



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Πρόγραμμα Προπτυχιακών Σπουδών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Διαχωρισμός Πόρων στα Κέντρα Δεδομένων  
με τη χρήση Οπτικών Δικτύων**

**Συγγραφέας :**  
**Κυριακάκος Παναγιώτης**  
**A.M. 47138**

**Εισηγητής: Αντώνης Μπόγρης , Καθηγητής**

**Αθήνα, Σεπτέμβριος 2022**





# **ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

Σχολή Μηχανικών

Τμήμα μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Διαχωρισμός Πόρων στα Κέντρα Δεδομένων**

**με τη χρήση Οπτικών Δικτύων**

**Κυριακάκος Παναγιώτης  
Α.Μ. 47138**

**Εισηγητής:**

**Αντώνης Μπόγρης , Καθηγητής**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Νίκος Ψαρράς, Λέκτορας  
Παναγιώτης Καρκαζής, Αναπληρωτής Καθηγητής**

**Ημερομηνία εξέτασης:**

**Παρασκευή 7 Οκτωβρίου 2022**



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Κυριακάκος Παναγιώτης** του **Λυσάνδρου**, με αριθμό μητρώου **71347138** φοιτητής του **Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής** της **Σχολής Μηχανικών** του Τμήματος **Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών**, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών,

Κυριακάκος Παναγιώτης





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής και σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των σπουδών μου. Με την παρούσα παράγραφο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους ανθρώπους με τους οποίους συνεργάστηκα και συνέβαλαν στην δημιουργία και την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα στην συνέχεια να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Αντώνη Μπόργη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου ένα τόσο ενδιαφέρον γνωστικό θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του και την υποστήριξη από την αρχή μέχρι το τέλος της συνεγραφίας μας.

Επιπρόσθετα, ευχαριστώ πολύ όλους τους συμφοιτητές μου για όλες τις όμορφες στιγμές που πέρασα σε αυτά τα ξέγνοιαστα και όμορφα χρόνια της φοίτησης μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω πολύ την οικογένεια μου, οι οποίοι πάντα αποτελούσαν το κύριο μου στήριγμα, σε όλες τις δυσκολίες που εμφανίστηκαν. Είμαι ευγνώμον για την συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, εφαρμογές με επίκεντρο τα δεδομένα, όπως ροές βίντεο υψηλής ευκρίνειας, η κοινωνική δικτύωση κλπ, σε συνδυασμό με τη μεγάλη διάδοση κινητών συσκευών όπως τα smartphones και τα tablet, έχουν συμβάλει στην ταχεία ανάπτυξη της κίνησης στο Διαδίκτυο. Τα κέντρα δεδομένων αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ύπαρξης του Διαδικτύου, παρέχοντας ποικίλες υπηρεσίες από την κοινωνική δικτύωση έως τους επιστημονικούς υπολογισμούς μεγάλης κλίμακας.

Τα σύγχρονα κέντρα δεδομένων, αντιμετωπίζουν μια σειρά ζητημάτων όπως ο κορεσμός των πόρων, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, η περιορισμένη διαθεσιμότητα εύρους ζώνης, η συνδεσιμότητα διακομιστή, η ενεργειακή απόδοση και το κόστος, η πολυπλοκότητα της κυκλοφορίας κλπ. Λόγω της προόδου στους πολυπύρηνους επεξεργαστές, τους επιταχυντές και τα αυξανόμενα παράλληλα επίπεδα σε όλα τα επίπεδα του ιεραρχικού συστήματος, παρατηρείται μία έντονη τάση βελτίωσης της απόδοσης που αναμένεται να συνεχιστεί και στα επόμενα χρόνια.

Τα τελευταία χρόνια, πολλοί ερευνητές επικεντρώνονται στην εξέταση διαφόρων προσεγγίσεων για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων επεκτασιμότητας, ταχύτητας και απόδοσης των κέντρων δεδομένων επόμενης γενιάς. Μία από τις πιο εφικτές λύσεις αυτών των ζητημάτων είναι η χρήση τεχνολογιών οπτικών δικτύων στον πυρήνα των συστημάτων των κέντρων δεδομένων, γεγονός που θα έχει ως αποτέλεσμα την αποσυμφόρησή τους λόγω του διαχωρισμού των πόρων.

### Λέξεις Κλειδιά :

Κέντρα Δεδομένων, Οπτικές ίνες, SDN, Αρχιτεκτονικές Δικτύωσης, Δικτυακές Συσκευές, Οπτικά Δίκτυα

### Επιστημονική Περίοχη:

Δικτύωση Κέντρων Δεδομένων

## **ABSTRACT**

In recent years, data-centric applications such as high-definition video streaming, social networking, etc., combined with the proliferation of mobile devices such as smartphones and tablets, have contributed to the rapid growth of Internet traffic. Data centers are an integral part of the Internet's existence, providing a variety of services from social networking to large-scale scientific computing.

Modern data centers, face a number of issues such as resource saturation, high power consumption, limited bandwidth availability, server connectivity, energy efficiency and cost, traffic complexity, etc. Due to advances in multicore processors, accelerators and increasing parallel layers at all levels of the hierarchical system, there is a strong trend of performance improvement that is expected to continue in the coming years.

In recent years, many researchers have focused on examining various approaches to address the scalability, speed, and performance requirements of next-generation data centers. One of the most feasible solutions to these issues is the use of optical networking technologies at the core of data center systems, which will result in decongestion due to the separation of resources.

### Key Words :

Data Center, Optical Fibers, SDN, Network Architectures, Network Equipment,  
Optical Networks

### Scientific Area:

Data Centre Networking

## **Περιεχόμενα:**

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΚΕΝΤΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (DATA CENTER)</b> .....	17
1.1 Γενικά.....	17
1.1 Ιστορική Αναδρομή στα DC.....	18
1.3 Σύγχρονα DC.....	20
1.4 Χαρακτηριστικά-Αρχιτεκτονικές των DC.....	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ</b> .....	29
2.1 Γενικά.....	29
2.2 Τι είναι ένα Οπτικό Δίκτυο .....	30
2.3 Δικτυακός εξοπλισμός ενός Οπτικού Δικτύου .....	31
2.3.1 Συζεύκτες.....	31
2.3.2 Μεταγωγείς .....	33
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ DC ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟ ΠΟΡΩΝ</b> ....	35
3.1 Τεχνικές Διαμόρφωσης Im-DD Συστημάτων Άμεσης Ανίχνευσης (Im-DD) και Διαμόρφωσης Έντασης .....	35
3.1.1. Πομπός Im-DD .....	35
3.1.2 Δέκτης Im-DD.....	40
3.2 Σύμφωνοι Πομποδέκτες.....	42
3.3. Co-Packaged Τεχνολογίες.....	43
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΔΙΚΤΥΩΣΗ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΗ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ (SDN) ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ DC</b> .....	47
4.1. Έννοια του SDN και Αρχιτεκτονική SDN για Οπτικά Δίκτυα .....	47
4.2 Από τα παραδοσιακά δίκτυα στο SDN.....	49
4.3 Η Ανάπτυξη των SDN Controllers .....	53
4.4 Εφαρμογές SDN.....	55
4.4.1. Data Centers .....	55
4.4.2 Δίκτυα Οπτικών Ινών.....	56
4.4.3. Οπτικά δίκτυα.....	56
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ</b> .....	57
5.1 Γενικά.....	57
5.2 Αρχιτεκτονική Διαχωρισμού: MONet.....	58
5.3 Πειραματική Διάταξη MONet .....	61
5.3.1 Αναδιαμορφώσιμη πρόσβαση και μετάφραση μνήμης: ReMAT .....	63
5.3.2 Απομακρυσμένες κάρτες μνήμης.....	64

5.3.3	Οπτική διαδρομή δεδομένων .....	65
5.3.4	Διαχειριστής πόρων .....	66
5.4	Αρχιτεκτονική Διαχωρισμού: DACON .....	67
5.5	Λειτουργία Αρχιτεκτονικής : DACON.....	69
5.6	Αξιολόγηση Αρχιτεκτονικών.....	73
5.6.1	Αξιολόγηση MONet .....	73
5.6.1.1	Χαρακτηρισμός αρχιτεκτονικής .....	73
5.6.1.2	Συμπεράσματα αρχιτεκτονικής MONet .....	74
5.6.2	Αξιολόγηση DACON.....	75
5.6.2.1	Απόδοση Δικτύου .....	75
5.6.2.2	Συμπεράσματα αρχιτεκτονικής DACON.....	77
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ .....</b>		<b>78</b>
6.1	Συμπεράσματα .....	78
6.1.1	Συνδέσεις υψηλού εύρους ζώνης (high bandwidth links) .....	78
6.1.2	Αξιοποίηση πόρων μέσω διαχωρισμού .....	78
6.1.3	Ενεργειακή αποδοτικότητα.....	79
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>		<b>80</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ:

<b>Εικόνα 1.1:</b> Data Center Traffic βάση προορισμού.....	19
<b>Εικόνα 1.2:</b> Διάγραμμα κίνησης δεδομένων σε Data Centers.....	20
<b>Εικόνα 1.3:</b> Διασύνδεση rack-to-rack με τη χρήση switches και AOCs.....	21
<b>Εικόνα 1.4:</b> In-package Optical I/O.....	22
<b>Εικόνα 1.5:</b> Δομή ενός οπτικού πομποδέκτη SFP/SFP+.....	23
<b>Εικόνα 1.6:</b> Τοπολογία Leaf & Spine.....	26
<b>Εικόνα 1.7:</b> Τοπολογία Fat-Tree για 4 διακόπτες θύρας.....	27
-----	
<b>Εικόνα 2.1:</b> Κατευθυντικός συζεύκτης.....	31
<b>Εικόνα 2.2:</b> Συζεύκτης τύπου αστέρα με 8 εισόδους και 8 εξόδους.....	32
-----	
<b>Εικόνα 3.1:</b> Generic block diagram of an IM-DD transmitter.....	35
<b>Εικόνα 3.2:</b> (a) a VCSEL and (b) a DFB laser.....	36
<b>Εικόνα 3.3:</b> (a) EAM (b) MZM.....	38
<b>Εικόνα 3.4:</b> α) διάγραμμα ενός γενικού δέκτη IM-DD.....	39
<b>Εικόνα 3.5:</b> (α) Αστερισμοί PAM-2, (β) QPSK και (γ) 16-QAM.....	41
<b>Εικόνα 3.6:</b> Ο οδικός χάρτης CPO .....	43
-----	
<b>Εικόνα 4.1:</b> Παραδοσιακή αρχιτεκτονική VS SDN.....	48
<b>Εικόνα 4.2:</b> OpenFlow Network.....	52
-----	
<b>Εικόνα 5.1:</b> MONet: προτεινόμενη τοπολογία οπτικού δικτύου.....	57
<b>Εικόνα 5.2:</b> Διασύνδεση CPU και απομακρυσμένης σειριακής μονάδας μνήμης.....	58
<b>Εικόνα 5.3:</b> Πειραματική διάταξη: MONet.....	60
<b>Εικόνα 5.4:</b> Αρχιτεκτονική DACON με δυνατότητα SDN που βασίζεται σε HOS.....	65
<b>Εικόνα 5.5:</b> Σχηματική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής του NOS.....	67
<b>Εικόνα 5.6:</b> Σχηματική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής HOS.....	69
<b>Εικόνα 5.7:</b> Χαρακτηρισμός επιπέδου μεταγωγής.....	72
<b>Εικόνα 5.8:</b> End-to-end καθυστέρηση.....	76

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ:**

<b>Πίνακας 2.1:</b> Εφαρμογές μεταγωγών, ανά χρόνο και τον αριθμό πορτών.....	33
<b>Πίνακας 4.1:</b> SDN vs Traditional Netwroks.....	50
<b>Πίνακας 4.2:</b> SDN Controllers.....	51

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ:

Συντ.	Πλήρης	Ελληνική Μετάφραση
<b>AOC</b>	Active Optical Cables	Ενεργά οπτικά καλώδια
<b>API</b>	Application programming interface	Διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών
<b>CPO</b>	Co-Packaged Optics	Συσκευασμένα Οπτικά
<b>DAC</b>	Digital-to-Analog Converter	Αποκωδικοποιητής ψηφιακού σήματος
<b>DACON</b>	Disaggregated Application-Centric Optical Network	Διακριτό οπτικό δίκτυο με επίκεντρο την εφ-αρμογή
<b>DC</b>	Data Centers	Κέντρα Δεδομένων
<b>DFB</b>	Distributed Feedback laser	Λέιζερ κατανεμημένης ανάδρασης
<b>DSP</b>	Digital Signal Processor	Επεξεργαστής ψηφιακού σήματος
<b>EOM</b>	Embedded Optic Modules	Ενσωματωμένες οπτικές μονάδες
<b>gRPC</b>	Google Remote Procedure Calls	Κλήση Απομακρυσμένης Διαδικασίας Google
<b>HDC</b>	Hyperscale Data Centers	Κέντρα δεδομένων τεράστιας κλίμακας
<b>HMC</b>	Hybrid Memory Cube	Υβριδικός Κύβος Μνήμης
<b>MONet</b>	Memory Over Network	Μνήμη μέσω Δικτύου
<b>NOS</b>	Network Operating System	Λειτουργικό Σύστημα Δικτύου
<b>TOR</b>	Top-of-Rack	Πάνω από τα Rack
<b>QAM</b>	Quadrature amplitude modulation	Τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους
<b>ODL</b>	OpenDaylight SDN Controller	Ελεγκτής OpenDaylight SDN
<b>OSM</b>	Optical Switch Module	Μονάδα οπτικού διακόπτη
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection	Ανοιχτό Σύστημα Διασύνδεσης
<b>QSFP</b>	Quad Small Form-factor pluggable	Δυνατότητα σύνδεσης τετραπλού μικρού συντελεστή μορφής
<b>PM</b>	Provisioning Manager	Διαχειριστής παροχής
<b>RRM</b>	Resource Reconfiguration Manager	Διαχειριστής επαναδιαθέτησης πόρων
<b>REQ</b>	Request	Αίτημα

<b>RM</b>	Remote Manager	Απομακρυσμένος Διαχειριστής
<b>MM</b>	Monitoring Manager	Διαχειριστής Παρακολούθησης
<b>SAL</b>	Services Abstraction Layer	Επίπεδο αφαίρεσης υπηρεσιών
<b>SDN</b>	Software Defined Networking	Δικτύωση Ορισμένη από λογισμικό
<b>VCSEL</b>	Vertical-Cavity Surface-Emitting laser	Λείζερ εκπομπής κατακόρυφης κοιλότητας
<b>WDM</b>	Wavelength division multiplexing	Πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος
<b>I/Os</b>	Inputs/Outputs	Είσοδος/Εξόδος



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΚΕΝΤΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (DATA CENTER)

### 1.1 Γενικά

Ένα Κέντρο Δεδομένων [Data Center (DC)] είναι ένας χώρος π.χ. ένα κτίριο, μέσα στο οποίο βρίσκονται υπολογιστές, διακομιστές (servers), τείχη προστασίας, συστήματα αποθήκευσης, ελεγκτές παράδοσης εφαρμογών, δικτυακός εξοπλισμός όπως switches, καθώς και καλώδια δικτύων ethernet και οπτικών ινών που τα διασυνδέουν. Τα στοιχεία αυτά, αποθηκεύουν και διαχειρίζονται κρίσιμα δεδομένα και εφαρμογές, ενώ η ασφάλεια κατά τον σχεδιασμό του κέντρου δεδομένων κρίνεται πολύ σημαντική. Όλα αυτά τα στοιχεία, συνθέτουν την υποδομή δικτύου, την υποδομή αποθήκευσης και τους υπολογιστικούς πόρους. Η υποδομή δικτύου συνδέει διακομιστές φυσικούς και εικονικούς (physical και virtual αντίστοιχα), παρέχει υπηρεσίες κέντρων δεδομένων, αποθηκεύει και εξασφαλίζει εξωτερική συνδεσιμότητα με την τοποθεσία του τελικού χρήστη. Στην υποδομή αποθήκευσης, αποθηκεύονται τα αρχεία και όλα όσα έχουν να κάνουν με το προϊόν που προσφέρεται στον χρήστη. Οι υπολογιστικοί πόροι είναι η επεξεργασία, η μνήμη, η τοπική αποθήκευση και η συνδεσιμότητα δικτύου των διακομιστών που χρησιμοποιούνται για τις εφαρμογές. Ένα DC συνήθως ασχολείται με το να αποθηκεύει, να επεξεργάζεται και να διαμοιράζει μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε πελάτες (clients) με την λογική client-server. Για παράδειγμα ένας πελάτης μπορεί να αποθηκεύσει τη ιστοσελίδα του ώστε να είναι προσβάσιμη από το διαδίκτυο ή να αποθηκεύσει κάποια αρχεία του.

## 1.1 Ιστορική Αναδρομή στα DC

Τα DC αποτελούν σήμερα τον εγκέφαλο που καθιστά δυνατές όλες τις υπηρεσίες web και cloud που χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο. Τέτοιες μεγάλες εγκαταστάσεις, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, περιλαμβάνουν έναν τεράστιο αριθμό διασυνδεδεμένων διακομιστών που αποθηκεύουν και επεξεργάζονται όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες στον παγκόσμιο ιστό και δημιουργούν εφαρμογές cloud/διαδικτύου που χρησιμοποιούμε σε καθημερινή βάση (π.χ. αποθήκευση cloud, ροή βίντεο, κοινή χρήση εικόνων και βίντεο, κοινωνικά δίκτυα κλπ.). Παρά το νεαρό ενός τέτοιου ψηφιακού διασυνδεδεμένου κόσμου, η προέλευση των κέντρων δεδομένων χρονολογείται από τις πρώτες μέρες της σύγχρονης πληροφορικής.

Η ιστορία των κέντρων δεδομένων ξεκίνησε στα μέσα του 1950 με την εμφάνιση των πρώτων εμπορικών υπολογιστών γενικής χρήσης, που ονομάζονταν mainframes. Κατασκευασμένοι από εταιρείες όπως η IBM, η Remington Rand ή η General Electric, οι mainframes ήταν οι πρώτοι υπολογιστές που χρησιμοποιήθηκαν από τις επιχειρήσεις για την επεξεργασία δεδομένων (Ceruzzi P. E. et al., 2015). Ωστόσο, λόγω του υψηλού κόστους τους, ακόμη και οι μεγάλες εταιρείες μπορούσαν συνήθως να αντέξουν οικονομικά μόνο ένα σύστημα. Με μεγέθη αρκετών τετραγωνικών μέτρων, τα mainframes τοποθετούνταν συνήθως σε ένα δωμάτιο υπολογιστών και μοιράζονταν από πολλούς χρήστες που εκτελούσαν διαφορετικές εργασίες. Η διαχείριση των πρώτων mainframes γινόταν μέσω καρτών διάτρησης ή χαρτοταινιών. Μεταγενέστερα mainframes, ακολουθούμενα από τερματικά, θα μπορούσαν να προσαρτηθούν στα κύρια συστήματα που θα ερμήνευαν τις εντολές τους μέσω ιδιόκτητων πρωτοκόλλων (Lee G. et al., 2014). Τις επόμενες δεκαετίες, τα υπολογιστικά συστήματα συρρικνώθηκαν γρήγορα σε μέγεθος.

Πρώτα, η εισαγωγή τρανζίστορ στερεάς κατάστασης, που αντικαθιστούσαν τους παραδοσιακούς σωλήνες, οδήγησε στη δημιουργία μικροϋπολογιστών. Η DEC ήταν μία από τις πρωτοπόρες εταιρείες που εμπορευματοποίησαν τέτοιους υπολογιστές το 1965. Λόγω του μειωμένου κόστους και το μέγεθός τους, οι επιχειρήσεις μπορούσαν να αντέξουν οικονομικά την αγορά πολλών μικρών υπολογιστών. Λίγα χρόνια αργότερα,

το 1971, η Intel παρουσίασε τον πρώτο μικροεπεξεργαστή. Η ηλεκτρονική ενσωμάτωση επέτρεψε τη δημιουργία πιο συμπαγών και λιγότερο δαπανηρών υπολογιστών κατάλληλων για τον τελικό χρήστη. Τέτοιες μηχανές ονομάστηκαν αρχικά microcomputers και εξελίχθηκαν στον γνωστό προσωπικό υπολογιστή [Personal Computer (PC)] που χρησιμοποιείται σήμερα. Έχοντας τη δυνατότητα να έχουμε έναν σταθμό εργασίας ανά χρήστη, εμφανίστηκε γρήγορα ξανά η έννοια της κοινής χρήσης πόρων. Το πρώτο εμπορικό σύστημα δικτύωσης που χρησιμοποιήθηκε ευρέως για τη διασύνδεση μικροϋπολογιστών ονομάστηκε Συνημμένο Δίκτυο Υπολογιστών Πόρων (ARCNET) και ανακοινώθηκε το 1977 από την Datapoint Corporation. Το ARCNET χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση σταθμών εργασίας τελικού χρήστη σε κοινόχρηστους πόρους αποθήκευσης και υπολογιστών. Με αυτόν τον τρόπο, οι χρήστες μπορούσαν να βασίζονται σε απλά και σχετικά φθηνά τερματικά, ενώ μοιράζονταν την ικανότητα επεξεργασίας και αποθήκευσης ισχυρότερων μηχανών (servers) που συνήθως τοποθετούνταν σε ειδικά δωμάτια. Σήμερα, αυτά τα δωμάτια ονομάζονται εταιρικά κέντρα δεδομένων.

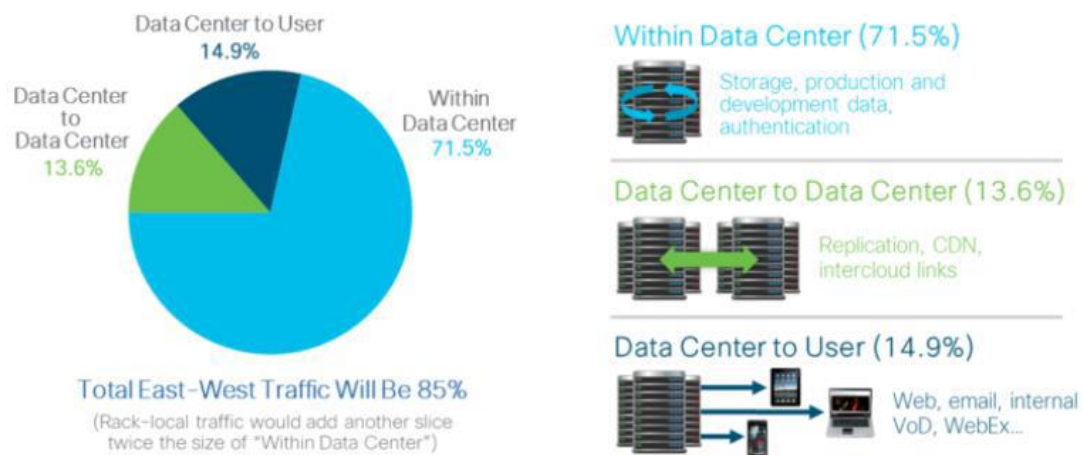
Η εμφάνιση του Διαδικτύου στα τέλη της δεκαετίας του '80 και η ιδέα του παγκόσμιου ιστού το 1990, οδήγησαν σε μια νέα εποχή διασύνδεσης του πλανήτη. Με το dot.com να λαμβάνει χώρα στα τέλη της δεκαετίας του '90, αναδύθηκε και η επιχείρηση των DC. Πολλές εταιρείες, σύλλογοι ακόμα και ιδιώτες απαιτούσαν μόνιμη παρουσία στο διαδίκτυο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, 1995-2000, ο αριθμός των ιστοσελίδων που υπήρχαν στον παγκόσμιο ιστό, αυξήθηκε από δεκάδες χιλιάδες σε περισσότερες από δέκα εκατομμύρια. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος, ήταν να δημιουργηθεί ένας μεγάλος αριθμός εγκαταστάσεων DC για να φιλοξενήσει τους αμέτρητους ιστότοπους και τις υπηρεσίες ιστού που εμφανίζονται σε καθημερινή βάση. Από τότε, η επίσκεψη στο διαδίκτυο και οι απαιτήσεις κίνησης σε κέντρα δεδομένων δεν έχουν σταματήσει να αυξάνονται (Netcraft, 2009).

### 1.3 Σύγχρονα DC

Η τεράστια ανάπτυξη της κοινωνικής δικτύωσης και της ανταλλαγής δεδομένων, μέσω του cloud και των έξυπνων φορητών συσκευών έχουν επιφέρει αντίστοιχη αύξηση της κίνησης σε επίπεδο IP, καθώς επίσης και της αντίστοιχης των DC. Η κίνηση αυτή που στα τέλη του 2016 υπολογιζόταν στα 6 ZB ετησίως, το έτος 2021 εκτινάχθηκε στα 19.5 ZB.

Το γεγονός αυτό, τονίζει την ανάγκη για μαζική και άμεση πρόσβαση σε δεδομένα, υπολογισμούς και αποθηκευτικούς πόρους, κάτι που καθιστά σαφές πως η βιωσιμότητα των DC είναι άμεσα συνυφασμένη με την αποδοτική τους λειτουργία.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, λόγω της φύσης των εφαρμογών, τουλάχιστον το 71.5% της συνολικής κίνησης παραμένει εσωτερικά των DC, η οποία αποδίδεται με το όρο «east-west traffic». Επιπλέον, το 14.9% αφορά την εισερχόμενη-εξερχόμενη κίνηση από αυτά, δηλαδή την κίνηση μεταξύ DC και χρήστη (user), που αποδίδεται με τον όρο «North-South» και τέλος το 13.6% περιλαμβάνει την κίνηση μεταξύ των DC (Inter-DC traffic).



Source: Cisco Global Cloud Index, 2016-2021

**Εικόνα 1.1:** Data Center Traffic βάση προορισμού. [8]



**Εικόνα 1.2:** Διάγραμμα κίνησης δεδομένων σε Data Centers. [8]

Οι απαιτήσεις αυτές μπορούν να εκπληρωθούν μόνο με την αξιοποίηση και περαιτέρω εξέλιξη των διασυνδέσεων εντός (Intra) αλλά και μεταξύ (Inter) των DC.

Οι διασυνδέσεις αυτές που μέχρι και την περασμένη δεκαετία υλοποιούνταν με καλώδια χαλκού, τα τελευταία χρόνια έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από καλώδια οπτικών ινών, κάνοντας πλέον λόγο για οπτικές διασυνδέσεις των DC. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα εγγενή πλεονεκτήματα που εμφανίζουν οι οπτικές ίνες έναντι του χαλκού, ακόμη και των πιο εξελιγμένων εμπορικών εκδοχών του τελευταίου, όπως για παράδειγμα τα καλώδια Cat6a-Cat7, με τα οποία επιτυγχάνονται ταχύτητες λίγο μεγαλύτερες από τα 10 Gbps μόνο για μικρές αποστάσεις (short-distances). Αντιθέτως, η χρήση των οπτικών ινών μας επιτρέπει να φτάσουμε σε μερικές εκατοντάδες Gbps και σε συχνότητες της τάξης των THz.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες, έναντι των καλωδίων χαλκού συνοψίζονται ως εξής:

- Ανοσία σε Η/Μ παρεμβολές.
- Πολύ μικρότερη διάμετρος
- Υψηλές ταχύτητες μετάδοσης.
- Μεγάλα εύρη ζώνης.
- Μετάδοση σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις.

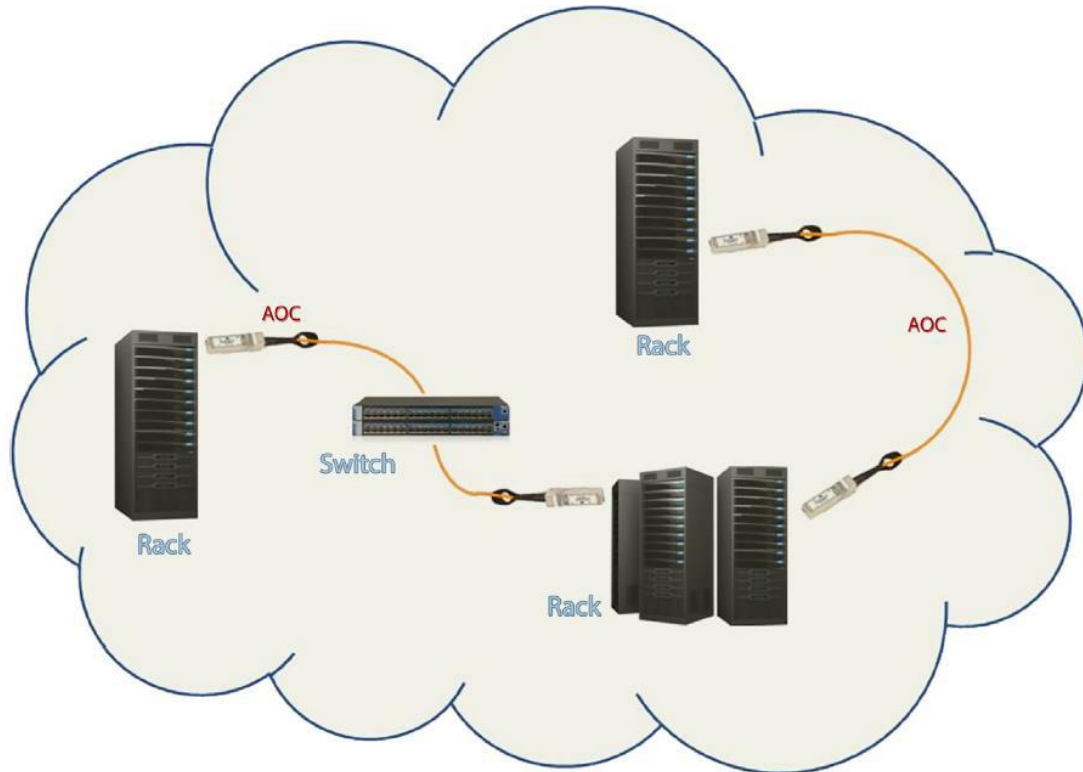
Όσον αφορά τα είδη των διασυνδέσεων που απαντώνται στα DC, διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες:

- On-board.
- Board-to-board.
- Rack-to-rack.

Η πρώτη κατηγορία αφορά τις διασυνδέσεις που εντοπίζονται σε έναν server board. Ένας τυπικός server board περιλαμβάνει ξεχωριστές υποδοχές (sockets), μνήμες για κατανεμημένη επεξεργασία δεδομένων, έναν κεντρικό δρομολογητή για δρομολόγηση δεδομένων μεταξύ επεξεργαστών, καθώς επίσης και μία σειρά από I/Os για την επικοινωνία αυτών των επεξεργαστών με το υπόλοιπο δίκτυο του DC. Οι οπτικές διασυνδέσεις γίνονται με τη χρήση των Embedded Optic Modules(EOM).

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει εκείνες τις διασυνδέσεις όπου τα δεδομένα μεταφέρονται από ένα board σε ένα άλλο, το οποίο ανήκει στο ίδιο back-plane.

Στην τρίτη κατηγορία περιλαμβάνονται οι διασυνδέσεις μεταξύ των Top-of-Rack (TOR) Switches μεταξύ διαφορετικών Racks, οι οποίες υλοποιούνται τόσο με τη χρήση ενδιάμεσων switches, όσο και με τη χρήση Active Optical Cables (AOCs).

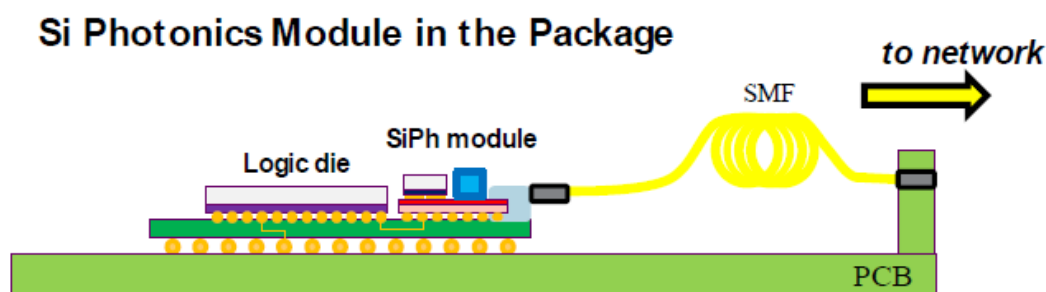


**Εικόνα 1.3:** Διασύνδεση rack-to-rack με τη χρήση διακοπών (switches) και AOCs.

Τα AOCs έχουν αντικαταστήσει τα τελευταία χρόνια τα «παραδοσιακά» χάλκινα καλώδια που χρησιμοποιούνταν κατά κύριο λόγο -και εν μέρει εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται - σε τέτοιες διασυνδέσεις, παρουσιάζοντας σαφή πλεονεκτήματα έναντι των τελευταίων. Πρόκειται για καλώδια οπτικών ινών, που καταλήγουν σε διεπαφές υψηλών προδιαγραφών, παρέχοντας τη δυνατότητα «στέγασης» τόσο του transmitter όσο και του receiver στο ίδιο συμπαγές εξάρτημα, το οποίο πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει τα standards των Ethernet, Fibre Channel, InfiniBand, SONET/SDH.[36]

Σήμερα, οι τρόποι οπτικών διασυνδέσεων σε συνδυασμό με τα οπτικά καλώδια που χρησιμοποιούνται, μπορούν να υποστηρίξουν εφαρμογές με τα εξής χαρακτηριστικά: 100G Ethernet, Fibre Channel>32G, InfiniBand>40G.

Ακόμα και η μετάβαση από τις πρώιμες λύσεις των stand-alone transceivers σε on-board transceivers δεν δύναται να καλύψει τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις και τους στόχους της νέας εποχής. Πλέον, η state-of-the art τεχνολογία υποδεικνύει τη χρήση in-package optical I/O, όπου το σύνολο των ενεργών και παθητικών στοιχείων είναι co-integrated στο ίδιο chip, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4.



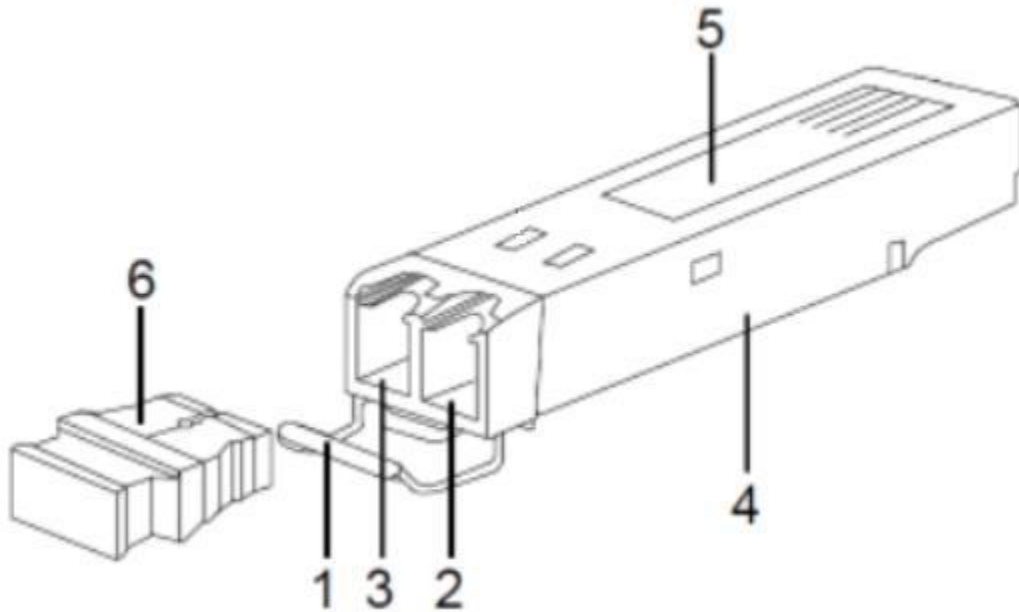
**Εικόνα 1.4:** In-package Optical I/O.

Αρκετά είδη παράλληλων οπτικών διεπαφών έχουν υιοθετηθεί τα τελευταία χρόνια, προκειμένου να ανταποκρίνονται στις υψηλές απαιτήσεις, όπως αυτές διαμορφώνονται λαμβάνοντας υπόψιν παραμέτρους όπως το εύρος ζώνης, η κατανάλωση ενέργειας, το συνολικό κόστος και η απόσταση μετάδοσης.

Αυτή τη στιγμή έχουν επικρατήσει δύο είδη εμπορικά διαθέσιμων διεπαφών. Η πρώτη, περιλαμβάνει ένα σύστημα 12 καναλιών (μηκών κύματος) που αποτελείται από έναν οπτικό πομπό και έναν οπτικό δέκτη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού αποτελούν οι Multiple-Fiber Push-On/Pull-Off connectors (MPOs). Η δεύτερη, περιλαμβάνει ένα σύστημα πομποδέκτη (transceiver) ικανό να εκπέμπει και να λαμβάνει τέσσερα κανάλια στην ίδια διάταξη. Η διάταξη που είναι αντιπροσωπευτική της κατηγορίας αυτής είναι ο Quad Small Form-factor pluggable (QSFP/QSFP+/QSFP28) hot-pluggable transceiver.



Στην Εικόνα 1.5 παρουσιάζονται τα κυριότερα μέρη που συνιστούν έναν αντίστοιχο transceiver (SFP/SFP+).



**Εικόνα 1.5:** Δομή ενός οπτικού πομποδέκτη SFP/SFP+.

1. Μάνταλο
2. Οπτικός δέκτης
3. Οπτικός πομπός
4. Κέλυφος πομποδέκτη
5. Επιγραφή
6. Βύσμα σκόνης

Ο ρυθμός μετάδοσης ανά κανάλι έχει πλέον υπερβεί τα 26Gb/s και φτάνει τα 56 Gb/s ή ακόμη και τα 112 Gb/s, σε κάποιες περιπτώσεις.

## 1.4 Χαρακτηριστικά-Αρχιτεκτονικές των DC.

Τα DC, όπως αναφέρθηκε, είναι πρακτικά τεράστιες εγκαταστάσεις που περιλαμβάνουν δεκάδες χιλιάδες διασυνδεδεμένους δρομολογητές, διακόπτες, τείχη προστασίας, συστήματα αποθήκευσης, διακομιστές και ελεγκτές παράδοσης εφαρμογών. Οι διεργασίες που υλοποιούνται εντός αυτών περιλαμβάνουν υπολογισμούς, αποθήκευση και δικτύωση, υποστηρίζοντας ποικίλες εφαρμογές όπως είναι οι content-servers (YouTube, Microsoft, Apple), οι μηχανές αναζήτησης και το e-business. Απαιτείται σημαντική υποδομή για την υποστήριξη τόσο του υλικού (hardware) όσο και του λογισμικού (software). Η υποδομή αυτή περιλαμβάνει υποσυστήματα ισχύος, τροφοδοτικά UPS, εξαιρισμό, συστήματα ψύξης, συστήματα καταστολής πυρκαγιάς, εφεδρικές γεννήτριες και συνδέσεις με εξωτερικά δίκτυα. Επίσης, υλοποιεί πολιτικές ασφαλείας των εργαζομένων οι οποίοι μπορούν να έχουν πρόσβαση στους χώρους μόνο μετά από εξουσιοδότηση με χρήση ειδικών διαπιστευτηρίων.

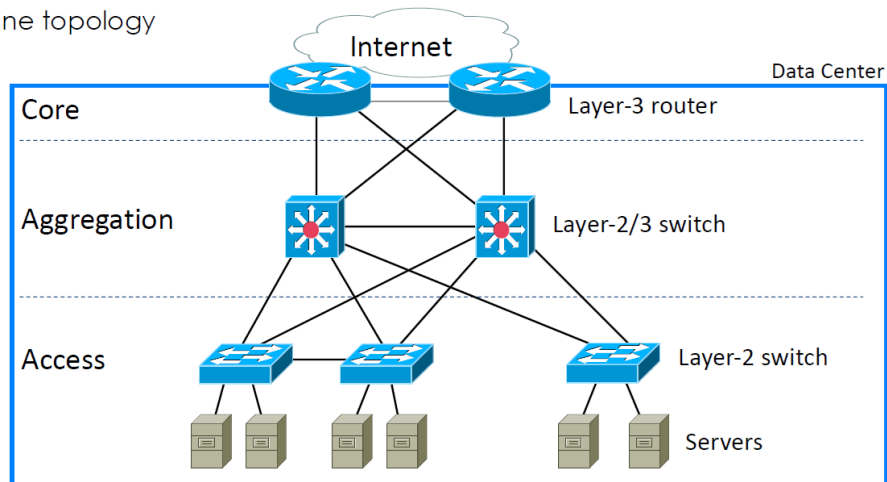
Ο σχεδιασμός ενός DC, συμπεριλαμβανομένων και των υποδομών αυτού, βασίζεται σε καθορισμένα πρότυπα. Το πιο διαδεδομένο πρότυπο είναι το ANSI/TIA-942. Η πιστοποίηση του προτύπου αυτού διασφαλίζει τη συμμόρφωση με μία από τις τέσσερις κατηγορίες βαθμίδων κέντρων δεδομένων που έχουν βαθμολογηθεί για επίπεδα πλεονασμού και ανοχής σφαλμάτων.

Συνολικά, σε ένα DC διακρίνονται οι εξής δομές:

- I. Υποδομή δικτύου (Network infrastructure). Εδώ συνδέονται οι διακομιστές (physical/virtual), οι υπηρεσίες κέντρου δεδομένων, η αποθήκευση και η εξωτερική συνδεσιμότητα με τοποθεσίες τελικού χρήστη (end-user locations).
- II. Υποδομή αποθήκευσης (Storage infrastructure). Τα συστήματα αποθήκευσης χρησιμοποιούνται για τη συγκράτηση του όγκου των δεδομένων.
- III. Υπολογιστικοί πόροι. Οι διακομιστές (servers) παρέχουν την επεξεργασία, την μνήμη, την τοπική αποθήκευση και τη σύνδεση δικτύου, που συνολικά «οδηγούν» τις εφαρμογές.

Η αρχική αρχιτεκτονική ενός DC περιελάμβανε ένα σύνολο από servers, switches και routers, ιεραρχικά δομημένων, βάση της τοπολογίας Leaf & Spine, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.6. Σύμφωνα με την εν λόγω αρχιτεκτονική, η διαστρωμάτωση αυτών διακρίνονταν στα εξής στρώματα: Access, Aggregation & Core.

▪ Leaf & Spine topology



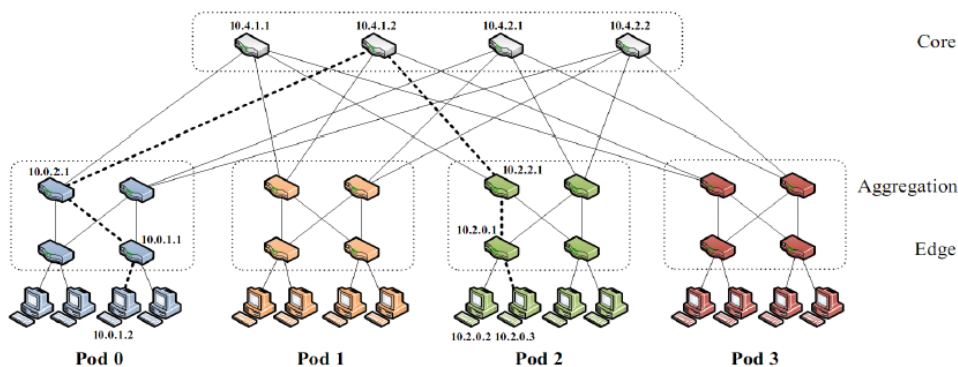
**Εικόνα 1.6:** Τοπολογία Leaf & Spine.[13]

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τέτοιου είδους τοπολογίες, γνωστές και ως tree-based topologies, αφορούν κυρίως την χαμηλή απόδοση, την έλλειψη ανοχής σε σφάλματα και κυρίως την ύπαρξη ίδιων boxes (routers/switches) αλλά και ίδιων bandwidth links. Παρά τις όποιες προσπάθειες για βελτίωση, όπως για παράδειγμα η προσπάθεια να επιτευχθεί speed hierarchy μέσω της χρήσης λιγότερο ακριβών boxes κορυφής, δεν επέφεραν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Προβλήματα όπως η εξάρτηση από δρομολογητές υψηλού κόστους, η εξαιρετικά περιορισμένη χωρητικότητα (capacity) μεταξύ των servers, η έλλειψη απομόνωσης απόδοσης και η έλλειψη αξιοπιστίας, οδήγησαν στην εξέλιξη της τοπολογίας Leaf&Spine (Tree) στην αποκαλούμενη Fat-Tree. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν ειδικό τύπο Clos Network, αποτελούμενο από τρία στρώματα: edge, aggregation & core.

Τα πλεονεκτήματα της εν λόγω τοπολογίας συνοψίζονται ως εξής:

- 1) Παρατηρείται το ίδιο εύρος ζώνης σε οποιοδήποτε bisection.
- 2) Σε κάθε στρώμα υπάρχει συγκέντρωση του ίδιου εύρους ζώνης.
- 3) Δύναται να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας σχετικά φθηνές συσκευές, ομοιόμορφης χωρητικότητας.
- 4) Κάθε θύρα (port) υποστηρίζει ίδια ταχύτητα με τον τερματικό κεντρικό υπολογιστή (end host).
- 5) Όλες οι συσκευές μπορούν να μεταδίδουν με ταχύτητα γραμμής, εάν τα πακέτα διανέμονται ομοιόμορφα στις διαθέσιμες διαδρομές.
- 6) Μεγάλη επεκτασιμότητα (scalability). Συγκεκριμένα, ένας διακόπτης k-θυρών υποστηρίζει  $k^3/4$  διακομιστές (servers).

Η τοπολογία Fat-Tree απεικονίζεται ενδεικτικά στην Εικόνα 1.7, για μεταγωγείς 4 θυρών (port switches).



**Εικόνα 1.7:** Τοπολογία Fat-Tree για 4 διακόπτες θύρας.[13]

Φυσικά, οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις, δημιουργούν νέα προβλήματα-προκλήσεις ακόμα και σε αυτές τις τοπολογίες. Αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στην άνιση χρήση εφαρμογών, στην έλλειψη ύπαρξης εφεδρικών διακομιστών και στην υψηλή αβεβαιότητα της ζήτησης. Για το λόγο αυτό, η πλέον σύγχρονη τάση αρχιτεκτονικής ενός DC, προσανατολίζεται σε ένα Υβριδικό μοντέλο, τα αποκαλούμενα Hyperscale Data Centers (HDCs). Ο όρος «Hyperscale» αναφέρεται

στην ικανότητα που έχει η αρχιτεκτονική υπολογιστών προκειμένου να κλιμακώνει (scaling) ευρέως και ταχύτατα, έτσι ώστε να ανταποκριθεί στο επίπεδο ζήτησης. Οι υπολογιστές βασίζονται σε πόρους εντός ενός δεδομένου κόμβου ή συνόλου αυτών. Η κλιμάκωση κάποιου μέρους της αρχιτεκτονικής του υπολογιστή σημαίνει αύξηση της υπολογιστικής ικανότητας, της μνήμης, της υποδομής δικτύωσης και των πόρων αποθήκευσης. Αυτά επιτυγχάνονται μέσω της δυναμικής επέκτασης, της χρήσης virtual machines και disk images, καθώς επίσης και μέσω της επικοινωνίας με άλλους servers, ανεξαρτήτως του εάν βρίσκονται εντός του DC.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

### 2.1 Γενικά

Οι επικοινωνίες υπολογιστών ξεκίνησαν χρησιμοποιώντας χάλκινα καλώδια σαν το μέσο για τη διάδοση των ηλεκτρικών σημάτων από τον έναν υπολογιστή στον άλλον. Το χάλκινο καλώδιο σαν μέσο έχει έναν σημαντικό αριθμό από περιορισμούς και τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικές έρευνες για τη χρήση εναλλακτικών μέσων για τις επικοινωνίες υπολογιστών όπως είναι η οπτική ίνα. Τα οπτικά δίκτυα είναι τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μεγάλης χωρητικότητας τα οποία βασίζονται πάνω σε οπτικές τεχνολογίες οι οποίες προσφέρουν δρομολόγηση, διάφορες υπηρεσίες καθώς επίσης και αποκατάσταση σε επίπεδο μήκους κύματος όπως κάνουν και άλλες υπηρεσίες βασισμένες στο μήκος κύματος.

## 2.2 Τι είναι ένα Οπτικό Δίκτυο

Οι οπτικές ίνες είναι ουσιαστικά πολύ λεπτά νήματα τα οποία μεταδίδουν τα φέροντα σήματα με τη μορφή του φωτός (οπτικά σήματα). Ένα οπτικό δίκτυο ενώνει υπολογιστές μεταξύ τους μέσω οπτικών ινών. Για την εγκαθίδρυση μιας τέτοιας επικοινωνίας, ένα οπτικό δίκτυο μπορεί να περιλαμβάνει επίσης και άλλα οπτικά στοιχεία για την παραγωγή οπτικών σημάτων από κάποια ηλεκτρικά σήματα, για την επαναφορά οπτικών σημάτων μετά από την διάδοση μέσω κάποιας οπτικής ίνας καθώς επίσης και για τη δρομολόγηση οπτικών σημάτων μέσα στο δίκτυο. Τα οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούνται ευρέως στις επικοινωνίες υπολογιστών λόγω του εύρους ζώνης που προσφέρουν χρησιμοποιώντας την τρέχουσα τεχνολογία των 20 terabit/second. Τα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς με απλά λόγια αντικατέστησαν τα χάλκινα καλώδια με οπτικές ίνες. Υπάρχουν όμως κάποιες διαφορές ανάμεσα στα χάλκινα καλώδια και στις οπτικές ίνες ως μέσα επικοινωνίας, οι οποίες είναι οι εξής:

- Οι οπτικές συσκευές είναι ακριβές σε σχέση με άλλες ηλεκτρονικές συσκευές και για αυτό το λόγο θα πρέπει να γίνεται σωστή χρήση των οπτικών μέσων δικτύωσης.
- Ένας αριθμός οπτικών σημάτων τα οποία μεταδίδονται σε διαφορετικά μήκη κύματος μπορούν να διαδοθούν ταυτόχρονα πάνω στην ίδια οπτική ίνα.
- Η ταχύτητα με την οποία τα οπτικά σήματα μπορούν να διαδίδονται είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με εκείνη της επεξεργασίας των δεδομένων σε ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς λαμβάνουν υπόψη τις διαφορές που αναφέρθηκαν παραπάνω και τις εφαρμόζουν στις οπτικές συσκευές και στις τεχνολογίες δικτύωσης. Η τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί πολλαπλά οπτικά σήματα πάνω στην ίδια οπτική ίνα ονομάζεται πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (wavelength division multiplexing – WDM).

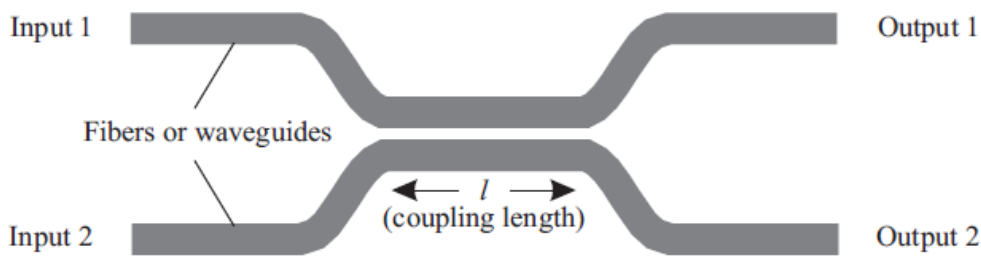
Τα οπτικά είναι ένας ευρεία διαδεδομένος τρόπος διάδοσης και προτιμάται στα σημερινά δίκτυα καθώς επίσης και η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος είναι μια τεχνική διάδοσης που χρησιμοποιείται στα δίκτυα. Τα οπτικά δίκτυα παρέχουν περισσότερες λειτουργίες διάδοσης πέρα από την σημείο σε σημείο (point-to-point) διάδοση. Μεγάλο πλεονέκτημα των οπτικών δικτύων είναι η ενσωμάτωση των λειτουργιών της δρομολόγησης και της μεταγωγής, οι οποίες λειτουργούσαν στα ηλεκτρονικά κυκλώματα, στα οπτικά δίκτυα.

### 2.3 Δικτυακός εξοπλισμός ενός Οπτικού Δικτύου

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε ένα σύγχρονο οπτικό επικοινωνιακό δίκτυο περιλαμβάνει συζεύκτες, φωτοαισθητήρες, οπτικούς ενισχυτές καθώς επίσης φίλτρα και πολυπλέκτες. Οι συζεύκτες είναι ένας εξοπλισμός ο οποίος συνδυάζει ή διαχωρίζει οπτικά σήματα.

#### 2.3.1 Συζεύκτες

Ένας κατευθυντικός οπτικός συζεύκτης χρησιμοποιείται για τον συνδυασμό ή τον διαχωρισμό σημάτων σε ένα οπτικό δίκτυο. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα ένα 2x2 οπτικός συζεύκτης αποτελείται από δύο πόρτες εισόδου και δύο πόρτες εξόδου. Οι πιο συνηθισμένοι συζεύκτες αποτελούνται από τη σύνθεση δύο οπτικών ινών στο μέσο. Οι συζεύκτες μπορούν επίσης να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας κυματοδηγούς σε μια ολοκληρωμένη δομή ενός οπτικού δικτύου. Όπως φαίνεται στην εικόνα, ένας 2x2 συζεύκτης λαμβάνει ένα όριο  $a$  της ισχύς από την είσοδο 1 και το εναποθέτει στην έξοδο 1 και το υπολειπόμενο όριο  $1-a$  το εναποθέτει στην έξοδο 2. Με παρόμοιο τρόπο, ένα όριο  $1-a$  της ισχύς από την είσοδο 2 το εναποθέτει στην έξοδο 1 και την υπολειπόμενη ισχύ την εναποθέτει στην έξοδο 2. Το  $a$  καλείται επίσης και λόγος σύζευξης.

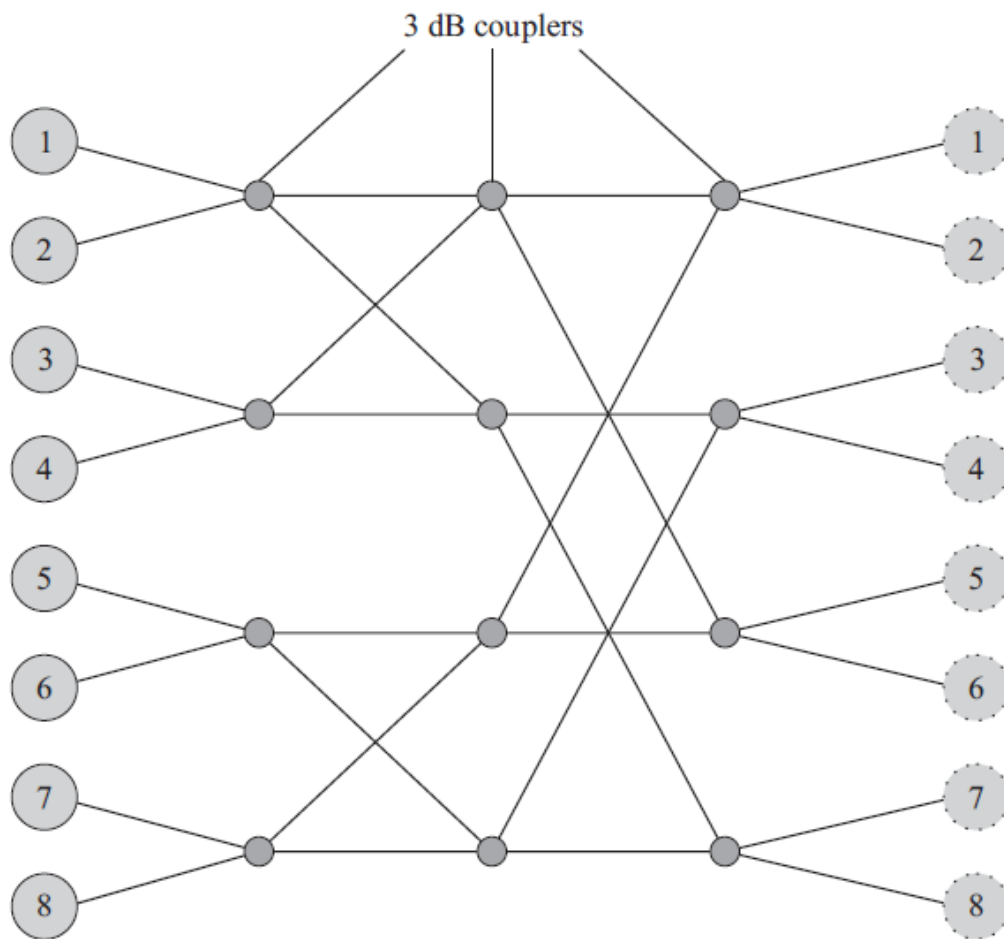


**Εικόνα 2.1:** Κατευθυντικός συζεύκτης

Ο συζεύκτης μπορεί να σχεδιαστεί να είναι είτε επιλεκτικός ως προς το μήκος κύματος είτε να είναι ανεξάρτητος από το μήκος κύματος, το οποίο κάποιες φορές καλείται και επίπεδο ως προς το μήκος κύματος. Σε ένα οπτικό δίκτυο το οποίο είναι επιλεκτικό ως προς το μήκος κύματος ο παράγοντας  $\alpha$  εξαρτάται από το μήκος κύματος, ενώ σε οπτικό δίκτυο το οποίο είναι ανεξάρτητο του μήκους κύματος ο παράγοντας  $\alpha$  δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος.

Ένας συζεύκτης είναι συστατικό με πολλές χρήσεις και έχει πολλές εφαρμογές μέσα σε ένα οπτικό δίκτυο. Η πιο απλή εφαρμογή που έχει ένας συζεύκτης σε ένα οπτικό δίκτυο είναι ο συνδυασμός ή ο διαχωρισμός σημάτων μέσα στο δίκτυο. Ένας  $n \times n$  συζεύκτης τύπου αστέρα είναι η γενικότερη εικόνα ενός  $2 \times 2$  συζεύκτη τύπου αστέρα των 3 dB. Πρόκειται για ένα συζεύκτη  $n$ -εισόδων και  $n$ -εξόδων με την ιδιότητα ότι η ισχύς από κάθε είσοδο διαχωρίζεται ίσα μεταξύ των εξόδων. Ένας τέτοιο συζεύκτης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.





**Εικόνα 2.2:** Συζεύκτης τύπου αστέρα με 8 εισόδους και 8 εξόδους κατασκευασμένος από συζεύκτες των 3 dB.

### 2.3.2 Μεταγωγείς

Οι οπτικοί μεταγωγείς (switches) σε ένα οπτικό δίκτυο έχουν διάφορες εφαρμογές. Οι διάφορες εφαρμογές, όπως φαίνεται και στην παρακάτω πίνακα, απαιτούν διαφορετικούς χρόνους μεταγωγής και αριθμό από πόρτες μεταγωγής. Μια εφαρμογή των οπτικών μεταγωγέων είναι η παροχή διαδρομών φωτός σε ένα οπτικό δίκτυο. Σε αυτή την εφαρμογή οι μεταγωγείς χρησιμοποιούνται στις διασυνδέσεις μήκους κύματος για την επαναδιαμόρφωση τους έτσι ώστε να υποστηρίξουν νέες διαδρομές φωτός.

<b>Εφαρμογή</b>	<b>Απαιτούμενος Χρόνος Μεταγωγής</b>	<b>Αριθμός Πορτών</b>
<b>Παροχή Διαδρομής Φωτός</b>	<b>1-10 ms</b>	<b>&gt;1000</b>
<b>Προστασία Μεταγωγής</b>	<b>1-10 ms</b>	<b>1-1000</b>
<b>Μεταγωγή Πακετών</b>	<b>1 ns</b>	<b>&gt; 100</b>
<b>Εξωτερική Διαμόρφωση</b>	<b>10 ps</b>	<b>1</b>

**Πίνακας 2.1:** Εφαρμογές μεταγωγών, συνδιάστικα με το απαιτούμενο χρόνο και τον αριθμό πορτών.

Μια άλλη εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται οι μεταγωγείς, είναι στην προστασία της μεταγωγής. Σε αυτή την εφαρμογή οι μεταγωγείς χρησιμοποιούνται για να αλλάξουν τη ροή της κίνησης από μια πρωτεύουσα οπτική ίνα σε μια δευτερεύουσα οπτική σε περίπτωση που η πρωτεύουσα αποτύχει. Όλη αυτή η λειτουργία θα πρέπει να έχει υλοποιηθεί σε ένα διάστημα των milliseconds στο οποίο θα πρέπει να έχει γίνει η ανίχνευση του σφάλματος, η επικοινωνία με το κατάλληλο συστατικό του δικτύου το οποίο θα διαχειριστεί το σφάλμα και ο χρόνος μεταγωγής. Ο χρόνος μεταγωγής που απαιτείται είναι και αυτός της τάξης των milliseconds.

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή των μεταγωγέων είναι η οπτική μεταγωγή πακέτων στα δίκτυα. Σε αυτά τα δίκτυα, οι μεταγωγείς χρησιμοποιούνται για την εναλλαγή των σημάτων από πακέτο σε πακέτο. Σε αυτή την εφαρμογή, ο χρόνος μεταγωγής θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερος από τη διάρκεια ενός πακέτου και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να γίνει η χρήση πολύ μεγαλύτερων μεταγωγέων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ DC ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟ ΠΟΡΩΝ

### 3.1 Τεχνικές Διαμόρφωσης Im-DD Συστημάτων Άμεσης Ανίχνευσης (Im-DD) και Διαμόρφωσης Έντασης

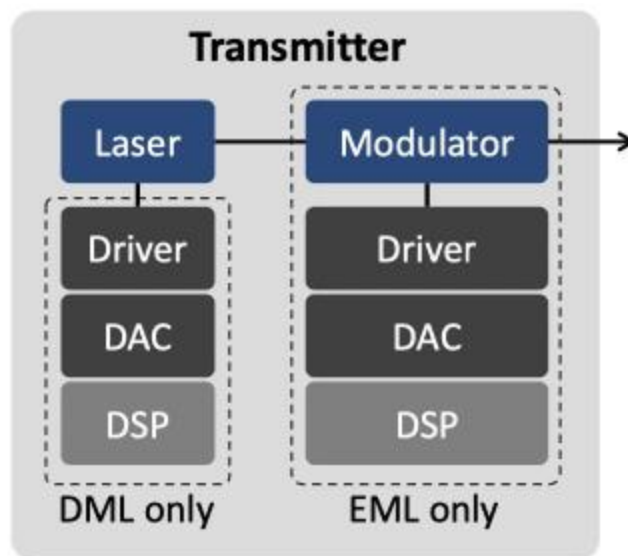
Τα οπτικά συστήματα βασίζονται σε διαφορετικές προσεγγίσεις μετάδοσης ανάλογα με τις απαιτήσεις των συγκεκριμένων τμημάτων του εκάστοτε δικτύου. Τα δίκτυα που τοποθετούνται στα τμήματα μικρών αποστάσεων συνήθως επωφελούνται από το χαμηλό κόστος των πομποδεκτών IM-DD, οι οποίοι μεταδίδουν πληροφορίες χρησιμοποιώντας την ένταση φωτός.

#### 3.1.1. Πομπός Im-DD

Η δομή ενός γενικού πομπού IM-DD φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Όπως απεικονίζεται, ένας πομπός IM-DD μπορεί να έχει δύο διαφορετικές υλοποιήσεις: άμεσα διαμορφωμένο λέιζερ (DML) και ένα έμμεσα ή εξωτερικά διαμορφωμένο λέιζερ (EML). Οι πομποί DML διαμορφώνουν την ένταση φωτός οδηγώντας απευθείας το τμήμα απολαβής του ίδιου του λέιζερ. Αυτή η προσέγγιση απλοποιεί τη μονάδα πομπού, η οποία δεν απαιτεί εξωτερικό διαμορφωτή. Ωστόσο, κατά τη διαμόρφωση του τμήματος απολαβής του λέιζερ, η πυκνότητα του φορέα σε αυτή την περιοχή αλλάζει και έτσι αλλάζει και ο δείκτης διάθλασης του υλικού, ο οποίος παράγει διακυμάνσεις της φωτεινής φάσης. Μια τέτοια διαδικασία οδηγεί στο λεγόμενο «chirp», το οποίο προκαλεί φασματική διεύρυνση και ως εκ τούτου, μειώνει την εμβέλεια λόγω της χρωματικής διασποράς.

Από την άλλη πλευρά, οι πομποί EML χρησιμοποιούν έναν εξωτερικό διαμορφωτή (modulator). Επιπλέον, οι εξωτερικοί διαμορφωτές προσφέρουν συνήθως υψηλότερο εύρος ζώνης από τα άμεσα διαμορφωμένα λέιζερ. Και στις δύο περιπτώσεις, το ηλεκτρικό σήμα παρέχεται από ένα Digital-to-Analog Converter (DAC), κυρίως όταν χρησιμοποιούνται μορφές διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων, που συνήθως

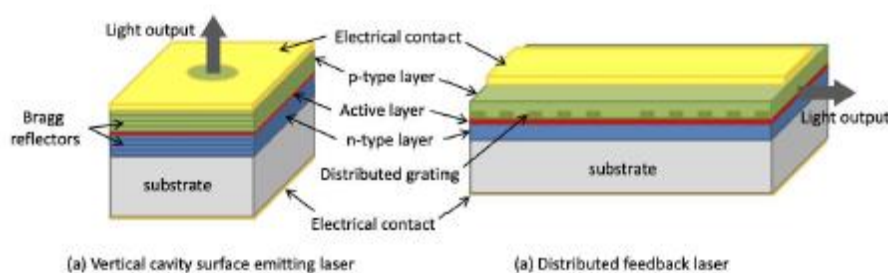
ακολουθούνται από έναν ενισχυτή, ώστε να παρέχεται αρκετή ταλάντευση κατά τη διαδικασία της διαμόρφωσης. Η συμβολή του DSP στην πλευρά του πομπού είναι σχεδόν αμελητέα. Κανονικά, σχήματα διαμόρφωσης πλάτους παλμού, χρησιμοποιούν μόνο DSP για να κωδικοποιήσουν τα δεδομένα για την τελευταία διόρθωση σφαλμάτων προς τα εμπρός. Ωστόσο, άλλες προσεγγίσεις διαμόρφωσης όπως η διαμόρφωση πλάτους παλμού σε σχήμα παλμού DMT, CAP ή Nyquist απαιτούν άλλα περαιτέρω μπλοκ πομπού DSP.



**Εικόνα 3.1:** Generic block diagram of an IM-DD transmitter (Nokia Bell-Labs, 2016)

**Laser:** Βρίσκουμε κυρίως δύο είδη λέιζερ ημιαγωγών σε μονάδες DV: VCSEL και DFB. Το πρώτο, το VCSEL, είναι το πιο συνηθισμένο στις μέρες μας λόγω του χαμηλού κόστους κατανάλωσης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2(α), η κοιλότητα αυτού του λέιζερ είναι χτισμένη κατακόρυφα, τοποθετώντας το ενεργό στρώμα ανάμεσα σε δύο ανακλαστικές Bragg (πάνω και κάτω). Ως εκ τούτου, το φως εξάγει το λέιζερ από την επάνω επιφάνεια του τσιπ, γεγονός που καθιστά δυνατή τη δοκιμή λέιζερ on-wafer, μειώνοντας έτσι το κόστος παραγωγής και την εύκολη σύζευξη με το MMF. Το γεγονός αυτό μειώνει επίσης το κόστος συσκευασίας. Αυτά τα λέιζερ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των συνδεδεμένων μονάδων μικρής απόστασης (SR) τα οποία συνδέονται μέσω MMF επιτρέποντας τη μετάδοση λίγων εκατοντάδων μέτρων.

Από την άλλη πλευρά, τα DFB είναι λέιζερ εκπομπής άκρων, τα οποία είναι κατασκευασμένα κατά μήκος του πλακιδίου. Η κοιλότητα αποτελείται από ένα περιοδικό πλέγμα, το οποίο λειτουργεί ως ανακλαστήρας τοποθετημένος κατά μήκος του ενεργού στρώματος, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο λειτουργία μονής διαμήκους λειτουργίας, βλ. Εικόνα 3.2(β). Αν και τα λέιζερ DFB παρουσιάζουν διπλάσιο κόστος από τα VCSEL (Mahgerefteh D. et al., 2016), πολλαπλά DFB μπορούν να ενσωματωθούν μαζί με διαμορφωτές και πολυπλέκτες μήκους κύματος. Με αυτόν τον τρόπο πολλά κανάλια μήκους κύματος μπορούν να δημιουργηθούν από ένα μόνο τσιπ, το οποίο μπορεί να συζευχθεί με το SMF. Οι τελευταίες ερευνητικές εργασίες έχουν αναφέρει εύρος ζώνης διαμόρφωσης περίπου 30 GHz, τόσο τα VCSEL (Haglund E. et al., 2015) όσο και για τα DFB (Zhang Z. et al., 2015), επιτρέπουν την διαμόρφωση 56-64 Gb/s (Kuchta D. et al., 2014).

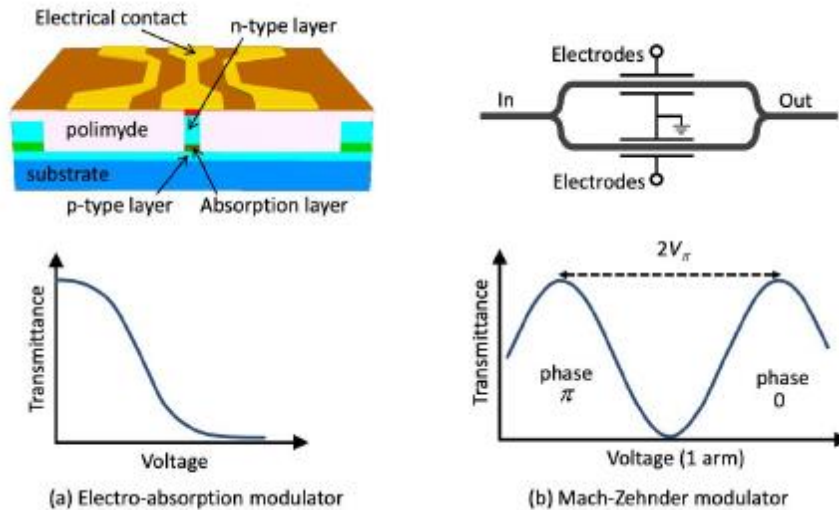


**Εικόνα 3.2:** (a) a VCSEL and (b) a DFB laser. (Nokia Bell-Labs, 2016)

**Modulator:** Μεγαλύτερα εύρη ζώνης μπορούν συνήθως να επιτευχθούν όταν χρησιμοποιούνται εξωτερικοί διαμορφωτές. Βρίσκουμε δύο κύρια είδη διαμορφωτών στους σημερινούς οπτικούς εμπορικούς πομπούς: EAM και ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή Mach-Zehnder (MZM). Στο EAM η ένταση του φωτός εισόδου διαμορφώνεται αλλάζοντας τον συντελεστή απορρόφησης ενός ημιαγωγού III-V (π.χ. δομή InPGaAsP για 1550 nm) εφαρμόζοντας μια εξωτερική τάση/ρεύμα, καμπύλη μετάδοσης-τάσης στην Εικόνα 3.3 (α, κάτω τμήμα). Ως εκ τούτου, η δομή είναι παρόμοια με αυτή ενός λέιζερ ημιαγωγών, ωστόσο, το ενεργό στρώμα χρησιμοποιείται για απορρόφηση αντί για παροχή κέρδους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3 (α, πάνω τμήμα). Τέτοιες συσκευές κρίνονται πολύ ελκυστικές για εφαρμογές χαμηλού κόστους επειδή παρουσιάζουν μικρό αποτύπωμα, χαμηλές τάσεις (<2 V) και μπορούν να ενσωματωθούν με λέιζερ DFB, παρέχοντας μικροσκοπικούς πομπούς EML. Επιπλέον,

το EAM μπορεί να επιτύχει εύρη ζώνης διαμόρφωσης πέραν των 50 GHz. (Neophotonics, 2016).

Από την άλλη πλευρά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3β, στο MZM το φως διαμορφώνεται μέσω της παρεμβολής που δημιουργείται σε ένα συμβολόμετρο Mach-Zehnder δύο βραχιόνων. Σε μια τέτοια δομή, η σχετική φάση μεταξύ των δύο βραχιόνων διαμορφώνεται αλλάζοντας τον δείκτη διάθλασης των κυματοδηγών μέσω ενός ηλεκτρο-οπτικού φαινομένου. Αυτό επιτρέπει την πρόκληση οποιασδήποτε αυθαίρετης παρεμβολής, καμπύλη μετάδοσης-τάσης στην Εικόνα 3.3. Ως εκ τούτου, τέτοιες δομές μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε IM-DD όσο και σε σύμφωνους πομπούς. Παραδοσιακά, τα εμπορικά MZM κατασκευάζονται ως επί το πλείστον σε νιοβικό λίθιο (LiNbO<sub>3</sub>), προσφέροντας περισσότερα από 30 GHz εύρους ζώνης 3-dB3 με τάσεις  $(V\pi)^4$  μεταξύ 3 και 4 V. Ωστόσο, έχουν εμφανιστεί νέες πλατφόρμες φωτονικής ολοκλήρωσης, επιτρέποντας την κατασκευή μικρότερων και πιο οικονομικά αποδοτικών συσκευών. Η δεύτερη πλατφόρμα ολοκλήρωσης που εμφανίστηκε ήταν το φωσφίδιο του ινδίου (InP), το οποίο παρέχει στη MZM το μισό μέγεθος του LiNbO<sub>3</sub> και μειωμένο  $V\pi$  (1,5-2,5 V), ενώ επιτρέπει εύρη ζώνης διαμόρφωσης της τάξης των 40 GHz. Έχουν αναφερθεί σήμερα διαμορφωτές MZM με βάση το πυρίτιο που παρουσιάζουν εύρη ζώνης μεταξύ 30 και 40 GHz. Τέλος, η πιο πρόσφατη πλατφόρμα που εμφανίστηκε βασίζεται σε πολυμερή υλικά, τα οποία έχουν τη δυνατότητα για εξαιρετικά μεγάλα εύρη ζώνης διαμόρφωσης (έως 100 GHz). (Groumas P. et. al., 2016).



**Εικόνα 3.3:** (a) Exemplary illustration of an EAM and (b) Schematic of a MZM.

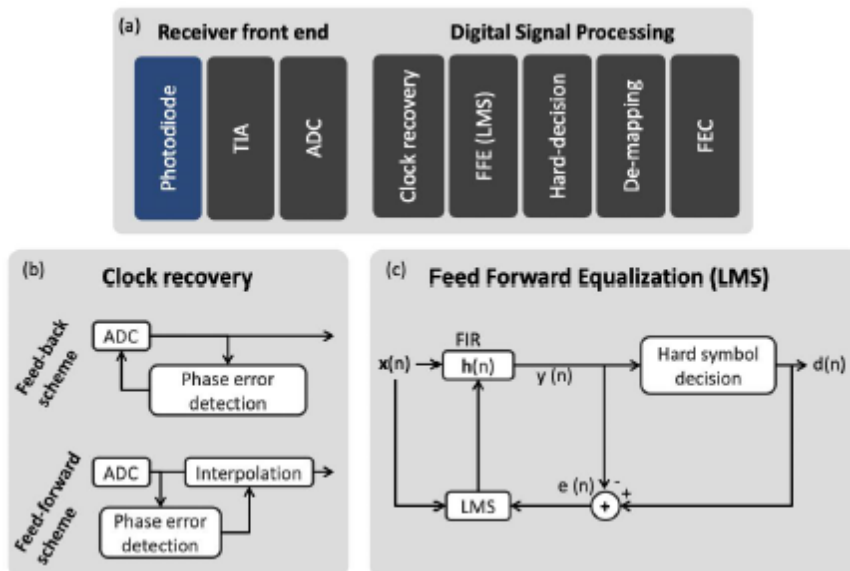
(Nokia Bell-Labs, 2016)

**Electrical Generator:** Εδώ και μερικά χρόνια, οι DAC υψηλής ανάλυσης χρησιμοποιούνται σε σύμφωνες τεχνολογίες για τη δημιουργία όλων των ειδών προηγμένων μορφών διαμόρφωσης και σχημάτων παλμών. Ωστόσο, τώρα θα απαιτούνται DAC σε πομπούς IM-DD για να μπορούν να δημιουργούν μορφές διαμόρφωσης πλάτους παλμών πολλαπλών επιπέδων (PAM) και ίσως στο μέλλον ακόμη πιο πολύπλοκα σχήματα διαμόρφωσης όπως το DMT. Ωστόσο, οι εμπορικοί DAC που διατίθενται στην αγορά είναι ένας από τους πιο περιοριστικούς παράγοντες κατά τη στόχευση ρυθμών υψηλής ταχύτητας. Οι τελευταίες γενιές DAC μπορούν να επιτύχουν αρκετά υψηλά ποσοστά δειγματοληψίας. Για παράδειγμα, η Socionext/Fujitsu ανέπτυξε ένα DAC 8-bit με δυνατότητα δειγματοληψίας στα 92 GS/s (σε CMOS), ενώ η Micram προσφέρει ένα DAC ανάλυσης 6-bit 72-GS/s ενσωματωμένο σε SiGe. Ωστόσο, το εύρος ζώνης τους περιορίζεται στα 20-25 GHz. Επιπλέον, η ταλάντευση εξόδου τους είναι μικρότερη από 1 V<sub>pp</sub> (τάση κορυφής σε κορυφή). Ως εκ τούτου, τυπικά προγράμματα ενισχυτών πρέπει να χρησιμοποιούνται ώστε να κινηθούν οι διαμορφωτές. Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία InP DHBT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη εύρους ζώνης άνω των 50 GHz ενώ εξάγει ηλεκτρικά σήματα πάνω από 4,5 V<sub>pp</sub> (Godin J. et al., 2008), αποφεύγοντας έτσι τη χρήση εξωτερικών ενισχυτών.

### 3.1.2 Δέκτης Im-DD

Η δομή του δέκτη φαίνεται στην Εικ. 3.4(α). Όπως απεικονίζεται, στα σχήματα άμεσης ανίχνευσης οι δέκτες υλοποιούνται χρησιμοποιώντας μια φωτοδίοδο, η οποία μετατρέπει την οπτική ένταση σε ηλεκτρικά σήματα και χρησιμοποιεί ένα ADC για τη μετατροπή σημάτων από αναλογικό σε ψηφιακό. Στη συνέχεια, μια ορισμένη ποσότητα DSP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση του σήματος.

**Front End Δέκτης:** Οι πιο συνηθισμένες φωτοδιόδους είναι η PIN και η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (APD), όπου η τελευταία περιλαμβάνει μια πρόσθετη περιοχή στη συμβατική δομή ημιαγωγού PIN στην οποία ο αριθμός των αγωγίμων ηλεκτρονίων αυξάνεται εκθετικά (περιοχή χιονοστιβάδας). Άρα παρέχει κέρδη μίας τάξης μεγέθους υψηλότερης από τις συμβατικές φωτοδιόδους PIN. Από την άλλη πλευρά, οι APD εμφανίζουν μεγαλύτερο κόστος και κατανάλωση, γεγονός που μαζί με την υψηλότερη αξιοπιστία και το μικρότερο αποτύπωμα των φωτοδίοδων PIN, καθιστά τις τελευταίες πιο συχνά χρησιμοποιούμενες σε ένα κέντρο δεδομένων. Στη συνέχεια, απαιτείται TIA για την ενίσχυση του ανιχνευόμενου σήματος. Σήμερα, πολύ γρήγορες φωτοδιόδους μπορούν να βρεθούν στην αγορά. (Vasilakopoulos K. et al., 2015).



**Εικόνα 3.4:** α) διάγραμμα ενός γενικού δέκτη IM-DD που περιλαμβάνει μια γενική περιγραφή της αλυσίδας DSP. (β) Απεικόνιση δύο πιθανών διαμορφώσεων για την



εκτέλεση ανάκτησης ρολογιού. (γ) Σχήμα της διαδικασίας εξισορρόπησης και προσαρμογής τροφοδοσίας. (Nokia Bell-Labs, 2016)

Όσον αφορά τα ADC, εξελίσσονται σε εμπορικά προϊόντα παρόμοια με τα DAC. Έχουν αναφερθεί ADC 56, 92 και 100 GS/s, ωστόσο προσφέρουν περιορισμένα εύρη ζώνης που ξεπερνούν ελαφρώς τα 20 GHz. Συνήθως, οι ερευνητικές διεργασίες υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιούν παλμογράφους μεγάλου εύρους ζώνης, ικανούς για δειγματοληψία στα 80 GS/s, 160 GS/s ή ακόμα και 200 GS/s.

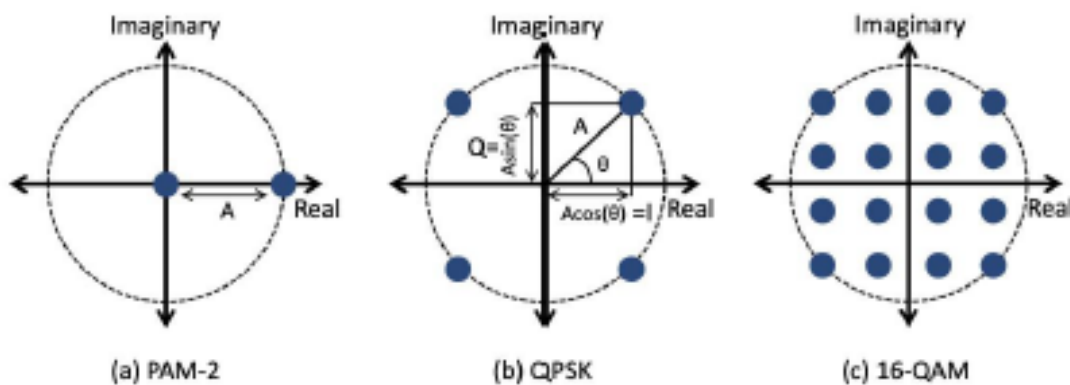
**Επεξεργασία ψηφιακού σήματος:** Αν και οι πραγματικοί δέκτες IM-DD περιλαμβάνουν λίγες λειτουργίες DSP, οι επερχόμενες διεπαφές υψηλής ταχύτητας που υποστηρίζουν υπηρεσίες διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων ενδέχεται να απαιτούν επεξεργασία ψηφιακού σήματος για την επιτυχή ανάκτηση σήματος λόγω της χαμηλότερης αντοχής τους σε θόρυβο και παραμορφώσεις. Τα βασικά μπλοκ DSP ενός προηγμένου δέκτη IM-DD φαίνονται στην Εικ. 3.4(α). Το πρώτο μπλοκ της αλυσίδας DSP είναι η ανάκτηση ρολογιού, η οποία ανακτά τη συχνότητα μεταξύ πομπού και δέκτη καθώς και τον σωστό χρονισμό συμβόλων δηλαδή τη φάση. Όπως φαίνεται στην Εικ. 3.4(β), μπορούμε να βρούμε δύο γενικές διαμορφώσεις για την ανάκτηση ρολογιού: ένα σχήμα ανάδρασης, στο οποίο το ρολόι του ADC επαναδιευθύνεται μέσω ενός βρόχου κλειδώματος φάσης (PLL) και το σχήμα τροφοδοσίας προς τα εμπρός. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές ανίχνευσης φάσης ανάλογα με τις απαιτήσεις του πομποδέκτη. Τα συστήματα IM-DD συνήθως χρησιμοποιούν χαμηλής πολυπλοκότητας και γρήγορα σχήματα, (όπως οι Alexander J. et al., 1975, Mueller K. et al., 1976 ή Hogge C. et al., 1985).

Μετά την ανάκτηση ρολογιού, η εξισορρόπηση προς τα εμπρός (FFE) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση γραμμικών βλαβών (π.χ. περιορισμοί εύρους ζώνης πομποδέκτη). Η Εικ. 3.4(ε) δείχνει μία τυπική δομή FFE χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του μέσου ελαχίστου τετραγώνου (LMS). Στο LMS, το σήμα διέρχεται από ένα φίλτρο ή πεπερασμένης παλμικής απόκρισης N-taps (FIR), το οποίο ενημερώνεται προσαρμοστικά.

### 3.2 Σύμφωνοι Πομποδέκτες

Σε σύμφωνα συστήματα τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν τόσο σε πλάτος όσο και σε φάση του οπτικού σήματος. Η Εικόνα 3.5 απεικονίζει μερικούς παραδειγματικούς αστερισμούς που σχεδιάζονται σε ένα σύνθετο επίπεδο, συμπεριλαμβανομένων πραγματικών και φανταστικών αξόνων. Η Εικόνα 3.5(α) δείχνει έναν αστερισμό PAM-2, αποδεικνύοντας το γεγονός ότι τα σχήματα διαμόρφωσης έντασης απαιτούν μόνο έναν άξονα (π.χ. πραγματικό άξονα) του μιγαδικού επιπέδου.

Από την άλλη πλευρά, σε σύμφωνα συστήματα χρησιμοποιούνται δύο διαστάσεις: πλάτος και φάση. Για να σχεδιάσουμε τέτοιου είδους δισδιάστατους αστερισμούς χρειαζόμαστε το πλήρες μιγαδικό επίπεδο. Η Εικόνα 3.5(β) δείχνει έναν αστερισμό μετατόπισης φάσης τετραγωνισμού (QPSK), στον οποίο οι πληροφορίες κωδικοποιούνται κατά μήκος τεσσάρων ισαπεχόντων φάσεων ( $\theta$ ) τοποθετημένες στο ίδιο επίπεδο πλάτους ( $A$ ).



**Εικόνα 3.5:** (α) Αστερισμοί PAM-2, (β) QPSK και (γ) 16-QAM αστερισμοί, που σχεδιάζονται στο μιγαδικό επίπεδο συμπεριλαμβανομένων πραγματικών και φανταστικών αξόνων. (Nokia Bell-Labs, 2016)

Στο προηγούμενο σχήμα διαμόρφωσης (QPSK), τα δεδομένα κωδικοποιούνται ακριβώς στη φάση του οπτικού σήματος. Ωστόσο, το πλάτος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα για τη μεταφορά δεδομένων που οδηγούν στην οικογένεια των αστερισμών QAM. Η Εικόνα 3.5(c) αντιπροσωπεύει έναν αστερισμό 16-QAM, ο

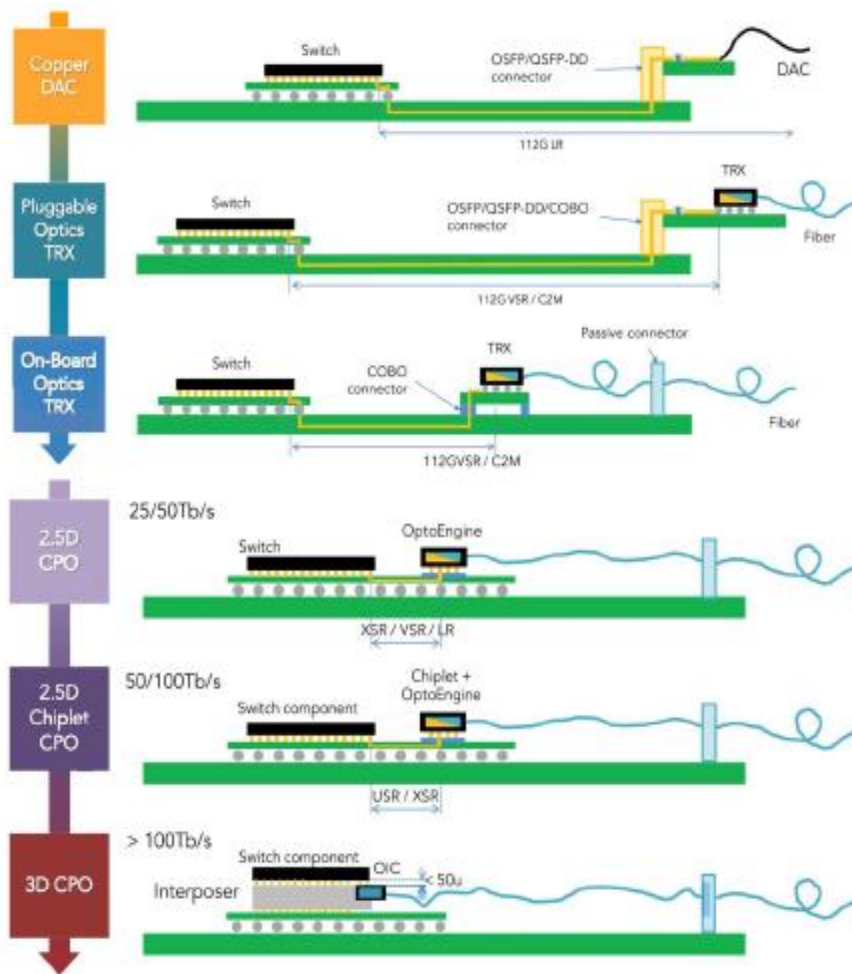
οποίος χρησιμοποιεί 16 σύμβολα σε ίση απόσταση τοποθετημένα σε διαφορετικούς συνδυασμούς πλάτους και φάσης στο μιγαδικό επίπεδο. Η αύξηση της σειράς των αστερισμών (αριθμός συμβόλων) επιτρέπει υψηλή φασματική απόδοση, δηλ. μπορούν να μεταδοθούν περισσότερα bit μέσα σε ένα μόνο χρονοσύμβολο. Για παράδειγμα, οι αστερισμοί 16-QAM επιτρέπουν τη μετάδοση διπλάσιου αριθμού bit ανά σύμβολο από το QPSK (2 bit/σύμβολο).

### 3.3. Co-Packaged Τεχνολογίες

Οι οπτικές ζεύξεις υψηλής χωρητικότητας, υψηλής πυκνότητας, ισχύος και οικονομικής απόδοσης είναι αναμφίβολα κρίσιμης σημασίας για την υποδομή και τον διαχωρισμό των πόρων των DC.

Έχει αποδειχτεί η χρησιμότητα αρκετών εφαρμογών co-packaged οπτικών, για οπτικά πολλαπλών τρόπων λειτουργίας (Cook C. et al., 2003; Hasharoni K. et al., 2013; Kuchta D., 2019; Knebel P. et al., 2019), καθώς και οπτικών μονής λειτουργίας (Meade R. et al., 2019; Intel, 2020). Για να βοηθήσουν στην ευθυγράμμιση της ανάπτυξης CPO με τις ανάγκες των χειριστών κέντρων δεδομένων, η Microsoft και το Facebook ξεκίνησαν τη Συνέργεια Co-Packaged Optics. Ο κλάδος δεν έχει ακόμη επιτύχει πλήρη ευθυγράμμιση με το CPO. Πολλά ερωτήματα συνεχίζουν να συζητούνται.

Σαφώς, υπάρχει σημαντική αδράνεια που πρέπει να ξεπεραστεί κατά τη μετακίνηση από ένα καθιερωμένο, αποδεδειγμένο μοντέλο ανάπτυξης σε ένα που εξακολουθεί να είναι γεμάτο αβεβαιότητα. Εναπόκειται στους υποστηρικτές του CPO να ξεπεράσουν τα τεχνικά εμπόδια και να βρουν αποδεκτές απαντήσεις στις ερωτήσεις όσων έχουν αμφιβολίες για τα πλεονεκτήματα που παρέχει. [7]



**Εικόνα 3.6:** Ο οδικός χάρτης CPO που απεικονίζει τα αυξανόμενα επίπεδα ενοποίησης των οπτικών και του διακόπτη ASIC. Αυτή η αναπαράσταση εστιάζει στη γραμμική απόσταση μεταξύ οπτικών και ASIC, αλλά σημειώστε ότι μία από τις βασικές μετρήσεις για λύσεις CPO είναι η πυκνότητα εύρους ζώνης κατά μήκος της περιμέτρου του διακόπτη.[7]

Η προτιμώμενη αρχιτεκτονική CPO βασίζεται στην προσέγγιση ολοκλήρωσης 2.5D που φαίνεται στην Εικόνα 3.6, στην οποία πολλαπλές υποδοχές CPO συναρμολογούνται γύρω από την περίμετρο ενός υποστρώματος με το διακόπτη ASIC τοποθετημένο στη μέση.

Η τρέχουσα προτίμηση, τείνει προς τις εξωτερικές πηγές λέιζερ που τοποθετούνται σε πρόσοψη για την αντιμετώπιση των διαδεδομένων ανησυχιών σχετικά με την αξιοπιστία του λέιζερ και το θερμικό περιβάλλον.

Αυτές οι εξωτερικές πηγές λέιζερ μπορούν να αξιοποιήσουν τους υπάρχοντες παράγοντες, όπως το QSFP-DD και το OSFP, παρόλο που οι ηλεκτρικές συνδέσεις υψηλής ταχύτητας δεν θα χρησιμοποιηθούν. Για να μειωθεί η έκταση της επιφάνειας πρόσοψης που απαιτείται από τα λέιζερ, ζητούνται νέες λύσεις που έχουν τον οπτικό σύνδεσμο στο πίσω μέρος της μονάδας λέιζερ, έτσι ώστε να μην χρειάζονται εξωτερικά καλώδια patch (και πρόσθετες υποδοχές εισόδου).

Για να μειωθεί ο αριθμός των μονάδων λέιζερ και ο αριθμός των ινών που παρέχουν οπτική ισχύ εισόδου, είναι πλεονεκτικό για κάθε μονάδα λέιζερ να τροφοδοτεί πολλά κανάλια χρησιμοποιώντας λέιζερ υψηλότερης ισχύος.

Καθώς ο στόχος για τα CPO είναι η παραγωγή διακοπών 51,2 Tb/s, η πυκνότητα ενσωμάτωσης πρέπει να είναι επαρκής για να φιλοξενήσει έως και 512x100G κανάλια μαζί με ένα τσιπ διακόπτη σε ένα υποστρώμα διαστάσεων 100 mm x 100 mm έως 150 mm x 150 mm. Υπογραμμίζεται, ότι το μέγεθος του υποστρώματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 100 mm x 100 mm. Το μέγεθος του υποστρώματος καθορίζεται κυρίως από τον ηλεκτρικό σύνδεσμο, δηλαδή από το βήμα και τη διάταξη της ηλεκτρικής επαφής. [6]

Η μείωση της ισχύος από μόνη της μπορεί να μην είναι αρκετή για την υιοθέτηση των CPO. Ως εκ τούτου, τα CPO θα πρέπει να στοχεύουν στην επίτευξη επιτακτικής μείωσης της τιμής όσον αφορά τα συνδεδεμένα οπτικά. Οι οπτικοί κινητήρες θα πρέπει να επιτύχουν μια μέση τιμή πώλησης (ASP) που είναι σαφώς χαμηλότερη από τις τρέχουσες προβλέψεις των ASP για οπτικά 400G-DR4 από <1,20\$/Gbps το 2021 σε <0,60\$ το 2024. [LightCounting, 2020]

Εκτιμάται ότι είναι εφικτή μια μείωση κατά 50% σε επίπεδο συστήματος στο κόστος ανά χωρητικότητα σε σύγκριση με τα συνδεδεμένα οπτικά, που προκύπτει από ενσωματωμένα PIC πολλών καναλιών με ενσωματωμένους κυματοδηγούς, διαμορφωτές, ανιχνευτές, πολυπλέκτες και ευθυγραμμισμένη σύνδεση ινών. Επιπλέον, εκτός από περισσότερη ενοποίηση, η επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων παραγωγής PIC θα είναι πρωταρχικής σημασίας.

Η εξάλειψη του τσιπ CDR αντιπροσωπεύει επίσης μία σημαντική εξοικονόμηση κόστους. Επιπλέον, οι θύρες CPO δεν απαιτούν συμβατικά περιβλήματα μονάδων, συνδέσμους, χρονομετρητές, ακριβά προηγμένα υλικά PCB εξαιρετικά χαμηλών απωλειών ή λύσεις καλωδίων «flyover».

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΔΙΚΤΥΩΣΗ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΗ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ (SDN) ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ DC

### 4.1. Έννοια του SDN και Αρχιτεκτονική SDN για Οπτικά Δίκτυα

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της δικτύωσης ορισμένης από λογισμικό (SDN) είναι ο διαχωρισμός του control και του data plane αντίστοιχα. Το control και το data plane αποτελούν τα βασικά συστατικά οποιασδήποτε αρχιτεκτονικής δικτύου. Το επίπεδο ελέγχου (control plane) αφορά τη λογική της συμπεριφοράς του ελέγχου και της προώθησης.

Οι κύριες λειτουργίες του περιλαμβάνουν:

- Την παρακολούθηση αλλαγών τοπολογίας.
- Την εγκατάσταση κανόνων προώθησης.
- Τις υπολογιστικές διαδρομές.
- Την παροχή υπηρεσιών.

Το δεύτερο και εξίσου βασικό στοιχείο είναι το επίπεδο διαχείρισης το οποίο μερικές φορές θεωρείται ως υποσύνολο του επιπέδου ελέγχου. Σε γενικές γραμμές, η διοίκηση προγραμματίζει τις λειτουργίες που είναι υπεύθυνες για τη διαμόρφωση, την παρακολούθηση και την παροχή υπηρεσιών διαχείρισης σε όλα τα επίπεδα του δικτύου αλλά και σε άλλα τμήματα του συστήματος. (A.Shalimov et al., 2013[1])

Το επίπεδο δεδομένων αφορά το τμήμα δικτύου που προωθεί την κίνηση του εκάστοτε χρήστη. Η διαβίβαση βασίζεται σε κανόνες που καθορίζονται από το επίπεδο ελέγχου. Άλλες λειτουργίες που σχετίζονται με το επίπεδο δεδομένων είναι:

- ✓ Το φιλτράρισμα.
- ✓ Το buffer.
- ✓ Η καταμέτρηση πακέτων κλπ.

Στην περίπτωση του SDN, το επίπεδο ελέγχου εντοπίζεται συγκεντρωμένο, ελέγχει ένα καταναμημένο επίπεδο του data plane και μπορεί να εφαρμοστεί πλήρως στο λογισμικό και να εγκατασταθεί στο υλικό. Ως εκ τούτου, ένα SDN μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία δικτύωση ή ένα δίκτυο ορισμένο από λογισμικό. Η αποσύνδεση του επιπέδου ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων καθιστά προγραμματιζόμενο το επίπεδο ελέγχου, επιτρέποντας έτσι την αφαίρεση των υποκείμενων συσκευών δικτύου από τα επίπεδα εφαρμογής και υπηρεσιών, τα οποία με τη σειρά τους αντιμετωπίζονται ως εικονική οντότητα. Εκτός από την αφαίρεση δικτύου, η αρχιτεκτονική SDN παρέχει ένα σύνολο από διασυνδέσεις προγραμματισμού των εφαρμογών (API) που απλοποιούν την υλοποίηση κοινών υπηρεσιών δικτύου όπως:

- Η δρομολόγηση.
- Η πολυεκπομπή.
- Η ασφάλεια.
- Ο έλεγχος πρόσβασης.
- Η διαχείριση εύρους ζώνης.
- Η ενεργειακή απόδοση.
- Μορφές διαχείρισης πολιτικής.

Αυτός ο διαχωρισμός παρέχει μια πιο ευέλικτη, προγραμματιζόμενη, οικονομικά αποδοτική και καινοτόμο δικτυακή αρχιτεκτονική (Azodolmolky et al., 2013[1]). Το SDN αποτελεί ένα τρόπο προσέγγισης και επίλυσης διαφόρων προβλημάτων του Διαδικτύου, όπως η ασφάλεια, η διαχείριση της πολυπλοκότητας, η πολλαπλή χύτευση, η εξισορρόπηση φορτίου και η ενεργειακή απόδοση. Ο διαχωρισμός του υλικού προώθησης από τη λογική ελέγχου επιτρέπει ευκολότερα την ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων και εφαρμογών, τη διαχείριση και την ενοποίηση των διαφόρων μέσω ελέγχου του λογισμικού (Bruno Astuto A. et al., 2014). Αντί να επιβάλλονται πολιτικές και να εκτελούνται πρωτόκολλα σε διαφορετικές layer devices, το δίκτυο απλοποιείται και μειώνεται η προώθηση στα παραπάνω.

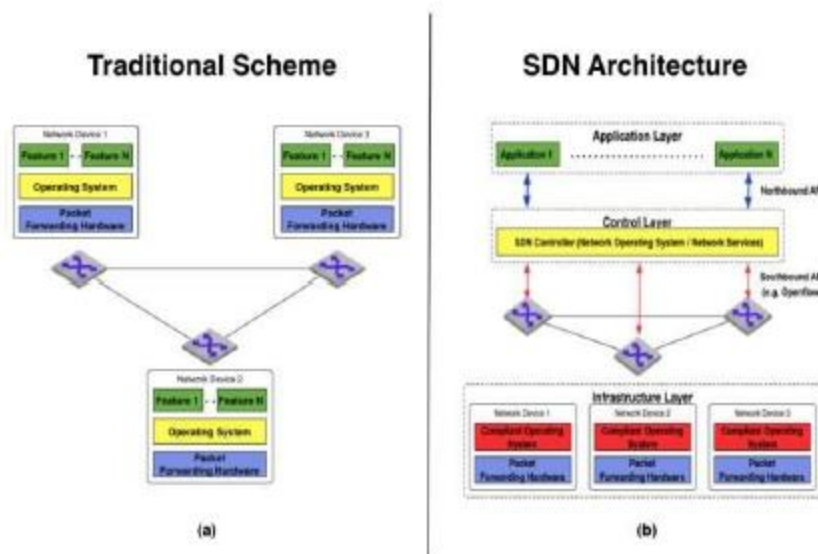
Σήμερα υπάρχουν πολλοί οργανισμοί που εστιάζουν μέρος της έρευνας τους στην τυποποίηση του SDN. Για παράδειγμα, το Open Network Foundation (ONF) επικεντρώνεται στην τυποποίηση πρωτοκόλλου Open Flow.



Ο βασικός στόχος της αρχιτεκτονικής SDN είναι να επιτευχθεί ο διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων. Επιπρόσθετα, το SDN υποστηρίζει ανοικτές διεπαφές μεταξύ των συσκευών στο επίπεδο ελέγχου αλλά και στο επίπεδο δεδομένων αντίστοιχα. Επιπλέον δίνει τη προγραμματισμού από εξωτερικές εφαρμογές γεγονός που μας προσφέρει ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία.

## 4.2 Από τα παραδοσιακά δίκτυα στο SDN

Στα παραδοσιακά δίκτυα, συνδυάζονται τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων. Κάθε κόμβος είναι υπεύθυνος για δύο λειτουργίες.. Το επίπεδο ελέγχου είναι υπεύθυνο για τη διαμόρφωση των κόμβων και τον προγραμματισμό της διαδρομής. Μόλις καθοριστούν οι διαδρομές, προωθούνται στο ακριβώς από κάτω επίπεδο, δηλαδή στο επίπεδο των δεδομένων. Παραδείγματα υφιστάμενων κόμβων δικτύου που επιτυγχάνουν την παραπάνω διαδικασία είναι τα Ethernet switches. (Diego Kreutz et al., 2014).



**Εικόνα 4.1:** Παραδοσιακή αρχιτεκτονική VS SDN. (Goswami, 2017)

Ένα Ethernet switch λειτουργεί στο επίπεδο της σύνδεσης του data link layer του μοντέλου OSI (Open Systems Interconnection) και είναι κατασκευασμένο από αμφότερα επίπεδα. Οι θύρες που χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση εισερχόμενης και εξερχόμενης κίνησης αντιπροσωπεύουν το επίπεδο δεδομένων (data plane). Αυτά

ελέγχονται και ρυθμίζονται από τη λογική ελέγχου, που περιέχει τη λογική προώθησης του μεταγωγέα (switch). Το σημαντικό μέρος της λογικής ελέγχου είναι ο πίνακας προώθησης (forwarding table) ο οποίος περιέχει μια λίστα με διευθύνσεις MAC που συσχετίζονται με την αντίστοιχη θύρα. Βάσει των κανόνων που αναπαρίστανται στον συγκεκριμένο πίνακα, η κίνηση μεταφέρεται είτε στην κατάλληλη θύρα είτε διασκορπίζεται σε περίπτωση που δεν υπάρχει αντιστοιχία. Η λίστα υψηλών επιδόσεων των λειτουργιών του switch περιλαμβάνει: τις ρυθμίσεις προτεραιότητας, το φιλτράρισμα MAC (mac filtering), τον έλεγχο υγιούς σύνδεσης (link health check), τις ρυθμίσεις VLAN (settings) κλπ. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα switches και τα άλλα δομικά στοιχεία του δικτύου συνδυάζονται σε κατακεντρωμένη (distributed) αρχιτεκτονική προσφέροντας σε σύγκριση με τη συγκεντρωτική (centralized) αρχιτεκτονική την δυνατότητα κλιμάκωσης και πλεονασμό. Αντίθετα, τα δίκτυα ελέγχου σε αποσυνδεδεμένες αρχιτεκτονικές είναι πιο κοντά στα δίκτυα πελάτη-εξυπηρετητή. Οι συσκευές προώθησης έχουν περιορισμένες δυνατότητες λήψης αποφάσεων και εφαρμόζουν στις αποφάσεις που λαμβάνουν οι controllers. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι αλλαγές διαμόρφωσης και άλλες ενημερώσεις ισχύουν μόνο με την άμεση ενημέρωση κάθε συσκευής. Αναπόφευκτα, τα δίκτυα μεγάλης κλίμακας που απαιτούν, για παράδειγμα, προσαρμογή στις απαιτήσεις κυκλοφορίας (μέσω αντίστοιχης κατανομής εύρους ζώνης) χρειάζονται τόσο χρόνο όσο και πόρους για την ενημέρωση. Επιπλέον, οι παραδοσιακοί πόροι αρχιτεκτονικής και οι έλεγχοι πολιτικής ενημερώνονται κάθε φορά που ενημερώνονται οι απαιτήσεις των εξωτερικών εφαρμογών. Τέλος, δεν υπάρχει έκθεση των πληροφοριών σε αυτές τις εφαρμογές όσον αφορά την κατάσταση του δικτύου.

Από την άλλη πλευρά, το SDN είναι ένα μοντέλο που βασίζεται στην ιδέα της μετάβασης από το παραδοσιακό πλήρως κατακεντρωμένο μοντέλο σε μια πιο συγκεντρωτική προσέγγιση. Αυτό επιτυγχάνεται με τον διαχωρισμό των λειτουργιών που σχετίζονται σε κάθε επίπεδο με διαφορετικά στοιχεία. Στο SDN, τα switches αποσυνδέονται από το control plane και εξυπηρετούν μόνο το data plane, ενώ οι ελεγκτές είναι υπεύθυνοι για το χειρισμό τους. Οι αποφάσεις ελέγχου στην περίπτωση αυτή γίνονται λαμβάνοντας υπόψη μια συνολική εικόνα της κατάστασης του δικτύου. Στο SDN, το control plane λειτουργεί ως ένα ενιαίο, λογικά συγκεντρωμένο λειτουργικό σύστημα δικτύου τόσο από άποψη προγραμματισμού όσο και από την

επίλυση συγκρούσεων πόρων, καθώς και από την απομάκρυνση των λεπτομερειών της συσκευής χαμηλού επιπέδου, π.χ. ηλεκτρικής ή οπτικής μετάδοσης.

Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει ότι ο ελεγκτής είναι συγκεντρωμένος φυσικά. Για λόγους απόδοσης, κλιμάκωσης και αξιοπιστίας, ο λογικά συγκεντρωμένος ελεγκτής SDN μπορεί να διανεμηθεί, έτσι ώστε αρκετά instances να συνεργάζονται για τον έλεγχο του δικτύου και την εξυπηρέτηση των εφαρμογών. Δεδομένου ότι ο controller γνωρίζει ολόκληρη την τοπολογία του δικτύου, μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις όσον αφορά την επεκτασιμότητα και την ευελιξία. Για παράδειγμα, το πρόβλημα της κατανομής εύρους ζώνης (Bandwidth allocation) επιλύεται με δυναμικό προγραμματισμό του controller μέσω του εκτεθειμένου του Northbound API. (ShieYuan Wang et al., 2015)

Αυτή η αρχιτεκτονική δίνει στις εφαρμογές περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση ολόκληρου του δικτύου από τον ελεγκτή, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα. Τα API αρχιτεκτονικής SDN συχνά αναφέρονται ως διασυνδέσεις Βορρά (Northbound) και Νότου (Southbound). Πολλές συσκευές από το data layer μπορούν να συνδεθούν σε ένα ενιαίο κεντρικό επίπεδο ελέγχου το οποίο επιτρέπει στον ελεγκτή να έχει μια ευρεία προβολή της τοπολογίας του δικτύου, παρέχοντας έτσι την ευελιξία στους μηχανικούς να αναπτύξουν εφαρμογές όπως η δρομολόγηση και η ασφάλεια. Τα δίκτυα ελέγχου για SDNs μπορεί να έχουν οποιαδήποτε μορφή, συμπεριλαμβανομένου ενός μόνο ελεγκτή, μιας ιεραρχίας ή ακόμα και ενός δυναμικού δακτυλίου.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις πιο βασικές διαφορές μεταξύ των συμβατικών δικτύων (Traditional Network) και του δικτύου SDN.

01.	Είναι κεντροποιημένη αρχιτεκτονική	Είναι αποκεντροποιημένη αρχιτεκτονική
02.	Το επίπεδο ελέγχου και δεδομένων είναι διαχωρισμένο μέσω λογισμικού.	Το επίπεδο ελέγχου και δεδομένων συνδυάζονται πάνω στις δικτυακές συσκευές
03.	Υποστηρίζει αυτοματοποιημένη παραμετροποίηση	Υποστηρίζει σταιτική/χειροκίνητη παραμετροποίηση, χρειάζεται παραπάνω χρόνο
04.	Έχει την δυνατότητα να μπλοκάρει και να δίνει προτεραιότητα σε συγκεκριμένα διαδυκτιακά πακέτα	Οδηγεί όλα τα πακέτα χωρίς καμιά προτεραιότητα
05.	Είναι εύκολο να προγραμματιστεί βάση της ζήτησης	Είναι εξαιρετικά δύσκολο να ξαναπρογραμματιστεί βάση της ζήτησης
06.	Η επεκτασιμότητα είναι αρκετά υψηλή	Μικρή Επεκτασιμότητα
07.	Χαμηλή πολυπλοκότητα στην δόμηση	Υψηλή πολυπλοκότητα στην δόμηση
08.	Η επίλυση και η αναφορά προβλήματων απλουστεύεται λόγω της κεντροποιημένης αρχιτεκτονικής	Η επίλυση και η αναφορά προβλήματων είναι εξαιρετικά πιο δύσκολη .
09.	Χαμηλότερο κόστος συντήρησης	Υψηλότερο κόστος συντήρησης

Πίνακας 4.1:SDN vs Traditional Networks

### 4.3 Η Ανάπτυξη των SDN Controllers

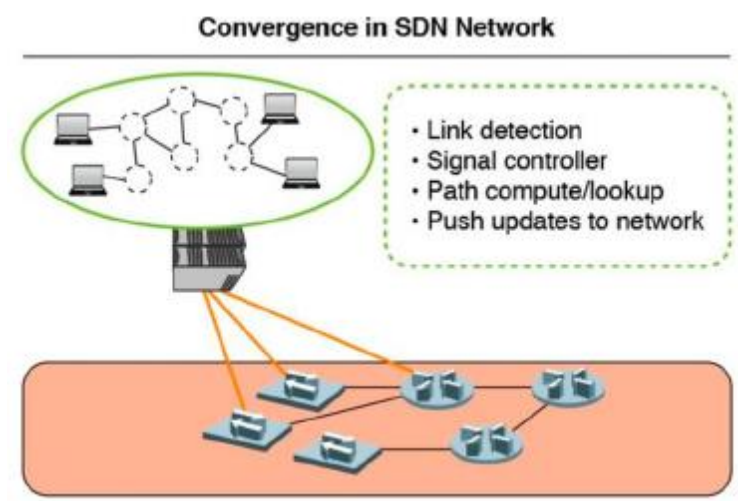
Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για δίκτυα που καθορίζονται από λογισμικό έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών SDN Controllers. Ενώ οι περισσότεροι από αυτούς τους ελεγκτές SDN έχουν αναπτυχθεί σε ακαδημαϊκό περιβάλλον, ορισμένοι από αυτούς έχουν αποκτήσει ένταση στη βιομηχανία, όπως τα NOX, Beacon και Floodlight. Ένας πίνακας κοινών ελεγκτών SDN αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.2. Μελλοντικά, αυτοί οι ελεγκτές πρόκειται να αναπτυχθούν σε μεγάλα και επεκτάσιμα δίκτυα όπως στα DC. Αυτές οι μελέτες έχουν οδηγήσει σε μεγαλύτερη εικόνα των ελεγκτών SDN. Σε μια πρώιμη μελέτη συγκριτικής αξιολόγησης, αρκετοί ελεγκτές - NOX, Beacon και Maestro - αναλύονται. Σύμφωνα με τη μελέτη, το NOX μπορεί να ελέγξει περίπου 30K εκκινήσεις ροής ανά / δευτερόλεπτο. Αυτός ο ρυθμός είναι εξαιρετικά χαμηλός από το μέσο ρυθμό ροών 100K / sec σε ένα σύμπλεγμα 1500 διακομιστών. Οι συγγραφείς της εργασίας ανέπτυξαν μια βελτιωμένη έκδοση του NOX γνωστή ως NOX-MT που είχε ως αποτέλεσμα καλύτερη απόδοση.

Controller	Language	Created by
Nox	C++	Niciria Networks
Maestro	Java	Stanford University
Beacon	Java	Rice University
Floodlight	Java	Big Switch Networks
Trema	Ruby , C	NEC
Node.Flow	Javascript	DreamersLab
OpenDaylight	Java	Cisco and OpenDaylighth

**Πίνακας 4.2:** SDN Controllers

Σε μια άλλη μελέτη, διάφοροι ελεγκτές δοκιμάζονται για απόδοση, συμπεριλαμβανομένων των Floodlight, Beacon, NOX-MT και Maestro. Σε αυτή τη μελέτη, οι ελεγκτές αξιολογούνται σε σχέση με την αρχιτεκτονική τους. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η απόδοση των ελεγκτών ποικίλλει βάσει των αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών, όπως η διαμέριση διακοπών, η δέσμη πακέτων και η υποστήριξη πολλαπλών πυρήνων. Διαπιστώθηκε ότι οι ελεγκτές που εφαρμόζουν το διαχωρισμό στατικού διακόπτη και τη στατική παρτίδα, επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση.

Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι όλοι οι ελεγκτές που συζητούνται στη βιβλιογραφία είναι ελεγκτές που βασίζονται στο πρωτόκολλο OpenFlow. Ενώ οι εφευρέσεις και η ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα βρίσκονται σε εξέλιξη, η εξάρτηση από ένα πρωτόκολλο SDN επιβραδύνει την πρόοδο. Ως αποτέλεσμα, καταβάλλονται προσπάθειες για την ανάπτυξη ελεγκτών SDN που υποστηρίζουν πρωτόκολλα διαφορετικά από το OpenFlow. Το OpenDaylight είναι μια κοινοπραξία που δημιουργήθηκε με τη βοήθεια σημαντικών φορέων της βιομηχανίας για την επίτευξη του ίδιου στόχου. Η Cisco έχει ήδη συνεισφέρει έναν ελεγκτή SDN ανοιχτού κώδικα στην κοινότητα ODL γνωστό ως OpenDaylight Controller. Το OpenDaylight SDN Controller (ODL) παρουσιάζει μια νέα αρχιτεκτονική ελεγκτή SDN που βασίζεται στην έννοια του Services Abstraction Layer (SAL). Το ODL υποστηρίζει επίσης πρωτόκολλα εκτός από το OpenFlow. [14]



**Εικόνα 4.2:** OpenFlow Network [1]

Οι ελεγκτές SDN πρόκειται να αναπτυχθούν σε μεγάλα δίκτυα κέντρων δεδομένων. Αυτά τα δίκτυα διαφέρουν από τα παραδοσιακά δίκτυα. [1]

Πολλά από αυτά που συζητήθηκαν στο παρελθόν επικεντρώθηκαν στο SDN, αλλά περιστράφηκαν μόνο γύρω από τις συσκευές που καθιστούν δυνατή τη δικτύωση ορισμένη από το λογισμικό όπως οι ελεγκτές SDN. Γνωρίζουμε από την αρχιτεκτονική SDN ότι ο ελεγκτής είναι ο ακρογωνιαίος λίθος, η κορυφή της ιεραρχίας της αρχιτεκτονικής, η οποία λειτουργεί ως ο εγκέφαλος του συστήματος.

## 4.4 Εφαρμογές SDN

Το SDN υπόσχεται πολλές ευκαιρίες σε πολλούς τομείς που σχετίζονται με τη δικτύωση των υπολογιστών. Ο διαχωρισμός του control plane και των δεδομένων και άλλων αρχών που διέπουν το SDN ορίζει το βασικό κριτήριο για τη χρήση SDN σε διαφορετικές περιπτώσεις και απολαμβάνει τα πολλά οφέλη που προσφέρει.

### 4.4.1. Data Centers

Τα DC έχουν εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια, προσπαθώντας συνεχώς να αντιμετωπίζουν ολοένα και υψηλότερες και ταχέως μεταβαλλόμενες απαιτήσεις. Τα παραδοσιακά DC χρησιμοποιούν routers για να συνδέσουν τον πυρήνα με το διαδίκτυο και τα switches για να συνδεθούν με servers και άλλα switches. Η προσεκτική διαχείριση της κυκλοφορίας και η επιβολή πολιτικής είναι κρίσιμης σημασίας όταν τα παραπάνω λειτουργούν σε τέτοιες μεγάλες κλίμακες, ειδικά όταν μια οποιαδήποτε διακοπή υπηρεσίας ή πρόσθετη καθυστέρηση μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη παραγωγικότητας ή απώλεια κέρδους (Bruno Astuto A , 2014). Οι χειριστές και οι μηχανικοί που είναι υπεύθυνοι για τα DC συχνά προβαίνουν σε ενέργειες ώστε να εξισορροπήσουν traffic patterns με τις αντίστοιχες απαιτήσεις. Τα σημερινά DC έχουν πολλές σχεδιαστικές απαιτήσεις, όπως η εύκολη μετάβαση των εικονικών μηχανών (Virtual Machines), η αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των servers και η ελάχιστη διαμόρφωση των switches και των κεντρικών υπολογιστών. Λόγω των δικτυακών προκλήσεων αναφορικά με τα παραπάνω, συχνά τα DC έχουν προβλεφθεί για την αιχμή της ζήτησης δεδομένης της κλίμακας και της σύνθετης προσαρμογής στις απαιτήσεις εφαρμογής. Έτσι, είναι σύνηθες σχεδιαστικά να τρέχουν πολύ κάτω από τη χωρητικότητα τις περισσότερες φορές, αλλά ταυτόχρονα είναι έτοιμα να εξυπηρετήσουν γρήγορα υψηλότερα φορτία εργασίας.

Επιπλέον, μια ολοένα και πιο σημαντική πτυχή είναι η κατανάλωση ενέργειας στα DC μεγάλης κλίμακας, η οποία επηρεάζει σημαντικά το κομμάτι του κόστους. Πιο συγκεκριμένα ένα μέρος της έρευνας έχει επικεντρωθεί στην βελτίωση των servers καθώς επίσης και στους μηχανισμούς ψύξης τους, μέσω της καλύτερης διαχείρισης υλικού και λογισμικού. Παρόλο αυτά οι συγκεκριμένες υποδομές συνεχίζουν να

καταναλώνουν περίπου το 10% - 20% της συνολικής ενεργείας. Μία προτεινόμενη λύση είναι το ElasticTree, ένας network-wide power manager που χρησιμοποιεί το SDN ώστε να υπολογίζει την βέλτιστη εκδοχή ισχύος που ικανοποιεί τις τρέχουσες συνθήκες κυκλοφορίας και απενεργοποιεί τα switches που δεν χρειάζονται.

#### **4.4.2 Δίκτυα Οπτικών Ινών**

Μια αρχιτεκτονική SDN μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση δικτύων μεγάλης κλίμακας για την επίτευξη σωστού προγραμματισμού και υψηλής διαθεσιμότητας. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το Google. Γενικά, ακολουθώντας μια προσέγγιση κεντρικού ελέγχου, υπάρχουν θετικά αποτελέσματα και πιο συγκεκριμένα: καλύτερη αξιοποίηση του δικτύου λόγω της συνολικής εικόνας, προγραμματισμένη κατανομή των πόρων με τη μείωση των προβλέψεων και άλλα. Επιπλέον, η προσέγγιση αυτή καθίστα ευκολότερη τη δοκιμή του δικτύου, καθώς ο κεντρικός έλεγχος μπορεί να χρησιμοποιήσει την πραγματική παραγωγή δικτύου παραγωγής για να ερευνήσει νέες ιδέες και να δοκιμάσει νέες εφαρμογές.

#### **4.4.3. Οπτικά δίκτυα**

Η διαχείριση του data traffic ως ροή, επιτρέπει στα δίκτυα που ορίζονται από το λογισμικό και τα δίκτυα Open Flow να υποστηρίζουν και να ενσωματώνουν πολλαπλές τεχνολογίες δικτύου. Επομένως, δίνεται η δυνατότητα να παρέχεται ενοποιημένος έλεγχος τεχνογνωσίας για δίκτυα οπτικών μεταφορών διευκολύνοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ δικτύων μεταγωγής πακέτων και κυκλωμάτων. Τα οφέλη από την εφαρμογή του SDN και του πρότυπου Open Flow, ειδικότερα στα δίκτυα οπτικών μεταφορών περιλαμβάνουν: τη βελτίωση της ευελιξίας του οπτικού δικτύου ελέγχου και διαχείρισης, επιτρέποντας την ανάπτυξη third-party συστημάτων διαχείρισης και ελέγχου καθώς επίσης και την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών με την αξιοποίηση του virtualization και του SDN. (Pritesh Ranjan, 2014).



## **5.1 Γενικά**

Στην εποχή των μεγάλων δεδομένων, οι εφαρμογές δεδομένων μεγάλης κλίμακας, όπως η ροή βίντεο, η ανάλυση και η οικονομική και επιστημονική επικοινωνία, μεταναστεύουν στο νέφος, το οποίο αναμένεται να φιλοξενήσει το 95% της συνολικής κίνησης σε λίγα χρόνια. Τέτοιες εφαρμογές τείνουν να χρησιμοποιούν ένα δίκτυο αυτόνομων διακομιστών που σχηματίζουν συμβατικά κέντρα δεδομένων (CDC). Τα CDC ακολουθούν μια διακομιστοκεντρική προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία οι διαθέσιμοι πόροι (υπολογιστική και φυσική μνήμη) ανά διακομιστή είναι σταθεροί και περιορίζονται στα όρια του δίσκου του διακομιστή. Σε γενικές γραμμές, ένας δίσκος διακομιστή αποτελείται συνήθως από πολλαπλές ετερογενείς μονάδες επεξεργασίας (xPU-Process Unit) που συνδέονται μέσω ενός (ή περισσότερων) ελεγκτή(ων) μνήμης (MC) σε μια τοπική μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM) για ταχεία ανάγνωση εντολών και γρήγορη, τυχαία πρόσβαση σε επίπεδο byte ανάγνωσης/εγγραφής. [26]

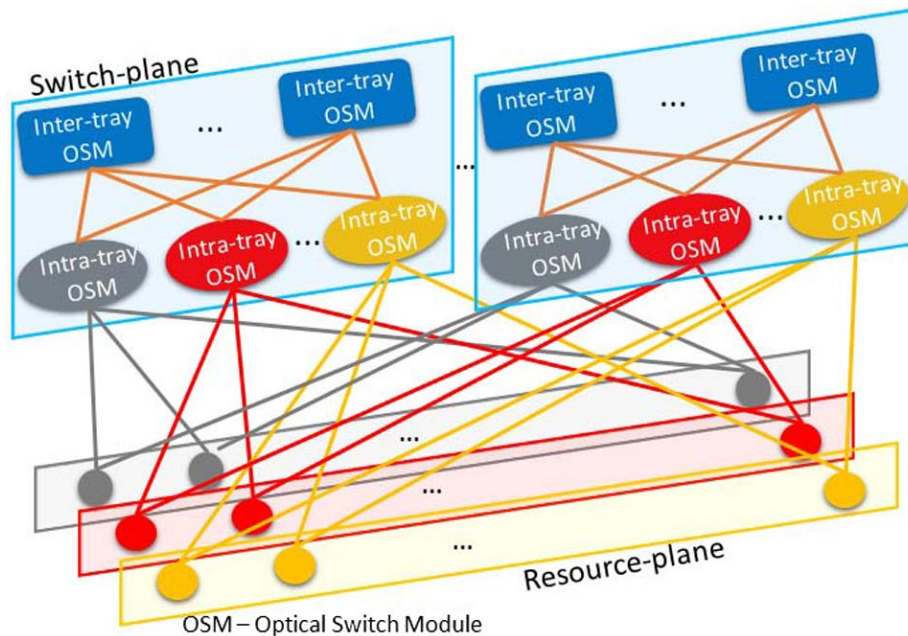
Όπως είναι εύκολο να συμπεράνουμε στην σημερινή εποχή, αρχιτεκτονικές σαν την fat tree τείνουν να αντικαθιστούνται από νέες πρωτοποριακές αρχιτεκτονικές. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν και δύο πολύ υποσχόμενες αποκεντρωμένες αρχιτεκτονικές που στοχοποιούν την επιλύση των προκλήσεων των κέντρων δεδομένων, τόσο ως προς την επεκτασιμότητα όσο και στις άλλα ζητήματα που αντιμετωπίζουν. Οι αρχιτεκτονικές για στις οποίες θα γίνει αναφορά είναι :

- MONet
- DACON

## 5.2 Αρχιτεκτονική Διαχωρισμού: MONet

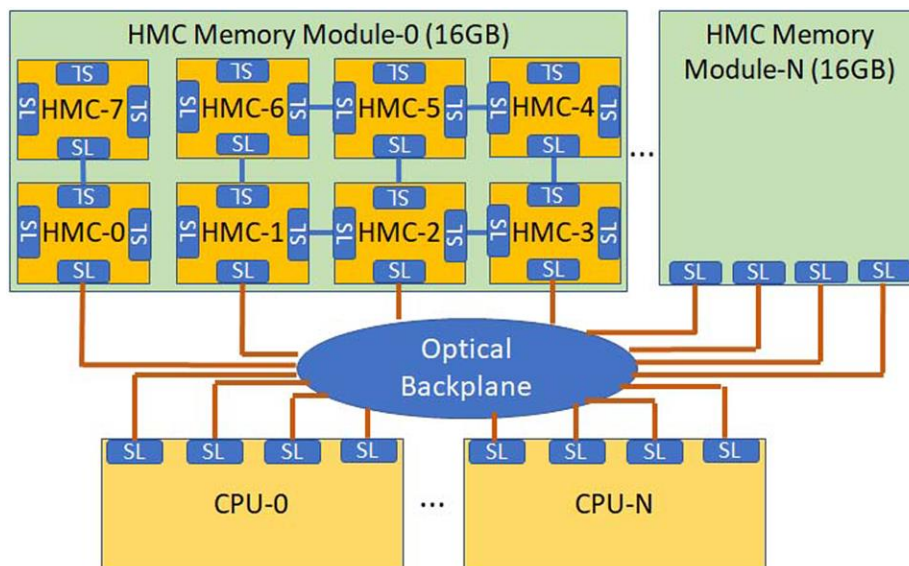
Το MONet είναι μια διαχωρισμένη αρχιτεκτονική κέντρου δεδομένων, η οποία βασίζεται στην προτεινόμενη παράλληλη τοπολογία και το ευέλικτο σύστημα με επίκεντρο τους πόρους, δημιουργώντας μια δεξαμενή προσβάσιμων υπολογιστικών πόρων και πόρων μνήμης. Ως εκ τούτου, το MONet παρέχει αυξημένα επίπεδα επεκτασιμότητας και ευελιξίας - οι πόροι μπορούν να προστεθούν/απομακρυνθούν δυναμικά ανάλογα με τις ανάγκες των εφαρμογών. Ακολουθεί μια παράλληλη τοπολογία δύο επιπέδων για την ελαχιστοποίηση της απόστασης διαδρομής μεταξύ οποιωνδήποτε πόρων. Ένας δίσκος, που απεικονίζεται ως επίπεδο πόρων στο Σχήμα 5.1, μπορεί να φιλοξενήσει ένα σύνολο καρτών πόρων που αποτελούνται από ένα  $x$  αριθμό μονάδων επεξεργασίας (PU) και/ή από ένα  $x$  αριθμό μοναδών αποθήκευσης (MU-Memory Units). Σε σύγκριση με τις μη παράλληλες αρχιτεκτονικές fat-tree, διαθέτει μόνο δύο επίπεδα μεταγωγέων, με στόχο την ελαχιστοποίηση του αριθμού των μεταπηδήσεων μεταξύ δύο πόρων και της καθυστέρησης δικτύου. Για την υλοποίηση της παράλληλης δομής δύο επιπέδων, αναπτύσσεται η έννοια του επιπέδου μεταγωγής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1, τα επίπεδα μεταγωγής δεν συνδέονται μεταξύ τους, επιτρέποντας την αρθρωτή αύξηση του εύρους ζώνης ανά επίπεδο πόρου. Κάθε επίπεδο μεταγωγής στεγάζει ένα ανώτερο επίπεδο inter-δίσκων οπτικών μονάδων μεταγωγής (OSMs) και ένα κατώτερο επίπεδο intra-δίσκων OSMs, που συνδέονται σε τοπολογία Spine&Leaf. Δεδομένου ότι κάθε επίπεδο μεταγωγής συνδέει όλους τους πόρους (χρωματιστοί κύκλοι στο Σχήμα 5.1) όλων των δίσκων, η επικοινωνία οποιασδήποτε κάρτας προς οποιαδήποτε μπορεί να εκτελεστεί μέσω οποιουδήποτε μεμονωμένου επιπέδου μεταγωγής. Όλες οι κάρτες σε ένα επίπεδο πόρων διασυνδέονται μέσω ενός αντίστοιχου ενδοδίσκου OSM σε κάθε επίπεδο μεταγωγής. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 5.1, οι γκριζες κάρτες συνδέονται μόνο με το γκριζό intra-tray OSM σε κάθε επίπεδο μεταγωγής (πρώτη βαθμίδα). Η επικοινωνία μεταξύ των πόρων σε διαφορετικά επίπεδα πόρων απαιτεί τη συμμετοχή του OSM διαδίσκου (δεύτερη βαθμίδα). Ο αριθμός του επιπέδου μεταγωγής εξαρτάται από τον αριθμό θύρας ανά πόρο και τον αριθμό καναλιού ανά σύνδεση. Για παράδειγμα, εάν χρησιμοποιούνται οκτώ κανάλια SDM (μέσω οκτώ ξεχωριστών ινών) ανά πομποδέκτη μεταξύ μιας κάρτας CPU και μιας κάρτας μνήμης, τότε απαιτούνται οκτώ επίπεδα μεταγωγής. Ωστόσο, εάν πρόκειται για δύο ομάδες/πομποδέκτες τεσσάρων καναλιών CWDM, τότε απαιτούνται δύο επίπεδα.

Ο αριθμός OSM εντός του δίσκου σε κάθε επίπεδο μεταγωγής είναι ίσος με τον αριθμό πόρων ανά επίπεδο πόρων, γεγονός που υποδηλώνει τα πλεονεκτήματα της επεκτασιμότητας και της ευελιξίας που ευνοούν τις επικοινωνίες στο επίπεδο δεδομένων, δεδομένου ότι ο αριθμός των επιπέδων πόρων στο δίκτυο μπορεί να αυξηθεί απλώς με την αύξηση του αριθμού των μεταγωγέων OSM μεταξύ και εντός του δίσκου σε κάθε επίπεδο, αντίστοιχα (Journal Vol. 13, No. 5, May 2021). Αυτή η παράλληλη αύξηση των στοιχείων μεταγωγής καθίσταται δυνατή ως αποτέλεσμα της χρήσης οπτικών μέσων πλακέτας πολλαπλών πομποδεκτών (MBOs), η οποία διευκολύνει την πλήρη συνδεσιμότητα μεταξύ όλων των πόρων σε αυτό το παράλληλο δίκτυο, όπου κάθε οπτικό κανάλι I/O/ίνα του MBO δρομολογείται προς ένα μεμονωμένο επίπεδο πόρων. Επιπλέον, προκειμένου να αυξηθεί η αξιοποίηση των θυρών κάθε οπτικού μεταγωγέα και η αρθρωτότητα του συστήματος, χρησιμοποιούνται μεταγωγείς μικρού αριθμού θυρών τόσο για OSM μεταξύ όσο και για OSM εντός και μεταξύ των δίσκων. Τα παράλληλα επίπεδα μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη α) πολλαπλής δρομολόγησης μεταξύ τελικών σημείων (κάρτες υπολογιστών/μνήμης) είτε β) επέκτασης σε διαφορετικές συστάδες/συστοιχίες δίσκων- το Εικόνα 5.1 απεικονίζει την πρώτη περίπτωση.



**Εικόνα 5.1: MONet: προτεινόμενη τοπολογία οπτικού δικτύου. [26]**

Ακολουθώντας τη δεύτερη περίπτωση, το σύστημα κλιμακώνεται με βάση τα cardstrays και μπορεί να οδηγήσει σε εκατοντάδες χιλιάδες συστήματα τελικών σημείων (κάρτες υπολογισμού/μνήμης). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με 24 κάρτες ανά δίσκο και 4096 δίσκους. Κάθε κάρτα μπορεί να υποστηρίζεται από έναν πομποδέκτη MBO SDM οκτώ καναλιών (κάθε κανάλι συνδέεται σε ένα παράλληλο επίπεδο, οκτώ συνολικά) και να διαθέτει μέτριους διακόπτες radix (48x48) και για τις δύο βαθμίδες ώστε να παρέχεται αναλογία συνδρομής 1:1. Για την κλιμάκωση του διαχωριζόμενου συστήματος από ένα μόνο rack σε ένα κέντρο δεδομένων, πρέπει να εξεταστεί μια αρχιτεκτονική δικτύου scale-out. Χρησιμοποιούνται διασυνδέσεις με οπτική μεταγωγή κυκλώματος (αναδιαμόρφωση 20 ms) προκειμένου να συγκεντρωθούν τέτοιοι ετερογενείς πόροι υπολογισμού και μνήμης που λειτουργούν σε χρονικά πλαίσια εικονικής μηχανής (VM) (δευτερόλεπτα-ώρες). Το MONet προτείνει την αξιοποίηση και των τεσσάρων συνδέσεων του HMC για την κλιμάκωση της χωρητικότητας της απομακρυσμένα συνδεδεμένης μνήμης. Όπως φαίνεται στο Εικόνα 5.2, το MONet επιτρέπει σε μία μόνο CPU να έχει πρόσβαση σε οποιαδήποτε διαθέσιμη απομακρυσμένη μονάδα μνήμης HMC εντός του δικτύου του κέντρου δεδομένων. Μία CPU μπορεί να έχει πρόσβαση σε 16 GB απομακρυσμένης μνήμης (82 GB μονάδες HMC που συνδέονται άμεσα μεταξύ τους εντός μία κάρτα) μέσω α) μίας σύνδεσης (έως 480 Gb/s) ή β) τεσσάρων συνδέσεων (έως 1,9 Tb/s εύρος ζώνης αμφίδρομης σύνδεσης).



Εικόνα 5.2: Διασύνδεση CPU και απομακρυσμένης σειριακής μονάδας μνήμης, με κλιμακωτές μονάδες μνήμης για κλιμάκωση. [26]

### 5.3 Πειραματική Διάταξη MONet

Τα βασικά δομικά στοιχεία για την ενεργοποίηση των κατ' απαίτηση διαχωρισμένων πόρων του κέντρου δεδομένων είναι:

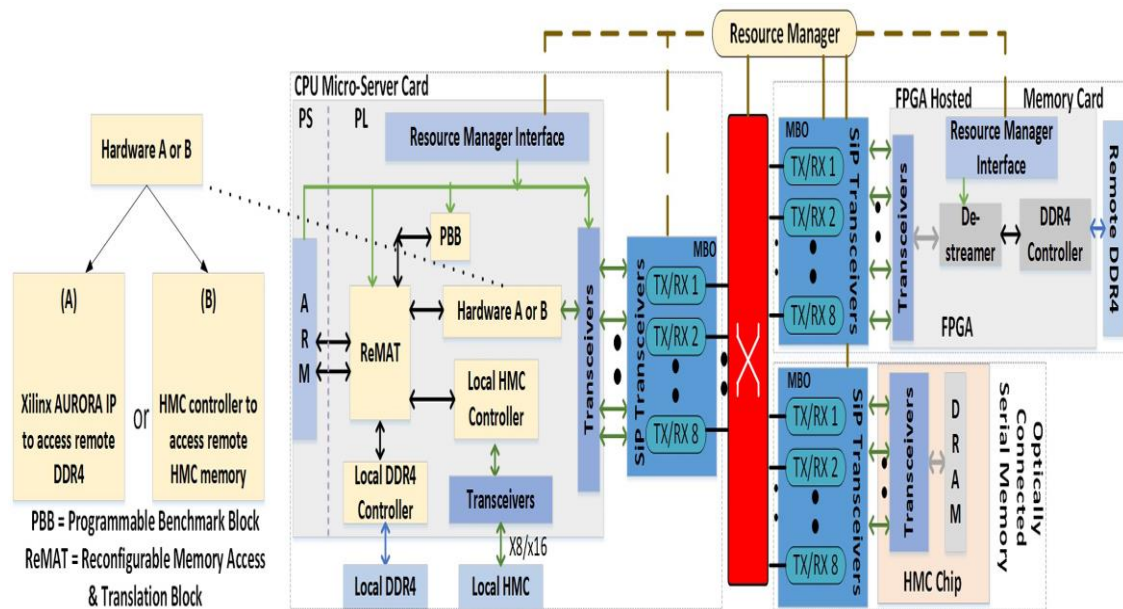
- α) μονάδα μικρο-εξυπηρετητή CPU (ASIC/FPGA),
- β) κάρτα παράλληλης μνήμης DDR4 που φιλοξενείται σε FPGA,
- γ) οπτικά συνδεδεμένη (σειριακή) κάρτα μνήμης,
- δ) οπτοηλεκτρονικοί πομποδέκτες,
- ε) διασύνδεση υψηλής ταχύτητας με οπτική μεταγωγή και
- στ) διαχειριστής πόρων.

Υποστηρίζονται δύο τύποι απομακρυσμένων καρτών μνήμης:

- (1) συμβατική παράλληλη πρόσβαση στη μνήμη (με DDR4)
- (2) αυτόνομη σειριακή μνήμη στο δίκτυο (με HMC).

Ο πρώτος τύπος κάρτας μνήμης ονομάζεται ASIC/FPGA HostedMemory Card θα υποστηρίξει παράλληλη πρόσβαση και θα παρέχει μια ευέλικτη δεξαμενή μονάδων μνήμης που θα μπορούν να μοιράζονται όλες οι CPU. Ο δεύτερος τύπος κάρτας μνήμης, που ονομάζεται Optically Connected Serial Memory Card, θα είναι ανεξάρτητος από οποιονδήποτε ξενιστή. Χρησιμοποιεί μόνο μονάδες μνήμης HMC, οι οποίες ενσωματώνουν σειριακούς πομποδέκτες στο ίδιο τσιπ. Αυτό συνδέει απευθείας τις μονάδες μνήμης στο δίκτυο μέσω ηλεκτρικής ή οπτικής διασύνδεσης. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές ηλεκτρικά διασυνδεδεμένες αρχιτεκτονικές, το MONet εκμεταλλεύεται το μεγάλο εύρος ζώνης και τις χαμηλές απώλειες που υποστηρίζονται από τις οπτικές ίνες για την επίτευξη προϊόντων μεγάλου εύρους ζώνης σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Οι ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς, σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης bit, περιορίζονται σε απόσταση λίγων μέτρων προκειμένου να διασφαλιστεί η ακεραιότητα του σήματος. Για παράδειγμα, οι ηλεκτρικοί πομποδέκτες 25 Gb/s χρησιμοποιούνται για αποστάσεις 5 μέτρων. Οι χαμηλές απώλειες της οπτικής ίνας (0,2 dB=Km), από την άλλη πλευρά, επιτρέπουν σημαντικά μεγαλύτερη εμβέλεια.

Κάθε κάρτα χρησιμοποιεί πλακέτες SiP με βάση τη MBO που χειρίζονται την ηλεκτροοπτική μετατροπή και τη διαμόρφωση σε έως και οκτώ αμφίδρομους οπτικούς πομποδέκτες. Όπως φαίνεται στο Εικόνα 5.3 η MBO εξοπλίζει τις κάρτες CPU και μνήμης με δυνατότητες οπτικών πομποδεκτών πολλαπλών καναλιών που επιτρέπουν την απομακρυσμένη πρόσβαση σε πόρους δικτύου. Για τη σύνδεση αυτών των καρτών και την εξομοίωση δικτύων πολλαπλών βημάτων στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένας μεταγωγέας κατευθυνόμενης δέσμης 48 θυρών (κόκκινο πλαίσιο στο Εικόνα 5.3).



**Εικόνα 5.3:** Πειραματική διάταξη: για την υποστήριξη τοπικής και απομακρυσμένης ετερογενούς παράλληλης μνήμης DDR4 και σειριακή μνήμη HMC. [26]

### 5.3.1 Αναδιαμορφώσιμη πρόσβαση και μετάφραση μνήμης: ReMAT

Το ReMAT προσφέρει χαμηλής καθυστέρησης, πολλαπλών σταδίων, διασυνδεδεμένη λογική υλικού, η οποία μπορεί να κατανοεί, να επεξεργάζεται και να προωθήσει τα αιτήματα πρόσβασης στη μνήμη στις επιθυμητές θέσεις μνήμης. Ενώ επιτρέπει βασικές δυνατότητες για τη διαχωρισμένη μνήμη όπως η μη-μπλοκαριστική και η καθορισμένη/ελεγχόμενη από το λογισμικό πρόσβαση στη μνήμη, το ReMAT υποστηρίζει επίσης μονή και διπλή κρυφή μνήμη γραμμής για ταχύτερη τοπική ή απομακρυσμένη πρόσβαση στη μνήμη. Ένας round-robin «διαιτητής» στη διασύνδεση ReMAT συνδυάζει τις συναλλαγές μνήμης και από τις δύο κύριες θύρες των CPU σε μια, για να παρέχει πρόσβαση στη μνήμη με χρονική διασύνδεση. (HMC/DDR4, τοπική/απομακρυσμένη) μέσω ενιαίου υλικού. Ο «διαιτητής» περιέχει επίσης πρόσθετα χαρακτηριστικά για το συνδυασμό πολλαπλών συναλλαγών του ίδιου τύπου (εγγραφή ή ανάγνωση) σε μία μόνο συναλλαγή του 64 (για DDR4) και 128 (για HMC) bytes για να ξεπεραστεί η επιβάρυνση που προκύπτει λόγω πολλαπλών κύκλων ανάγνωσης και εγγραφής. Η ReMAT χρησιμοποιεί έναν streamer για τη μετατροπή κάθε συναλλαγής μνήμης σε τυπικά δεδομένα AXI4-stream, επιτρέποντας στο MONet να υποστηρίζει τυποποιημένα πρωτόκολλα πρόσβασης σε δεδομένα από chip σε chip, όπως το Ethernet. Η επιτυχής λειτουργία του MONet εξαρτάται από τους πίνακες αντιστοίχισης στο ReMAT, οι οποίοι καταγράφουν και μεταφράζουν τη θέση, τον τύπο της συσκευής και το μοτίβο πρόσβασης στη μνήμη. Αυτοί οι πίνακες συνδυάζονται συλλογικά για τη δημιουργία πινάκων ελέγχου λειτουργιών γέφυρας (BFCT), οι οποίοι μπορούν να ενημερώνονται συνεχώς από τον διαχειριστή πόρων (RM) μέσω της διεπαφής διαχειριστή πόρων, χρησιμοποιώντας το ReON, χωρίς να διακόπτεται η τοπική CPU ή άλλοι πόροι του συστήματος. Το ReMAT προσφέρει διαφάνεια και αντιστοίχιση μεταξύ των φυσικών διευθύνσεων μνήμης (όπως τις βλέπει η CPU) και των απομακρυσμένων διευθύνσεων μνήμης, ανεξάρτητα από τη θέση της μνήμης (τοπική ή απομακρυσμένη) και την τεχνολογία (σειριακή ή παράλληλη). Οι εφαρμογές των χρηστών, που δεν γνωρίζουν την αντιστοίχιση διευθύνσεων και τις μεταφράσεις, χρησιμοποιούν ένα σύστημα εικονικής μνήμης, το οποίο αναλαμβάνει τη μετάφραση διευθύνσεων (εικονική-φυσική και φυσική-εικονική). [26]

### 5.3.2 Απομακρυσμένες κάρτες μνήμης

Οι κάρτες μνήμης που φιλοξενούνται σε FPGA χρησιμοποιούν συμβατικούς παράλληλους ακροδέκτες μεταξύ του τσιπ μνήμης και του ελεγκτή (ελεγκτής DDR4). Στην εργασία, χρησιμοποιήσαμε την πλακέτα αξιολόγησης FPGA που βασίζεται σε MPSoC και αναπτύχθηκε από την HiTech Global (συγκεκριμένη πλακέτα: HTG-Z920) για τη φιλοξενία του ελεγκτή μνήμης για πρόσβαση σε απομακρυσμένες κάρτες DDR4. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται ένα πρόσθετο chip FPGA για τη φιλοξενία του ελεγκτή μνήμης και πρόσθετη λογική που ονομάζεται de-streamer για τη μετατροπή των αιτημάτων ροής AXI4 σε παράλληλες AXI memory-mapped transactions. Τα αιτήματα πρόσβασης στη μνήμη μπορούν να φθάνουν από έναν ή πολλούς (πολλά bitsynchronous bonded channels) πομποδέκτες και από μία ή πολλές CPU. Ο de-streamer μπορεί να προρυθμιστεί από το RM για να αντιμετωπίσει αυτό το σενάριο. Το υλικό του ελεγκτή μνήμης είναι παθητικός υποτελής στις συνδεδεμένες κάρτες μικροεξυπηρετητών CPU με απλοποιημένη σύνδεση λόγω της χρήσης δικτύου μεταγωγής κυκλώματος. Αυτή η διάταξη ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση επεξεργασίας για τα εισερχόμενα αιτήματα πρόσβασης στη μνήμη, καθώς οι κάρτες μνήμης αποθηκεύουν μόνο τους αριθμούς πομποδέκτη και θύρας για τη διαχείριση των απαντήσεων, αντί για λεπτομερείς διευθύνσεις/τοποθετήσεις CPU. Στην περίπτωση της οπτικά συνδεδεμένης σειριακής μνήμης, δεν απαιτείται πρόσθετο τσιπ στους ελεγκτές μνήμης υποδοχής, καθώς διαθέτουν ενσωματωμένο ελεγκτή μνήμης και σειριακές εισόδους/εξόδους υψηλής ταχύτητας.



### 5.3.3 Οπτική διαδρομή δεδομένων

Οι MBO θεωρούνται ελκυστική λύση για την αντικατάσταση των διασυνδέσεων με βάση το χαλκό και την αξιοποίηση των οπτικών τυπωμένων πλακετών κυκλωμάτων (OPCB) για τη διασύνδεση διαφόρων πόρων. Κάθε κανάλι, κατά μέσο όρο, έχει οπτική ισχύ εξόδου -3 dBm και μπορεί να λειτουργήσει έως και 25 Gb/s. Για την ελαχιστοποίηση του αποτυπώματος και της κατανάλωσης ισχύος και για τη μεγιστοποίηση των πυκνότητα εύρους ζώνης, κάθε κάρτα πόρων χρησιμοποιεί MBO που είναι ενσωματωμένα με πομποδέκτες SiP και κατασκευάζονται από την Luxtera Inc. με χωρητικότητα έως και 200 Gb/s (8x25) και μία πηγή λέιζερ 1310 nm, σε ένα μόνο τσιπ. Χρησιμοποιείται ένας διακόπτης οπτικού κυκλώματος 48 θυρών (OCS) της Polatis για

- (1) πρόσβαση σε πολλαπλά διαφορετικά επίπεδα πόρων και μεταγωγής και
- (2) την εξομοίωση δικτύων πολλαπλών βημάτων.

Ο κύριος λόγος για τη χρήση ενός αμιγούς δικτύου μεταγωγής κυκλώματος είναι η ελαχιστοποίηση της λανθάνουσας κατάστασης από τη CPU προς τη μνήμη σε επίπεδο υπο-μικροδευτερολέπτου. Αυτό εξομοιώνει τη δομή διαύλου της CPU, η οποία παρέχει τη χαμηλότερη επίπεδο εγγυημένης καθυστέρησης και εύρους ζώνης μεταξύ των επεξεργαστών και των στοιχείων μνήμης, ενώ συνδέει οποιονδήποτε αριθμό CPU με οποιονδήποτε αριθμό καρτών μνήμης.

Η μεταγωγή βασίζεται σε τεχνολογία πιεζοηλεκτρικής ενεργοποίησης, η οποία περιορίζει την αναδιαμόρφωση σε 25 ns. Η απώλεια οπτικής ισχύος κατά την διέλευση του διακόπτη είναι μόνο 1 dB κατά μέσο όρο. Έτσι, τέτοιοι διακόπτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός δικτύου μεγάλου μεγέθους. Στην εγκατάσταση, η κάρτα υπολογιστών, η κάρτα μνήμης και οι βρόχοι οπτικών ινών είναι όλα μαζί συνδεδεμένα στο μεταγωγέα (που λειτουργεί ως backplane) ώστε να διασχίζουν τον μεταγωγέα πολλές φορές και έτσι να προσομοιώνουν ένα δίκτυο πολλαπλών επιπέδων. (Journal Vol 13, No. 5, May 2021)

#### 5.3.4 Διαχειριστής πόρων

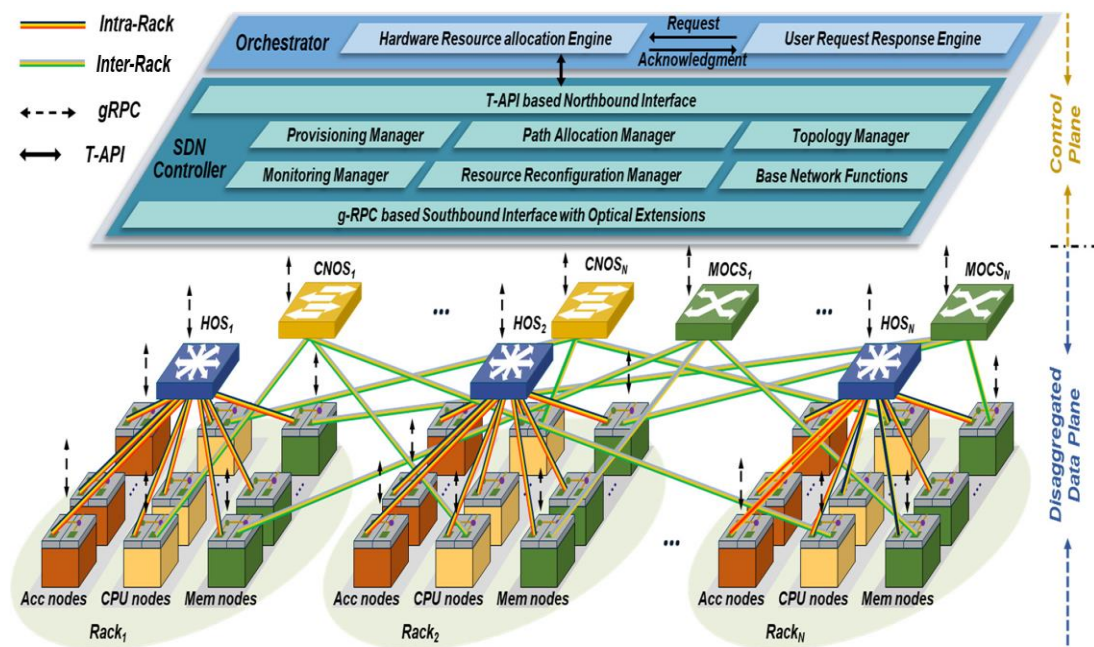
Ο RM διατηρεί ενημερωμένες πληροφορίες σχετικά με τους διαθέσιμους πόρους, όπως η CPU, οι διαθέσιμοι πόροι μνήμης και η κατανομή τους και ελέγχει δυναμικά την κατανομή και τη διαμόρφωση της διασύνδεσης μνήμης. Ο RM χρησιμοποιεί ειδικά δίκτυα χαμηλής ταχύτητας, όπως USB και I2C, για τη διαμόρφωση του δικτύου οπτικών μεταγωγέων, την παροχή επικοινωνίας από άκρο σε άκρο μεταξύ της CPU και της μνήμης και την παροχή διαμόρφωσης κατά την εκκίνηση για τις μονάδες μνήμης HMC. Σε μεγαλύτερα δίκτυα ή δίκτυα μεγάλων αποστάσεων, το RM θα είναι εξοπλισμένο με θύρες Ethernet για την αναδιαμόρφωση των πόρων με το πρωτόκολλο ReON. Το MONet δεν μπορεί να προσαρμοστεί στα υπάρχοντα κέντρα δεδομένων με επίκεντρο τον διακομιστή, καθώς απαιτεί προσαρμοσμένους επεξεργαστές με βάση ASIC/FPGA για να φιλοξενήσει το ReMAT, τη διεπαφή RM, το PBB και τη λογική του τοπικού ελεγκτή που επιτρέπει τη μετάφραση διευθύνσεων και τον έλεγχο της μνήμης. (Journal Vol 13, No. 5, May 2021)

## 5.4 Αρχιτεκτονική Διαχωρισμού: DACON

Για να επιλύσουμε τα προβλήματα της χαμηλής χρήσης των πόρων και της συμφόρησης των επιδόσεων στα τρέχοντα δίκτυα κέντρων δεδομένων (DCN) με επίκεντρο τον διακομιστή, προτείνουμε και επιδεικνύουμε πειραματικά ένα διαχωρισμένο οπτικό δίκτυο με επίκεντρο την εφαρμογή (DACON) για υποδομές κέντρων δεδομένων που βασίζονται σε υβριδικούς οπτικούς μεταγωγείς. Το DACON επιτυγχάνει ευέλικτη παροχή και δυναμική αναδιαμόρφωση των κόμβων υλικού, αξιοποιώντας το επίπεδο εντοπισμού (Control Plane) της δικτύωσης software-defined (SDN). Υλοποιεί ένα διαχωρισμό τεσσάρων πρωτότυπο κόμβων με δυνατότητα SDN με έναν ελεγκτή κόμβων υλικού με βάση συστοιχία πυλών προγραμματιζόμενου πεδίου και οπτικούς μεταγωγείς νανοδευτερόλεπτων, που εκτελεί ελάχιστη καθυστέρηση δικτύου από κόμβο σε κόμβο 378,6 ns και μηδενική απώλεια πακέτων.

Η κλιμακούμενη αρχιτεκτονική διαχωρισμένης οπτικής πληροφορικής με τον προσαρμοσμένο εντοπιστή στο επίπεδο ελέγχου SDN παρουσιάζεται στην εικόνα 5.4. Στο επίπεδο δεδομένων, υπάρχουν τρία είδη κόμβων υλικού στο DACON: ο κόμβος CPU, ο κόμβος μνήμης (κόμβος mem) και ο κόμβος επιταχυντή (κόμβος acc στο Εικ. 5.4). Αυτοί οι διαχωρισμένοι κόμβοι υλικού χωρίζονται σε  $N$  ράφια, ενώ κάθε ράφι αποτελείται από  $N$  κόμβους CPU,  $N$  κόμβους μνήμης και  $N$  κόμβους επιταχυντή [ο επιταχυντής μπορεί να είναι μονάδα επεξεργασίας γραφικών (GPU), μονάδα επεξεργασίας τανυστών (TPU) ή FPGA]. Αξίζει να σημειωθεί ότι το DACON επιτρέπει διαφορετικές ποσότητες κάθε είδους κόμβου υλικού, αυξάνοντας την ευελιξία της διαμόρφωσης υλικού. Όλοι οι κόμβοι υλικού στο ίδιο rack συνδέονται μεταξύ τους μέσω HOS. Ο  $i$ -οστός κόμβος CPU σε κάθε rack συνδέεται μέσω του  $i$ -οστού NOS για την CPU (CNOS), ενώ ο  $j$ -οστός κόμβος μνήμης σε κάθε rack διασυνδέεται μέσω του  $j$ -οστού OCS για τη μνήμη (MOCS) ( $i, j=0, \dots, N$ ). Αυτό συμβαίνει επειδή η κυκλοφορία CPU-CPU είναι συνήθως ευαίσθητη στην καθυστέρηση σύντομων πακέτων, ενώ η κυκλοφορία μνήμης-μνήμης είναι συνήθως για σενάρια μακράς διάρκειας, όπως η άμεση πρόσβαση στη μνήμη (DMA) και η ζωντανή μετανάστευση εικονικών μηχανών που απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης και ρυθμό μετάδοσης. Το εύρος ζώνης των διασυνδέσεων δικτύου στο DACON μπορεί να κλιμακωθεί αξιοσημείωτα σε υψηλότερα από 100 Gb/s χωρίς τροποποίηση του NOS με τη χρήση πομποδεκτών

QSFP28DD καθώς και τεχνολογιών πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) και δέσμης καναλιών. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφεται και ξεπερνιέται το σημείο συμφόρησης των επιδόσεων των διασυνδέσεων στην αρχιτεκτονική με επίκεντρο τον εξυπηρετητή όσον αφορά το χαμηλό εύρος ζώνης και την υψηλή καθυστέρηση. Με τη χρήση HOSs  $3N$  θυρών, CNOSs  $k*N$  θυρών και MOCSs  $k*N$  θυρών, μπορούν να διασυνδεθούν έως και  $3k*N^2$  κόμβοι υλικού στην αρχιτεκτονική DACON ( $k > 0$ ), γεγονός που εγγυάται τους βασισμένους στην επεκτασιμότητα δικτύου οπτικούς μεταγωγείς μέτριου αριθμού θυρών. (Journal Vol. 14, No. 1, January 2022)



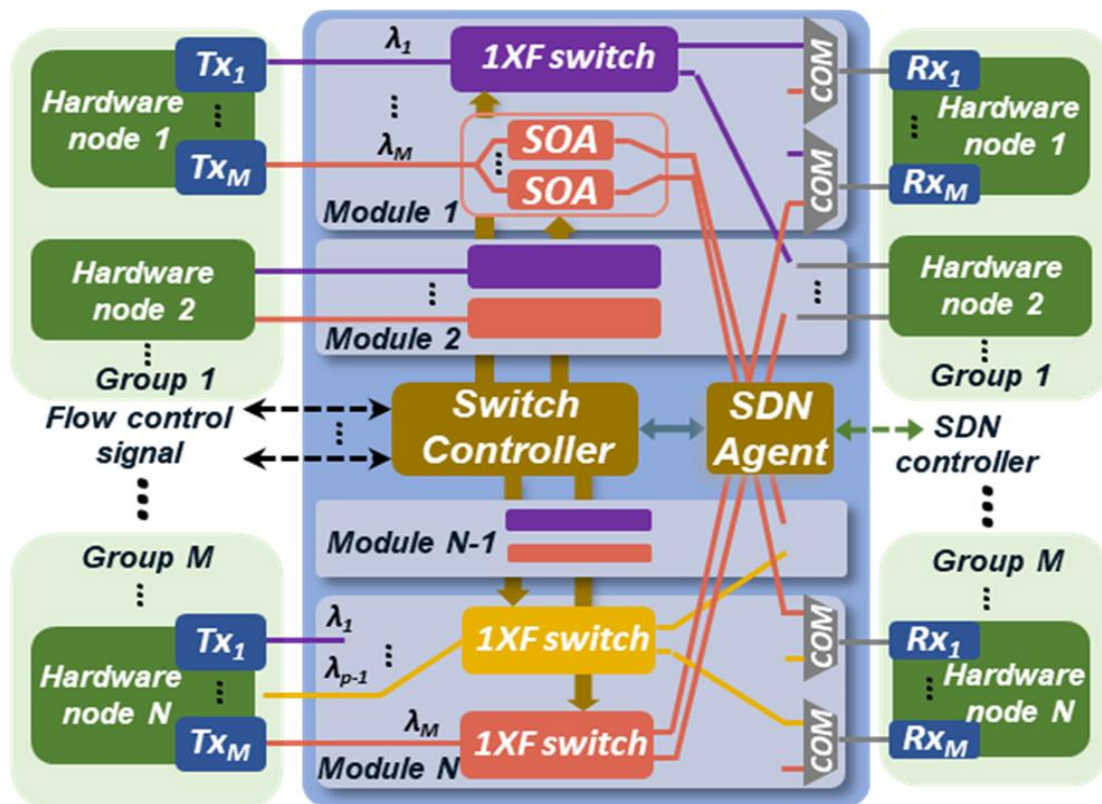
Εικόνα 5.4: Αρχιτεκτονική DACON με δυνατότητα SDN που βασίζεται σε HOS. [27]

## 5.5 Λειτουργία Αρχιτεκτονικής : DACON

Στο επίπεδο ελέγχου SDN, αναπτύσσεται μια νότια διεπαφή με οπτικές επεκτάσεις που βασίζεται στο πρωτόκολλο Google Remote Procedure Calls (gRPC) για την επικοινωνία με κόμβους υλικού και οπτικούς μεταγωγείς στο επίπεδο δεδομένων. Η τοπολογία δικτύου του επιπέδου δεδομένων και η διαμόρφωση των κόμβων υλικού αποθηκεύονται στον διαχειριστή τοπολογίας (TM) και ο διαχειριστής παρακολούθησης (MM) στέλνει περιοδικά αιτήματα (REQs) στους πράκτορες SDN για τις καταστάσεις δικτύου του επιπέδου δεδομένων. Μόλις λάβει το REQ της εφαρμογής από τους χρήστες, ο προσαρμοσμένος ενορχηστρωτής παράγει τη διαμόρφωση των διαχωρισμένων υπολογιστικών κόμβων (DiCN) για την εκτέλεση της εφαρμογής-στόχου. Το DiCN περιλαμβάνει διάφορες κατηγορίες/ποσότητες πόρων υλικού ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Στη συνέχεια, η διαμόρφωση DiCN αποστέλλεται στον ελεγκτή SDN μέσω της βόρειας διεπαφής και η κυκλοφορία βασίζεται στο πρωτόκολλο T-API (Transport Application Programming Interface). Χρησιμοποιώντας την κατάσταση δικτύου που είναι αποθηκευμένη στο MM, ο διαχειριστής παροχής (PM) επιλέγει τους διαθέσιμους κόμβους υλικού για τη δημιουργία του DiCN και οι διασυνδεδεμένες διαδρομές μεταξύ αυτών των κόμβων υπολογίζονται από τον διαχειριστή κατανομής διαδρομών (PAM). Εάν εμφανιστεί διαμάχη πόρων, ο κόμβος υλικού του DiCN ανακατανέμεται από τον διαχειριστή αναδιαμόρφωσης πόρων (Resource Reconfiguration Manager) για να εγγυηθεί την απόδοση της εγκατεστημένης εφαρμογής. [27]

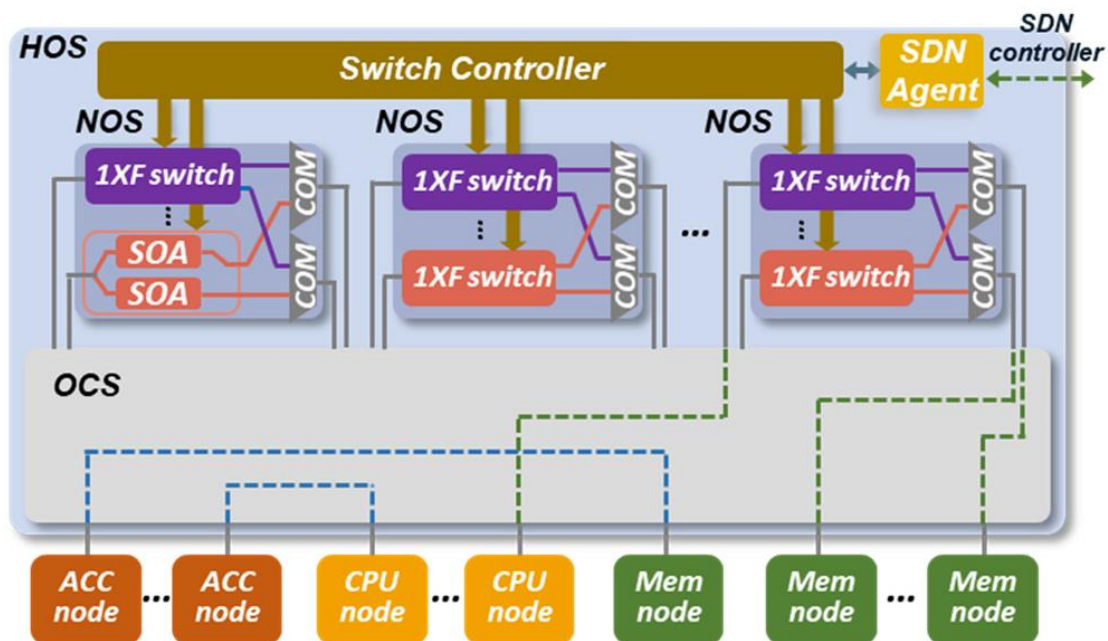
Το NOS χωρίς buffer-less NOS με βάση τον οπτικό έλεγχο ροής (Optical Flow Control) παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 5.4. Με βάση το αρθρωτό και τη δομή μετάδοσης και επιλογής, η κυκλοφορία από διαφορετικούς κόμβους υλικού επεξεργάζεται σε αντίστοιχες μονάδες. Οι  $N$  κόμβοι υλικού χωρίζονται σε  $M$  ομάδες και κάθε ομάδα έχει  $F$  κόμβους υλικού. Σημειώνεται ότι  $1 \times F$  ( $F=N/M$ ) οπτικοί μεταγωγείς χρησιμοποιούνται στο NOS, δεδομένου ότι κάθε ένας από τους  $M$  πομποδέκτες σε έναν κόμβο υλικού προορίζεται για επικοινωνία με διαφορετική ομάδα κόμβων υλικού. Το πακέτο αποστέλλεται από έναν από τους  $M$  πομπούς (TX) στον κόμβο υλικού ανάλογα με τον προορισμό του πακέτου, ενώ ο έλεγχος ροής του σήματος που περιλαμβάνει την προτεραιότητα και τον προορισμό του πακέτου αποστέλλεται στον ελεγκτή μεταγωγής.

Ο ελεγκτής θέτει την ON/OFF κατάσταση των πυλών του οπτικού ενισχυτή ημιαγωγού (SOA), στη θέση 1xF του διακόπτη ( $F=N/M$ ) με βάση το σήμα ελέγχου ροής. Ο συνδυαστής (COM) συγκεντρώνει την έξοδο των διαφορετικών διακοπών 1xF με το ίδιο προορισμό υλικού στον κόμβο. Μεγαλύτερη εκπομπή και διαχωρισμός επιλογής στον 1xF SOA διακόπτες, θα απαιτήσει μεγαλύτερο κέρδος SOA για να αντισταθμίσει τις απώλειες. Όταν το κέρδος είναι υψηλότερο, η υποβάθμιση OSNR θα είναι μεγαλύτερη. Η αντιστάθμιση ισχύος της πύλης SOA μπορεί εγγυηθεί επαρκή περιθώρια προϋπολογισμού σύνδεσης υπό υψηλή διάσπαση λόγο  $F$  ( $F=16$ ) και ρυθμό δεδομένων σύνδεσης (υψηλότερο από 100 Gb/s). Εάν προκύψει ανταγωνισμός, προωθείται το πακέτο με υψηλότερη προτεραιότητα, και ο ελεγκτής μεταγωγής αποστέλλει μια επιβεβαίωση (ACK) στον κόμβο προέλευσης. Εν τω μεταξύ, το πακέτο με χαμηλότερη προτεραιότητα μπλοκάρεται και το σήμα αρνητικής επιβεβαίωσης (NACK) αποστέλλεται στον κόμβο πηγής για επαναμετάδοση του πακέτου. Ο ελεγκτής SDN μπορεί να λαμβάνει στατιστικά στοιχεία δικτύου ρωτώντας τον πράκτορα SDN στο NOS και στέλνοντας οδηγίες στον πράκτορα SDN στο NOS, για την ενημέρωση του πακέτου του πίνακα αναζήτησης του ελεγκτή μεταγωγής (Journal Vol 14, January 2021).



Εικόνα 5.5: Σχηματική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής του NOS.[27]

Το σχηματικό διάγραμμα του HOS για τη διασύνδεση εντός του rack απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5. Στο HOS, υπάρχουν δύο οπτικά τμήματα μεταγωγής: ένα OCS με μεγάλο αριθμό θυρών και διάφορα NOS με μικρό αριθμό θυρών. Όλο το υλικό στο ίδιο rack είναι διασυνδεδεμένο με το τμήμα OCS του HOS, ενώ τα NOS είναι επίσης συνδεδεμένα με τμήμα OCS. Με βάση τις απαιτήσεις κίνησης των διαφόρων κόμβων υλικού και των οδηγιών από τον ελεγκτή SDN, το HOS μπορεί ευέλικτα να ρυθμίσει τον τύπο μεταγωγής των μονοπατιών εισόδου-εξόδου. Για το κίνηση από τον κόμβο CPU/μνήμης στον κόμβο επιταχυντή, συνήθως μεταφέρει τα δεδομένα μεγάλου μεγέθους για τον υπολογισμό του επιταχυντή, τα οποία απαιτούν υψηλή απόδοση και εύρος ζώνης. Ως εκ τούτου, το HOS ορίζει μια σταθερή διαδρομή με τη σύνδεση OCS (μπλε διακεκομμένη γραμμή) για αυτή την ευαίσθητη-καθυστέρηση κυκλοφορίας. Μια χαμηλή καθυστέρηση διασύνδεσης με γρήγορη μεταγωγή δικτύου απαιτείται για την κυκλοφορία CPU-μνήμης και στη συνέχεια το HOS αναθέτει το NOS για μεταγωγή σε νανοδευτερόλεπτα (πράσινη διακεκομμένη γραμμή).



Εικόνα 5.6: Σχηματική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής HOS.[27]

Το HOS μπορεί να παρέχει ένα κλιμακούμενο δίκτυο διασύνδεσης (έως και εκατοντάδων θυρών) και μια λεπτή μεταγωγή για διαφορετική κυκλοφορία, η οποία επίσης αποφεύγει την υψηλή απώλεια ισχύος ενός οπτικού συστήματος μεγάλων θυρών με δομή εκπομπής και επιλογής. Επωφελούμενο από τις πύλες SOA, η απώλεια ισχύος που εισάγει το OCS μπορεί να αντισταθμιστεί χωρίς κανένα πρόσθετο στοιχείο. Λαμβάνοντας υπόψη 3N κόμβους υλικού σε ένα rack (N κόμβους CPU, N κόμβους μνήμης και N κόμβους επιταχυντή), χρησιμοποιείται ένα HOS 3N θυρών για τη διασύνδεση εντός του rack. Σε αυτό το πλαίσιο, το τμήμα OCS του HOS έχει αριθμό θυρών 5N για τη σύνδεση του τμήματος NOS. Υποθέτοντας ότι κάθε HOS έχει αριθμό οκτώ θυρών (αυτό μπορεί να είναι ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου), N/4 NOS απαιτούνται σε κάθε HOS για τη διασύνδεση χαμηλής καθυστέρησης.

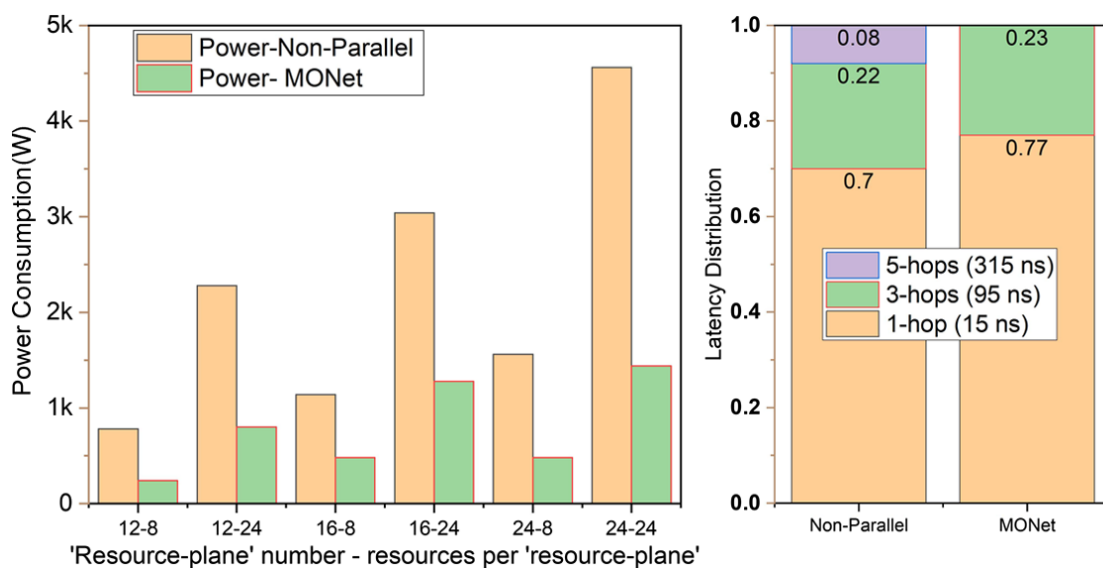


## 5.6 Αξιολόγηση Αρχιτεκτονικών

### 5.6.1 Αξιολόγηση MONet

#### 5.6.1.1 Χαρακτηρισμός αρχιτεκτονικής

Οι πόροι MONet (CPU, μνήμη και θύρες μεταγωγής) χορηγούνται και δεσμεύονται για αιτήσεις VM μόνο όταν υπάρχουν επαρκείς πόροι, διαφορετικά, η αίτηση απορρίπτεται. Οι παράμετροι προσομοίωσης περιγράφονται ως εξής: η απόσταση σύνδεσης που χρησιμοποιείται τόσο στη μη παράλληλη όσο και στην αρχιτεκτονική κέντρου δεδομένων MONet διατηρείται πανομοιότυπη, όπως 0,25 m μεταξύ του πόρου και του OSM εντός της διαδρομής και 3 m μεταξύ του OSM εντός της διαδρομής και του OSM μεταξύ των διαδρομών. Μια πρόσθετη απόσταση σύνδεσης 10 m θεωρείται μεταξύ των οπτικών μεταγωγέων εντός και μεταξύ των ραφιών στη μη παράλληλη αρχιτεκτονική. Στη δεξιά πλευρά της εικόνας 5.7 παρουσιάζεται η αθροιστική συνάρτηση κατανομής καθυστέρησης (CDF) της καθυστέρησης δικτύου round-trip (συναλλαγή ανάγνωσης/εγγραφής μνήμης) σε επίπεδο αρχιτεκτονικής για τη μη παράλληλη και την προτεινόμενη αρχιτεκτονική MONet.



Σχήμα 5.7: Χαρακτηρισμός επιπέδου μεταγωγής: σύγκριση ισχύος και καθυστέρησης δικτύου μεταξύ μη παράλληλων (fat tree) και MONet αρχιτεκτονικών. [26]

### **5.6.1.2 Συμπεράσματα αρχιτεκτονικής MONet**

Στο παρόν κεφάλαιο, προτάθηκε μια νέα αρχιτεκτονική δικτύου με οπτική διάσπαση (MONet) βασισμένη σε FPGA, παρουσιάζοντας τοπικά/απομακρυσμένα συνδεδεμένη σειριακή/παράλληλη πρόσβαση στη μνήμη. Αυτή η αρχιτεκτονική επιδεικνύει την υποστήριξη τόσο παράλληλης μνήμης DDR4 όσο και σειριακής μνήμης HMC για διαχωρισμένα δίκτυα κέντρων δεδομένων. Συνολικά, ο χαρακτήρας της δομής υλικού του MONet υπερτερεί έναντι όλων των ανταγωνιστών δικτύων διαχωρισμένων κέντρων δεδομένων όσον αφορά το εύρος ζώνης, την καθυστέρηση, την κατανάλωση ενέργειας και την αρχιτεκτονική. Παρουσιάστηκε πως για έναν αριθμό πόρων και αναλογιών επιπέδου πόρων, το MONet υποστηρίζει χαμηλότερα άλματα (3 άλματα) και χαμηλότερη καθυστέρηση και καταναλώνει χαμηλότερη ισχύ (<33%) σε σύγκριση με άλλες μη παράλληλες αρχιτεκτονικές. Στο MONet, η λανθάνουσα κατάσταση απομακρυσμένης πρόσβασης στη μνήμη αποδείχθηκε ότι είναι περίπου 678,4 ns για τη μνήμη DDR4 και 534,2 ns, με ελάχιστη ποινή τοπικής-απομακρυσμένης πρόσβασης, για τη μνήμη HMC. Το MONet επιτυγχάνει μέγιστο εύρος ζώνης μνήμης 8,1 GB/s για απομακρυσμένη μνήμη DDR4 και 22,5 GB/s για απομακρυσμένη μνήμη HMC. Η ενεργειακή απόδοση του MONet, έχει ισχυρή συσχέτιση με τη μνήμη/σύνδεση χρήση, καταναλώνοντας μέγιστο 239,2 και 86,6 pJ/bit για απομακρυσμένη μνήμη DDR4 και HMC, αντίστοιχα. Το φυσικό στρώμα του MONet χαρακτηρίστηκε και εξετάστηκε η λειτουργία χωρίς FEC για τοπολογία 2 επιπέδων και 4 επιπέδων σε λειτουργικούς ρυθμούς λωρίδων 12.5, 15 και 10 Gb/s, αντίστοιχα, εξασφαλίζοντας ότι το 100% των πόρων του κέντρου δεδομένων μπορεί να προσπελαστεί μέσα σε 3 άλματα.[26]

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική συνηγορεί υπέρ της χρήσης οπτικά προσαρτημένης σειριακής μνήμης ως ιδανικού υποψηφίου λόγω

(1) υψηλότερου διατηρούμενου εύρους ζώνης (95,7% με χρήση της βασικής γραμμής και 91,1% με χρήση της συγκριτικής αξιολόγησης STREAM) με δυνατότητα παροχής μέσων-χαμηλών καθυστερήσεων εγγραφής-ανάγνωσης (μόνο 196-230,4 ns επιπλέον καθυστέρηση κυκλικής διαδρομής σε απόσταση 36 m κυκλικής διαδρομής) σε ρυθμό λωρίδας 15 Gb/s,

(2) υψηλότερη διατηρούμενη απόδοση σε όλους τους φόρτους εργασίας YCSB (πάνω από 90%) με πολύ χαμηλή πρόσθετη συνεισφορά στη μέση καθυστέρηση (μόνο έως 10%) σε απόσταση 36 m κυκλικής διαδρομής σε 15 Gb/s,

(3) εξάλειψη ενός πρόσθετου τσιπ (π.χ, ASIC, FPGA, MPSoC) για τη φιλοξενία του ελεγκτή μνήμης λόγω σειριακής επικοινωνίας και

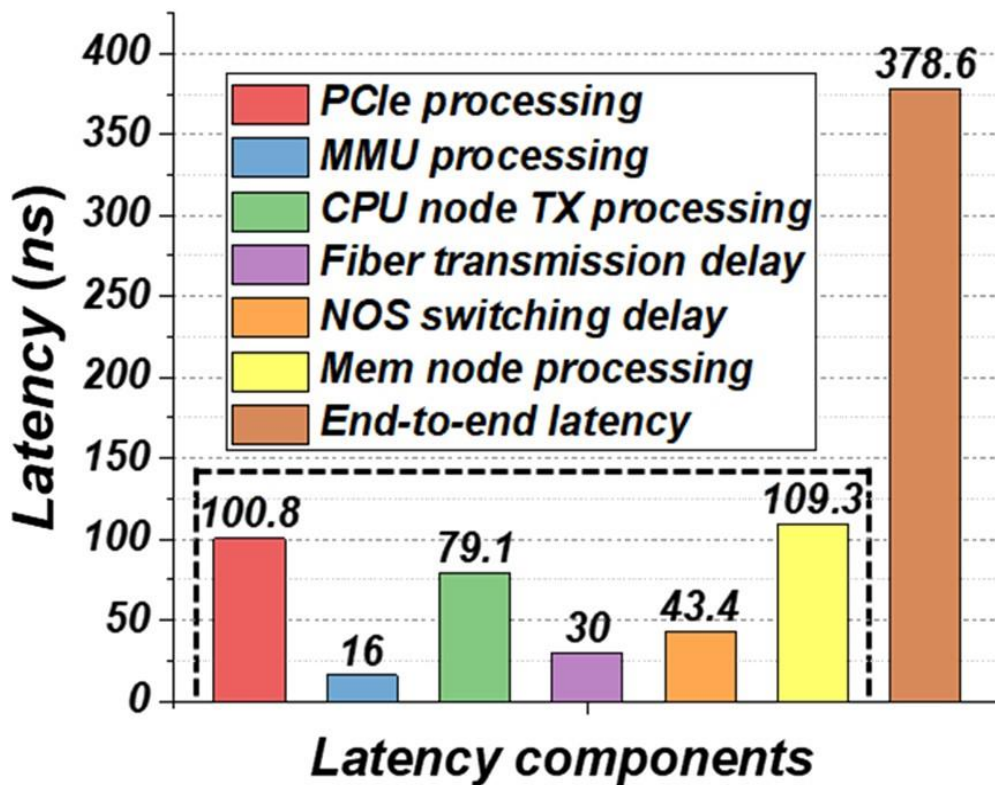
(4) εγγενής συμβατότητα με διασυνδέσεις υψηλής ταχύτητας και λειτουργία δικτύου που μειώνει την το κόστος, την κατανάλωση ενέργειας και το αποτύπωμα.

## 5.6.2 Αξιολόγηση DACON

### 5.6.2.1 Απόδοση Δικτύου

Ο συνολικός λανθάνων χρόνος κόμβου προς κόμβο και η κατανομή του εμφανίζονται στο εικόνας 5.8 για την πρόσβαση στον κόμβο μνήμης. Η προσαρμοσμένη φυσική κωδικοποίηση. Τα υποστρώματα (PCS) και τα φυσικά μέσα προσάρτησης (PMA) έχουν σχεδιαστεί για την ενότητα GTH αντί για το τρέχον πρωτόκολλο Ethernet για να ελαχιστοποιήσουν την καθυστέρηση της επεξεργασίας πακέτων. Ο χρόνος μεταγωγής του NOS των 43,4 ns περιλαμβάνει 12,4 ns χρόνου επεξεργασίας ετικέτας, 3 ns καθυστέρησης του προγράμματος οδήγησης του διακόπτη, 6 ns χρόνου αύξησης του διακόπτη, 6 ns του χρόνου πτώσης του διακόπτη, και 16 ns του χρόνου περιθωρίου του διακόπτη. Μετά τη διαδικασία προετοιμασίας, η συχνότητα ρολογιού διατηρείται κλειδωμένη μεταξύ όλων των κόμβων με βάση το 1588v2 PTP. Όταν εναλλάσσετε μεταξύ διαφορετικών ζευγών TX/RX, απαιτεί μόνο μέχρι 3,1 ns για να ανακτήσει τη φάση ρολογιού στην πλευρά RX για το κλείδωμα CDR (που περιλαμβάνεται στην επεξεργασία κόμβου Mem της εικόνας 5.8).

Με βάση το διακριτό πρωτότυπο που βασίζεται σε NOS, επιτυγχάνεται ελάχιστος λανθάνων χρόνος δικτύου μεταξύ κόμβων 378,6 ns κατά την πρόσβαση στον κόμβο μνήμης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καθυστέρηση επεξεργασίας PCIe των 100,8 ns είναι για τη συμβατότητα με την τρέχουσα δομή της CPU και την ενσωματωμένη διασύνδεση διαύλου και για την εκτέλεση του μη τροποποιημένου λειτουργικού συστήματος Linux. Ο χρόνος αναμονής κόμβου προς κόμβο μπορεί να μειωθεί περαιτέρω όταν υλοποιηθεί μια διακριτή CPU και αφαιρεθεί ο δίαυλος PCIe.



Εικόνα. 5.8. End-to-end καθυστέρηση, μαζί με την δικτυακή καθυστέρηση και καθυστέρηση επεξεργασίας του κάθε κόμβου όταν προσπελασεται ένας κόμβος μνήμης [27]

### **5.6.2.2 Συμπεράσματα αρχιτεκτονικής DACON**

Επωφελούμενη από τους διαχωρισμένους κόμβους υλικών και από ένα προσαρμοσμένο επίπεδο ελέγχου SDN, η αρχιτεκτονική DACON επιτυγχάνει αποδοτική αξιοποίηση και ευέλικτη ανακατανομή των πόρων. Βασιζόμενη στον ελεγκτή των κόμβων υλικού που βασίζεται σε FPGA, στους πόρους υλικού των μικροπινάκων και στα NOS τεσσάρων θυρών, υλοποιεί ένα πρωτότυπο διαχωρισμού τεσσάρων κόμβων. Με τον μη τροποποιημένο πυρήνα Linux, η αρχιτεκτονική DACON επιτυγχάνει ταχύτερο χρόνο εκτέλεσης κατά 1,46 κάτω από την εφαρμογή βάσης δεδομένων Memcached και το MNAR της 0,9 σε σύγκριση με την αρχιτεκτονική με επίκεντρο τον διακομιστή. Εν τω μεταξύ, αποδεικνύεται ότι, αξιοποιώντας τον προσαρμοσμένο ελεγκτή και ενορχηστρωτή SDN, η καθυστέρηση δικτύου της προσπέλασης κόμβων μνήμης μειώνεται κατά 21% με βάση τον πραγματικό χρόνο ανακατανομής πόρων. Η ανάλυση της επεκτασιμότητας δείχνει ότι η αρχιτεκτονική DACON επιτυγχάνει καθυστέρηση δικτύου από κόμβο σε κόμβο 404,8 ns για την κυκλοφορία εντός του rack και 521,9 ns για την κυκλοφορία μεταξύ των rack υπό κλίμακα δικτύου 6144 κόμβων και MNAR 0,9. Επιπλέον, φαίνεται από το κόστος και την ισχύ κατανάλωσης ότι η αρχιτεκτονική DACON επιτυγχάνει έως και 13,4% εξοικονόμηση κόστους του δικτύου διασύνδεσης σε σύγκριση με την τρέχουσα διαχωρισμένη αρχιτεκτονική, ενώ έως και 31,1% λιγότερη κατανάλωση ισχύος σε σύγκριση με τις τρέχουσες αρχιτεκτονικές με επίκεντρο τον εξυπηρετητή. [27]

Περισσότερες πληροφορίες για τις προαναφερθούσες αρχιτεκτονικές, όσον αφορά την υλοποίηση και τα αποτελέσματα, μπορούν να βρεθούν στα άρθρα που χρησιμοποιήθηκαν και θα υπάρχουν στην βιβλιογραφία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

### 6.1 Συμπεράσματα

Είναι γεγονός ότι το πρόβλημα που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα DC προέρχεται από την συνεχώς αυξανόμενη κίνηση των δεδομένων. Οι προκλήσεις που εγείρονται από την ραγδαία αυτή αύξηση, δεν αφορούν μόνο τις νέες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, ως μεμονωμένη οντότητα, αλλά και στον κορεσμό των πόρων που έχει επέλθει στα DC, στον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης, στην ελαχιστοποίηση των διαστάσεων των μεγεθών των συστημάτων.

#### 6.1.1 Συνδέσεις υψηλού εύρους ζώνης (high bandwidth links)

Η κίνηση που παράγεται από τους servers διπλασιάζεται κάθε χρόνο, οι μεταβάσεις από 10 σε 40 Gb/s , από 40 σε 100 Gb/s και από 100 Gb/s σε ακόμη υψηλότερους ρυθμούς είχαν προβλεφθεί σχετικά νωρίς. Το 2017 αναπτύχθηκαν στα DC διασυνδέσεις των 40 Gb/s, σε επίπεδο Ethernet. Συνδέσεις χωρητικότητας 100 Gb/s είναι εμπορικά διαθέσιμες από το 2014, ενώ μονάδες διασύνδεσης χωρητικότητας 400 Gb/s σε επίπεδο ενσύρματο αναμένεται να εμφανιστούν μαζικά στην αγορά το 2023. Τέλος, η επόμενη επικύρωση προτύπων, που θα περιλαμβάνει τα 800 Gb/s και 1.6 Tb/s σε επίπεδο οπτικών ινών, αναμένεται μέχρι το 2024.

#### 6.1.2 Αξιοποίηση πόρων μέσω διαχωρισμού

Τα DC αποτελούνται από διακομιστές (servers), ως δομικά μπλοκ, οι οποίοι περιλαμβάνουν ένα σύνολο στενά συνδεδεμένων συσκευών-πόρων όπως CPU/GPU, μνήμη, διεπαφές δικτύου και αποθηκευτικά συστήματα (π.χ. σκληρούς δίσκους). Ο σχεδιασμός αυτός έρχεται αντιμέτωπος με τις νέες τάσεις-προκλήσεις, καθώς τα διάφορα στοιχεία του διακομιστή ακολουθούν διαφορετικές τάσεις σε θέματα κόστους και επίδοσης.

Ένα άλλο πρόβλημα που εντοπίζεται είναι η αδυναμία κατακερματισμού πόρων, σε περιπτώσεις όπου πόροι (CPU, μνήμη, I/Os, κλπ.) δεν βρίσκονται σε αντιστοιχία με τις απαιτήσεις του φόρτου εργασίας. Οι προκλήσεις αυτές αποτελούν το κίνητρο για την ανάπτυξη της ιδέας του διαχωρισμού. Ο διαχωρισμός (disaggregation) με τη χρήση οπτικών δικτύων, είναι μία έννοια στην οποία συγκεντρώνονται παρόμοιοι πόροι, με τη δυνατότητα κάθε διαφορετικός πόρος να μπορεί να αναβαθμιστεί ξεχωριστά και το σύστημα να προσαρμοστεί αναλόγως για βελτιστοποίηση της απόδοσης. Το δίκτυο μπορεί να χωριστεί σε διαφορετικά επίπεδα, όπως για παράδειγμα σε επίπεδο rack ή server.

### **6.1.3 Ενεργειακή αποδοτικότητα**

Τα σύγχρονα DC, πρέπει αφενός μεν να είναι σε θέση να συμβαδίσουν με τις αυξανόμενες απαιτήσεις που υπαγορεύουν τα νέα δεδομένα, αφετέρου δε να αντιμετωπίσουν την αυξανόμενη κατανάλωση ισχύος που απαιτείται για τη διαχείριση της ροής αέρα και της ψύξης, που οι απαιτήσεις αυτές επιφέρουν.

Όσον αφορά τις ανάγκες σε ισχύ, αυτές περιλαμβάνουν τόσο την ισχύ που απαιτείται για την εκτέλεση μίας εργασίας σε μία CPU (ή GPU) όσο και την ισχύ για τον διαμοιρασμό των δεδομένων αυτών σε chip και κόμβους. Οι τάσεις που αφορούν τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των DC και στις οποίες εισέρχεται η χρήση των οπτικών είναι:

- Οι συνδέσεις υψηλού εύρους ζώνης.
- Η βελτιστοποίηση της αξιοποίησης πόρων μέσω διαχωρισμού (disaggregation).

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Alexander Shalimov, Dmitry Zuikov, Daria Zimarina, Vasily Pashkov, Ruslan Smeliansky, “Advanced study of SDN/Openflow controllers”, Conference: Proceedings of the 9th Central & Eastern European Software Engineering, 2013.
- [2] Brandon Heller, Rob Sherwood, Nick McKeown, “The Controller Placement Problem”, HotSDN’12, 2012.
- [3] Bruno Astuto A. Nunes, Marc Mendonca, Xuan-Nam Nguyen, Katia Obraczka, and Thierry Turetli, “A Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks”, Communications Surveys and Tutorials, IEEE Communications Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014.
- [4] Cook, C., et al.: A 36-channel parallel optical interconnect module based on optoelectronics-on-VLSI technology. IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 9(2), 2003.
- [5] C. Hogge, “A self correcting clock recovery circuit,” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 3, no. 6, 1985.
- [6] -Co-packaged optical module discussion document v1.0. CPO Collaboration (2019)
- [7] Co-packaged optics external laser source guidance document v1.0. CPO Collaboration (2020).
- [8] Cisco global cloud index: forecast and methodology, 2016–2021. [Online] Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-indexgci/white-paper-c11-738085.html>



- [9] D. Kuchta, A. V. Rylyakov, C. L. Schow, J. Proesel, C. Baks, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, and A. Larsson, "64Gb/s Transmission over 57m MMF using an NRZ Modulated 850nm VCSEL," in Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2014.
- [10] D. Mahgerefteh, C. Thompson, C. Cole, G. Denoyer, T. Nguyen, I. Lyubomirsky, C. Kocot, and J. Tatum, "Techno-Economic Comparison of Silicon Photonics and Multimode VCSELs," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 2.
- [11] D. Patel, S. Ghosh, M. Chagnon, A. Samani, V. Veerasubramanian, M. Osman, and D. V. Plant, "Design, analysis, and transmission system performance of a 41 GHz silicon photonic modulator," Optics Express, vol. 23, no. 11, 2015.
- [12] D. Syrivelis, A. Reale, K. Katrinis, I. Syrigos, M. Bielski, D. Theodoropoulos, D. N. Pnevmatikatos, and G. Zervas, "A softwaredefined architecture and prototype for disaggregated memory rack scale systems," in International Conference on Embedded
- [13] Computer Systems: Architectures, Modeling, and Simulation (SAMOS) (2017).
- [14] Diego Kreutz, Fernando M. V. Ramos, Paulo Verissimo, Christian Esteve Rothenberg, Siamak Azodolmolky and Steve Uhlig, Member, "Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey", 2014.
- [15] E. Haglund, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, E. P. Haglund, A. Larsson, M. Geen, and A. Joel, "30 GHz bandwidth 850 nm VCSEL with sub-100 fJ/bit energy dissipation at 25-50 Gbit/s," Electronics Letters, vol. 51, no. 14, 2015.
- [16] Finisar, "40 GHz Single High-speed photoreceiver," 2016.
- [17] Fujitsu, "40 Gb/s NRZ LiNbO external modulator," 2005.
- [18] G. Lee, Cloud Networking: Understanding Cloud-Based Data Center Networks. Morgan Kaufmann, 2014.

- [19] G. Letal, K. Prosyk, R. Millett, D. Macquistan, S. Paquet, O. Thibault-Maheu, J.-F. Gagné, P.-L. Fortin, R. Dowlatshahi, B. Rioux, T. Spring Thorpe, M. Hisko, R. Ma, and I. Woods, “Low Loss InP C-Band IQ Modulator with 40GHz Bandwidth and 1.5V V<sub>pi</sub>,” in Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2015.
- [20] Hasharoni, K., et al.: A high end routing platform for core and edge applications based on chip to chip optical interconnect. In: Optical fibre Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013.
- [21] Hyojoon Kim, Nick Feamster, “Improving Network Management with Software Defined Networking”, IEEE Communications Magazine, 2013.
- [22] Intel demonstrates industry-first co-packaged optics ethernet switch. Intel (2020).
- [23] “Introduction to OSPF, ISP/IXP Workshops“, Cisco Systems.
- [24] J. D. H. Alexander, “Clock recovery from random binary signals,” IEEE Electronics Letters, vol. 11, no. 22, 1975.
- [25] J. Godin, V. Nodjiadjim, M. Riet, P. Berdager, O. Drisse, E. Derouin, A. Konczykowska, J. Moulu, J. Y. Dupuy, F. Jorge, J. L. Gentner, A. Scavennec, T. Johansen, and V. Krozer, “Submicron InP DHBT technology for high-speed high-swing mixed-signal ICs,” in IEEE CSIC Symposium: GaAs ICs Celebrate 30 Years in Monterey, 2008.
- [26] Journal of Optical Communications and Networking 126 Vol. 13, No. 5, May 2021
- [27] Journal of Optical Communications and Networking A69 Vol. 14, No. 1, January 2022
- [28] K. Mueller and M. Muller, “Timing Recovery in Digital Synchronous Data Receivers,” IEEE Transactions on Communications, vol. 24, no. 5, 1976.

[29] Knebel, P. et al.: Gen-Z Chipset for Exascale fabrics. In: 2019 IEEE Hot Chips Symposium, IEEE (2019).

[30] Kuchta, D: High speed VCSELs and Co-packaging for short reach communication within Cloud and high performance computing. In: 24th Microoptics Conference (MOC), 2019.

[31] L. Kull, T. Toifl, M. Schmatz, P. A. Francese, C. Menolfi, M. Braendli, M. Kossel, T. Morf, T.M.Andersen, and Y. Leblebici, “22.1 A 90GS/s 8b 667mW 64 x interleaved SAR ADC in 32nm digital SOI CMOS,” in 2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2014.

[32] LightCounting, Lightcounting ethernet optics report. 2020.

[33] M. K. Weldon, The Future X Network: A Bell Labs Perspective. CRC Press, 2016. The encyclopedia of information technology. Atlantic, 2007.

[34] Meade, R., et al.: TeraPHY: a high-density electronic-photonic chiplet for optical I/O from a multi-chip module. In: 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2019.

[35] Neophotonics, “56G EML,” 2016.

[36] Netcraft, “Netcraft web server survey,” 2009.

[37] Nokia, —PSE-2 super coherent technology, 2016. Available: <https://networks.nokia.com/products/pse-2-super-coherent-technology>

[38] “On the Convergence of the EIGRP Routing Protocol“, Dejan Spasov, Marjan Gusev, Sasko Ristov, Institute of Informatics, Faculty of Natural Science, Ss. Cyril and Methodius University.

[39] P. E. Ceruzzi, A History of Modern Computing. MIT press, 2015.

[40] P. Groumas, Z. Zhang, V. Katopodis, A. Konczykowska, J. Y. Dupuy, A. Beretta, A. Dede, J. H. Choi, P. Harati, F. Jorge, V. Nodjiadjim, M. Riet, R. Dinu, G. Cangini, E. Miller, A. Vannucci, N. Keil, H. G. Bach, N. Grote, M. Spyropoulou, H. Avramopoulos, and C. Kouloumentas, “Tunable 100 Gbaud Transmitter Based on Hybrid Polymer-to-Polymer Integration for Flexible Optical Interconnects,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 2, 2016.

[41] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan and Galen H. Sasaki, “Optical Networks A Practical Perspective Third Edition”, Horgan Kaufman Elsevier, 2010.

[42] Shie-Yuan Wang, Hung-Wei Chiu, Chih-Liang Chou, “Comparisons of SDN OpenFlow Controllers over EstiNet: Ryu vs. NOX”, *ICN 2015: The Fourteenth International Conference on Networks*, 2015.

[43] Siamak Azodolmolky, “Software Defined Networking with Open Flow”, 2013 Pritesh Ranjan, Pankaj Pande, Ramesh Oswal, Zainab Qurani, Rajneeshkaur Bedi, “A Survey of Past, Present and Future of Software Defined Networking”, Volume 2, Issue 4, *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, 2014.

[44] V. Mishra, Q. Chen, and G. Zervas, “REoN: a protocol for reliable software-defined FPGA partial reconfiguration over network,” in *International Conference on ReConFigurable Computing and FPGAs (ReConFig)* (2016).

[45] Xilinx, “Zynq UltraScale+ RFSoc ZCU111 evaluation kit,” 2019, <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/zcu111.html>.

[46] Y. Yan, G. M. Saridis, Y. Shu, B. R. Rofoee, S. Yan, M. Arslan, T. Bradley, N. V. Wheeler, N. H. Wong, F. Poletti, M. N. Petrovich, D. J. Richardson, S. Poole, G. Zervas, and D. Simeonidou, “All-optical programmable disaggregated data centre network realized by FPGA-based switch and interface card,” *J. Lightwave Technol.* (2016).

[47] Z. Zhang, J. liu, Y. Liu, J. Guo, H. Yuan, J. Bai, and N. zhu, “30-GHz directly modulation DFB laser with narrow linewidth,” in Proc. Asia Communications and Photonics Conference (ACP), 2015. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ACPC-2015-AM1B.3>