμενο της παρούσας μελέτης και στο παρόν δεν θα θιγεί περαιτέρω. Παρ 'όλα αυτά, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι κάρτες OTDM και η μήτρα μεταγωγής έχουν οπτικές διασυνδέσεις με χρήση μονορυθμικής οπτικής ίνας (single-mode). Η λύση αυτή είναι παρόμοια με αυτές που έχουν υιοθετηθεί από την CISCO και την JUNIPER προκειμένου να διασυνδεθούν τα

πλαίσια, οι μήτρες μεταγωγής και οι κάρτες διεπαφών. Η μεγάλη σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων είναι ότι οι συμβατικοί δρομολογητές χρησιμοποιούν πολυρυθμικές οπτικές ίνες (multi-mode), επειδή οι κάρτες αναμετάδοσης (δηλαδή S1 και S3 κάρτες) έχουν συστοιχίες με χαμηλό ρυθμό bit (multi-mode) ως πομποί και ως δέκτες. Ωστόσο η επιλογή χρήσης υψηλού ρυθμού bit για προώθηση πακέτων από και προς την μήτρα μεταγωγής θεωρείται αρκετά δαπανηρή λύση. Το θέμα είναι αρκετά πολύπλοκο, επειδή ένας υψηλός ρυθμός bit επιτρέπει μικρότερο αριθμό PIC δεδομένων των συστοιχιών πολύρυθμικών οπτικών ινών. Επιπλέον, οι μονορυθμικές οπτικές ίνες μπορούν να εγγηθούν την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε αποστάσεις 1 χιλιομέτρου περίπου μεταξύ της κάρτας διεπαφής και της μήτρας μεταγωγής ενώ στην περίπτωση των πολυρυθμικών περιοριζόμαστε περί τα 100 μέτρα. Συνοψίζοντας θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι μονορυθμικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει μεγάλη γεωγραφική διασπορά παρά μόνο σε πολύ μικρή ακτίνα ώστε ο δρομολογητής και τα επί μέρους δικτυακά στοιχεία να μπορούν να ανταποκριθούν στις εκάστοτε ανάγκες και απαιτήσεις.

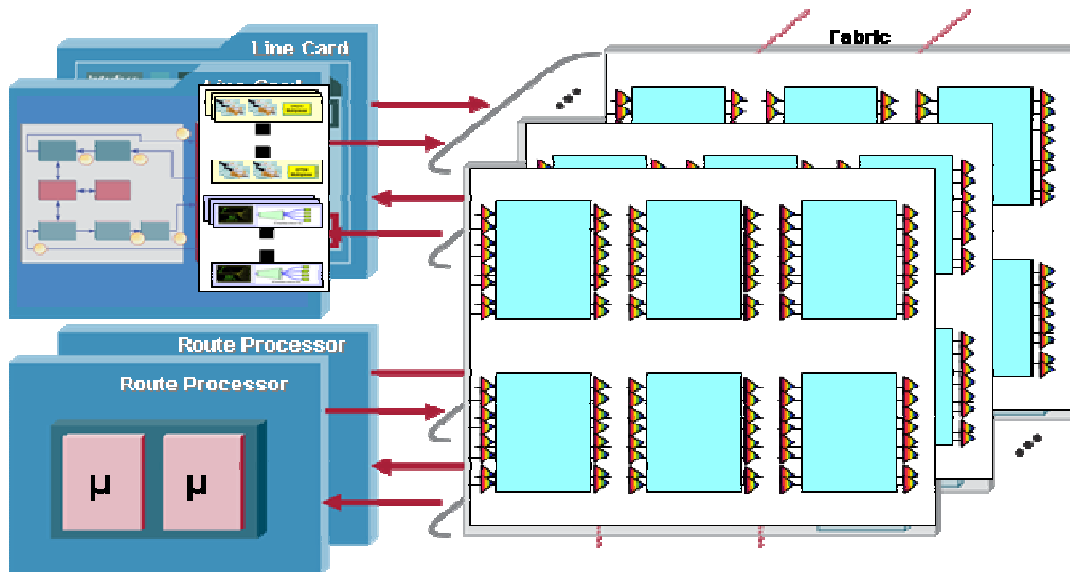
Λόγω του μεγέθους της και της κατανάλωσης ενέργειας, η μήτρα μεταγωγής διαστάσεων 64x64 δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μία ενιαία κάρτα δρομολόγησης. Η κατάλληλη αρχιτεκτονική είναι η συνάθροιση σε μια μόνο κάρτα μεταγωγής έξι μπλοκ 8x8, ομαδοποιώντας τρεις στοιχειώδεις μονάδες για κατεύθυνση (Σχήμα 47). Με αυτή τη διαμόρφωση, κάθε μήτρα μεταγωγής θα χρησιμοποιεί το 1/8 της συνολικής αμφίδρομης κατεύθυνσης της μήτρας 64x64. Κάθε μήτρα μεταγωγής θα πρέπει να συνδέεται με τις κάρτες αναμετάδοσης OTDM με 4 μονορυθμικά οπτικά καλώδια (το καθένα αποτελείται από οκτώ ίνες). Εντός κάθε μήτρας μεταγωγής, (για κάθε κατεύθυνση), οι διασυνδέσεις μεταξύ των τριών 8x8 μεταγωγέων και των EDFAs που τοποθετούνται μεταξύ τους, υλοποιούνται επίσης με SM καλώδια (Σχήμα 48).



Σχήμα 47: Τεχνικές λεπτομέρειες από την συνολική αρχιτεκτονική της μήτρας μεταγωγής.

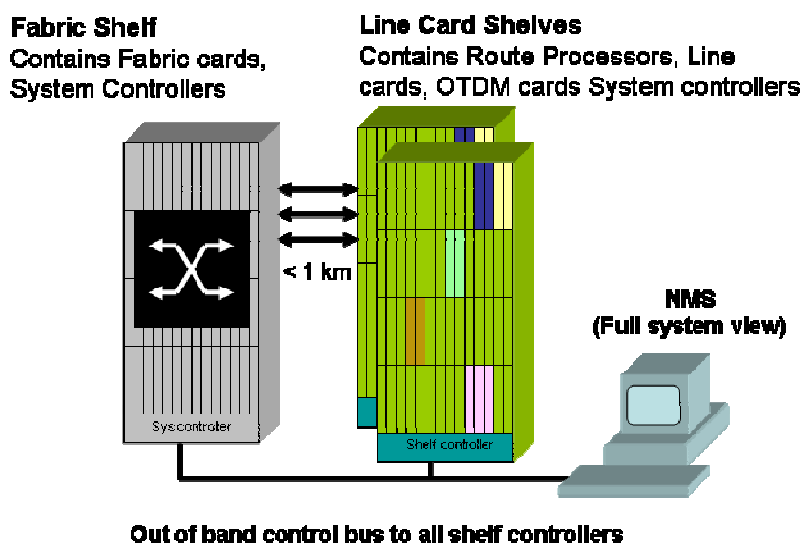


Σχήμα 48: Γενική αρχιτεκτονική της μήτρας μεταγωγής BOOM.



Σχήμα 49: Αρχιτεκτονική δρομολόγησης δεδομένων δια μέσω των καρτών διεπαφής, επεξεργαστή δρομολόγησης και μήτρας μεταγωγής.

Οι 8 κάρτες μεταγωγής της μήτρας είναι εγκατεστημένες σε ένα ενιαίο πλαίσιο το οποίο αποτελεί το πλαίσιο που είναι αποκλειστικά υπεύθυνο για την διαδικασία μεταγωγής. Οι 8 κάρτες OTDM κατά πάσα πιθανότητα θα είναι εγκατεστημένες στο πλαίσιο διεπαφών ανάλογα με τις διαστάσεις των καρτών διεπαφών ενώ κάθε πλαίσιο διεπαφών θα πρέπει να υποστηρίζει από 4 έως 8 OTDM κάρτες σε ένα ενιαίο πλαίσιο. Αν πρόκειται για 4 OTDM κάρτες στο πλαίσιο διεπαφών, η αρχιτεκτονική του δρομολογητή θα περιλαμβάνει ένα πλαίσιο μεταγωγής και δύο πλαίσια διεπαφών (Σχήμα 50). Αν εγκατασταθούν 8 κάρτες σε ένα ενιαίο πλαίσιο διεπαφών, η αρχιτεκτονική του δρομολογητή θα περιλαμβάνει ένα πλαίσιο μεταγωγής και ένα πλαίσιο γραμμών διεπαφής.



Σχήμα 50: Αποψη δρομολογητή BOOM

Για να συνοψίσουμε, με την εισαγωγή του οπτικού μεταγωγέα 8x8 και της μήτρας μεταγωγής οπτικών πακέτων 64x64, προκύπτει μια τεράστια μείωση του αριθμού ικριωμάτων σε σύγκριση με τις λύσεις που προσφέρουν οι δύο πρωτοπόροι της αγοράς δρομολογητών, CISCO και JUNIPER.

	CISCO	JUNIPER	BOOM_ phase_1	BOOM_ phase_2
Συνολική ρυθμαπόδοση (Tbit/s)	92	25	20.5	20.5
Ρυθμαπόδοση/πλαίσιο (Gbit/s)	640	800	640	1280
OC768 κάρτες/πλαίσιο	16	16	16	32
100GbE κάρτες/πλαίσιο	---	8	8	12
Πολλάπλών πλαισίων: κάρτες διεπαφής/πλαίσιο	72	16	16	8
Πολλαπλών πλαισίων: κάρτες διεπαφής/πλαίσιο επέκτασης	16	16	16	32
Πολλαπλών πλαισίων: κάρτες μεταγωγής/πλαίσιο επέκτασης	8	16	4	8
Πολλαπλών πλαισίων: κάρτες μεταγωγής/πλαίσιο	8	3	1	1
Πολλαπλών πλαισίων: κάρτες μεταγωγής/πλαίσιο	24	5	8	8

Πίνακας 3. Σύγκριση δρομολογητών μεταξύ CISCO, JUNIPER και BOOM

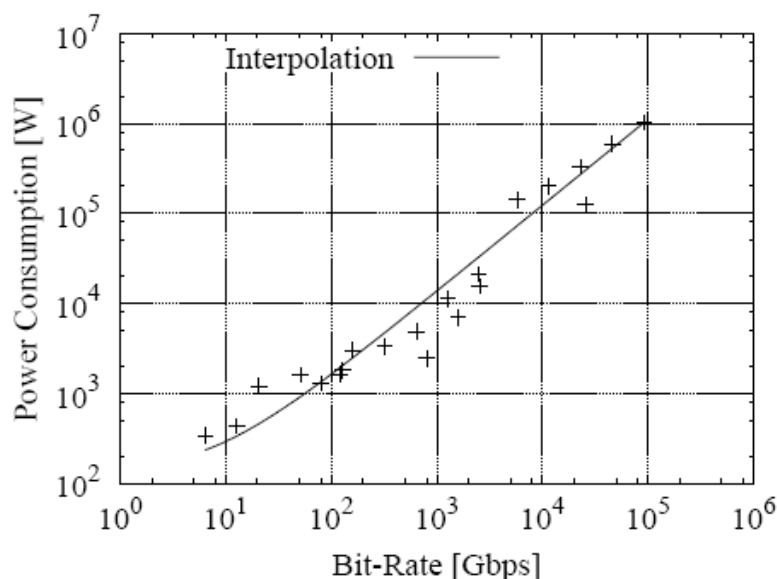
4 ΑΠΟΨΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Το μοντέλο που προτείνεται για τον δρομολογητή BOOM αποτελεί τη βάση την βάση κάποιων απόψεων σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας και ισχύος.

4.1 Γενικές επισημάνσεις

Η κατανάλωση ρεύματος έχει πρόσφατα αναδειχθεί ως ένα σημαντικό πρόβλημα που οφείλεται στην αύξηση του κόστους της ενέργειας λόγω των σχετικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Σύμφωνα με διάφορες εκτιμήσεις, οι εφαρμογές στις Τεχνολογίες Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών (Information & Communication Technology) ευθύνονται για ένα ποσοστό από 2% έως 10% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, και εκπομπών αερίων ενώ αναμένεται να διπλασιαστούν μέχρι το 2020, φθάνοντας τους 1,43 Gt CO₂ παγκοσμίως ^[45].

Η κατανάλωση ισχύος των ηλεκτρονικών συσκευών αυξάνεται πάρα πολύ γρήγορα με την αντίστοιχη αύξηση της διακινούμενης πληροφορίας στα δίκτυα επικοινωνιών και υπολογιστών.



Σχήμα 51: Κατανάλωση ισχύος συναρτήσει της χωρητικότητας των δρομολογητών ^[45]

Παραθέτουμε ένα παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 51 με την ισχύ που απαιτείται από διαφορετικές κατηγορίες δρομολογητών ως συνάρτηση της συνολικής χωρητικότητας μεταγωγής. Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα, είναι ότι η κατανάλωση ενέργειας είναι σχεδόν γραμμική με την απόδοση δρομολογητών υψηλών προδιαγραφών που καταναλώνουν σήμερα περισσότερο από 10 KW ισχύος κατά μέσο όρο.

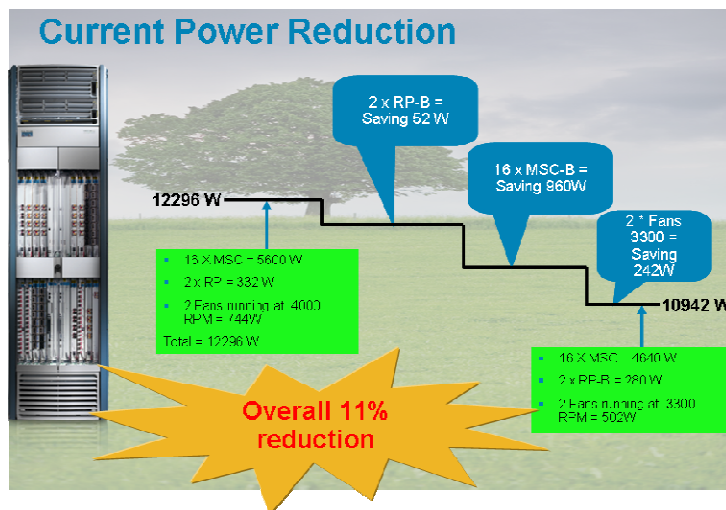
Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ότι οι φορείς παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών είναι πλέον υπεύθυνοι για το 37% των παγκόσμιων εκπομπών που προέρχονται από ICT, ενώ τα κέντρα δεδομένων και τα τερματικά των χρηστών για το υπόλοιπο ποσοστό. Στην Ιταλία, για παράδειγμα, η Telecom Italia είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος καταναλωτής ηλεκτρικής ενέργειας μετά τον Οργανισμό Σιδηροδρόμων. Λαμβάνοντας υπ'όψιν ένα τυπικό πάροχο υπηρεσιών Internet (ISP), η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου κορμού και μόνο είναι πάνω από 12 GWh σε ένα χρόνο. Σε αυτό το πλαίσιο, παρέχοντας 100 Mb/s (ή παραπάνω), η πρόσβαση για κάθε πολίτη καθίσταται μάλλον αδύνατη λόγω της έλλειψης πόρων για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στην παραγωγή όσο και στη διανομή.

Ωστόσο εναλλακτικές λύσεις προκειμένου να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας απαντώνται στα οπτικά δίκτυα. Σε μία προσέγγιση επιπέδου δικτύου (network level), μπορεί να επιτευχθεί υψηλή ενεργειακή απόδοση με τον σχεδιασμό μίας νέας αρχιτεκτονικής αλλά και μηχανισμών σε ότι αφορά τη συντήρηση και τη λειτουργία του. Δύο είναι οι δυνατές επιλογές: σταδιακή απενεργοποίηση παλαιών τεχνολογιών και δρομολόγηση των δεδομένων σε ένα ελάχιστο υποσύνολο συστημάτων που μπορούν να διαχειρισθούν την κίνηση με την βέλτιστη χρήση δικτυακών πόρων στο επιθυμητό επίπεδο ποιότητας.

Από λειτουργικής απόψεως, νέα προϊόντα θα μπορούσαν να προσφέρουν πολύ σημαντικές λύσεις σε ότι αφορά τον συνολικό καλυπτόμενο όγκο, την ενέργεια, και τις απαιτήσεις ψύξεως ενός POP (Point Of Presence) στα πλαίσια δικτύου νέας γενεάς.

4.1.1 Κατανάλωση ισχύος σε δρομολογητές

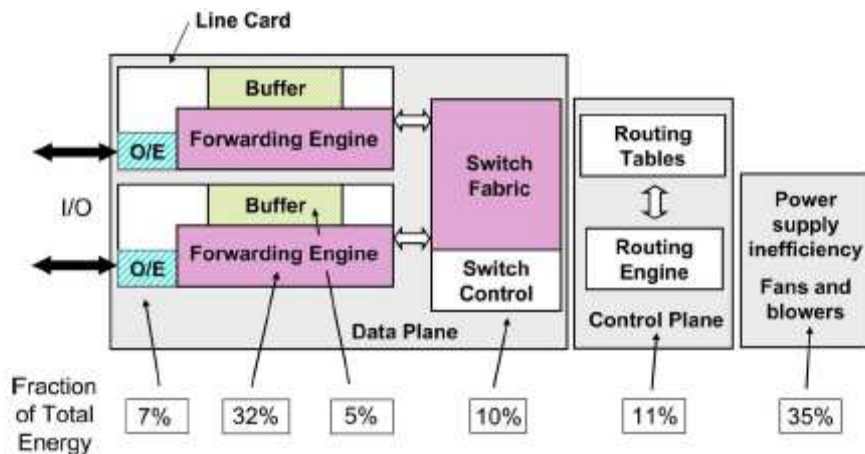
Η ενεργειακή απόδοση των δρομολογητών δικτύου κορμού έχει βελτιωθεί με την πάροδο των τελευταίων ετών, και προβλέπεται ότι η απόδοσή τους θα συνεχίσει να βελτιώνεται στο μέλλον με ταχείς ρυθμούς (Σχήμα 52).



Σχήμα 52: Μέση σταθμική μείωση κατανάλωσης ισχύος σε δρομολογητή CISCO με χρήση νέων καρτών διεπαφής (MSC), επεξεργαστή (RPs) και ανεμιστήρες.

Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι οι high-end δρομολογητές σήμερα, της τάξεως του 1 Tb/s, καταναλώνουν περίπου 10 nJ ανά bit του throughput δεδομένων ^[42].

Στο Σχήμα 53 φαίνεται ένα απλό σχηματικό των κύριων λειτουργικών τμημάτων ενός high-end ηλεκτρονικού δρομολογητή 1 Tb/s. Οι διάφορες βαθμίδες παρουσιάζονται στην § 3.6.7. Μεταξύ των βαθμίδων αυτών, η πλέον ενεργοβόρα είναι η μηχανή προώθησης δεδομένων (forwarding engine) (32% επί του συνόλου), τα τροφοδοτικά, οι ανεμιστήρες, και απαγωγείς θερμότητας (35% επί του συνόλου). Η μήτρα μεταγωγής καταναλώνει μόνο το 10% της ολικής ισχύος.



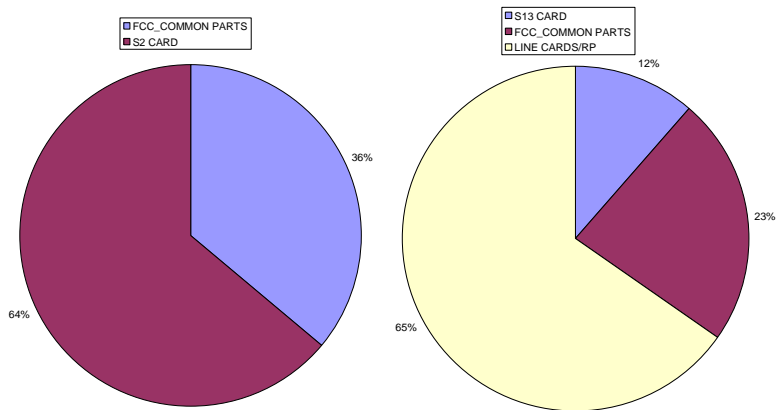
Σχήμα 53: Δομικό διάγραμμα όλων των λειτουργιών στο εσωτερικό ενός δρομολογητή καθώς και κατανομή κατανάλωσης ισχύων ανά βαθμίδα ^[42].

Η παραπάνω ανάλυση δρομολογητών κορμού έχει πραγματοποιηθεί επίσης στην Telecom Italia, τόσο σε συστήματα ενιαίου πλαισίου όσο και σε συστήματα πολλαπλών πλαισίων.

Τα δεδομένα παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα. Σύμφωνα με τα δεδομένα που μετρώνται από πραγματικό εξοπλισμό εγκατεστημένο στο πεδίο, η βαθμίδα μεταγωγής ενός δρομολογητή είναι αρκετά δαπανηρή από την άποψη των καταναλώσεων ισχύος, ειδικά σε πλαίσια αυτόνομου υποσυστήματος, όπου μετρά περισσότερο από το 30% της συνολικής κατανάλωσης.

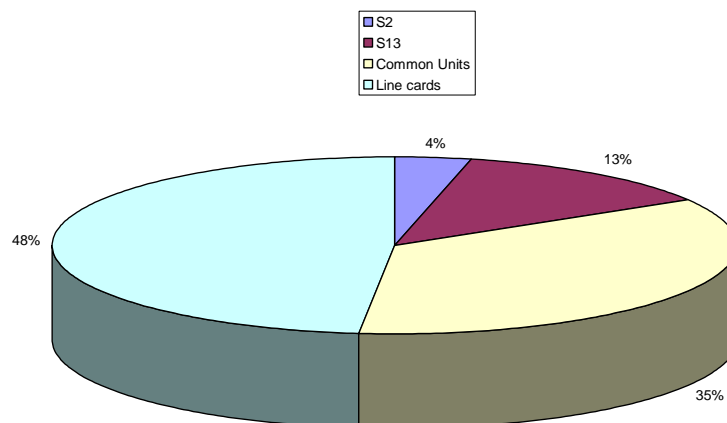
Στο πλαίσιο γραμμών διεπαφής, η ισχύς που απαιτείται για τη μήτρα μεταγωγής (S13 κάρτα) είναι σαφώς πιο περιορισμένη, και φτάνει μέχρι το 12% της συνολικής κατανάλωσης (Σχήμα 54), ενώ ως επί το πλείστον η ισχύς καταναλώνεται στις κάρτες διεπαφής καθώς και κατά την επεξεργασία των πακέτων.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι παραπάνω τιμές είναι ποσοστιαίες και ότι τόσο οι κάρτες S2 όσο και οι κάρτες μεταγωγής S13 έχουν την ίδια κατανάλωση ισχύος, η οποία κυμαίνεται στα 220 W.

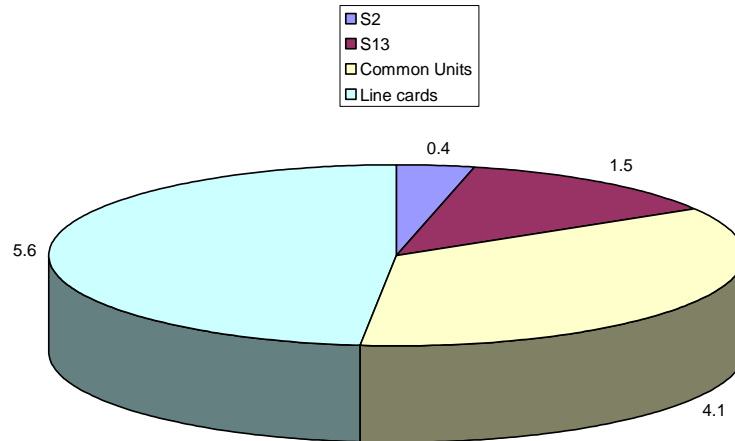


Σχήμα 54: Γράφημα κατανάλωσης ενέργειας για τις λειτουργίες μεταγωγής (αριστερά) και διεπαφής (δεξιά).

Η ίδια ανάλυση επαναλήφθηκε λαμβάνοντας υπ'όψιν την αρχιτεκτονική του δρομολογητή σε διάταξη πολλαπλού πλαισίου, συμπεριλαμβανομένου και του πλαισίου μεταγωγής και γραμμών διεπαφής.



Σχήμα 55: Γράφημα που δείχνει την επιμέρους κατανάλωση σε κάθε λειτουργική βαθμίδα του ενός δρομολογητή κορμού στο δίκτυο IP της Telecom Italia.



Σχήμα 56: Γράφημα που δείχνει την κατανάλωση σε KWatt ανά Terabit throughput

4.1.2 Κατανάλωση ισχύος σε δρομολογητές BOOM

Τα συστήματα της πλατφόρμας BOOM καταναλώνουν ενέργεια, έτσι ώστε να επιτελούν και να ολοκληρώνουν τις λειτουργίες τους (για παράδειγμα, καταναλώνουν οπτική ισχύ, για την μετατροπή ενός μήκος κύματος σε ένα ηλεκτρικό σήμα ελέγχου) ή για τη σταθεροποίηση της κατάστασής τους (απαγωγή θερμότητας, έλεγχος και σταθεροποίηση θερμοκρασίας) ή για να συντονίζουν τις οπτικές παραμέτρους τους (συντονισμός ROADM μικρο-δακτυλίων, καθορισμός των UWDM αποπολυπλεκτών, ρύθμιση και σταθεροποίηση μήκους κύματος).

Στην συνέχεια θα υπεισεέλθουμε σε περισσότερες λεπτομέρειες για κάποιες από αυτές. Όσον αφορά την παραγωγή οπτική ενέργειας και τη μετατροπή μήκους κύματος, το λέιζερ EML θα καταναλώσει μέγιστη ηλεκτρική ισχύ περίπου 0,5 W.

Όσον αφορά τα ηλεκτρικά σήματα ελέγχου θα καταναλώνουν περίπου 4.5W. Σε ότι αφορά την κατανάλωση του ρυθμιζόμενου λέιζερ αυτή είναι πολύ υψηλότερη, και φτάνει περί τα 18W.

Ένα αντηχείο μικρο-δακτυλίου (micro ring resonator) για ROADM χρειάζεται απαραίτητως κάποια ελάχιστη ισχύ για να συντονίσει τις οπτικές παραμέτρους του. Η σημερινή γενεά αντηχείων απαιτούν περίπου 500 mW ισχύος για κάθε θερμαντικό στοιχείο πάνω στο τσιπ. Στη νεότερη διαδικασία κατασκευής η απαιτούμενη ισχύς θερμαντικού στοιχείου κατέρχεται κατά ένα συντελεστή από 6 έως 80 mW ανά θερμαντικό στοιχείο. Η συνολική ισχύς θερμότητας θα πρέπει να αφαιρεθεί από την ίδια τη συσκευή. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση ενός μεταλλικού ελάσματος τοποθετημένο εντός του τσιπ που διατηρείται σε μια σταθερή θερμοκρασία για παράδειγμα με ένα στοιχείο Peltier. Ένα μεγάλο μέρος της θερμότητας από την ψύκτρα μπορεί να

απομακρυνθεί με ακτινοβολία χρησιμοποιώντας μία κατάλληλα σχεδιασμένη ψύκτρα. Το στοιχείο Peltier χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του οπτικού κυκλώματος, σε όσον το δυνατόν χαμηλότερο επίπεδο.

Ως γενικός κανόνας, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα στοιχεία peltier μπορούν να καταναλώσουν ακόμη και μέχρι το διπλάσιο του ποσού της ενέργειας που απάγεται και / ή άγεται διαμέσου της συσκευής.

4.1.3 Συνολική κατανάλωση πλατφόρμας BOOM

Τα δεδομένα σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας των επιμέρους φωτονικών στοιχείων που ενσωματώνονται σε πλακέτα SOI για τη δημιουργία μία μονάδας μεταγωγής 8x8 τεχνολογίας BOOM έχουν συλλεχθεί και συγκεντρωθεί στην παρούσα παράγραφο .

Ο πίνακας 4 παρουσιάζει τις διάφορες τιμές για τα δομικά στοιχεία που απεικονίζονται στην § 2.1.2 στο Σχήμα 3. Για τα διάφορα στοιχεία, η κατανάλωση ισχύος υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπ'όψιν τους μικροκυματικούς οδηγούς για τα λέιζερ, τους διαμορφωτές, οδηγούς ηλεκτρονικού ελέγχου, θερμικού ελέγχου, ρύθμιση και σταθεροποίηση των διαφόρων φωτονικών τσιπ.

8x8 BOOM βασικός μεταγωγέας				
Μονάδες	Αριθμός κάρτας στο πλαίσιο	Ποσότητα	Watt	Σύνολο
Κάρτα SOI		2	0	0
Διαχωριστής ετικέτας εισόδου	1	8	0	0
UWDM αποπολυπλέκτης & drivers	2	8	2.5	20
PD + TIA + drivers	3	8	1.2	9.6
Ηλεκτρονικό στοιχείο δημιουργίας ετικέτας	7	1	2	2
driver για λέιζερ EML	8	8	4.5	36
EML	8	8	0.5	4
Ρυθμιζόμενος driver για λέιζερ EML	9	1	18	18
Ρυθμιζόμενο λέιζερ EML	9	1	0.8	0.8
SOA + 2 DI	4	8	1.2	9.6
Drivers για SOA (TEC + current)	4	8	4.5	36
Drivers για 2 DIs (TEC)	4	8	4.5	36
Συζεύκτης ετικέτας εισόδου	5	8	0	0
ROADM	6	8	2.5	20
Συζεύκτης εξόδου 8:1	12	8	0	0
EDFA IN	10	8	1	8
EDFA OUT	11	8	1	8
Έλεγχος/επικοινωνία/ρύθμιση ηλεκτρονικών	13	1	0.5	0.5
ΣΥΝΟΛΟ		-	-	208.5

Πίνακας 4: Κατανάλωση ισχύος των επιμέρους βαθμίδων ενός μεταγωγέα 8x8.

Ξεκινώντας από έναν μεταγωγέα 8x8 και συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών στοιχείων, των κοινών τους μερών, τους απαγωγούς θερμότητας, τις θύρες επικοινωνίας και διεπαφές αλλά και την μήτρα μεταγωγής, τα στοιχεία κατανάλωσης αναφέρονται στον Πίνακα 5.

Αμφίδρομη κάρτα μεταγωγής 3 βαθμίδων				
Μονάδες	Ποσότητα	Watt/μονάδα	Σύνολο	KW
8x8 BOOM βασική μονάδα	6.0	208.5	1251	1.2
Κάρτα ελέγχου & ηλεκτρονικά επικοινωνίας	1.0	5.0	0.0	0.0
Κάρτα τροφοδοσίας	1.0	5.0	0.0	0.0
Μηχανικά & οπτικά στοιχεία	1.0	0.0	0.0	0.0
Σύνολο	-	-	1251	1.2

Πίνακας 5. Κατανάλωση ισχύος αλυσωτής κάρτας μεταγωγής 8x8.

Αμφίδρομη μήτρα 64x64 πλαισίου				
Μονάδες	N.	Watt/unit	Total	KW
Αμφίδρομη κάρτα μεταγωγής 3 βαθμίδων	8	1251	10008	10.0
Πλαίσιο με κοινά μέρη	1	4200	4200	4.2
ΣΥΝΟΛΟ	-	-	14208	14.2

Πίνακας 6. Κατανάλωση ισχύος πλαισίου με κάρτες μεταγωγής BOOM.

Η κάρτα μεταγωγής BOOM απαιτεί 1,2 KW, δηλαδή πενταπλάσια κατανάλωση από ό, τι μία αντίστοιχη κάρτα ενός δρομολογητή Cisco, που απαιτεί περίπου 240 W. Ο μεταγωγέας BOOM απαιτεί 14 KW όπως φαίνεται στον Πίνακα 6, διπλάσια δηλαδή ενέργεια απ'αυτή που απαιτείται στην περίπτωση ενός μεταγωγέα CISCO.

Παρ'όλα αυτά, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3, η απόδοση της κάρτας BOOM είναι υψηλότερη από ό, τι τα ηλεκτρονικά στοιχεία του δρομολογητή. Σε ότι αφορά την διακίνηση των δεδομένων από πλευράς τεχνολογίας BOOM αυτή είναι διπλάσια της απόδοσης της JUNIPER και δύομισι φορές υψηλότερη σε σύγκριση με την CISCO.

Η σύγκριση αυτή δείχνει ότι οι ακόλουθες σκέψεις για ένα συμβατικό δρομολογητή και έναν δρομολογητή BOOM πρέπει να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας μία κοινή κλίμακα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μία ένδειξη της κατανάλωσης ισχύος ανά Tb/s throughput βάσει δρομολόγησης διαμέσου της μήτρας μεταγωγής (Σχήμα 56).

Τα στοιχεία για την κατανάλωση ρεύματος οδηγούν στο συμπέρασμα ότι για τους δρομολογητές BOOM είναι σαφώς χαμηλότερη σε σχέση με τους συμβατικούς δρομολογητές.

Είναι σημαντικό να σχολιασθεί ότι ο φωτονικός δρομολογητής BOOM καταναλώνει ενέργεια ανάλογη με τουλάχιστον ένα από τα μοντέλα συμβατικών δρομολογητών εκ των δύο μεγάλων κατασκευαστών. Αυτό σαφώς αποτελεί έκπληξη δεδομένου ότι μέχρι τώρα στο παρόν κείμενο αναφέρεται συνεχώς το γεγονός ότι οι δρομολογητές BOOM είναι ιδιαίτερα φιλικοί προς το περιβάλλον και ότι εξοικονομούν μεγάλα ποσά ενέργειας.

Η ανάλυση κατανάλωσης ισχύος μέχρι τώρα έρχεται σε αντίθεση με το βασικό συμπέρασμα, λαμβάνοντας όμως υπ'όψιν τα δεδομένα που διατίθενται σήμερα, θα μπορούσε να είναι ανακριβής επειδή απλά αναφερόμαστε σε ένα πρωτότυπο νέας τεχνολογίας. Θα έπρεπε να μην θεωρηθεί έκπληξη αν το αποτέλεσμα θα ήταν το αντίθετο. Στην πραγματικότητα, ένα καλά δοκιμασμένο προϊόν με πολυετή παρουσία στην αγορά συγκρίνεται με μία εντελώς νέα τεχνολογία και η αρχιτεκτονική. Ωστόσο, οι υπολογισμοί έχουν γίνει με μία ρεαλιστική προσέγγιση, υπάρχει όμως μεγαλύτερο περιθώριο βελτίωσης.

Διάφορες λύσεις για την ανίχνευση ετικέτας και λαμβάνοντας υπ'όψιν τη δυνατότητα αποφυγής διαγραφής της σε κάθε στάδιο μεταγωγής, θα μπορούσε να είναι π.χ η εξάλειψη διαδικασίας επανεγγραφής της και η ταυτόχρονη μείωση κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον, η μείωση των απωλειών κυματοδηγού και οι λύσεις λέιζερ υψηλής ισχύος θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην ελάττωση του αριθμού των EDFAs που απαιτούνται για να διατηρηθεί η απόσβεση εντός των χωρικών πλαισίων της μήτρας μεταγωγής.

Τέλος, ένα άλλο σημαντικό σημείο που πρέπει να υπογραμμισθεί είναι ότι η αρχιτεκτονική του φωτονικού δρομολογητή μπορεί να συγκριθεί με τον συμβατικό σε ότι αφορά την συνολική του απόδοση αφού το ενεργειακό του αποτύπωμα μπορεί να είναι λιγότερο από το ένα πέμπτο σε σχέση με τον συμβατικό.

5 ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μία προσπάθεια να αναλυθεί τεχνο-οικονομικά η υιοθέτηση μία λύσης που βασίζεται στην πλατφόρμα BOOM. Η ανάλυση θα λαμβάνει υπ'όψιν την κατασκευή, ανάπτυξη και ολοκλήρωση των διαδικασιών, καθώς και το αντίστοιχο κόστος. Η ανάλυση αυτή έχει κάποιο εγγενή θεμελιώδη περιορισμό, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι ορισμένες συσκευές έχουν ένα βραχυπρόθεσμο μέσο όρο εκμετάλλευσης, ενώ η πλατφόρμα σαν σύνολο καθώς και άλλα επιμέρους στοιχεία ή βαθμίδες έχουν μακροπρόθεσμες δυνατότητες εκμετάλλευσης.

Η συγχώνευση όλων αυτών των στοιχείων θα οδηγήσει ίσως σε ένα πρωταρχικό αποτέλεσμα που σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να θεωρηθεί σαν εκτενής ανάλυση αγοράς (market analysis) απλούστατα διότι εμπεριέχει κάποια αβεβαιότητα η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα και λανθασμένα συμπεράσματα.

5.1 Τεχνο-οικονομική ανάλυση για συμβατικούς δρομολογητές δικτύου κορμού

Τιμοκατάλογοι για τις διάφορες κάρτες τα διάφορα προϊόντα της CISCO και της JUNIPER είναι διαθέσιμα on line (www.globalpricelist.com). Τα στοιχεία αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως ένα καλό σημείο εκκίνησης για μια πρωταρχική τεχνο-οικονομική ανάλυση συμβατικών δρομολογητών. Οι τιμές αυτές αποτελούν συνήθως το σημείο αναφοράς για την οικονομική αξιολόγηση των προσφορών κατά τη διάρκεια διαγωνισμών για την απόκτηση νέων δικτυακών προϊόντων.

Για τους δύο μεγάλους προμηθευτές, μια λεπτομερής ανάλυση της αρχιτεκτονικής έχει ήδη πραγματοποιηθεί ενώ έχει υπολογισθεί ο αριθμός των καρτών που απαιτούνται για την πλήρη διαμόρφωση του συστήματος σε ένα πραγματικό δίκτυο.

Σημειωτέον ότι είχαν δοθεί ήδη ενδεικτικές τιμές για τις διάφορες κάρτες μεταγωγής, διεπαφών, επεξεργαστών, ελέγχου και τροφοδοσίας.

Όλα τα επιμέρους στοιχεία κατηγοριοποιήθηκαν και ομαδοποιήθηκαν ως εξής:

- Κοινό μέρος (σασί, παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, πίνακες συναγερμού, μονάδες ελέγχου, επεξεργαστές δρομολόγησης, ανεμιστήρες, μονάδες ελέγχου)
- Γραμμή οπτικών διεπαφών (οπτικές μονάδες και κάρτα προώθησης οπτικών πακέτων)
- Κάρτες μεταγωγής (S13 και S2 κάρτες, οπτικά καλώδια και οπτικές μονάδες για διασυνδέσεις)

	Σύνολο καρτών/πλαίσιο επέκτασης	Σύνολο καρτών /κεντρικό πλαίσιο
Πλαίσιο επέκτασης	1	0
Κεντρικό πλαίσιο	0	1
Πόρτες πλαισίων	1	1
Κάρτα συναγερμού	2	2
Πίνακας Ελέγχου DC	1	1
Μονάδα Τροφοδοσίας DC	3	3
Πλαίσιο Τροφοδοσίας DC	1	1
Μήτρα μεταγωγής	0	24
Μήτρα μεταγωγής (S13)	8	0
Πλαίσιο Οπτικών Μονάδων & Διασυνδέσεων	0	24
Φορητός Σκληρός Δίσκος	1	1
Ελεγκτής ανεμιστήρα	2	2
Ανεμιστήρας	2	2
Φίλτρο καρτών μεταγωγής & διεπαφής	1	1
Πλαίσιο διαχείρισης καλωδίων	1	1
Επεξεργαστής δρομολόγησης	2	2
Επιμέρους Κάρτες Υπηρεσιών & Μηχανή Προώθησης Πακέτων	16	0
40G POS PLIM	16	0

Πίνακας 8. Ελάχιστος αριθμός καρτών που απαιτούνται για την βασική λειτουργία ενός δρομολογητή (γαλάζιο = κοινές μονάδες, μωβ = οπτικές διεπαφές, κίτρινες κάρτες = κάρτα μεταγωγής), σύμφωνα με τον προμηθευτή 1.

	Σύνολο καρτών/πλαίσιο ο επέκτασης	Σύνολο καρτών /κεντρικό πλαίσιο
Πλαίσιο επέκτασης	1	0
Κεντρικό πλαίσιο	0	1
Πόρτες πλαισίων	1	1
Κάρτα συναγερμού	2	2
Πίνακας Ελέγχου DC	1	1
Μονάδα Τροφοδοσίας DC	2	2
Πλαίσιο Τροφοδοσίας DC	1	1
Μήτρα μεταγωγής	0	16
Μήτρα μεταγωγής (S13)	5	0
Πλαίσιο Οπτικών Μονάδων & Διασυνδέσεων	0	16
Φορητός Σκληρός Δίσκος	2	2

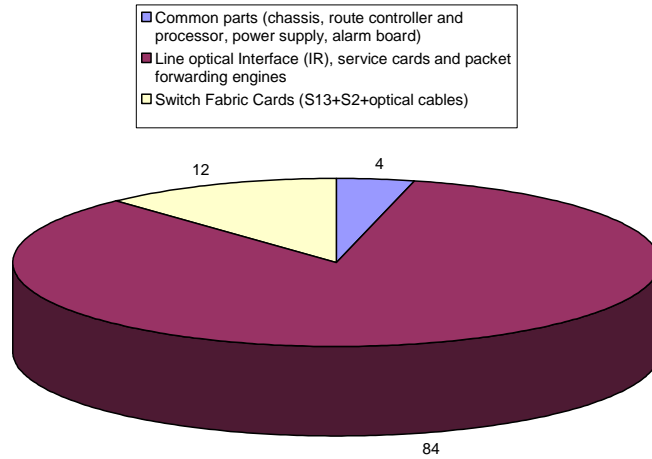
Ανεμιστήρας	2	2
Φίλτρο καρτών μεταγωγής & διεπαφής	1	1
Πλαίσιο διαχείρισης καλωδίων	1	1
Επεξεργαστής δρομολόγησης	2	2
Επιμέρους Κάρτες Υπηρεσιών & Μηχανή Προώθησης Πακέτων	16	0
40G POS PLIM	16	0

Πίνακας 7. Ελάχιστος αριθμός καρτών που απαιτούνται για την βασική λειτουργία ενός δρομολογητή (γαλάζιο = κοινές μονάδες, μωβ = οπτικές διεπαφές, κίτρινες κάρτες = κάρτα μεταγωγής), σύμφωνα με τον προμηθευτή 2.

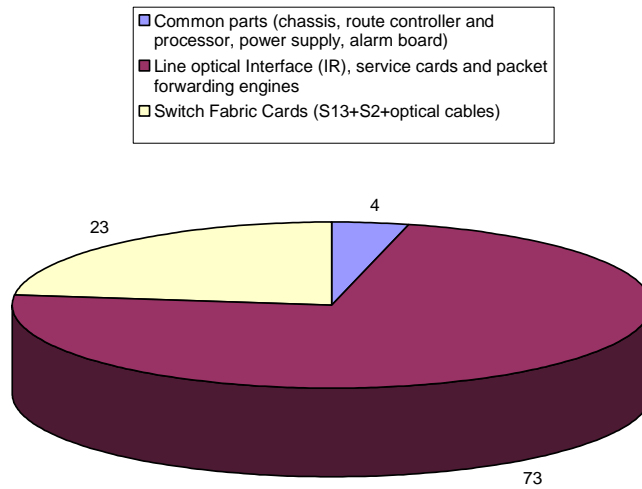
Τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν σύμφωνα με τις τρεις παραπάνω κατηγορίες υλικών ενώ κάθε επιμέρους τιμή αναφέρεται στα σχήματα 57 και 58 για τον κατασκευαστή 1 και 2 αντίστοιχα.

Ανεξάρτητα από τη συνολική απόδοση του δρομολογητή και την αρχιτεκτονική του, οι κοινές μονάδες έχουν βαρύτητα στο συνολικό κόστος της λύσης περίπου 4% . Οι γραμμές διεπαφής καταλαμβάνουν μία ξεχωριστή θέση σε ότι αφορά την συμμετοχή τους στην απόδοση του δρομολογητή. Το επιμέρους κόστος που αναφέρεται στις οπτικές διασυνδέσεις είναι χαμηλότερο για τον κατασκευαστή ο οποίος έχει αναπτύξει μίαν αρχιτεκτονική υψηλότερης απόδοσης. Αντιθέτως, το επιμέρους κόστος που αναφέρεται στην μήτρα μεταγωγής είναι υψηλότερο για τον κατασκευαστή που διαθέτει αρχιτεκτονική υψηλότερης απόδοσης.

Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, το κόστος μίας μήτρας μεταγωγής δεν φαίνεται να κλιμακώνεται γραμμικά με την απόδοση, αλλά περισσότερο με την αύξηση του κόστους διασύνδεσης. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι στην παρούσα αρχιτεκτονική πολλαπλών πλαισίων ένα μεγάλο κλάσμα του κόστους οφείλεται στις οπτικές μονάδες που χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση των καρτών μεταγωγής λόγω του υψηλού αριθμού των απαιτούμενων Η/ Ο και Ο/Η μετατροπών.



Σχήμα 57: Ποσοστό συμμετοχής των επιμέρους στοιχείων ενός δρομολογητή στο συνολικό κόστος (κατασκευαστής 1).



Σχήμα 58: Ποσοστό συμμετοχής των επιμέρους στοιχείων ενός δρομολογητή στο συνολικό κόστος (κατασκευαστής 2).

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη συζητήσαμε και αναλύσαμε τις προοπτικές εφαρμογής αλλά και τις τεχνοοικονομικές πτυχές της δρομολόγησης πακέτων βάσει της Φωτονικής Πυριπίου με χρήση των αντίστοιχων ολοκληρωμένων φωτονικών στοιχείων.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, ο ρόλος των ολοκληρωμένων οπτικών στα δίκτυα νέας γενεάς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τμήματος του ευρύτερου δικτύου (σε σχέση με το μέγεθός του, τις υπηρεσίες που προσφέρει αλλά και την ευελιξία του: campus, metro, long haul). Αναλογιζόμενοι πάντως ότι τα συστατικά κάθε νέας τεχνολογίας όσο εξελιγμένα και αν είναι δεν αποτελούν πανάκεια στους φυσικούς και τεχνολογικούς περιορισμούς αλλά και τα προβλήματα που καλούνται να επιλύσουν ή να μετριάσουν εκ των πραγμάτων ανταποκρίνονται μόνον σε συγκεκριμένες ανάγκες και εφαρμογές. Ωστόσο η Ολοκληρωμένη Οπτική αδιαμφισβήτητα παίζει έναν σημαντικό ρόλο στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και του ενεργειακού αποτυπώματος που απαιτείται για την λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων επόμενης γενιάς.

Ειδικότερα, η οπτική μεταγωγή αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο υποκατάστατο της συμβατικής ηλεκτρικής μεταγωγής τουλάχιστον σε ότι αφορά την εσωτερική λειτουργία των δρομολογητών κορμού. Η προοπτική της μετάβασης αυτής αναλύθηκε προσεκτικά στην εκτενή αυτή εργασία λαμβάνοντας υπ' όψιν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση της πλατφόρμας μεταγωγής BOOM και την μελέτη ενσωμάτωσης της αρχιτεκτονικής της σε δρομολογητές κορμού. Το σημαντικότερο όμως σημείο αυτής της μελέτης αποτελεί η σύγκριση με την συμβατική ηλεκτρονική λύση τόσο ως προς την συνολική απόδοση και την κατανάλωση ενέργειας όσο και ως προς το συνολικό κόστος. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν και ενίσχυσαν τις προσδοκίες που τοποθετούνται υπέρ της αρχιτεκτονικής BOOM και της τεχνολογίας υβριδικής ολοκλήρωσης SOI αλλά και των απόψεων για καθολική μετάβαση σε υλοποιήσεις οπτικής μεταγωγής το οποίο δυνητικά θα οδηγήσει στα πολυπόθητα αμιγώς οπτικά δίκτυα.

Αναφερόμενοι στην τεχνο-οικονομική ανάλυση, αν και η παρούσα εργασία έχει πολλά σημεία που χρήζουν περαιτέρω μελέτης, τα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν να βοηθήσουν στον προσδιορισμό της μελλοντικής εκμετάλλευσης της προτεινόμενης τεχνολογίας ολοκλήρωσης και των φωτονικών συστατικών της. Τέλος θα πρέπει να τονισθεί σε αυτό το σημείο η σημαντικότητα των αποτελεσμάτων ειδικά στο θέμα της ενεργειακής κατανάλωσης αλλά και των οικονομιών που επιτυγχάνονται από μία νέα επαναστατική τεχνολογία σε σχέση με μία ώριμη και εδραιωμένη σε όλα τα μήκη και πλάτη των υπαρχόντων δικτύων δεδομένων.

7 Βιβλιογραφία

- [1] Heavy reading infinera
- [2] Daniel J Blumenthal, Masashi Usami, ECOC 2009, Austria, packet switching papers, "Tutorial on optical signal processing: the roadmap towards high speed optical Burst/Packet switching".
- [3] Ruth Van Caenegem, Jan Cheyns, Erik Van Breusegem, Didier Colle, Mario Pickavet, Piet Demeester, INTEC, "Optical packet switching: doing it all optical" packet switching papers packet switching papers.
- [4] Mike J. O'Mahony, Ken M. Guild, David K. Hunter, Ivan Andonovic, Ian H. White, Richard V. Penty, Photonics in switching, 2001, "The WASPNET optical packet switching node and its testbed realization"
- [5] Alberto Scandurra, Ian O'Connor, NoCArc 2008, "Scalable CMOS-compatible photonic routing topologies for versatile networks on chip", Como (Italy)
- [6] J.E. Bowers, Alexander W. Fang, Hyundai Park, Richard Jones, Oded Cohen, Mario J. Paniccia, 2006 IEEE/LEOS Group IV Photonics Conference, Ottawa, Canada, September 13-15, 2006. "Silicon Evanescent Lasers and Amplifiers".
- [7] Alexander W. Fang, Hyundai Park, Richard Jones, Oded Cohen, Mario J. Paniccia, and John E. Bowers, IEEE Photonics Technology Letters 18, 1143-1145 (2006).
"A continuous wave hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser".
- [8] D. Van Thourhout¹, I. O'Connor², A. Scandurra³, L. Liu¹, W. Bogaerts¹, S. Selvaraja¹, G. Roelkens¹, "Nanophotonic Devices for Optical Networks-On-Chip"
- [9] III-V silicon heterogeneous integration, Dries Van Thourhout – IPRM '08, Paris
- [10]
- [11] I wavelength conversion
- [11a] Herrera Llorente, J., [Raz, O.](#), [Tangdiongga, E.](#), Liu, Y., Marti, J., Ramos, F., Maxwell, G.D., Poustie, A., Mulvad, H.C.H., [Hill, M.T.](#), [Wardt, H. de](#), [Khoe, G.D.](#), [Koonen, A.M.J.](#) & [Dorren, H.J.S.](#) (2007). Proceedings of the Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC / NFOEC 2007) 25 - 29 March 2007, Anaheim, California, USA. 160 Gb/s all-optical packet switched network operation over 110 km of field installed fiber, (pp. PDP5-1/3). Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Service Center.
- [12] Nicola Calabretta, Hyun-Do Jung, Javier Herrera Llorente, Eduward Tangdiongga, Ton Koonen, and Harm Dorren, ICTON-MW'08 Sa2.3, "All-Optical Packet Switching Techniques with Label Rewriting for Optical Packets at Bit-Rate Beyond 160 Gb/s".
- [13] S. Bidnyk et al., PTL vol.18, nr.22, pp.2392-2394, Nov.2006 : "Silicon on Insulator Based Planar circuit for Passive Optical Network Applications."
- [14] Gunther Roelkens, Joost Brouckaert, Dirk Taillaert, Pieter Dumon, Wim Bogaerts, Dries Van Thourhout, Roel Baets, Richard Nötzel, and Meint Smit, Opt. Express 13, 10102-10108 (2005), "Integration of InP/InGaAsP photodetectors onto silicon-on-insulator waveguide circuits".

- [15] Francesco Morichetti, Andrea Melloni, Mario Martinelli, Member, IEEE, René G. Heideman, Arne Leinse, Douwe H. Geuzebroek, and Albert Borreman, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 25, NO. 9, SEPTEMBER 2007
 “Box-Shaped Dielectric Waveguides: A New Concept in Integrated Optics?”
- [16] BOOM “D4.1 Report on specifications of UDWDM photodetector and dual EML transmitter”
- [17] BOOM “Deliverable D0.1: First year technical supplement to the periodic report”
- [18] NTUA fast SOA
- [19] NTUA fast SOA
- [20] GLOBAL INTERNET GEOGRAPHY EXECUTIVE SUMMARY, TeleGeography Research, www.telegeography.com
- [21] P.Pagnan, M. Schiano, Photonics in switching, 2009, Pisa, “A \square switched photonic network for the new transport backbone of Telecom Italia”.
- [22] Leontios Stampoulidis, Konstantinos Vyrsoinos, Karsten Voigt, Lars Zimmermann, Fausto Gomez- Agis, Harm Dorren, Zhen Sheng, Dries Van Thourhout, Ludwig Moerl, Jochen Kreissl, Behnam Sedighi, Annachiara Pagano and Emilio Riccardi, JSTQE special issue 2010, “The European BOOM project: Silicon photonics for high-capacity optical packet routers”
- [23] Z. Sheng, L. Liu, S. He, D. Van Thourhout, and R. Baets, 6th IEEE International Conference on Group IV Photonics, San Francisco, CA, USA, 9-11 September, 2009. “Silicon-on-insulator microring resonator for ultra dense WDM applications”.
- [24] M. Schnarrenberger, L. Zimmermann, T. Mitze, K. Voigt, J. Bruns, K. Petermann, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18, No. 23, pp. 2469-2471, December 2006
 Low Loss Star Coupler Concept for AWGs in Rib Waveguide Technology;
- [25] www.intel.com/research/platform/sp/hybridlaser.htm
- [26] K. Barker, A. Benner, and R. H. et al. In Proc. SC05, 2005, On the Feasibility of Optical Circuit Switching for High Performance Computing Systems.
- [27] M. Glick, IEEE Hot Interconnects 2008, "Optical interconnects in next generation data centers; an end to end view".
- [28] L. A. Barroso, J. dean, U. Holzle, IEEE Micro, March/April 2003, vol.23, N.2, pag.22-28, “Web search for a planet: the Google cluster architecture”
- [29] US Environmental Protection Agency ENERGY STAR, august 2007
 Report to congress on server and data center eEnergy efficiency
- [30] J.M. Schropf, et al, “End to end data solutions for distributed Petascale Science”, Nov. 2007
- [31] L. Schares, X. Zhang, R. Wagle, D. Rajan, P. Selo, S. P. Chang, J. Giles, K. H. and D. Kuchta, J. Wolf, and E. Schenfeld, In Optical Fiber Comm. Conference (OFC), Mar. 2009,
 A reconfigurable interconnect fabric with optical circuit switch and software optimizer for stream computing systems.
- [32] M. Glick, D. G. Andersen, M. Kaminsky, and L. Mummert, In Optical Fiber Comm. Conference (OFC), Mar. 2009. Dynamically reconfigurable optical links for high-bandwidth data center networks.
- [33] Dr. Andreas D. Bovopoulos and Mr. Micha Zeiger, “THE IMPACT OF

SHARED-MEMORY AND IN-BAND CONTROL IN THE DESIGN OF SWITCHING FABRICS ”

- [34] Hiroachi Takeuchi, 2008 Eu-Japan Cooperation Forum on ICT research “Photonic Packet Router Project – towards future Optical Packet-switched Networks”
- [35] Ken-ichi Sato “Future Directions in Optical Networking Technology Development -Optical Fast Circuit Switching and Multilevel Optical Routing”
- [36] N. Wada, H. Furukawa, NICT, PiS 2009, paper We13-3640-Gbit/s/port (64_ x 10-Gbit/s) Colored DPSK Optical Packet Switching.
- [37] O. Liboiron-Ladouceur, et al., ECOC2005, Th2.4.3, 2005.
- [38] H. Furukawa, et al., OFC2009, no. PDP-D7, 2009.
- [39] N. Wada, et. al., OFC 2003, vol. 2, no. FS7, pp. 801-802, 2003.
- [40] N. Wada, et.al., IEEE J. Select.Topics Quantum Electron., vol. 13, pp.1551-1559, 2007.
- [41] apache
- [42] Rodney S Tucker, Rajendran Parthiban, Jayant Baliga, Kerry Hinton,Robert W. A. Ayre, and Wayne V. Sorin,JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 27, NO. 3, FEBRUARY 1, 2009 243, “Evolution of WDM Optical IP Networks: A Cost and Energy Perspective”
- [43] D. Ward, M. Betts, ed., http://www.ietf.org/MPLS-TP_overview-22.pdf April 18, 2008, “MPLS architectural considerations for a transport.
- [44] www.yankeegroup.com, IP Core Network Intelligence: Essential Components and Drivers, October 2007
- [45] Edoardo Bonetto, Luca Chiaraviglio, Davide Cuda, Guido A. Gavilanes Castillo, Fabio Neri, ECOC 2009, 20-24 September, 2009, Vienna, Austria “Optical Technologies Can Improve the Energy Efficiency of Networks”,
- [46] A. Pawlikeiwicz, et al., [Online]. www.rfdesign .com, Mar. 2006,“Choosing RF CMOS or SiGe BiCMOS in Mixed Signal Design”
- [47] David Cheskis, [Online] www.wirelessdesignmag.com, Jun.2007, “130nm SiGe BiCMOS processes optimize cost and performance”.