



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών

Ειδίκευση Δικτύων Επικοινωνιών και Καταναμημένων Συστημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων σε δίκτυα κέντρων δεδομένων

**Διονυσία Γαλυφοπούλου
Α.Μ. mcse20013**

Εισηγητής: Δρ Αντώνιος Μπόγγρης, Καθηγητής

(Κενό φύλλο)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων σε δίκτυα κέντρων δεδομένων

**Διονυσία Γαλυφοπούλου
Α.Μ. mcse20013**

Εισηγητής:

Δρ Αντώνιος Μπόγρης, Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή:

Νικόλαος Μυριδάκης, Επίκουρος Καθηγητής

Νικόλαος Ψαράς, Λέκτορας Εφαρμογών

Ημερομηνία εξέτασης 06/04/2022

(Κενό φύλλο)

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Γαλυφοπούλου Διονυσία του Νικολάου, με αριθμό μητρώου mcse20013 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών (ΕΤΠΥ) του Τμήματος Μηχανικών και Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής 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».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Η Δηλούσα

Γαλυφοπούλου Διονυσία



(Κενό φύλλο)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Αντώνιο Μπόγρη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, την επιμονή του, το αμείωτο ενδιαφέρον του, τη συμπαράστασή του, τη συνεχή του υποστήριξη και το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω βαθιά για όλη την αμέτρητη συμπαράσταση και κατανόησή την οικογένεια μου, η οποία υπήρξε ανεκτίμητο στήριγμα για εμένα και στην οποία οφείλω όλη τη διαδρομή των σπουδών μου, μέχρι σήμερα.

(Κενό φύλλο)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, εφαρμογές με επίκεντρο τα δεδομένα, όπως ροές βίντεο υψηλής ευκρίνειας, η κοινωνική δικτύωση και το cloud computing 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 μία αναπόσπαστη απόρροια της ύπαρξης του Διαδικτύου και παρέχουν ποικίλες υπηρεσίες από την κοινωνική δικτύωση έως τους επιστημονικούς υπολογισμούς μεγάλης κλίμακας. Επιπρόσθετα, τα τρέχοντα συστήματα κέντρων δεδομένων οργανώνονται με τη μορφή της ιεραρχικής δενδρικής δομής που βασίζεται σε μεταγωγείς περιορισμένου εύρους ζώνης.

Τα σύγχρονα συστήματα κέντρων δεδομένων αντιμετωπίζουν μια σειρά ζητημάτων όπως η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, η περιορισμένη διαθεσιμότητα εύρους ζώνης, η συνδεσιμότητα διακομιστή, η ενεργειακή απόδοση και το κόστος, η πολυπλοκότητα της κυκλοφορίας κ.λπ. Λόγω της προόδου στους πολυπύρηνους επεξεργαστές, τους επιταχυντές και τα αυξανόμενα επίπεδα παραλληλισμού σε όλα τα επίπεδα του ιεραρχικού συστήματος, παρατηρείται μία έντονη τάση βελτίωσης της απόδοσης που αναμένεται να συνεχιστεί και στα επόμενα χρόνια. Ως εκ τούτου, τα κέντρα δεδομένων πρέπει να επανεξεταστούν από την άποψη του σχεδιασμού διασύνδεσης όσων αφορά την υποστήριξη κέντρων δεδομένων πολύ μεγάλης κλίμακας, εξοικονομώντας παράλληλα ενέργεια.

Το τελευταίο διάστημα, πολλοί ερευνητές επικεντρώθηκαν 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 οπτικής μεταγωγής ή πιο συγκεκριμένα οπτικών δικτύων στον πυρήνα των συστημάτων των κέντρων δεδομένων.

Στα πλαίσια υλοποίησης της παρούσας εργασίας θα παρουσιαστεί μια ενδελεχής περιγραφή των σύγχρονων συστημάτων κέντρων δεδομένων και μερικές δημοφιλείς αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων σε δίκτυα κέντρων δεδομένων όπου θα παρουσιάζονται και θα αναλύονται αντίστοιχα τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της εκάστοτε αρχιτεκτονικής.

Αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων σε δίκτυα κέντρων δεδομένων

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Αρχιτεκτονική Ηλεκτρονικών Υπολογιστών ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:
επεξεργαστής, λανθάνουσα μνήμη, διακοπές, assembly, DMA

ABSTRACT

In recent years, data-driven applications such as high-definition video streaming, social networking and cloud computing combined with the widespread use 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 existence of the Internet and provide a variety of services from social networking to large-scale scientific calculations. In addition, current data center systems are organized in the form of a hierarchical tree structure based on bandwidth switches.

Modern data center systems face a number of issues such as high power consumption, limited bandwidth availability, server connectivity, energy efficiency and cost, traffic complexity, etc. Due to advances in multicore processors, accelerators and increasing levels of parallelism at all levels of the hierarchical system, there is a strong trend of improving performance that is expected to continue in the coming years. Therefore, data centers need to be reconsidered in terms of interconnection design in terms of very large data center support, while saving energy.

Lately, many researchers have focused on looking at different approaches to addressing the scalability, speed, and performance requirements of next-generation data centers. One of the most feasible solutions to these problems is the use of optical switching technologies or more specifically optical networks in the core of data center systems.

As part of the implementation of this work, a thorough description of modern data center systems and some popular optical network architectures in data center networks will be presented.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγικά Κεφάλαια Εργασίας	1
1.1. Εισαγωγή	1
1.2. Σκοπός Εργασίας.....	3
1.3. Δομή Εργασίας.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Αναδρομή στα δίκτυα Κέντρων Δεδομένων	6
2.1. Ιστορική Αναδρομή Στα Κέντρα Δεδομένων.....	6
2.2. Παγκόσμια Εξέλιξη Της Κυκλοφορίας - Κίνησης στα Κέντρα Δεδομένων	7
2.3. Σύγχρονες Εφαρμογές των Δικτύων Κέντρων Δεδομένων.....	9
2.4. Αρχιτεκτονική Δικτύων Κέντρων Δεδομένων: Απαιτήσεις Και Προκλήσεις..	12
2.5. Μελλοντικές Προκλήσεις Των Κέντρων Δεδομένων Μεγάλης Κλίμακας	15
2.5.1. Ανατομία Ενός Κέντρου Δεδομένων Μεγάλης Κλίμακας	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Τεχνολογίες Οπτικής Διασύνδεσης (Optical Interconnects) 18	18
3.1. Τεχνικές Διαμόρφωσης Im-DD Συστημάτων Άμεσης Ανίχνευσης (Im-DD) Και Διαμόρφωσης Έντασης.....	18
3.1.1. Πομπός Im-DD	18
3.1.2. Δέκτης Im-DD	23
3.2. Σύμφωνοι Πομποδέκτες.....	25
3.3. Co-Packaged Τεχνολογίες	26
3.4. Σύγχρονες Τάσεις Ethernet.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Τεχνολογίες Οπτικής Μεταγωγής	37
4.1. Ο Ρόλος Της Οπτικής Μεταγωγής Στα Σημερινά Κέντρα Δεδομένων	37
4.2. Τεχνικές Επικοινωνίας / Μεταγωγής Δικτύων.....	40
4.2.1. Μεταγωγή οπτικού κυκλώματος- Optical circuit switching	40
4.2.2. Ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων- Electronic packet switching.....	41
4.2.3. Οπτική μεταγωγή πακέτων- Optical packet switching	43
4.3. Προοπτικές Εξέλιξης των Τεχνολογιών Οπτικής Μεταγωγής σε Μελλοντικά Κέντρα Δεδομένων.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Δικτύωση Καθορισμένη από Λογισμικό (SDN) και Οπτικά Δίκτυα σε Δίκτυα Κέντρων Δεδομένων.....	50
5.1. Η Έννοια του SDN και Αρχιτεκτονική SDN για Οπτικά Δίκτυα	50
5.2. Από τα παραδοσιακά δίκτυα στο SDN	52
5.3. Η Ανάπτυξη των SDN Controllers	55
5.4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ SDN	57

5.4.1. Data Centers	58
5.4.2. Δίκτυα οπτικών δικτύων.....	59
5.4.3. Σημεία ανταλλαγής διαδικτύου (IXP)	59
5.4.4. Δίκτυα Επιχειρήσεων.....	59
5.4.5. Ασύρματη πρόσβαση στα Δίκτυα	60
5.4.6. Οπτικά δίκτυα	60
5.4.7. Οικιακή Χρήση και Μικρές Επιχειρήσεις	60
5.5. Το πρωτόκολλο OpenFlow.....	61
5.5.1. Πλεονεκτήματα της χρήσης OpenFlow	65
5.6. Το πρωτόκολλο NETCONF.....	66
5.6.1. Λειτουργίες	68
5.6.2. Ενεργοποίηση και διαμόρφωση πρωτοκόλλου ρύθμισης παραμέτρων δικτύου (NETCONF) σε διαχειριζόμενη συσκευή.....	68
5.7. OpenFlow εναντίον Netconf: Η σύγκριση πρωτοκόλλων	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	77

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αύξηση κίνησης δικτύου από την εμφάνιση του Διαδικτύου	8
Εικόνα 2: Παραδοσιακή τοπολογία δέντρων πολλαπλών ριζών τριών επιπέδων. Αριστερά: απεικόνιση τυπικής υλοποίησης συμπλέγματος	11
Εικόνα 3: Modern Folded Clos topology.....	12
Εικόνα 4: Συνολικός αριθμός συνδεδεμένων μονάδων, διακοπών και ινών που τοποθετήθηκαν στο πιο πρόσφατο αναφερόμενο κέντρο δεδομένων Google που υποστηρίζει σχεδόν 400.000 διακομιστές 10-Gb/s (εκτιμώμενη) και την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας.	14
Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση του πιο πρόσφατου αναφερόμενου δικτύου κέντρων δεδομένων της Google "Jupiter"	18
Εικόνα 6: Generic block diagram of an IM-DD transmitter.	19
Εικόνα 7:(a) a VCSEL and (b) a DFB laser.	20
Εικόνα 8:(a) Exemplary illustration of an EAM (From [79]). (b) Schematic of a MZM.	22
Εικόνα 9: (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.	24
Εικόνα 10: (α) Αστερισμοί PAM-2, (β) QPSK και (γ) 16-QAM αστερισμοί, που σχεδιάζονται στο μιγαδικό επίπεδο συμπεριλαμβανομένων πραγματικών και φανταστικών αξόνων.....	26
Εικόνα 11: 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	27
Εικόνα 12: Τεχνολογίες Δικτύωσης και Χαρακτηριστικά.....	31
Εικόνα 13: Οι καλύτερες ταχύτητες Ethernet ανα Μέγεθος Επιχείρησης.....	33
Εικόνα 14: Αναβάθμιση Χώρων Εργασίας - Ethernet	33
Εικόνα 15: Τύποι Switches ανά Μέγεθος Εταιρείας	35

Εικόνα 16: Εταιρείες Παροχής Μεταγωγέων Δικτύου	36
Εικόνα 17: Network segments in a global telecommunication network.	38
Εικόνα 18: Optical Circuit Switching Network.....	41
Εικόνα 19: Electronic Packet Switching Network	42
Εικόνα 20: Optical packet switching networks when using a mesh-like topology.	44
Εικόνα 21: Optical packet switching networks when using a ring topology.	45
Εικόνα 22: Evolution of Optical Switching in NGDCs	49
Εικόνα 23: Χρονοδιάγραμμα SDN.....	52
Εικόνα 24: Παραδοσιακή αρχιτεκτονική VS SDN	53
Εικόνα 25: SDN Controllers.....	55
Εικόνα 26: OpenFlow Network	57
Εικόνα 27: The OpenFlow Protocol.....	62
Εικόνα 28: The OpenFlow Architecture	63
Εικόνα 29: Flow-Table Entries That Can Be Manipulated in an OF Switch	64
Εικόνα 30: NETCONF Protocol – Network Configuration Protocol.....	66
Εικόνα 31: OPENFLOW VS NETCONF	70

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

SDN	Software Defined Networks	Δικτύωση οριζόμενη από λογισμικό
DCN	Data Center Networks	Δίκτυα Κέντρων Δεδομένων
Switch		Μεταγωγέας/Διακόπτης
Optical circuit switching	OCS	Εναλλαγή Οπτικού Κυκλώματος
Electronic packet switching	EPS	Ηλεκτρονική Μεταγωγή Πακέτων
Optical packet Switching	OPS	Οπτική Εναλλαγή Πακέτων
Space Division Multiplexing	SDM	Πολυπλεξία Χωρικής Διαίρεσης
Wavelength Division Multiplexing	WDM	Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος
Coherent Transceivers		Σύμφωνοι Πομποδέκτες
Passive Optical Networks	PON	Παθητικό Οπτικό Δίκτυο
Wavelength Selective Switch	WSS	Διακόπτες Επιλογής Μήκους Κύματος
Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer	ROADM	Επαναδιαμορφώσιμος Οπτικός πολυπλέκτης Προσθήκης
Open Systems Interconnection	OSI	Ανοιχτό Σύστημα Διασύνδεσης
Controller		Ελεγκτής
Northbound		Κατεύθυνση Βορρά
Southbound		Κατεύθυνση Νότου
Network Node Manager	NNMi	Κόμβος Διαχείρισης Δικτύου
Command Line Interface	CLI	Διεπαφή Γραμμής Εντολών
Remote Procedure Call	RPC	Κλήση Απομακρυσμένης Διαδικασίας
Datapath ID	DPID	Αναγνωριστικό Διαδρομής Δεδομένων

Co-packaged Optics	CPO	Co-packaged οπτικά
--------------------	-----	--------------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγικά Κεφάλαια Εργασίας

1.1. Εισαγωγή

Οι πλατφόρμες υπολογιστών μεγάλης κλίμακας έχουν χρησιμεύσει ως υποδομή διαφόρων ειδών υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων των επιστημονικών υπολογιστών, των μηχανών αναζήτησης στο Διαδίκτυο, των κοινωνικών δικτύων, της πρόγνωσης καιρού κ.λπ. Το cloud computing επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε τέτοιου βεληνεκούς πλατφόρμες υπολογιστών παντού. Για να γίνει αυτό, η υποδομή μεταγωγής και δικτύωσης για την υποστήριξη του υπολογιστικού νέφους πρέπει να είναι επεκτάσιμη, ευέλικτη, ανθεκτική και διάχυτη. Επιπλέον, πολλές εφαρμογές υπολογιστικού νέφους απαιτούν πλέον υψηλή απόδοση και χαμηλή καθυστέρηση. Δεδομένου ότι αυτές οι εφαρμογές πρέπει να εκτελούνται από άκρο σε άκρο σε πολλά ετερογενή δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων κέντρων δεδομένων και παρόχων υπηρεσιών, πρέπει να εξετάσουμε τα ζητήματα τόσο της δικτύωσης εντός αλλά και μεταξύ των κέντρων δεδομένων. Τα κέντρα δεδομένων (DC) διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην παροχή υπηρεσιών Διαδικτύου για έναν ολοένα αυξανόμενο αριθμό πελατών και συσκευών (Clark J., 2012) γεγονός που εγείρει αυστηρές απαιτήσεις σε δίκτυα διασύνδεσης για DC όσον αφορά τη χωρητικότητα, την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση όπως αναφέραμε και παραπάνω. Όσον αφορά την απαίτηση χωρητικότητας, η κίνηση των DC θα συνεχίσει να κυριαρχεί στην κίνηση του Διαδικτύου στο προβλεπόμενο μέλλον. Μια σαφής τάση αυτής της κίνησης είναι η μετατροπή της συμβατικής κατεύθυνσης «βορρά-νότου» που στέλνει/λαμβάνει δεδομένα προς/από έξω από τα DC προς την κατεύθυνση «ανατολή-δύση» που αντιστοιχεί στην κίνηση που παραμένει τοπικά εντός του DC και προβλέπεται να αντιπροσωπεύει το 85% της συνολικής κίνησης DC έως το 2021 (Cisco, 2016-2022). Ως εκ τούτου, η παροχή υψηλής χωρητικότητας στο δίκτυο ενδο-συνεχούς ρεύματος είναι μεγάλης σημασίας. Στο εξής, αναφερόμαστε στο δίκτυο DC (DCN) ως αυτό που διαχειρίζεται την κίνηση μέσα σε ένα DC. Επιπλέον, τα DCs προβλέπεται να καταναλώνουν περίπου το 3~13% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας το 2030 (Andrae A. S. G. et al., 2015). Οι επικοινωνίες είναι απαραίτητες στα DC, και ως εκ τούτου υπάρχει μεγάλη ανάγκη για

τεχνικές αποδοτικής ισχύος στα DCN. Για να μπορέσουμε να υποστηρίξουμε μελλοντικές περιπτώσεις χρήσης επικοινωνίας, που περιλαμβάνουν ολοένα και περισσότερο εγκαταστάσεις cloud (Coriant Blog, 2016) απαιτείται χαμηλή καθυστέρηση για συνδέσεις από άκρο σε άκρο.

Για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων σχετικά με τη χωρητικότητα, την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση, έχουν εισαχθεί τεχνικές οπτικής επικοινωνίας στα DCN. Επιπλέον, οι τεχνικές οπτικής πολυπλεξίας, όπως η πολυπλεξία χωρικής διαίρεσης (SDM) και η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM), έχουν θεωρηθεί ότι αυξάνουν την ικανότητα μετάδοσης στα DCN.

Το δίκτυο εντός των κέντρων δεδομένων είναι ένα περιβάλλον πλούσιο σε ίνες, όπου το οπτικό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιοποιώντας οπτικά εξαρτήματα εκτός των κλασικών (οπτικοί αναμεταδότες σταθερού μήκους κύματος, κ.λπ.). Η κύρια πρόκληση είναι η ανάπτυξη κλιμακωτών, υψηλού αριθμού θυρών διακοπών διασύνδεσης με την ικανότητα υποστήριξης εκατομμυρίων κόμβων, παρέχοντας παράλληλα υψηλή απόδοση, χαμηλή καθυστέρηση και ελαστικότητα. Από την άλλη πλευρά, το δίκτυο μεταξύ των κέντρων δεδομένων περιλαμβάνει συνήθως μεταδόσεις ινών μεγάλων αποστάσεων, καθώς τα κέντρα δεδομένων είναι γεωγραφικά κατανεμημένα σε αγροτικές περιοχές. Θα μπορούσαμε να αξιοποιήσουμε το παλαιού τύπου δίκτυο κορμού για να προσφέρουμε κυρίως μεγάλο όγκο κίνησης στο κέντρο δεδομένων. Ωστόσο, η εκθετική αύξηση της εκρηκτικής κίνησης στο Διαδίκτυο συνεπάγεται ότι πρέπει να κοιτάξουμε πέρα από λύσεις που βασίζονται στην πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) σε δίκτυα οπτικών ινών. Τα ελαστικά οπτικά δίκτυα (EONs) (Clark J., 2012) προτάθηκαν πρόσφατα για την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης και προσαρμοστικής δικτύωσης με ευέλικτες κοκκοποιήσεις κατανομής φάσματος πέρα από το άκαμπτο μήκος κύματος που εισηγείται η Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών — Τομέας Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών (ITU-T) πυκνού μήκους κύματος WDM (DWDM). Ως εκ τούτου, οι νέες προκλήσεις για το δίκτυο μεταξύ κέντρων δεδομένων ενδέχεται να βρίσκονται στις έξυπνες μεθόδους κοινής χρήσης φασματικών πόρων μεταξύ της κίνησης του κέντρου δεδομένων και της διαφοροποιημένης κίνησης τελικού χρήστη.

Υπό το πρίσμα των διαφορετικών αρχιτεκτονικών δικτύων και των προβλημάτων διαχείρισης πόρων σε δίκτυα εντός και μεταξύ κέντρων δεδομένων, ένα έξυπνο και

ενοποιημένο επίπεδο ελέγχου που μπορεί να κάνει βελτιστοποιημένη χρήση των πόρων μεταγωγής και μετάδοσης είναι σε μεγάλη ζήτηση. Το γενικό επίπεδο ελέγχου που βασίζεται σε μεταγωγή πολλαπλών πρωτοκόλλων (GMPLS) δεν έχει αναπτυχθεί σε πραγματικά επιχειρησιακά δίκτυα, κυρίως λόγω της κατανεμημένης φύσης και της υψηλής πολυπλοκότητάς του. Από την άλλη πλευρά, η πρόσφατα αναδυόμενη αρχιτεκτονική «OpenFlow» προσφέρει ευελιξία στους χειριστές να ελέγχουν και να διαχειρίζονται άμεσα ένα δίκτυο. Ο έλεγχος και η διαχείριση δικτύου που βασίζεται στο OpenFlow το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές πλέγματος ή cloud, καθώς το OpenFlow προτείνεται ως πλαίσιο για συστήματα λειτουργίας δικτύου, όπου οι πίνακες προώθησης σε διακόπτες και δρομολογητές μπορούν να προγραμματιστούν ελεύθερα και πλήρως.

1.2. Σκοπός Εργασίας

Στα πλαίσια υλοποίησης της παρούσας εργασίας θα επικεντρωθούμε σε κέντρα δεδομένων μεγάλης κλίμακας, τα οποία μπορούν να φιλοξενήσουν δεκάδες ή και εκατοντάδες χιλιάδες διακομιστές. Μερικά από τα μεγάλα κέντρα δεδομένων cloud φιλοξενούνται από δημοφιλείς παρόχους υπηρεσιών όπως η Google, η Microsoft, το Facebook, η Amazon, κ.λπ. Τέτοια κέντρα δεδομένων μεγάλης κλίμακας ενδέχεται να παρουσιάσουν ακόμη ταχύτερη ανάπτυξη. Για παράδειγμα, η Google ανέφερε αύξηση επισκεψιμότητας $\times 50$ μεταξύ 2008 και 2014, πράγμα που σημαίνει ότι η κίνηση στις εγκαταστάσεις της διπλασιάζεται κάθε 12 έως 15 μήνες (Singh A. et al., 2016). Η αλόγιστη αύξηση της κυκλοφορίας αναγκάζει τα μεγαλύτερα κέντρα δεδομένων να ενημερώνουν την υποδομή τους κάθε λίγα χρόνια. Στις επόμενες ενότητες θα αναφερθούν οι μετασχηματισμοί στην αρχιτεκτονική δικτύων και η πρόοδος τόσο στα ηλεκτρονικά όσο και στα οπτικά υποσυστήματα που έχουν οδηγήσει στην οικοδόμηση σύγχρονων κέντρων δεδομένων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα διερευνήσουμε οπτικές λύσεις, κυρίως από την άποψη του φυσικού επιπέδου, που στοχεύουν στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που συναντώνται τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Επειδή η ραχοκοκαλιά αυτής της εργασίας στηρίζεται στο φυσικό επίπεδο των οπτικών επικοινωνιών, παρέχεται αρχικά ένα υπόβαθρο για τις οπτικές επικοινωνίες. Θα πραγματοποιηθεί επίσης μια ευρεία επισκόπηση των οπτικών δικτύων σε

παγκόσμια κλίμακα για να εστιάσουμε αργότερα σε περισσότερες τεχνικές πτυχές, όπως οι υπάρχουσες τεχνικές επικοινωνίας και μεταγωγής.

1.3. Δομή Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας συναντώνται τα εισαγωγικά κεφάλαια της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η εξέλιξη των κέντρων δεδομένων από τις πρώτες μέρες της σύγχρονης πληροφορικής μέχρι τα σύγχρονα και μεγάλης κλίμακας κέντρα δεδομένων cloud. Μετά από μια σύντομη ιστορία των υπολογιστών, αναλύσαμε την εξέλιξη της κυκλοφορίας από τις αρχές της δεκαετίας του '90. Αναλύσαμε το γεγονός ότι οι υπηρεσίες Διαδικτύου και cloud έχουν προκαλέσει μια αμείλικτη ζήτηση εύρους ζώνης, η οποία εξακολουθεί να διπλασιάζεται σχεδόν κάθε χρόνο στις εγκαταστάσεις των μεγαλύτερων παρόχων υπηρεσιών. Αναζητώντας μια επεκτάσιμη και ανθεκτική σε αστοχίες λύση, τα κέντρα δεδομένων έχουν υιοθετήσει μια τοπολογία Folded Clos, συμπεριλαμβανομένου ενός μεγάλου αριθμού ηλεκτρονικών μεταγωγέων οργανωμένων σε αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων για την παροχή πλήρους συνδεσιμότητας από διακομιστή σε διακομιστή.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλωθήκαμε με τις τεχνολογίες οπτικής διασύνδεσης και δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στις τεχνικές διαμόρφωσης Im-DD συστημάτων άμεσης ανίχνευσης. Αφού περιγράφηκαν οι λειτουργίες του πομπού και του δέκτη Im-DD, προσεγγίστηκε θεματολογία που αφορά τους σύμφωνους πομποδέκτες. Στη συνέχεια, ολοκληρώσαμε το κεφάλαιο κάνοντας αναφορά στις co-packaged τεχνολογίες καθώς και στις σύγχρονες τάσεις Ethernet.

Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά τις τεχνολογίες οπτικής μεταγωγής. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε ο ρόλος της οπτικής μεταγωγής στα σημερινά κέντρα δεδομένων καθώς και οι προοπτικές εξέλιξής τους. Επίσης, αναλύθηκε η μεταγωγή οπτικού κυκλώματος, η ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων και η οπτική εναλλαγή πακέτων.

Το πέμπτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στη δικτύωση καθορισμένη από το λογισμικό (SDN) καθώς και στον αντίκτυπό της στα οπτικά δίκτυα που εντοπίζονται στα κέντρα δεδομένων. Αναλύθηκαν εκτενώς οι εφαρμογές SDN και το αντίκτυπό τους. Επιπρόσθετα, αναλύθηκαν τα πρωτόκολλα OpenFlow και NETCONF και στη συνέχεια συγκρίθηκαν οι δυνατότητες τους.

Καταλήγοντας, στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας βιβλιογραφικής έρευνας καθώς και η μελλοντική έρευνα και εξελίξεις που θα μπορούσαν να λάβουν χώρα στο συγκεκριμένο ερευνητικό τομέα.

Τέλος, αναγράφεται η βιβλιογραφία που μελετήθηκε στα πλαίσια υλοποίησης της παρούσας βιβλιογραφικής διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Αναδρομή στα δίκτυα Κέντρων Δεδομένων

2.1. Ιστορική Αναδρομή Στα Κέντρα Δεδομένων

Τα κέντρα δεδομένων αποτελούν σήμερα τον εγκέφαλο που καθιστά δυνατές όλες τις υπηρεσίες cloud και web που χρησιμοποιούνται εκτενώς σε όλο τον κόσμο. Τέτοιες μεγάλες εγκαταστάσεις 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 κ.λπ.). Παρά τη νεότητα 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 Electrics, 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). Κατά 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. Χάρη στο μειωμένο κόστος και το μέγεθός τους, οι επιχειρήσεις μπορούσαν πλέον να αντέξουν οικονομικά την αγορά πολλών μικροϋπολογιστών. Λίγα χρόνια αργότερα, η Intel παρουσίασε τον πρώτο μικροεπεξεργαστή (1971). Η ηλεκτρονική

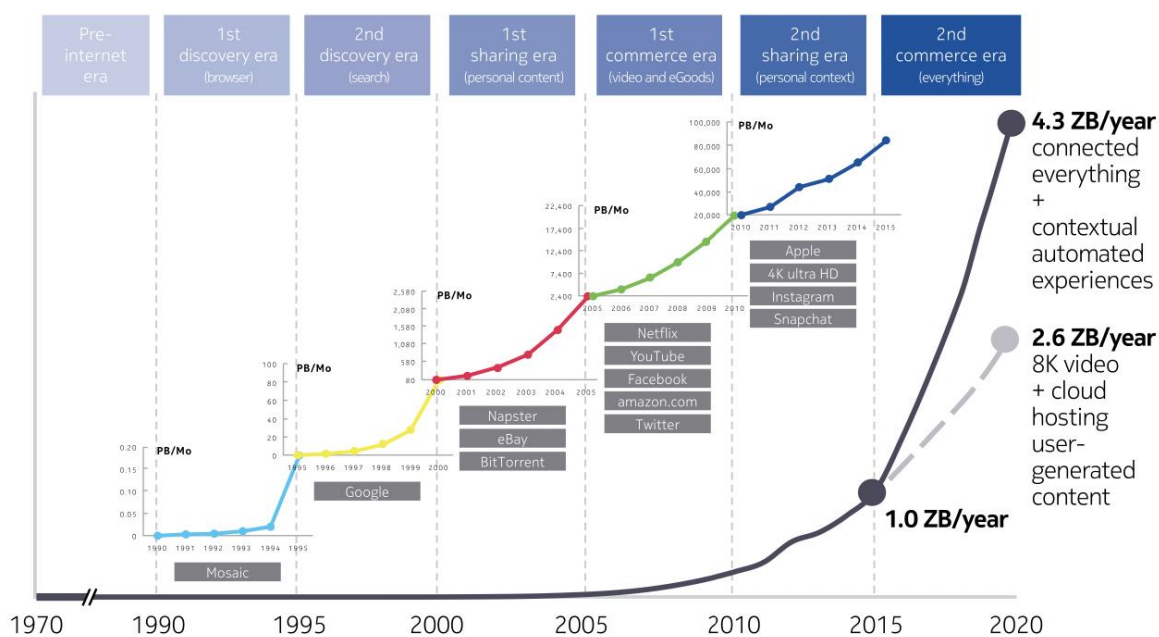
ενσωμάτωση επέτρεψε τη δημιουργία πιο συμπαγών και λιγότερο δαπανηρών υπολογιστών κατάλληλων για τον τελικό χρήστη. Τέτοιες μηχανές ονομάστηκαν αρχικά microcomputers και εξελίχθηκαν στον γνωστό προσωπικό υπολογιστή (PC) που χρησιμοποιείται σήμερα. Έχοντας τη δυνατότητα να έχουμε έναν σταθμό εργασίας 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). Το συγκεκριμένο δίκτυο, ανακοινώθηκε το 1977 από την Datapoint Corporation. Το ARCNET χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση σταθμών εργασίας τελικού χρήστη σε κοινόχρηστους πόρους αποθήκευσης και υπολογιστών (Atlantic, 2007). Με αυτόν τον τρόπο, οι χρήστες θα μπορούσαν να βασίζονται σε απλά και σχετικά φθηνά τερματικά, ενώ μοιράζονταν την ικανότητα επεξεργασίας και αποθήκευσης ισχυρότερων μηχανών (σήμερα ονομάζονται διακομιστές) 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 τη φούσκα του dot.com να λαμβάνει χώρα στα τέλη της δεκαετίας του '90 θα αναδυόταν και η επιχείρηση των data center. Πολλές εταιρείες, σύλλογοι ακόμα και ιδιώτες απαιτούσαν μόνιμη παρουσία στο διαδίκτυο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου (1995-2000), ο αριθμός των ιστοσελίδων που υπάρχουν στον παγκόσμιο ιστό αυξήθηκε από δεκάδες χιλιάδες σε περισσότερες από δέκα εκατομμύρια (Netcraft, 2009). Ως εκ τούτου, ένας μεγάλος αριθμός εγκαταστάσεων κέντρων δεδομένων άνοιξε για να φιλοξενήσει τους αμέτρητους ιστότοπους και τις υπηρεσίες Ιστού που εμφανίζονται σε καθημερινή βάση. Έκτοτε, η επισκεψιμότητα στο διαδίκτυο και οι απαιτήσεις κίνησης σε κέντρα δεδομένων δεν έχουν σταματήσει να αυξάνονται.

2.2. Παγκόσμια Εξέλιξη Της Κυκλοφορίας - Κίνησης στα Κέντρα Δεδομένων

Η εξέλιξη της κίνησης του βασικού δικτύου από την εμφάνιση του Διαδικτύου φαίνεται στην Εικόνα 1. Αυτή η ανάλυση πραγματοποιήθηκε από τη Nokia Bell Labs Consulting, η οποία προσδιόρισε τις κύριες τάσεις που προκαλούν την αύξηση της κυκλοφορίας (Weldon M. K. et al., 2016). Όπως απεικονίζεται στο γράφημα, πριν

από τη δεκαετία του 2000, η κίνηση στο Διαδίκτυο διέπονταν από το περιεχόμενο Ιστού. Με το πρώτο πρόγραμμα περιήγησης που κυκλοφόρησε το 1993 (Mosaic) και τις κύριες μηχανές αναζήτησης Ιστού (π.χ. Altavista, Yahoo, Google) που εμφανίστηκαν τα επόμενα χρόνια, η κίνηση στο Διαδίκτυο άρχισε να αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό, οδηγώντας σε 80 PByte να κυκλοφορούν παγκοσμίως ανά μήνα (PB /Mo) κατά την είσοδο στη νέα χιλιετία. Το 1999 η έννοια της κοινής χρήσης αρχείων έγινε δημοφιλής με την εμφάνιση του Napster, το οποίο δημιουργήθηκε κυρίως για να μοιράζεται αρχεία μουσικής μεταξύ χρηστών. Πολλές εφαρμογές αναπτύχθηκαν ακολουθώντας την έννοια της κοινής χρήσης αρχείων peer-to-peer (π.χ. eDonkey, Bittorrent, Gnutella), η οποία χρησιμοποιήθηκε εκτενώς από τους χρήστες του Διαδικτύου για την ανταλλαγή όλων των ειδών αρχείων (π.χ. βίντεο, ταινίες, παιχνίδια, μουσική, βιβλία), οδηγώντας σε μια ταχεία αύξηση της επισκεψιμότητας, η οποία ξεπέρασε γρήγορα το 1-EB/Mo (1000 PB/Mo) γύρω στο 2004. Τον Φεβρουάριο του ίδιου έτους ξεκίνησε η ιστοσελίδα του Facebook, ξεκινώντας μια νέα εποχή κοινωνικής δικτύωσης και κοινής χρήσης προσωπικού περιεχομένου. Η ροή βίντεο έγινε επίσης δημοφιλής εκείνη την περίοδο με την εμφάνιση του Youtube (2005) και αργότερα του Netflix, το οποίο ξεκίνησε την δική του διαδικτυακή ροή το 2007. Αυτές οι νέες τάσεις οδήγησαν σε αύξηση της επισκεψιμότητας μεταξύ 2005 και 2010.



Εικόνα 1: Αύξηση κίνησης δικτύου από την εμφάνιση του Διαδικτύου (Nokia Bell-Labs, 2015)

Τα τελευταία χρόνια, η επανάσταση των έξυπνων τηλεφώνων έχει προσφέρει απεριόριστη πρόσβαση στο Διαδίκτυο σε όλους. Αυτή η τεχνολογία σε συνδυασμό με νέες (π.χ. Instagram, Snapchat) και υπάρχουσες (Facebook, Twitter) εφαρμογές κοινωνικής δικτύωσης έχουν οδηγήσει σε έναν ευρέως διαδεδομένο «modus operandi»: κοινή χρήση των πάντων ανά πάσα στιγμή και οπουδήποτε. Αυτή η τεράστια κίνηση κοινής χρήσης μαζί με άλλες επερχόμενες τάσεις (βίντεο εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας ή αποθήκευση στο cloud), διατηρούν την αύξηση της βασικής επισκεψιμότητας, η οποία ξεπερνά σήμερα το 1 ZB/έτος. Στα επόμενα χρόνια αναμένεται η επιπρόσθετη εξέλιξη της επαναστατικής τεχνολογίας: διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT). Μια νέα εποχή πρόκειται να ξεκινήσει, κατά την οποία όχι μόνο θα συνδεθούν όλοι αλλά και «τα πάντα». Το IoT θα επιτρέψει έναν νέο αυτοματοποιημένο κόσμο όπου η διαχείριση των μηχανών θα γίνεται αποτελεσματικά από το cloud, δημιουργώντας έξυπνα αυτοκίνητα, κτίρια, νοσοκομεία και πόλεις (Cisco, 2015). Οι εκτεταμένες επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο μεταξύ ενός τεράστιου αριθμού μηχανών και συστημάτων cloud υποτίθεται ότι θα δημιουργήσουν μια άνευ προηγουμένου αύξηση της κυκλοφορίας που θα υπερβαίνει πιθανώς τα 4 ZB/έτος το 2020 (Weldon M. K. et al., 2016).

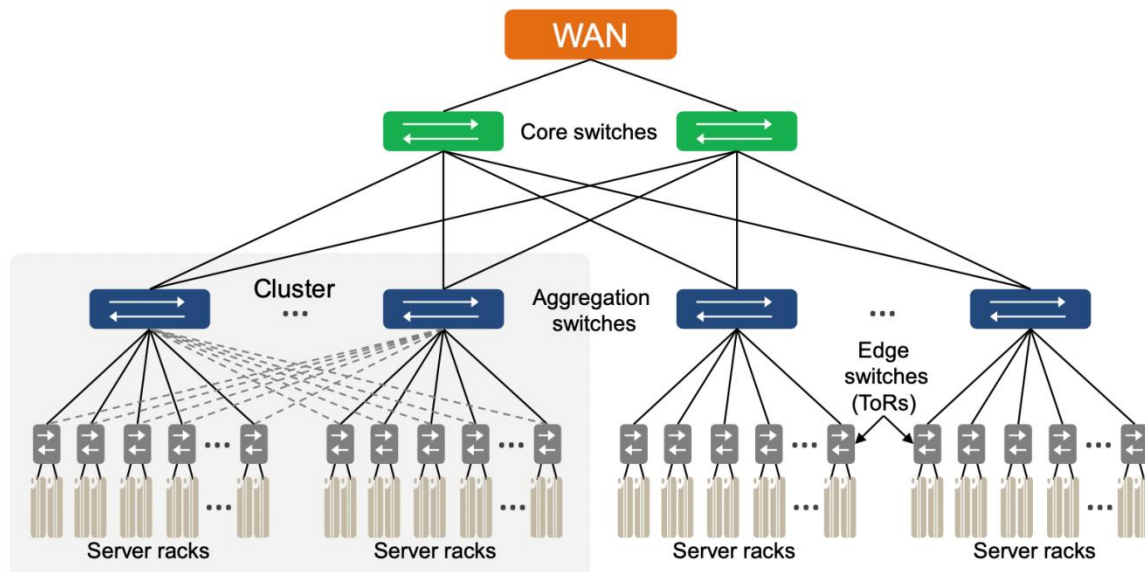
2.3. Σύγχρονες Εφαρμογές των Δικτύων Κέντρων Δεδομένων

Προκειμένου να επεξεργαστούν και να αποθηκεύσουν όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για την υποστήριξη του τεράστιου αριθμού εφαρμογών και υπηρεσιών που διατίθενται επί του παρόντος στο cloud, τα κέντρα δεδομένων χρησιμοποιούν έναν τεράστιο αριθμό διακομιστών, οι οποίοι μπορούν να μετρηθούν σε εκατοντάδες ή χιλιάδες σε μικρές/μεσαίες εγκαταστάσεις, και σε δεκάδες ή εκατοντάδες χιλιάδες σε κέντρα δεδομένων μεγάλης κλίμακας. Η διασύνδεση τόσο μεγάλου αριθμού διακομιστών δεν είναι ασήμαντη και ως εκ τούτου έχει μελετηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια, δημιουργώντας πολλές αρχιτεκτονικές (π.χ. δέντρα, Folded Clos, BCube, DCell, torus, κ.λπ.) (Hammad A. et al., 2014). Σε αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε δύο από τις πιο δημοφιλείς τοπολογίες που χρησιμοποιούνται στο παρελθόν και στο παρόν σε μεγάλα κέντρα δεδομένων: δέντρα πολλαπλών επιπέδων και Folded Clos.

Οι πρώτες γενιές κέντρων δεδομένων υιοθετούσαν συνήθως τοπολογίες που μοιάζουν με δέντρα, σχηματίζοντας συνήθως δύο ή τρία επίπεδα μεταγωγής

χρησιμοποιώντας διακόπτες υψηλής ακρίβειας (Al-Fares M. et al., 2008). Η εικόνα 2 απεικονίζει ένα τυπικό δίκτυο κέντρων δεδομένων 3 επιπέδων πολλαπλών ριζών που μοιάζει με δέντρο, το οποίο περιλαμβάνει τρία επίπεδα (στάδια/βαθμίδες) μεταγωγής. Το στάδιο της κάτω άκρης περιλαμβάνει τους λεγόμενους διακόπτες Top-of-Rack (ToR), οι οποίοι διασυνδέουν 20-40 διακομιστές που βρίσκονται σε rack. Για να γίνει αυτό, τα ToR περιέχουν συνήθως 24 ή 48 θύρες κατερχόμενης ζεύξης με χωρητικότητες που κυμαίνονται μεταξύ 1 και 10 Gb/s. Στη συνέχεια, ένας μεγάλος αριθμός Top-of-Rack (ToR) συνδέεται με έναν ή περισσότερους διακόπτες του επιπέδου συνάθροισης χρησιμοποιώντας πολλές θύρες ανερχόμενης ζεύξης 10 Gb/s. Το στάδιο συγκέντρωσης συνήθως περιέχει μεγάλους διακόπτες για τη διασύνδεση ενός τεράστιου αριθμού ToR (μέχρι 32-512 θύρες).

Σε μεγάλα κέντρα δεδομένων, μερικές φορές οι μεταγωγείς συναθροίσεων ομαδοποιούνται σχηματίζοντας συμπλέγματα, όπως φαίνεται στα αριστερά κλαδιά δέντρων στην Εικόνα 2 Αυτή η προσέγγιση παρέχει πλεονασμό και βελτιωμένη ικανότητα μεταγωγής. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένα επιπλέον βασικό επίπεδο για την ανταλλαγή κίνησης από διάφορους μεταγωγείς ή συμπλέγματα συγκέντρωσης και για τη σύνδεση στο εξωτερικό δίκτυο ευρείας περιοχής (WAN). Γενικά, για να αξιοποιηθεί το υψηλό κόστος των μεγάλων διακοπών, τα διαφορετικά επίπεδα μεταγωγής υπερκαλύπτονται με συντελεστές 5:1 (Greenberg A. et al., 2009). Για παράδειγμα, οι προηγούμενες γενιές κέντρων δεδομένων του Facebook κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο 3-επιπέδων 4-post clustered, που εμφανίζει αναλογίες υπερ-συνδρομής 10:1 και 4:1 σε χαμηλότερες και υψηλότερες βαθμίδες, αντίστοιχα (Farrington N. et al., 2013).



Εικόνα 2: Παραδοσιακή τοπολογία δέντρων πολλαπλών ριζών τριών επιπέδων. Αριστερά: απεικόνιση τυπικής υλοποίησης συμπλέγματος (Nokia Bell-Labs, 2015)

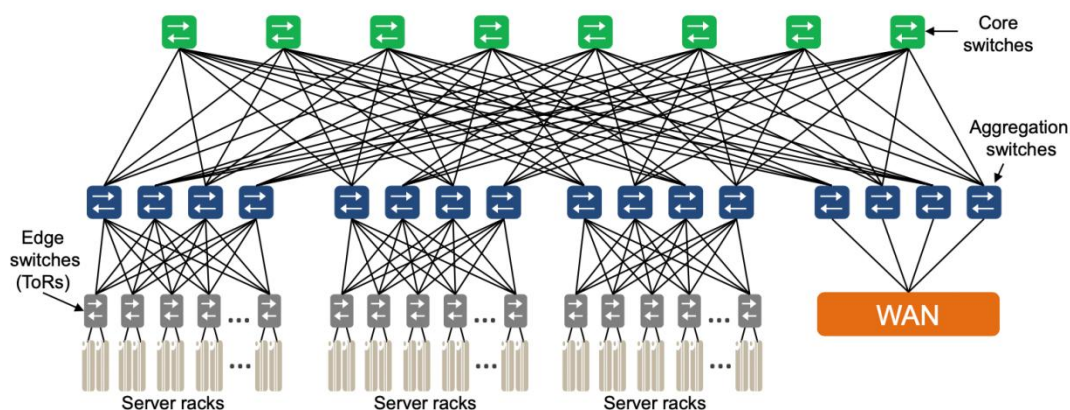
Προκειμένου να αντιμετωπίσουν την ταχέως αυξανόμενη ζήτηση εύρους ζώνης που σχολιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα κέντρα δεδομένων αναβαθμίζουν τους διακόπτες και τους διακομιστές τους προς υψηλότερες χωρητικότητες. Τα τελευταία χρόνια, πολλά πρωτόκολλα έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση δεδομένων εντός κέντρων δεδομένων (π.χ. InfiniBand, Fiber Channel ή Ethernet). Ωστόσο, η βιομηχανία οραματίζεται εδώ και πολύ καιρό τη σύγκλιση σε ένα ενιαίο πρωτόκολλο ικανό να αντιμετωπίσει τις επικοινωνίες όλων των στοιχείων δικτύωσης και υπολογιστών σε ένα κέντρο δεδομένων. Η εμφάνιση του Ethernet υψηλής ταχύτητας δεδομένων, με χωρητικότητες 40 και 100 Gb/s, έχει καταστήσει αυτό το πρωτόκολλο δυνητικό υποψήφιο να αντικαταστήσει τα άλλα και να αναλάβει την ηγεσία σε ένα μοναδικό πρωτόκολλο για δίκτυα κέντρων δεδομένων (Decusatis C. Et al., 2014).

Καταλήγοντας, θα πραγματοποιηθεί μία εισαγωγική προσέγγιση για το δίκτυο Folded Clos που αναφέρθηκε παραπάνω. Η συνέχεια της ανάλυσης του συγκεκριμένου δικτύου θα συνεχιστεί σε επόμενο κεφάλαιο. Στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, ένα δίκτυο Clos είναι ένα είδος δικτύου μεταγωγής κυκλωμάτων πολλαπλών σταδίων που αντιπροσωπεύει μια θεωρητική εξιδανίκευση πρακτικών συστημάτων μεταγωγής πολλαπλών σταδίων. Εφευρέθηκε από τον Edson Erwin το 1938 και επισημοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Charles Clos το 1952.

Με την προσθήκη σταδίων, ένα δίκτυο Clos μειώνει τον αριθμό των εγκάρσιων σημείων που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός μεγάλου διακόπτη crossbar. Μια τοπολογία δικτύου Clos παραμετροποιείται από τρεις ακέραιους αριθμούς n , m και r :

- Το n αντιπροσωπεύει τον αριθμό των πηγών που τροφοδοτούνται σε καθέναν από τους διακόπτες διασταυρούμενης γραμμής σταδίου εισόδου r .
- Κάθε διακόπτης εγκάρσιας ράβδου σταδίου εισόδου έχει m εξόδους.
- Υπάρχουν m διακόπτες μεσαίας βαθμίδας.

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας θα μας απασχολήσει το Folded Clos δίκτυο. Ένα Folded Clos (fat-tree) δίκτυο είναι η μονόπλευρη έκδοση του δικτύου Clos. Ουσιαστικά συγχωνεύει τους αντίστοιχους διακόπτες εισόδου και εξόδου σε έναν διακόπτη.



Εικόνα 3: Modern Folded Clos topology (Nokia Bell-Labs, 2015)

2.4. Αρχιτεκτονική Δικτύων Κέντρων Δεδομένων: Απαιτήσεις Και Προκλήσεις

Παρακάτω θα συζητήσουμε ενδελεχώς τις απαιτήσεις ενός δικτύου κέντρων δεδομένων καθώς και τις προκλήσεις που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε.

1. Κλίμακα και χωρητικότητα του κέντρου δεδομένων: Βραχυπρόθεσμα, τα μεγάλα κέντρα δεδομένων θα συνεχίσουν να κλιμακώνονται αυξάνοντας τις ταχύτητες που χρησιμοποιούνται και τον αριθμό των θυρών που είναι ενσωματωμένες σε τσιπ ενός μεταγωγέα. Το επόμενο αναμενόμενο βήμα θα είναι η αναβάθμιση

ολόκληρου του συστήματος σε δύο ταχύτητες 25-100 Gb/s (αντί για 10-40 Gb/s). Ωστόσο, χρησιμοποιώντας την ίδια αρχιτεκτονική, αυτή η αλλαγή αποφέρει μόνο 2,5 φορές αύξηση της συνολικής χωρητικότητας, κάτι που δεν είναι αρκετό για μεγάλους παρόχους. Η Google, για παράδειγμα, αύξησε κατά 6 φορές τη χωρητικότητά της κατά τη μετάβαση στο δίκτυο που περιγράφεται παραπάνω (Singh A. et al., 2015) μόλις τρία χρόνια μετά την προηγούμενη αναβάθμισή τους. Προκειμένου να διατηρηθεί η αύξηση της συνολικής χωρητικότητας περιορίζοντας τον αριθμό των σταδίων μεταγωγής, οι προμηθευτές μεταγωγών παράγουν τσιπ που υποστηρίζουν μεγαλύτερο αριθμό θυρών. Για παράδειγμα, η Broadcom και η Mellanox έχουν ήδη κυκλοφορήσει τους διακόπτες Ethernet 32×100-Gb/s (Broadcom and Mellanox, 2016). Παρόλα αυτά, τα μεγαλύτερα κέντρα δεδομένων θα απαιτήσουν σύντομα διεπαφές υψηλότερου ρυθμού δεδομένων, με ταχύτητες μεγαλύτερες από 25-Gb/s ανά lane. Έτσι, η τυποποίηση των 50 GE, συμπεριλαμβανομένων των 50-Gb/s lane-speed, 200-GE και 400 GE βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη. Οι προμηθευτές εξαρτημάτων θα πρέπει να εργαστούν σκληρά για να αυξήσουν τους ρυθμούς δεδομένων προς τα 50 και τα 100 Gb/s/lane, διατηρώντας παράλληλα χαμηλό κόστος και κατανάλωση ενέργειας, κάτι που είναι πολύ δύσκολο.

2. Μεγάλη πολυπλοκότητα και κόστος δικτύου: Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των σημερινών αρχιτεκτονικών Folded Clos είναι η υψηλή πολυπλοκότητα του δικτύου. Στην εικόνα 3 παρουσιάζουμε τον συνολικό αριθμό διεπαφών, διακοπών και καλωδίων που απαιτούνται στο κέντρο δεδομένων της Google που περιγράφεται παραπάνω. Όπως απεικονίζεται, για τη διασύνδεση όλων των υπηρεσιών της η Google χρησιμοποιεί δεκάδες χιλιάδες διακόπτες και εκατομμύρια βύσματα (διεπαφές) και καλώδια. Για απλότητα μετράμε όλα τα καλώδια στο κέντρο δεδομένων ως συνδέσμους οπτικών ινών. Ας σημειώσουμε ότι τα βύσματα LR 40 Gb/s συνδέονται μέσω ενός ζεύγους ινών SMF, ενώ τα βύσματα SR 40 Gb/s χρησιμοποιούν τέσσερα ζεύγη MMF.

Device	Total count	Power per device	Total power
10G SFP+	1,048,576	1 W	1 MW
40G QSFP+	196,608	1.5 (SR) - 3.5 (LR) W	0.3 (SR) -0.7 (LR) MW
Switch chips	22,528	94 W	2.1 MW
Fibers (if 40G LR-SMF)	1,245,184	0 W	0 MW
Fibers (if 40G SR-MMF)	1,835,008	0 W	0 MW
Total amount of power			3.5-3.8 MW

Εικόνα 4: Συνολικός αριθμός συνδεδεμένων μονάδων, διακοπών και ινών που τοποθετήθηκαν στο πιο πρόσφατο αναφερόμενο κέντρο δεδομένων Google που υποστηρίζει σχεδόν 400.000 διακομιστές 10-Gb/s (εκτιμώμενη) και την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας. (Nokia Bell-Labs, 2015)

3. Τεράστια κατανάλωση ενέργειας: Το 2014 τα κέντρα δεδομένων των ΗΠΑ κατανάλωναν έως και το 2% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, που ισοδυναμεί με την κατανάλωση 6,4 εκατομμυρίων σπιτιών κατά μέσο όρο (Sverdlík Y., 2016). Το δίκτυο διασύνδεσης αντιπροσωπεύει το 10-20% αυτής της κατανάλωσης (Greenberg A., 2008). Ορισμένες πηγές υπολόγισαν το 2012 ότι τα μεγάλα κέντρα δεδομένων της Google κατανάλωναν μεταξύ 50 και 100 MW (Miller R., 2012). Αν υποθέσουμε ότι το 15% αυτής της κατανάλωσης σχετίζεται με τον ιστό δικτύωσης (Greenberg A., 2008), λαμβάνουμε 7,5-15 MW, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα ένα εκπληκτικό ετήσιο κόστος 3,9-7,9 εκατομμυρίων \$13.
4. Υψηλή καθυστέρηση: Η ύπαρξη πολλαπλών επιπέδων εναλλαγής μπορεί να αυξήσει δραστικά τον χρόνο περιαγωγής από άκρο σε άκρο. Οι τελευταίοι διακόπτες 100-GE καθορίζουν την άδηλη κατάσταση από θύρα σε θύρα 300-400 ns (Broadcom and Mellanox, 2016). Αντίστοιχα, η συνολική καθυστέρηση φτάνει τα 2,7-3,6 μs όταν αθροίζεται ο συνολικός αριθμός μεταγωγέων που πρέπει να διασχίσει ένα πακέτο Ethernet για να πραγματοποιήσει οποιαδήποτε σύνδεση διακομιστή σε διακομιστή στο κέντρο δεδομένων. Ωστόσο, η καθυστέρηση μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω όταν λαμβάνεται υπόψη η πτώση πακέτων που συμβαίνει στο δίκτυο.

Βραχυπρόθεσμα, τα κέντρα δεδομένων θα συνεχίσουν να αυξάνουν τη χωρητικότητά τους αναβαθμίζοντας τις χωρητικότητες μεταγωγέων και διασυνδέσεων και δημιουργώντας μεγαλύτερα δίκτυα πολλαπλών επιπέδων.

Ωστόσο, στο τέλος, η αύξηση του εύρους ζώνης του κέντρου δεδομένων διατηρώντας παράλληλα την τρέχουσα αρχιτεκτονική μπορεί να επιδεινώσει δραστικά τα προαναφερθέντα ζητήματα, τα οποία ενδέχεται να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση του κέντρου δεδομένων. Ως εκ τούτου, μακροπρόθεσμα, η επαναξιολόγηση της αρχιτεκτονικής των κέντρων δεδομένων είναι αναπόφευκτη.

2.5. Μελλοντικές Προκλήσεις Των Κέντρων Δεδομένων Μεγάλης Κλίμακας

Πέρα από την προφανή διαφορά στη σταθερότητα της τοπολογίας του δικτύου, η τεράστια κλίμακα αυτών των μεγάλων κέντρων δεδομένων όσον αφορά τους κόμβους και τις συνδέσεις δημιουργεί μια πρόκληση διαχείρισης δικτύου διαφορετική από αυτές που αντιμετωπίζαμε προηγουμένως. Τα συστήματα διαχείρισης δικτύου που έχουν σχεδιαστεί για δημόσια δίκτυα παρόχων ή μεγάλα εταιρικά intranet απλά δεν μπορούν να κλιμακωθούν σε αυτούς τους αριθμούς. Απαιτείται ένα νέο υπόδειγμα διαχείρισης δικτύου. Επιπλέον, αν και αυτά τα κέντρα δεδομένων υπάρχουν για να υποστηρίξουν την αλληλεπίδραση με τον κόσμο έξω, η έρευνα του Guis I. (Guis I., 2012) προέβλεψε ότι έως το 2014 το 80% της κίνησης στα κέντρα δεδομένων θα είναι κίνηση Ανατολής-Δύσης. Η κίνηση Ανατολής-Δύσης αποτελείται από πακέτα που αποστέλλονται από έναν κεντρικό υπολογιστή σε ένα κέντρο δεδομένων σε έναν άλλο κεντρικό υπολογιστή στο ίδιο κέντρο δεδομένων. Αντίστοιχα, η κίνηση Βορρά-Νότου είναι η κίνηση που εισέρχεται (εξέρχεται) από το κέντρο δεδομένων από (προς) τον έξω κόσμο. Για παράδειγμα, το ερώτημα του προγράμματος περιήγησης ιστού ενός χρήστη σχετικά με τον καιρό μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία από έναν διακομιστή ιστού (Βορράς-Νότος) που ανακτά δεδομένα από έναν διακομιστή αποθήκευσης στο ίδιο κέντρο δεδομένων (Ανατολή-Δύση) πριν απαντήσει στον χρήστη (Βορράς-Νότος). Τα πρωτόκολλα που έχουν σχεδιαστεί για την επίτευξη ευρωστίας στο γεωγραφικά διασκορπισμένο Διαδίκτυο ευρείας περιοχής σήμερα απαιτούν από τους δρομολογητές να ξοδεύουν περισσότερο από το 30% των κύκλων CPU τους (Gahsinsky I., 2011) ανακαλύπτοντας εκ νέου και υπολογίζοντας εκ νέου διαδρομές για μια τοπολογία δικτύου στο κέντρο δεδομένων που είναι εξαιρετικά στατική και αλλάζει μόνο υπό αυστηρούς και συγκεντρωτικούς ελέγχους. Αυτή η αυξανόμενη υπεροχή της κίνησης Ανατολής-Δύσης δεν επωφελείται από τα γενικά έξοδα και τις πολυπλοκότητες που

έχουν αφενός εξελιχθεί στους παραδοσιακούς μεταγωγείς δικτύου για να παρέχουν αφετέρου την αποκεντρωμένη δυνατότητα επιβίωσης που τόσο σοφά οραματίστηκε ο Paul Baran για τα WAN του παρελθόντος.

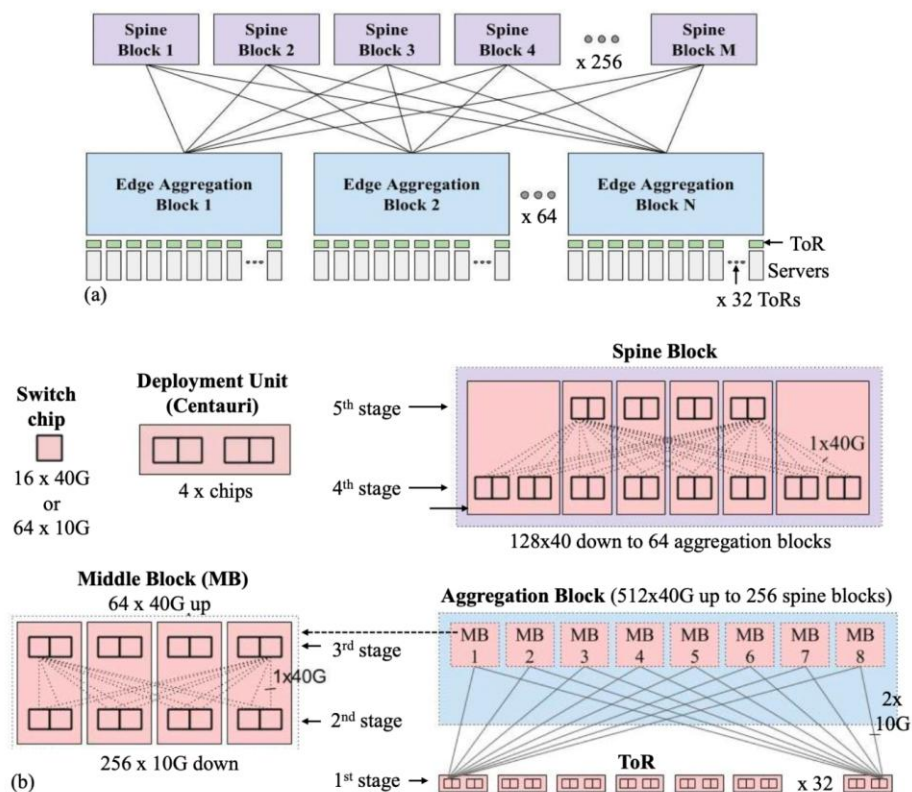
Τα μεγάλα κέντρα δεδομένων που αναφέρονται σε αυτήν την ενότητα διαφέρουν από τα προηγούμενα δίκτυα με διάφορους τρόπους: σταθερότητα τοπολογίας, μοτίβα κυκλοφορίας και καθαρή κλίμακα. Οι παραδοσιακές τεχνολογίες δικτύωσης είναι απλώς ανεπαρκείς για να κλιμακωθούν στα απαιτούμενα επίπεδα. Το SDN, μια τεχνολογία που έχει σχεδιαστεί ρητά για να λειτουργεί καλά με αυτό το νέο είδος δικτύου, αντιπροσωπεύει έναν θεμελιώδη μετασχηματισμό από την παραδοσιακή μεταγωγή στο Διαδίκτυο. Πριν συνεχίσουμε, θα πρέπει να τονίσουμε ότι παρόλο που το σύγχρονο κέντρο δεδομένων είναι ο κορυφαίος οδηγός πίσω από την τρέχουσα ζήση SDN, σε καμία περίπτωση το SDN δεν ισχύει μόνο για το κέντρο δεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η τεχνολογία SDN μπορεί να φέρει σημαντικές καινοτομίες σε τομείς που έχουν ελάχιστη σχέση με το κέντρο δεδομένων, όπως η κινητικότητα.

2.5.1. Ανατομία Ενός Κέντρου Δεδομένων Μεγάλης Κλίμακας

Όπως περιεγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, προκειμένου να υποστηριχθεί η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση εύρους ζώνης, τα μεγάλα κέντρα δεδομένων στηρίζονται σε δίκτυα Folded Clos τα οποία βασίζονται σε έναν τεράστιο αριθμό ηλεκτρονικών μεταγωγέων που παρέχουν πλήρη συνδεσιμότητα με το διακομιστή. Οι κύριοι πάροχοι υπηρεσιών επέλεξαν μια τέτοια τοπολογία επειδή προσφέρει υψηλή επεκτασιμότητα ενώ χρησιμοποιούν μεταγωγείς χαμηλότερου κόστους. Ωστόσο, η μεγάλη κλιμάκωση σε μια τέτοια αρχιτεκτονική επιτυγχάνεται αυξάνοντας τον αριθμό των σταδίων μεταγωγής και κατά συνέπεια τον αριθμό των μεταγωγέων και τον αριθμό των θυρών και τη χωρητικότητά τους. Προκειμένου να έχουμε μια καλύτερη ιδέα ενός μεγάλου δικτύου Folded Clos, παρουσιάζουμε στην Εικόνα 5 την πιο πρόσφατη αναφερόμενη διαμόρφωση του κέντρου δεδομένων της Google (Singh A et al., 2015).

Όπως απεικονίζεται στην Εικ. 5 το συνολικό μπλοκ μεταγωγής της Google αποτελείται από $N=64$ μπλοκ συνάθροισης και $M=256$ μπλοκ σπονδυλικής στήλης, η αρχιτεκτονική της οποίας φαίνεται παρακάτω. Όλη η διαδικασία μεταγωγής βασίζεται σε ένα μοναδικό τσιπ μεταγωγής πυριτίου 16 θυρών 40 Gb/s. Κάθε θύρα του

μεταγωγέα μπορεί να διαμορφωθεί ως 4x10-Gb/s, γεγονός που επιτρέπει διακόπτες υψηλότερης ρίζας που χειρίζονται έως και 64 θύρες στα 10 Gb/s ή οποιαδήποτε διαμόρφωση μικτού ρυθμού δεδομένων. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η ευελιξία για την κατασκευή ενός συνολικού μπλοκ που λειτουργεί με δύο ρυθμούς δεδομένων αλλά με το ίδιο τσιπ. Με αυτόν τον τρόπο, τα κορυφαία στάδια του συνολικού μας μπλοκ (μπλοκ σπονδυλικής στήλης) χρησιμοποιούν συνδέσμους 40 Gb/s, ενώ το χαμηλότερο (ToRs) λειτουργεί σε χαμηλότερους ρυθμούς δεδομένων (10 Gb/s), όπως φαίνεται στη δεξιά πλευρά της Εικ. 5. Το επίπεδο συνάθροισης συνδέει τα δύο τελευταία, χρησιμοποιώντας κατερχόμενες ζεύξεις 10-Gb/s και ανερχόμενες ζεύξεις 40-Gb/s. Κάθε μπλοκ συνάθροισης αποτελείται από 8 μεσαία μπλοκ (MB), συμπεριλαμβανομένων κάθε 16 τσιπ μεταγωγής που συνδέονται με συνδέσμους 40 Gb/s σε μια τοπολογία Clos δύο σταδίων (εμφανίζεται στην κάτω πλευρά της Εικ. 5.). Τα μπλοκ σπονδυλικής στήλης είναι επίσης ενσωματωμένα σε μια τοπολογία Clos δύο σταδίων (αναδιπλωμένη), που αποτελείται από 24 μεταγωγείς. Συγκεντρώνοντας όλα τα στάδια του δικτύου μπορούμε να υπολογίσουμε 5 επίπεδα μεταγωγής (το ToR είναι το πρώτο στάδιο μεταγωγής), βλ. Εικ. 5 για καλύτερη απεικόνιση των διαφορετικών σταδίων.



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση του πιο πρόσφατου αναφερόμενου δικτύου κέντρων δεδομένων της Google "Jupiter" (Nokia Bell-Labs, 2015)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Τεχνολογίες Οπτικής Διασύνδεσης (Optical Interconnects)

3.1. Τεχνικές Διαμόρφωσης Im-DD Συστημάτων Άμεσης Ανίχνευσης (Im-DD) Και Διαμόρφωσης Έντασης

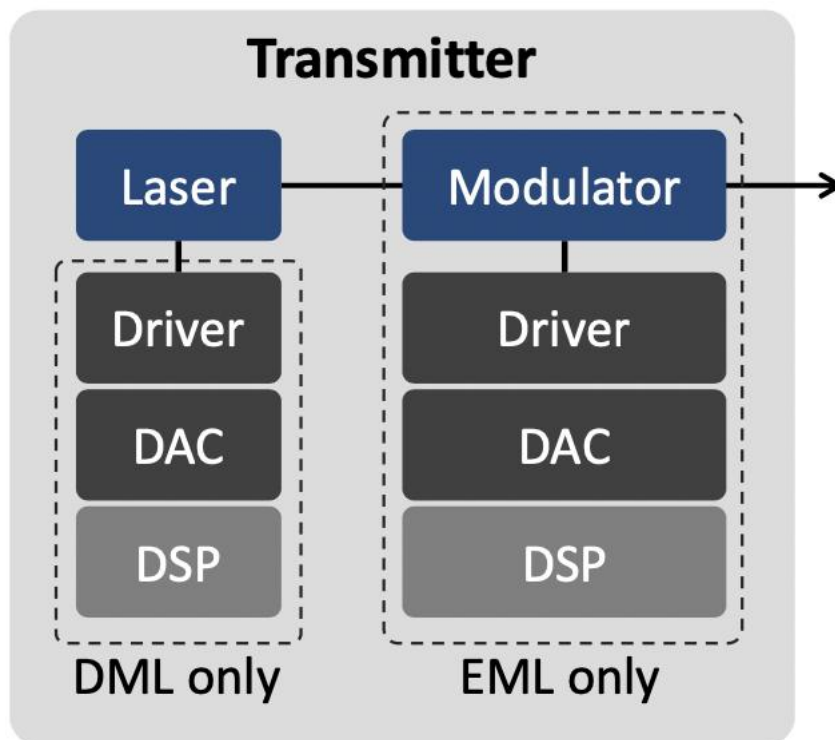
Όπως περιεγράφηκε προηγουμένως, τα οπτικά συστήματα βασίζονται σε διαφορετικές προσεγγίσεις μετάδοσης ανάλογα με τις απαιτήσεις των συγκεκριμένων τμημάτων του εκάστοτε δικτύου. Τα δίκτυα που τοποθετούνται στα τμήματα μικρών αποστάσεων (οικιακή, κινητή πρόσβαση και κέντρα δεδομένων) συνήθως επωφελούνται από το χαμηλό κόστος των πομποδεκτών IM-DD, οι οποίοι μεταδίδουν πληροφορίες χρησιμοποιώντας την ένταση φωτός. Σε αυτή την ενότητα περιγράφουμε τις πιθανές υλοποιήσεις πομποδεκτών IM-DD.

3.1.1. Πομπός Im-DD

Η δομή ενός γενικού πομπού IM-DD φαίνεται στην Εικόνα 6. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα, 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 φαινόμενο «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. Επιπλέον, οι εξωτερικοί διαμορφωτές προσφέρουν συνήθως υψηλότερο εύρος ζώνης από τα άμεσα διαμορφωμένα λέιζερ. Και στις δύο περιπτώσεις, το ηλεκτρικό σήμα παρέχεται από ένα 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.

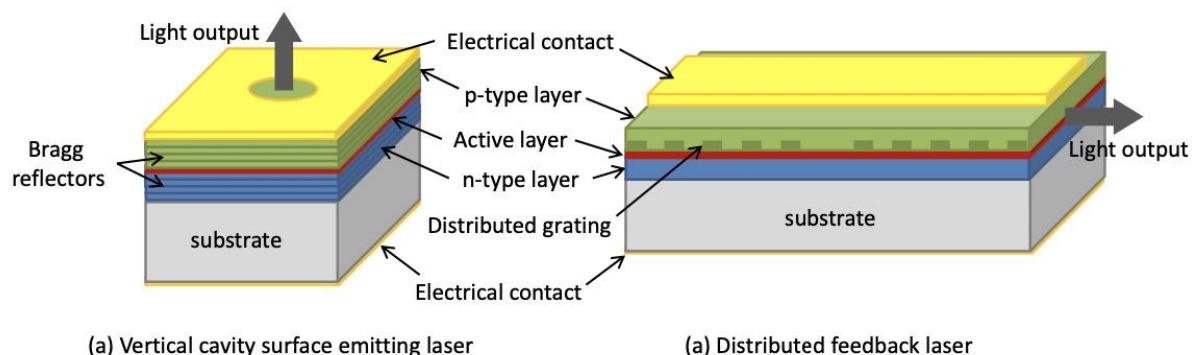


Εικόνα 6: Generic block diagram of an IM-DD transmitter. (Nokia Bell-Labs, 2015)

Laser: Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, βρίσκουμε κυρίως δύο είδη λέιζερ ημιαγωγών σε μονάδες κέντρων δεδομένων: VCSEL και DFB. Το πρώτο, το VCSEL, είναι το πιο συνηθισμένο στις μέρες μας λόγω του χαμηλού κόστους καταπόνησης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7(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 7(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 για τα VCSEL (Haglund E. et al., 2015) όσο και για τα DFB (Zhang Z. et al., 2015), που επιτρέπει τη διαμόρφωση 56-64 Gb/s (Kuchta D. et al., 2014).

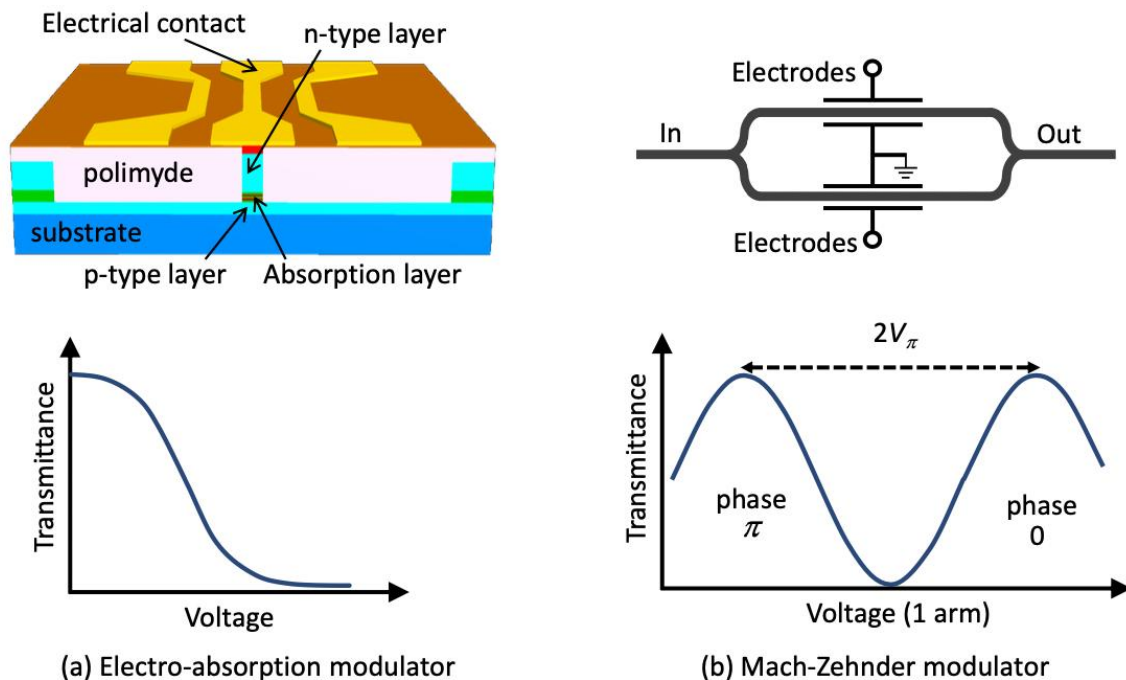


Εικόνα 7:(a) a VCSEL and (b) a DFB laser. (Nokia Bell-Labs, 2015)

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, βλ. καμπύλη μετάδοσης-τάσης στην Εικόνα 8 (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 8 (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 λείζερ 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 8b, 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 (βλ. καμπύλη μετάδοσης-τάσης στην Εικόνα 8). Ως εκ τούτου, τέτοιες δομές μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε IM-DD όσο και σε σύμφωνους πομπούς (θα περιγραφούν στην επόμενη ενότητα). Παραδοσιακά, τα εμπορικά MZM κατασκευάζονται ως επί το πλείστον σε νιοβικό λίθιο (LiNbO₃), προσφέροντας περισσότερα από 30 GHz εύρους ζώνης 3-dB με τάσεις (V_π)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 LiNbO₃ και μειωμένο V_π (1,5-2,5 V), ενώ επιτρέπει εύρη ζώνης διαμόρφωσης της τάξης των 40 GHz (Letal G. et al., 2015). Πιο πρόσφατα εμφανίστηκε η πλατφόρμα Silicon, η οποία υπόσχεται τη δυνατότητα για μαζική παραγωγή και ενσωμάτωση φωτονικών και ηλεκτρονικών στο ίδιο υπόστρωμα. Έχουν αναφερθεί σήμερα διαμορφωτές MZM με βάση το πυρίτιο που παρουσιάζουν εύρη ζώνης μεταξύ 30 και 40 GHz (Patel D. et al., 2015). 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 8:(a) Exemplary illustration of an EAM (From [79]). (b) Schematic of a MZM. (Nokia Bell-Labs, 2015)

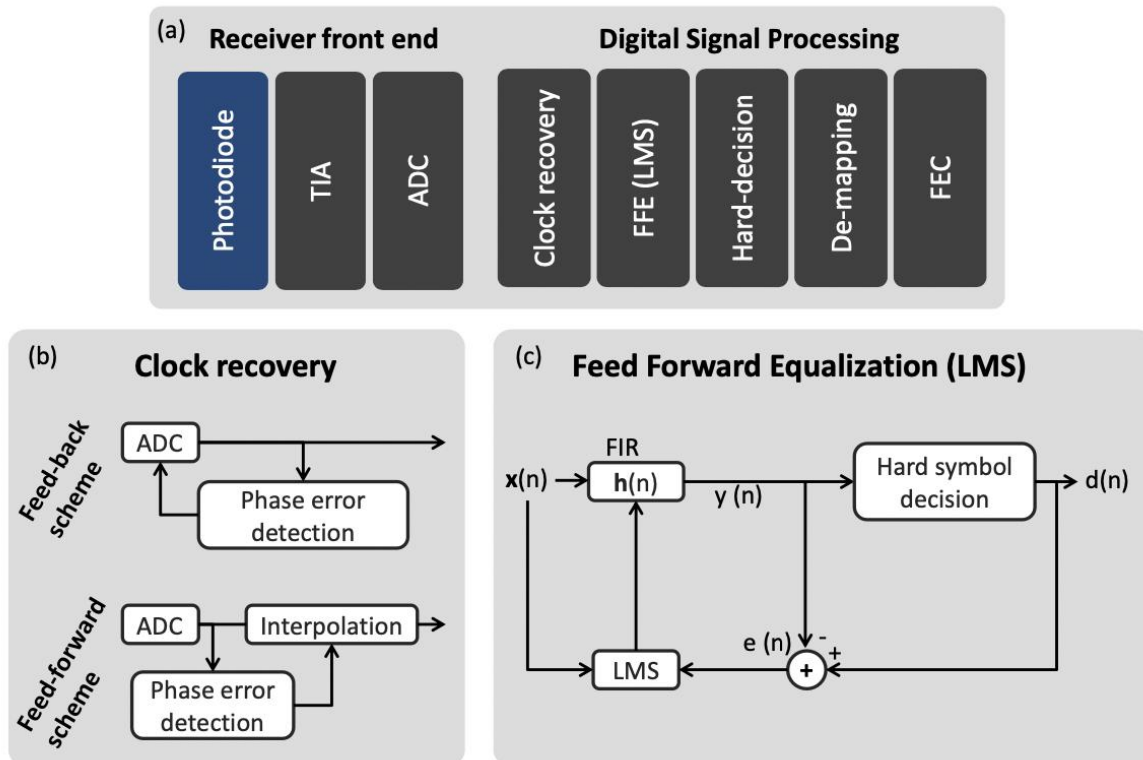
Electrical Generation: Εδώ και μερικά χρόνια, οι DAC υψηλής ανάλυσης χρησιμοποιούνται σε σύμφωνες τεχνολογίες για τη δημιουργία όλων των ειδών προηγμένων μορφών διαμόρφωσης και σχημάτων παλμών. Ωστόσο, τώρα θα απαιτούνται DAC σε πομπούς IM-DD για να μπορούν να δημιουργούν μορφές διαμόρφωσης πλάτους παλμών 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 (Fujitsu, 2016) 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 (Micram, 2016). Επιπλέον, η ταλάντευση εξόδου τους είναι μικρότερη από 1 V_{pp} (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 Vpp (Godin J. et al., 2008), αποφεύγοντας έτσι τη χρήση εξωτερικών ενισχυτών.

3.1.2. Δέκτης Im-DD

Η δομή του δέκτη φαίνεται στην Εικ. 9(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 αγώγιμων ηλεκτρονίων αυξάνεται εκθετικά (περιοχή χιονοστιβάδας). Άρα παρέχει κέρδη μίας τάξης μεγέθους υψηλότερης από τις συμβατικές φωτοδιόδους PIN (Finisar, 2016). 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. Για παράδειγμα, η Finisar πουλά έναν φωτοανιχνευτή 100 GHz. Ωστόσο, το εύρος ζώνης των εμπορικά διαθέσιμων μονάδων PIN-TIA περιορίζεται στα 40-50 GHz (Vasilakopoulos K. et al., 2015).



Εικόνα 9: (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, 2015)

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 (Kull L. et al., 2014). 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. 9(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. 9(β), μπορούμε να βρούμε δύο γενικές διαμορφώσεις για

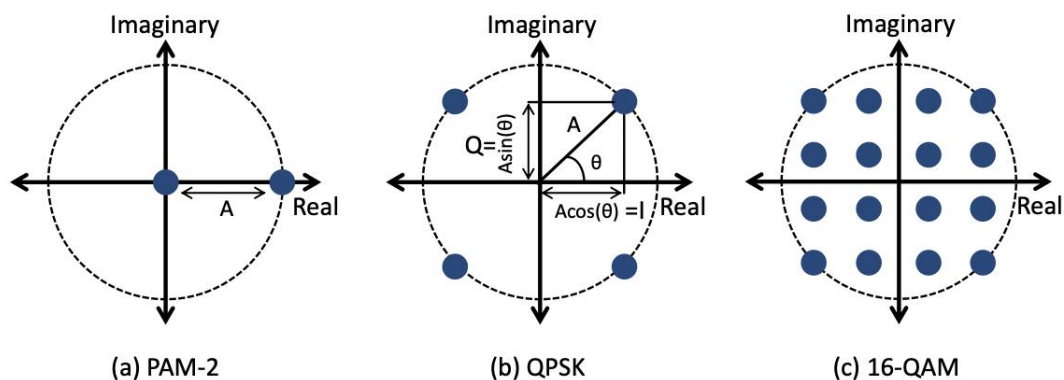
την ανάκτηση ρολογιού: ένα σχήμα ανάδρασης, στο οποίο το ρολόι του ADC επαναδιευθύνεται μέσω ενός βρόχου κλειδώματος φάσης (PLL) και το σχήμα τροφοδοσίας προς τα εμπρός. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές ανίχνευσης φάσης ανάλογα με τις απαιτήσεις του πομποδέκτη. Τα συστήματα IM-DD συνήθως 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. 9(c) δείχνει μία τυπική δομή FFE χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του μέσου ελαχίστου τετραγώνου (LMS). Στο LMS, το σήμα διέρχεται από ένα φίλτρο η 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 10 απεικονίζει μερικούς παραδειγματικούς αστερισμούς που σχεδιάζονται σε ένα σύνθετο επίπεδο, συμπεριλαμβανομένων πραγματικών και φανταστικών αξόνων. Η Εικ. 10(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 Εικ. 10(β) δείχνει έναν αστερισμό μετατόπισης φάσης τετραγωνισμού (QPSK), στον οποίο οι πληροφορίες κωδικοποιούνται κατά μήκος τεσσάρων ισαπεχόντων φάσεων (θ) τοποθετημένες στο ίδιο επίπεδο πλάτους (A).



Εικόνα 10: (α) Αστερισμοί PAM-2, (β) QPSK και (γ) 16-QAM αστερισμοί, που σχεδιάζονται στο μιγαδικό επίπεδο συμπεριλαμβανομένων πραγματικών και φανταστικών αξόνων. (Nokia Bell-Labs, 2015)

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 Εικ. 10(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).

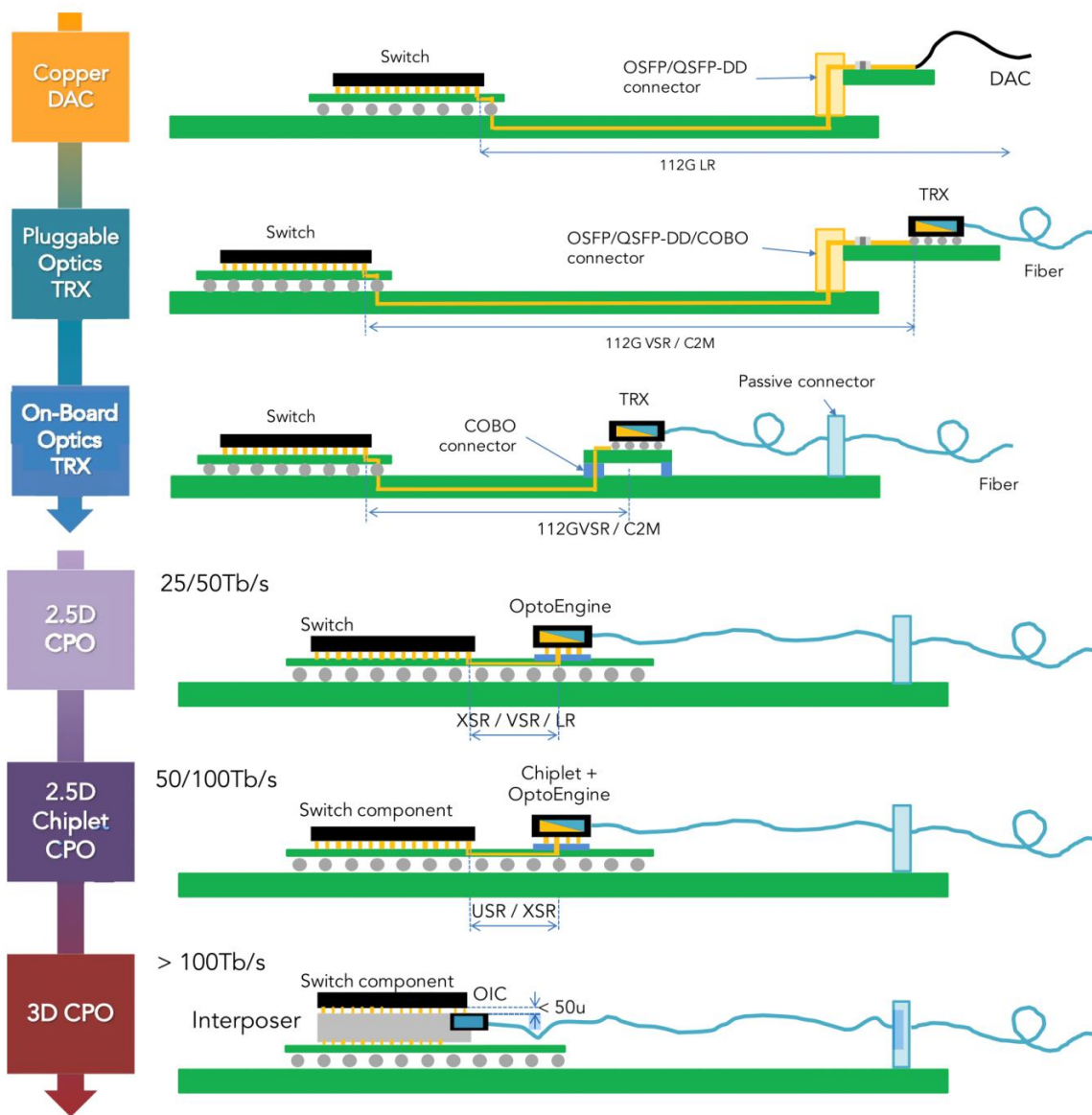
3.3. Co-Packaged Τεχνολογίες

Οι οπτικές ζεύξεις υψηλής χωρητικότητας, υψηλής πυκνότητας, ισχύος και οικονομικής απόδοσης είναι αναμφίβολα κρίσιμης σημασίας για την υποδομή κέντρων δεδομένων. Ωστόσο, ο οδικός χάρτης των οπτικών έχει φτάσει στο τέλος του δρόμου: Είναι σωστό να συνεχίσουμε στη δοκιμασμένη και αποδεδειγμένη διαδρομή που ακολουθούσαμε έως τώρα ή είναι καιρός να υιοθετήσουμε ένα νέο μοντέλο ανάπτυξης που περιλαμβάνει co-packaged τεχνολογίες;

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 (CPO Collaboration 2019, 2020). 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.



Εικόνα 11: Ο οδικός χάρτης CPO που απεικονίζει τα αυξανόμενα επίπεδα εντοποίησης 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 διακόπτη¹

Η προτιμώμενη αρχιτεκτονική CPO βασίζεται στην προσέγγιση ολοκλήρωσης 2.5D που φαίνεται στην Εικ. 11, στην οποία πολλαπλές υποδοχές CPO συναρμολογούνται γύρω από την περίμετρο ενός υποστρώματος με το διακόπτη ASIC τοποθετημένο στη μέση.

Η τρέχουσα προτίμηση (CPO Collaboration, 2020) 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 υπόστρωμα 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.

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

¹ <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/ote2.12020>

από τις τρέχουσες προβλέψεις των ASP για οπτικά 400G-DR4 από <1,20\$/Gbps to 2021 σε <0,60\$ to 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».

3.4. Σύγχρονες Τάσεις Ethernet

Η σύγχρονη τεχνολογία δικτύωσης έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, καθώς οι απαιτήσεις σε εταιρικό Ethernet και Wi-Fi έχουν αυξηθεί. Σήμερα, εκτός από την ανάγκη υποστήριξης μιας μεγάλης ποικιλίας συσκευών, τα τοπικά δίκτυα (LAN) πρέπει να εξυπηρετούν την κίνηση για πολλές περιπτώσεις χρήσης, συμπεριλαμβανομένων των μέσων ροής, του συνδεδεμένου χώρου αποθήκευσης δικτύου (NAS), της φωνής μέσω IP (VoIP), της εικονικοποίησης κτλ. Επιπλέον, η άνοδος του IoT και των υπηρεσιών cloud έχουν αλλάξει τις ροές κυκλοφορίας σε πολλές επιχειρήσεις και έχουν αυξήσει περαιτέρω τις απαιτήσεις εύρους ζώνης.

Άλλες σημαντικές τάσεις στον χώρο δικτύωσης θα εμφανιστούν δριμύτερες στο μέλλον. Το Wi-Fi 6 και το 100 Gigabit Ethernet υπόσχονται να επεκτείνουν σημαντικά τη χωρητικότητα, το Software-Defined Networking (SDN) θα βελτιώσει τις δυνατότητες αυτοματοποίησης και διαχείρισης δικτύου και οι επιχειρήσεις θα βασίζονται όλο και περισσότερο στα δίκτυα ευρείας περιοχής που καθορίζονται από το λογισμικό (SD-WAN) για συνδεσιμότητα μεταξύ των υποκαταστημάτων και κέντρων δεδομένων cloud. Επίσης, το Power over Ethernet (PoE) έχει διευκολύνει την εγκατάσταση, την κλιμάκωση και το συγχρονισμό των βιομηχανικών συσκευών IoT.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων πληροφορικής αντιμετωπίζουν διπλές προκλήσεις όσον αφορά τη διαχείριση της ταχείας αύξησης της επισκεψιμότητας από το cloud, τις κινητές συσκευές, τις συσκευές IoT και την εισαγωγή νέων τεχνολογιών για να κάνουν τα δίκτυα πιο επεκτάσιμα, αυτοματοποιημένα και ασφαλή. Για να κατανοήσουμε πώς οι οργανισμοί θα ενημερώσουν τα ενσύρματα δίκτυα, μελετήθηκε η έρευνα της Spiceworks² που έλαβε χώρα τον Ιανουάριο του 2020, λίγο πριν η πανδημία COVID-19 αλλάξει το τοπίο της πληροφορικής.

1. Networking Growth Adoption and Opportunities

• Αναβαθμίσεις Ethernet - Wi-Fi και Υιοθέτηση SD-WAN

Από άποψη συνδεσιμότητας, το SD-WAN πωλήθηκε ως αντικατάσταση παλαιών λύσεων WAN, με γνωστά πλεονεκτήματα όπως η δυνατότητα κλιμάκωσης δικτύων σε φυσικά καταμεμημένες περιοχές, αυξημένη ευελιξία και πλεονεκτήματα κόστους σε σχέση με την εναλλαγή πολλαπλών πρωτοκόλλων (MPLS). Ίσως αυτός είναι ο λόγος που τα δεδομένα της έρευνας δείχνουν ότι ένα επιπλέον 11% των οργανισμών θα αρχίσει να χρησιμοποιεί τεχνολογία SD-WAN μέσα στα επόμενα δύο χρόνια, από 21% που είναι σήμερα. Η ανάπτυξη θα είναι ακόμη ταχύτερη μεταξύ των μεγαλύτερων οργανισμών, με επιπλέον 29% των επιχειρήσεων να σχεδιάζουν να υιοθετήσουν το SD-WAN έως το 2022, από 33% σήμερα. Η επιτυχία του SD-WAN μπορεί να γίνει εις βάρος των παλαιών τεχνολογιών. Ενώ το MPLS είναι μια εξέχουσα τεχνολογία WAN με τρέχον ποσοστό υιοθέτησης 24%, το 5% των ερωτηθέντων είπε ότι ο οργανισμός τους διέκοψε τη χρήση της τεχνολογίας τα τελευταία δύο χρόνια — σε σύγκριση με μόνο το 3% των επιχειρήσεων που σχεδιάζουν να αρχίσουν να χρησιμοποιούν MPLS έως το 2022.

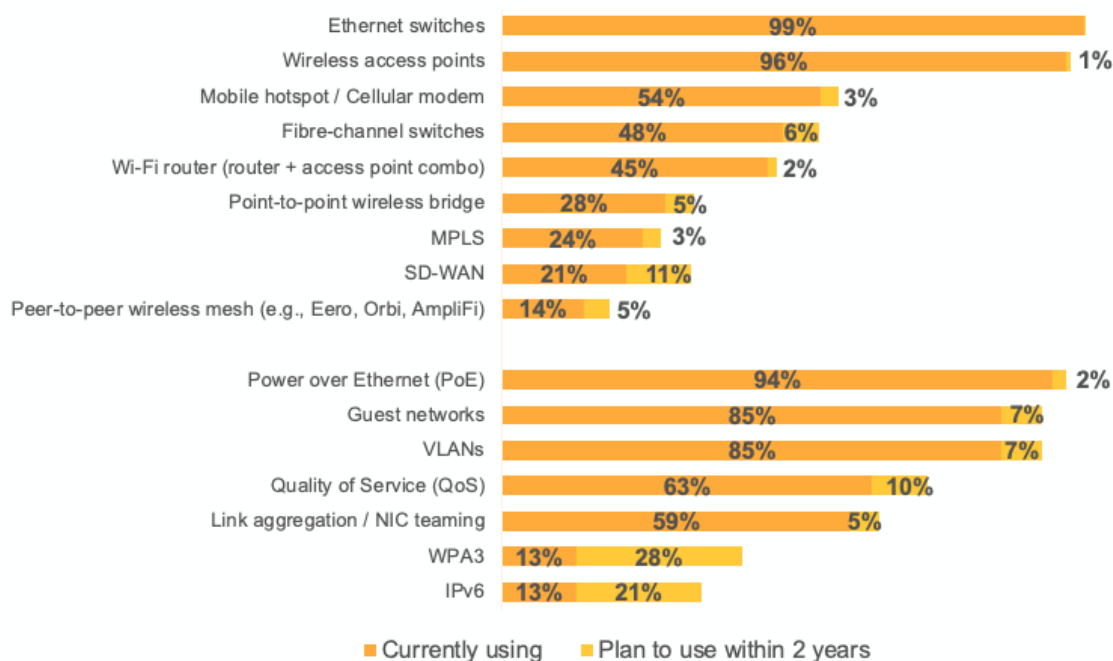
Με έναν συνεχώς αυξανόμενο αριθμό συσκευών που συνδέονται σε δίκτυα, αυξημένες ανησυχίες για την ασφάλεια και αυξανόμενες απαιτήσεις δεδομένων, αναμένουμε ανάπτυξη επιχειρηματικής υιοθέτησης μέσα στα επόμενα δύο χρόνια για πρότυπα και δυνατότητες όπως IPv6 (21%) και WPA3 (28%).

Τα VLAN, μια λύση για ευέλικτη τμηματοποίηση δικτύου, υιοθετείται κατά 85% και το 7% των ερωτηθέντων σχεδιάζει να τα εφαρμόσει έως το 2022. Επιπλέον, η χρήση

² <https://swzd.com/resources/networking-trends-in-2020-and-beyond/>

guest networks — τα οποία βοηθούν στο διαχωρισμό και την ασφάλεια ευαίσθητων εταιρικών δεδομένων από την άλλη κίνηση — αναμένεται να αυξηθεί κατά 7%.

Current and Future Business Adoption of Networking Technologies and Features



Εικόνα 12: Τεχνολογίες Δικτύωσης και Χαρακτηριστικά³

Επιπρόσθετα, ενώ σχεδόν όλες οι επιχειρήσεις χρησιμοποιούν ήδη Ethernet ή Wi-Fi, πολλές επιχειρήσεις θέλουν να μετακινηθούν σε πιο γρήγορες εκδόσεις αυτών των προτύπων. Σύμφωνα με την παρούσα έρευνα, το 45% των οργανισμών σχεδιάζει να αναβαθμίσει ενσύρματα ή ασύρματα δίκτυα στο μέλλον και το 10% σχεδιάζει να αναβαθμίσει και τα δύο.

2. Ethernet Switch Technology Trends

- **40/100 GbE Revolution Brewing στις επιχειρήσεις**

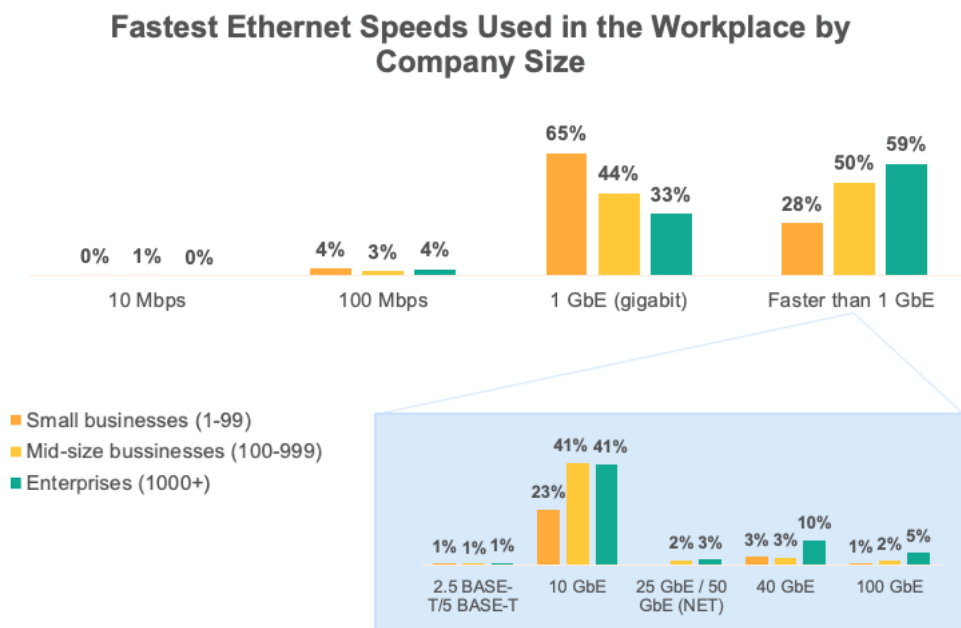
Με τα χρόνια, τα εξελισσόμενα πρότυπα Ethernet επέτρεψαν ταχύτερη συνδεσιμότητα LAN, ξεκλειδώνοντας νέες δυνατότητες στο χώρο εργασίας. Το πρότυπο Fast Ethernet (100BASE-T), που εισήχθη το 1995, ανέβασε τον πήχη προσφέροντας ταχύτητες μετάδοσης έως και 100 Mbps, 10 φορές μεγαλύτερες από τον προκάτοχό του, το Standard Ethernet (10 Mbps). Αργότερα, το πρότυπο

³ <https://swzd.com/resources/networking-trends-in-2020-and-beyond/>

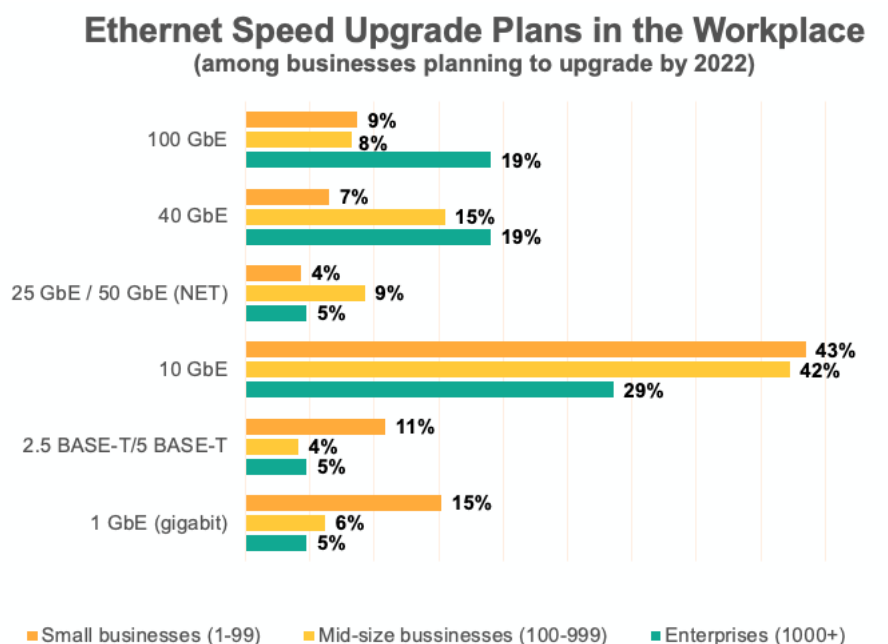
1000BASE-T παρείχε 10 φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης μέσω Fast Ethernet, με ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων 1 gigabit ανά δευτερόλεπτο. Με τα χρόνια, ο οδικός χάρτης Ethernet εξελίχθηκε για να προσφέρει ταχύτητες 10GbE, 40GbE και ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες 100GbE, με τους προμηθευτές να είναι πρόθυμοι να λανσάρουν διακόπτες και καλώδια δικτύου υψηλής απόδοσης για να υποστηρίξουν τα νέα πρότυπα. Σήμερα, το 92% των οργανισμών χρησιμοποιεί διακόπτες ικανούς για μέγιστες ταχύτητες Ethernet 1 GbE ή μεγαλύτερες στο χώρο εργασίας και το 42% των οργανισμών χρησιμοποιεί δίκτυα Ethernet 10 Gigabit ή ταχύτερα. Οι επιχειρήσεις τείνουν να υιοθετούν πρώιμα πρότυπα Ethernet σε σύγκριση με μικρότερους οργανισμούς. Για παράδειγμα, το 59% των επιχειρήσεων έχουν εφαρμόσει ταχύτητες Ethernet 10 GbE ή μεγαλύτερες, σε σύγκριση με μόλις 27% των μικρών επιχειρήσεων. Παρόλο που είναι διαθέσιμα 100 GbE, πολλοί οργανισμοί το θεωρούν πολυτέλεια. Ακόμη και μεταξύ των επιχειρήσεων, μόνο το 5% το έχει αναπτύξει.

Το πιο δημοφιλές πρότυπο για αναβάθμιση τα επόμενα δύο χρόνια θα είναι τα 10 GbE, ειδικά μεταξύ μικρότερων οργανισμών. Το 43% των μικρομεσαίων επιχειρήσεων που σχεδιάζουν να αγοράσουν νέους διακόπτες Ethernet πριν από το 2022 σχεδιάζουν να κάνουν αναβάθμιση στα 10 GbE. Κατευθυντικά, η έρευνα επισημαίνει ότι περισσότερες από το ένα τρίτο των επιχειρήσεων που σχεδιάζουν να αναβαθμίσουν τα πρότυπα Ethernet θα επιλέξουν είτε 40 GbE είτε 100 GbE. Σχεδόν το ένα τέταρτο των μεσαίων εταιρειών που σχεδιάζουν να αναβαθμίσουν θα στραφούν σε πρότυπα δικτύωσης 40GbE ή 100GbE μέσα στα επόμενα δύο χρόνια.

Μεταξύ των επιχειρήσεων που επιθυμούν να αναβαθμίσουν, τα νεότερα πρότυπα Ethernet 2,5GBASE-T και 5GBASE-T τα οποία αντιπροσωπεύουν μια λιγότερο δαπανηρή επιλογή για επιχειρήσεις που θέλουν να υπερβούν τις ταχύτητες gigabit, θα είναι μια πιο δημοφιλής επιλογή αναβάθμισης για τις μικρές επιχειρήσεις (11%) σε σύγκριση με τις επιχειρήσεις (5%).



Εικόνα 13: Οι καλύτερες ταχύτητες Ethernet ανα Μέγεθος Επιχείρησης⁴



Εικόνα 14: Αναβάθμιση Χώρων Εργασίας - Ethernet⁵

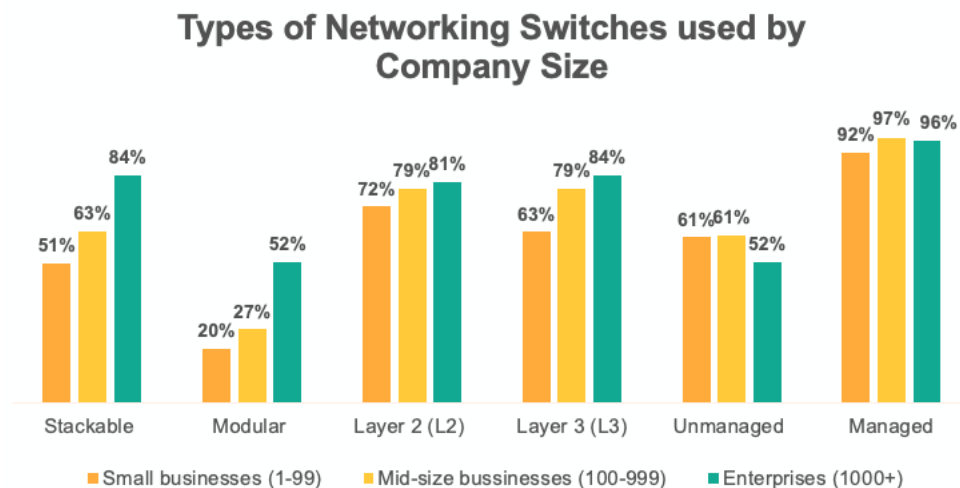
Ωστόσο, δεν θα αναβαθμιστούν όλοι οι οργανισμοί σε μία από τις πιο πρόσφατες και καλύτερες επιλογές. Μεταξύ των επιχειρήσεων που σχεδιάζουν να αναβαθμίσουν τα πρότυπα Ethernet έως το 2022, το 9% σχεδιάζει να υιοθετήσει το πρότυπο 1 GbE.

⁴ <https://swzd.com/resources/networking-trends-in-2020-and-beyond/>

⁵ <https://swzd.com/resources/networking-trends-in-2020-and-beyond/>

Ανάμεσα στους μεταγωγείς Ethernet υπάρχουν βασικές διαφορές μεταξύ της πληθώρας επιλογών που σχετίζονται με τη διαχειρισσιμότητα και τον έλεγχο. Για παράδειγμα, εάν θα αγοραστούν διαχειριζόμενοι ή μη διαχειριζόμενοι διακόπτες είναι μια απόφαση που πρέπει να λάβουν υπόψη οι επαγγελματίες του δικτύου. Οι κορυφαίοι προμηθευτές μεταγωγέων (Cisco, Juniper, HPE) υποστηρίζουν πολλά από τα πλεονεκτήματα των διαχειριζόμενων μεταγωγέων, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας ιεράρχησης της κυκλοφορίας LAN και της αυξημένης ασφάλειας δικτύου (προστασία από επιθέσεις DDOS) και του ελέγχου της ροής πληροφοριών σε ολόκληρο το δίκτυο σε πραγματικό χρόνο.

Μια άλλη επιλογή που πρέπει να ληφθεί υπόψη με τους διακόπτες είναι ο τρόπος σύνδεσής τους. Παρατηρείται ότι με τους stackable διακόπτες επιτρέπεται σε πολλαπλές μονάδες να συνδέονται μεταξύ τους και να διαμορφώνονται ως μια ενιαία οντότητα, κάτι που μπορεί να απλοποιήσει τη διαχείριση με δυνητικό αποτέλεσμα την αυξημένη απόδοση και επεκτασιμότητα. Ενώ οι αρθρωτοί διακόπτες είναι ακριβότεροι από τους τυπικούς διακόπτες, επιτρέπουν στους επαγγελματίες IT να προσθέτουν μονάδες επέκτασης καθώς αλλάζουν οι απαιτήσεις δικτύωσης. Τέλος, με την αύξηση της πολυπλοκότητας του δικτύου, βλέπουμε μια μετατόπιση από τους πιο βασικούς διακόπτες Layer 2 σε διακόπτες Layer 3, οι οποίοι επιτρέπουν τη δυναμική δρομολόγηση. Συνολικά, με ποσοστό υιοθέτησης 95%, οι managed ή διαχειριζόμενοι διακόπτες είναι ο πιο δημοφιλής τύπος μεταγωγέα Ethernet στο χώρο εργασίας. Οι διακόπτες Layer 2 και Layer 3 είναι επίσης αρκετά δημοφιλείς, με 77% και 74% ποσοστά υιοθέτησης επιχειρήσεων, αντίστοιχα. Με την πιο προηγμένη λειτουργικότητά τους, αλλά με υψηλότερες τιμές, οι διακόπτες με δυνατότητα στοίβαξης, αρθρωτών και Layer 3 είναι σημαντικά πιο δημοφιλείς μεταξύ των επιχειρήσεων από ό,τι στις μικρές επιχειρήσεις.



Εικόνα 15: Τύποι Switches ανά Μέγεθος Εταιρείας⁶

1. Επωνυμίες μεταγωγέων δικτύου

- **Παράγοντες που εξετάζουν οι επιχειρήσεις κατά την αγορά υλικού δικτύωσης**

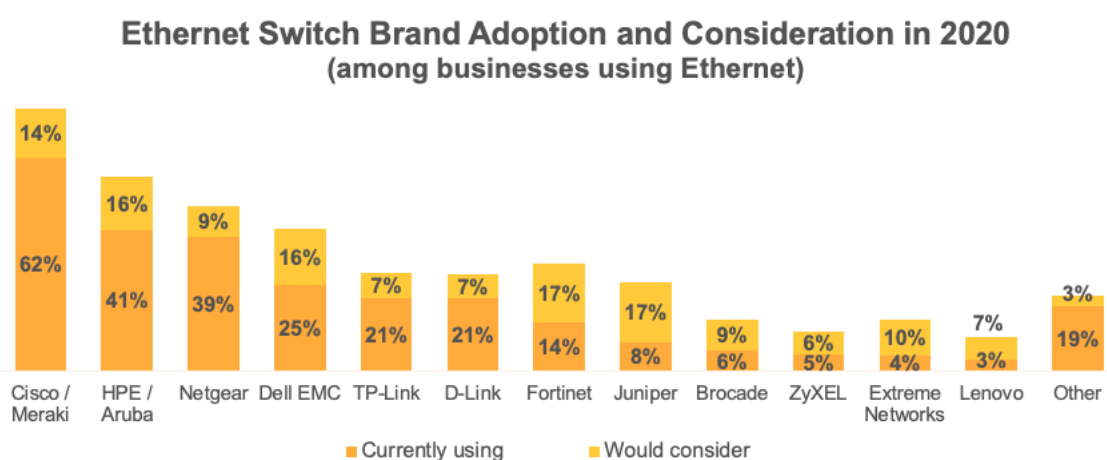
Η αξιοπιστία έχει τη μεγαλύτερη σημασία κατά την αξιολόγηση μιας αγοράς υλικού δικτύου, με το 75% των ερωτηθέντων να το θεωρεί κρίσιμο παράγοντα. Τα χαρακτηριστικά ασφαλείας θεωρούνται πιο σημαντικά από τη συμβατότητα με την υπάρχουσα υποδομή (41%). Πάνω από το ένα τρίτο των συμβούλων πληροφορικής πιστεύουν ότι η υψηλή απόδοση (37%) είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τις αποφάσεις αγοράς δικτύων. Οι αγοραστές δίνουν επίσης προσοχή στην ευκολία διαχείρισης (25%), στην έλλειψη ζητημάτων ασφαλείας (24%), στο χαμηλό κόστος ιδιοκτησίας (22%) και στη δυνατότητα διαμόρφωσης (21%).

Επί του παρόντος, οι μεταγωγείς δικτύου Cisco/Meraki είναι πιο δημοφιλείς μεταξύ των επιχειρήσεων, με ποσοστό υιοθέτησης 62% που δημιουργεί σημαντικό χάσμα μεταξύ της Cisco και των πλησιέστερων ανταγωνιστών του, HPE/Aruba (41%), Netgear (39%) και Dell EMC (25%). Μεταξύ των προμηθευτών δεύτερης βαθμίδας, η TP-Link και η D-Link συγκέντρωσαν 21% επιχειρηματική υιοθέτηση η καθεμία, ακολουθούμενη από τις Fortinet (14%), Juniper (8%) και Brocade (6%). Το Netgear είναι δημοφιλές μεταξύ των μικρότερων οργανισμών, με ποσοστό υιοθέτησης 41%.

⁶ <https://swzd.com/resources/networking-trends-in-2020-and-beyond/>

Αντίθετα, η Brocade κατέχει ποσοστό υιοθέτησης 15% στις επιχειρήσεις, σε σύγκριση με μόνο 4% μεταξύ των μικρομεσαίων επιχειρήσεων.

Πολλοί οργανισμοί χρησιμοποιούν πολλαπλές μάρκες μεταγωγών δικτύου. Κατά μέσο όρο, τα δεδομένα μας δείχνουν ότι οι επιχειρήσεις χρησιμοποιούν διακόπτες από 2 προμηθευτές και είναι ανοιχτές στο ενδεχόμενο 2 επιπλέον επωνυμιών στο μέλλον. Οι επωνυμίες που απολαμβάνουν τα υψηλότερα μελλοντικά ποσοστά αντιπαροχής περιλαμβάνουν τις Fortinet (17%), Juniper (17%) και HPE Aruba (16%).



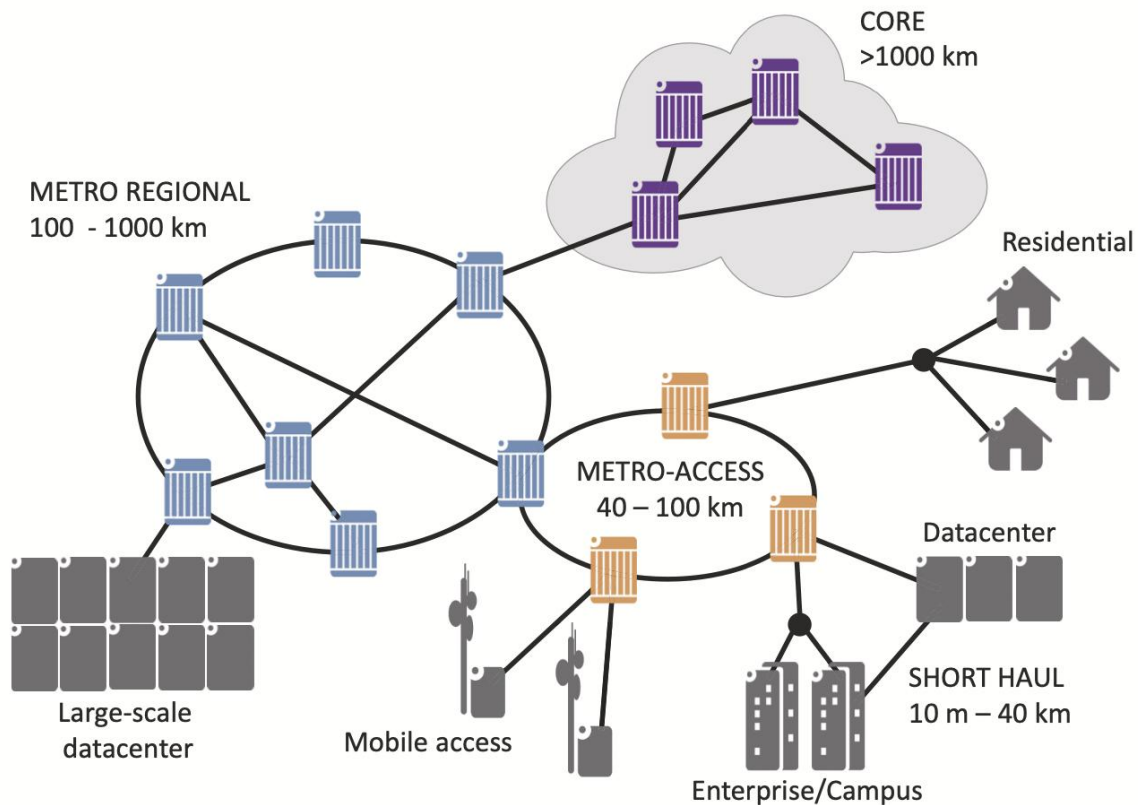
Εικόνα 16: Εταιρείες Παροχής Μεταγωγών Δικτύου⁷

⁷ <https://swzd.com/resources/networking-trends-in-2020-and-beyond/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Τεχνολογίες Οπτικής Μεταγωγής

4.1. Ο Ρόλος Της Οπτικής Μεταγωγής Στα Σημερινά Κέντρα Δεδομένων

Από την πρώτη τους δοκιμαστική επίδειξη το 1977, τα συστήματα οπτικών ινών δεν έχουν σταματήσει να εξελίσσονται. Τα πρώτα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα έκαναν χρήση σχημάτων διαμόρφωσης έντασης και άμεσης ανίχνευσης (IM-DD) για μετάδοση έως και 45 Mb/s μέσω 10 km χωρίς repeater [56]. Μόλις δέκα χρόνια αργότερα, τα οπτικά συστήματα επέτρεψαν τη μετάδοση έως και 2,5 Gb/s χωρητικότητα σε 60-70 km (Agrawal G. P., 2002). Αυτό κατέστη δυνατό με τη χρήση νέων λέιζερ και ανιχνευτών που λειτουργούν στα 1,55 μm που αντιστοιχεί στη ζώνη με τη χαμηλότερη απώλεια ινών, συνήθως 0,2 dB/km (Agrawal G. P., 2002). Μετά την εφεύρεση του ενισχυτή ινών με πρόσμειξη με έρβιο, η έννοια της πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM-Wavelength Division Multiplexing) έγινε πολύ δημοφιλής (Gnauck A. et al., 2008). Το WDM επέτρεψε τη μετάδοση καναλιών πολλαπλών μηκών κύματος μέσα σε μία μόνο ίνα, γεγονός που επέτρεψε την αύξηση της χωρητικότητας της ίνας πάνω από το Tb/s μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '90 (Gnauck A. et al., 2008). Η τελευταία οπτική επανάσταση εμφανίστηκε τη δεκαετία του 2000. Η τελευταία προσθήκη αφορούσε διαφορετικά σχήματα από τα IM-DD, τα οποία χρησιμοποιούν μόνο την ένταση το πλάτος, τη φάση και την πόλωση του φωτός, αυξάνοντας έτσι τη φασματική απόδοση (b/s/Hz).



Εικόνα 17: Network segments in a global telecommunication network.⁸

Σήμερα οι σύμφωνοι πομποδέκτες είναι ικανοί να μεταδίδουν 100 έως 500 Gb/s ανά κανάλι μήκους κύματος σε χιλιάδες/εκατοντάδες χιλιόμετρα (Nokia, 2016).

Λόγω της υψηλής χωρητικότητάς τους και της μεγάλης τους εμβέλειας, τα συστήματα οπτικών ινών έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την υποστήριξη παγκόσμιων core-δικτύων (που ονομάζονται επίσης δίκτυα κορμού ή δίκτυα μεγάλων αποστάσεων). Ωστόσο, με οδηγό την αυξανόμενη ζήτηση κίνησης στο Διαδίκτυο και με τη βοήθεια του μειωμένου κόστους των οπτικών συστημάτων, τα περισσότερα τμήματα τηλεπικοινωνιών υιοθετούν σήμερα την επικοινωνία οπτικών ινών. Η εικόνα 6 δείχνει ένα διάγραμμα ενός παγκόσμιου τηλεπικοινωνιακού δικτύου, που περιγράφει την ποικιλομορφία των τμημάτων του δικτύου. Προφανώς, κάθε τμήμα υιοθετεί την τεχνολογική λύση που ταιριάζει καλύτερα στις μοναδικές απαιτήσεις εύρους ζώνης και στους τεχνοοικονομικούς περιορισμούς του.

⁸ <https://networks.nokia.com/products/pse-2-super-coherent-technology>

Τα βασικά δίκτυα απαιτούν τεράστιους και μεγάλους σωλήνες ροής δεδομένων ικανούς να μεταφέρουν παγκοσμίως όλη την κίνηση δεδομένων που συγκεντρώνεται από τα υποκείμενα τμήματα. Όντας το δίκτυο με τους λιγότερους κόμβους, αλλά απαιτώντας την υψηλότερη χωρητικότητα, τα core-δίκτυα βασίζονται σε σύμφωνους πομποδέκτες υψηλής τεχνολογίας για να επιτύχουν μεγάλη φασματική απόδοση και ως εκ τούτου να μεγιστοποιήσουν τη χωρητικότητα των ινών. Τέτοιες ίνες μεταφέρουν συνήθως δεκάδες terabit ανά δευτερόλεπτο μέσω πολλών καναλιών μήκους κύματος που το καθένα λειτουργεί στα 100-200 Gb/s. Το αντίθετο συμβαίνει στα χαμηλότερα τμήματα του δικτύου όπου δεν απαιτείται να διανυθεί μεγάλη απόσταση (λιγότερο από 40 km συνολικά), αλλά είναι πολύ ευαίσθητα στο κόστος λόγω της εγγύτητάς τους στον τελικό χρήστη. Ως εκ τούτου, τέτοια τμήματα χρησιμοποιούν συνήθως πομποδέκτες χαμηλότερου κόστους που βασίζονται σε IM-DD. Τα διαφορετικά τμήματα σε ένα τέτοιο επίπεδο παρουσιάζουν μεγάλη τεχνολογική ποικιλομορφία λόγω των ετερογενών αναγκών τους: παθητικό οπτικό δίκτυο Mb/s-Gb/s (PON) που παρέχει συνδεσιμότητα σε κατοικημένες περιοχές, ζεύξεις 1-10 Gb/s για κινητά backhauling ή Κέντρα δεδομένων Enterprise/Campus και 10-100 Gb/s για κέντρα δεδομένων μεγάλης κλίμακας. Το ενδιάμεσο μητροπολιτικό τμήμα συγκεντρώνει την κίνηση από αυτό το ετερογενές οικοσύστημα, επομένως οι ροές κυκλοφορίας που ταξιδεύουν μέσω των μητροπολιτικών δικτύων είναι πολύ διαφορετικές, γεγονός που καθιστά τον σχεδιασμό τους δύσκολο. Επιπλέον, η κίνηση σε τέτοια τμήματα αυξάνεται ραγδαία λόγω της δημιουργίας υπηρεσιών cloud που απαιτούν εύρος ζώνης. Κατά συνέπεια, οι περισσότεροι προμηθευτές πομποδέκτη εργάζονται επί του παρόντος για τη μείωση του κόστους της σύμφωνης τεχνολογίας για να προσφέρουν μια λύση υψηλού εύρους ζώνης για αυτά τα δίκτυα, με χωρητικότητες που κυμαίνονται μεταξύ 100 και 400 Gb/s.

Στα επόμενα κεφάλαια παρέχουμε τις θεμελιώδεις έννοιες για τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών που θα βοηθήσουν τον αναγνώστη να κατανοήσει καλύτερα τα επόμενα κεφάλαια. Αρχικά, στην Ενότητα 4.2, περιγράφουμε τις διαφορετικές τεχνικές επικοινωνίας/μεταγωγής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ δύο ή περισσότερων κόμβων σε ένα οπτικό δίκτυο.

4.2. Τεχνικές Επικοινωνίας / Μεταγωγής Δικτύων

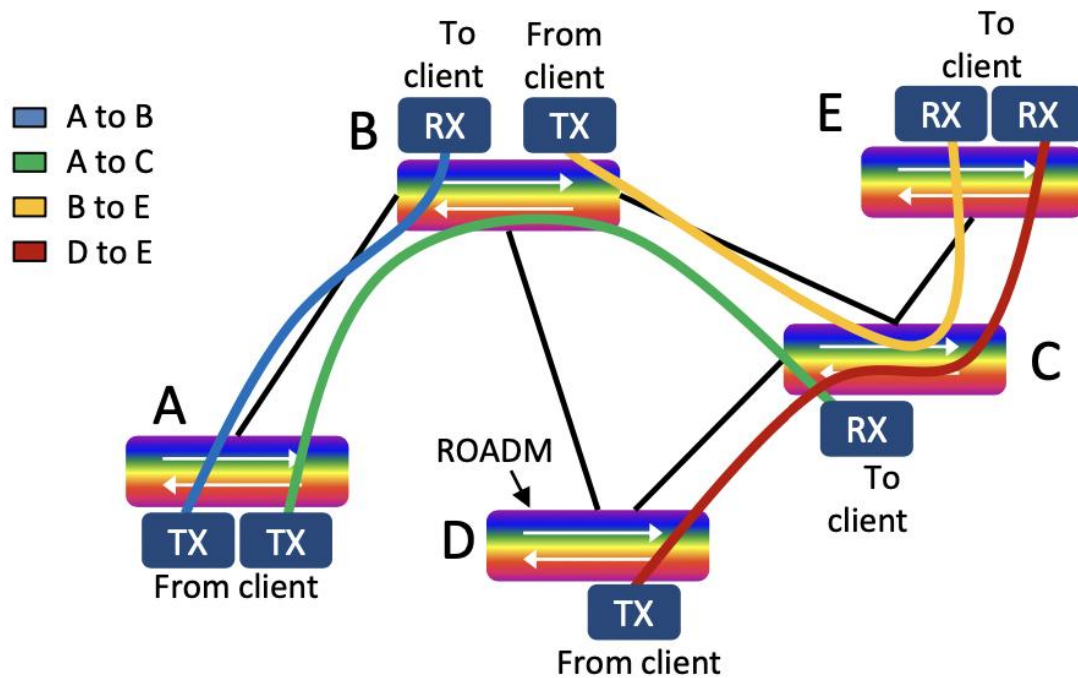
Διαφορετικές τεχνικές επικοινωνίας/μεταγωγής χρησιμοποιούνται σήμερα στα διαφορετικά τμήματα του δικτύου, ανάλογα με το είδος της κίνησης που ρέει μέσω του συγκεκριμένου δικτύου. Σε αυτήν την υποενότητα θα συζητήσουμε τρεις διαφορετικές τεχνικές μεταγωγής: μεταγωγή οπτικού κυκλώματος (OCS), μεταγωγή ηλεκτρονικών πακέτων (EPS) και μεταγωγή οπτικών πακέτων (OPS).

4.2.1. Μεταγωγή οπτικού κυκλώματος- Optical circuit switching

Η μεταγωγή οπτικού κυκλώματος είναι η τυπική τεχνική επικοινωνίας που χρησιμοποιείται στις μέρες μας σε core δίκτυα. Σε μια τέτοια προσέγγιση δημιουργείται μια σταθερή οπτική σύνδεση (κύκλωμα) μεταξύ των κόμβων πηγής και προορισμού. Παρατηρούμε την ανάθεση μιας διαδρομής από άκρο σε άκρο μέσω ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος, βλέπε Εικ. 7, όπου οι καμπύλες χρώματος υποδηλώνουν κυκλώματα που δημιουργούνται μεταξύ δύο κόμβων. Με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα μπορούν να διασχίζουν πολλούς κόμβους με διαφάνεια (δηλαδή, χωρίς την ανάγκη οπτο-ηλεκτρο-οπτικών (O/E/O) μετατροπών), ενώ δρομολογούνται οπτικά σε επαναδιαμορφώσιμο οπτικό πολυπλέκτη προσθήκης (ROADM) που τοποθετείται στους κόμβους. Κάθε ROADM έχει συνήθως τόσους διακόπτες επιλογής μήκους κύματος (WSS) όσες και οι ίνες εισόδου/εξόδου, γεγονός που επιτρέπει την ανακατεύθυνση οποιουδήποτε μήκους κύματος από οποιαδήποτε ίνα εισόδου σε οποιαδήποτε ίνα εξόδου (ή προς τους δέκτες αντίστοιχα). Τα WSS έχουν αργό χρόνο επαναδιαμόρφωσης (από χιλιοστά του δευτερολέπτου σε δευτερόλεπτα), ο οποίος είναι επαρκής για δίκτυα OCS, που προορίζονται να είναι στατικά ή να μπορούν να διαμορφωθούν εκ νέου μακροπρόθεσμα.

Αυτή η προσέγγιση είναι αποτελεσματική εάν η κίνηση μεταξύ δύο κόμβων από άκρο σε άκρο είναι σταθερή και η επικοινωνία απαιτεί χωρητικότητα πλήρους μήκους κύματος. Αυτή είναι συνήθως η περίπτωση των βασικών δικτύων, τα οποία συγκεντρώνουν τεράστιο όγκο κίνησης που προέρχεται από τα υποκείμενα δίκτυα, οδηγώντας σε κατά μέσο όρο σταθερές ανάγκες χωρητικότητας. Το OCS είναι αποδοτικό όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση, επειδή το φως ταξιδεύει με διαφάνεια από την πηγή στον προορισμό. Ωστόσο, εάν αυτή η

προσέγγιση χρησιμοποιείται σε περιβάλλοντα με μεταβαλλόμενη κίνηση, η χωρητικότητα σπαταλιέται.

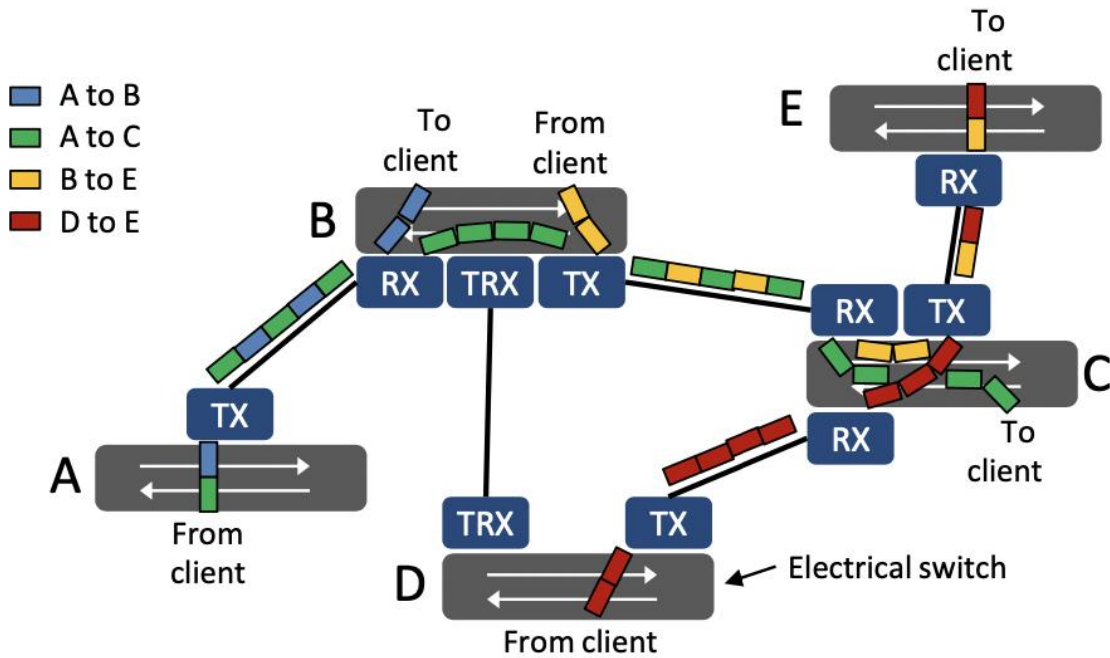


Εικόνα 18: Optical Circuit Switching Network (Nokia Bell-Labs, 2015)

4.2.2. Ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων- Electronic packet switching

Σε άλλα τμήματα, όπως τα δίκτυα κέντρων δεδομένων, η κίνηση μεταξύ κόμβων από άκρο σε άκρο (διακομιστές σε αυτήν την περίπτωση) μεταβάλλεται γρήγορα, παρουσιάζοντας συνδέσεις που απαιτούν συνήθως λιγότερη από τη χωρητικότητα του μήκους κύματος του εκάστοτε καναλιού. Ως εκ τούτου, η χρήση OCS οδηγεί σε σπατάλη μεγάλης χωρητικότητας. Σε τέτοια δυναμικά περιβάλλοντα κυκλοφορίας, το EPS (π.χ. Ethernet) χρησιμοποιείται για την ευέλικτη προσαρμογή στις διακυμάνσεις της κυκλοφορίας, βελτιστοποιώντας παράλληλα τη χρήση του εξοπλισμού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 8, κάθε χρώμα υποδεικνύει πακέτα με τους ίδιους κόμβους πηγής και προορισμού. Στο EPS, δεδομένα που πηγαίνουν σε διαφορετικούς προορισμούς (που ανήκουν σε διαφορετικές συνδέσεις) μπορούν να σταλούν μέσω της ίδιας ζεύξης πολυπλεξίας σε μικρά ηλεκτρικά πακέτα συνήθως στην κλίμακα νανο- ή μικρο-δευτερολέπτου. Ας λάβουμε υπόψη ότι χρησιμοποιώντας αυτήν την προσέγγιση η έννοια της διαφάνειας που σχολιάσαμε στην παραπάνω υπο-ενότητα, εξαφανίζεται. Τα ηλεκτρικά παραγόμενα πακέτα που απεικονίζονται στην Εικόνα 8,

μεταδίδονται μέσω οπτικών ζευξιών σε ένα κύκλωμα σημείου-προς-σημείο, οι οποίες απαιτούν πομποδέκτες σε κάθε τερματισμό ζεύξης της εκάστοτε ίνας. Ως εκ τούτου, κατά τη διέλευση ενός ενδιάμεσου κόμβου, το οπτικό σήμα μετατρέπεται πρώτα στον ηλεκτρικό τομέα μέσω ενός δέκτη, στη συνέχεια κάθε ηλεκτρικό πακέτο δρομολογείται προς μια θύρα εξόδου στον ηλεκτρικό τομέα (ηλεκτρικός διακόπτης) και τέλος το ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται εκ νέου στον οπτικό τομέα (πομπός).



Εικόνα 19: Electronic Packet Switching Network (Nokia Bell-Labs, 2015)

Ένα σαφές πλεονέκτημα του EPS είναι η δυνατότητα εκτέλεσης στατιστικής πολυπλεξίας που ενισχύει τη χρήση των πόρων. Πιο συγκεκριμένα, ένας μόνο πομποδέκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξυπηρέτηση πολλών συνδέσεων). Ωστόσο, το EPS απαιτεί ηλεκτρονική μεταγωγή (και κατά συνέπεια μετατροπές O/E/O) σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο, κάτι που όχι μόνο αυξάνει την απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας, αλλά και την καθυστέρηση, λόγω του χρόνου που αφιερώνεται σε κάθε κόμβο για τη μετατροπή δεδομένων, την επεξεργασία, και την εκ νέου μετατροπή (σε οπτικό τομέα). Επιπλέον, η αναβάθμιση της χωρητικότητας σε δίκτυα EPS τυπικά απαιτεί αλλαγή των περισσότερων στοιχείων του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των πομποδεκτών τελικού κόμβου (πελάτη) και των πομποδεκτών ενδιάμεσων κόμβων και των ηλεκτρικών διακοπών. Από την άλλη

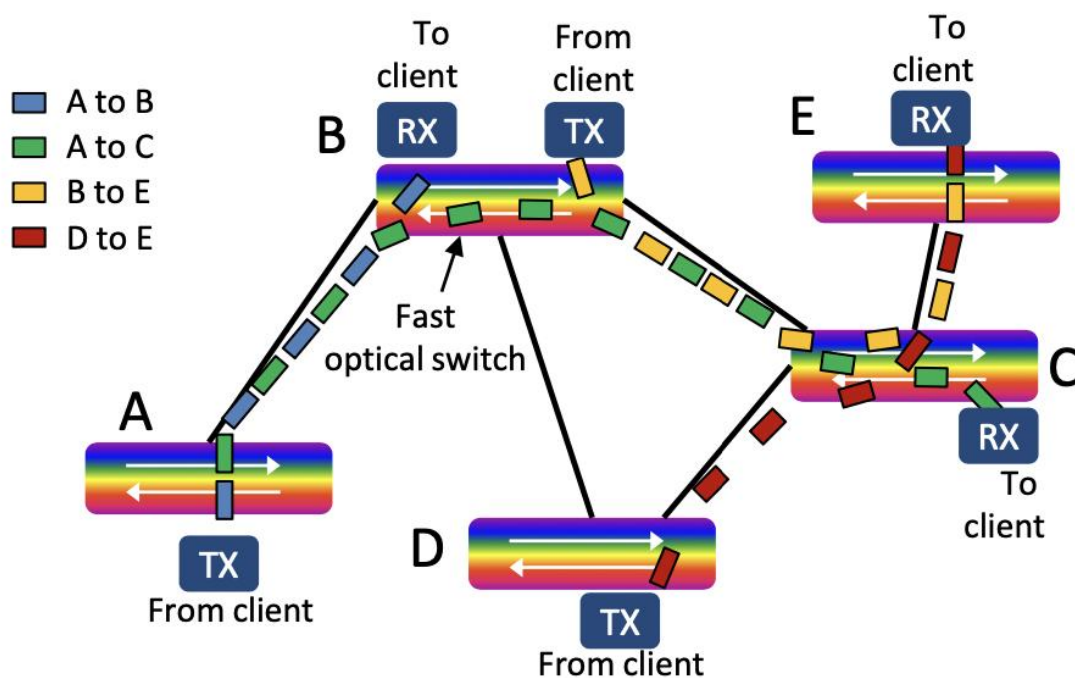
πλευρά, στα δίκτυα OCS, μόνο οι πομποδέκτες τελικού κόμβου χρειάζονται αναβάθμιση, καθώς τα δεδομένα διασχίζουν με διαφάνεια τους ROADMs.

4.2.3. Οπτική μεταγωγή πακέτων- Optical packet switching

Με στόχο την ταυτόχρονη διαφάνεια (όπως στο OCS) και τη στατιστική πολυπλεξία (όπως στο EPS), πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν προτείνει τη χρήση του OPS σε πλήρως δυναμικά δίκτυα, όπως τμήματα μητροπολιτικών και κέντρων δεδομένων. Σε αντίθεση το EPS, όπου τα ηλεκτρικά πακέτα εισάγονται σε οπτικές συνδέσεις από σημείο σε σημείο που μοιάζουν με κύκλωμα, οι οπτικές ζεύξεις στο OPS συναντώνται σε οντότητες οπτικών πακέτων μεταφοράς. Όπως φαίνεται στην εικόνα 9, παρόμοια με το OCS, τα οπτικά πακέτα δρομολογούνται τώρα στον οπτικό τομέα. Ωστόσο, στο OPS απαιτούνται γρήγοροι οπτικοί διακόπτες ικανοί να ανακατευθύνουν το φως σε μια χρονική κλίμακα πακέτων (μετάβαση σε νανοδευτερόλεπτο). Τέτοιοι οπτικοί διακόπτες μπορούν για παράδειγμα να υλοποιηθούν σε μια αρχιτεκτονική εκπομπής και επιλογής χρησιμοποιώντας οπτικούς ενισχυτές ημιαγωγών (SOA), διαμορφωτές ηλεκτροαπορρόφησης (EAMs) ή μεταβλητούς οπτικούς εξασθενητές (VOA), μεταξύ άλλων, ως οπτικές πύλες.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το OPS έχει τα πλεονεκτήματα και των δύο τελευταίων προσεγγίσεων: στατιστική πολυπλεξία που επιτρέπει την προσαρμοστικότητα της κυκλοφορίας και τη βελτιστοποίηση των πόρων και διαφάνεια, η οποία με τη σειρά της μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, την καθυστέρηση και διευκολύνει την αναβάθμιση χωρητικότητας (μόνο στο τέλος οι πομποδέκτες κόμβων πρέπει να αλλάξουν). Ωστόσο, το κύριο σημείο δυσχέρειας του OPS είναι η διαχείριση των συγκρούσεων των πακέτων. Σε μια τοπολογία που μοιάζει με πλέγμα, που απεικονίζεται στην Εικόνα 9, κάθε κόμβος έχει πολλαπλούς συνδέσμους εισόδου/εξόδου. Ως εκ τούτου, είναι πιθανό δύο πακέτα, που φτάνουν ταυτόχρονα από διαφορετικές εισόδους, να απαιτούν να κατευθυνθούν στην ίδια έξοδο, βλ. κίτρινα και κόκκινα πακέτα στον κόμβο C της Εικόνας 9. Σε αυτήν την περίπτωση, εάν τα πακέτα που προέρχονται από διαφορετικές εισόδους δεν συγχρονιστούν ή αποθηκευτούν στην προσωρινή μνήμη, μπορεί να λάβει χώρα μια σύγκρουση πακέτων, η οποία απαιτεί επαναμετάδοση πακέτων, οδηγώντας σε σπατάλη χωρητικότητας και αυξημένη καθυστέρηση. Στα συστήματα EPS, η διαχείριση τέτοιων συμβάντων γίνεται μέσω ηλεκτρονικής προσωρινής

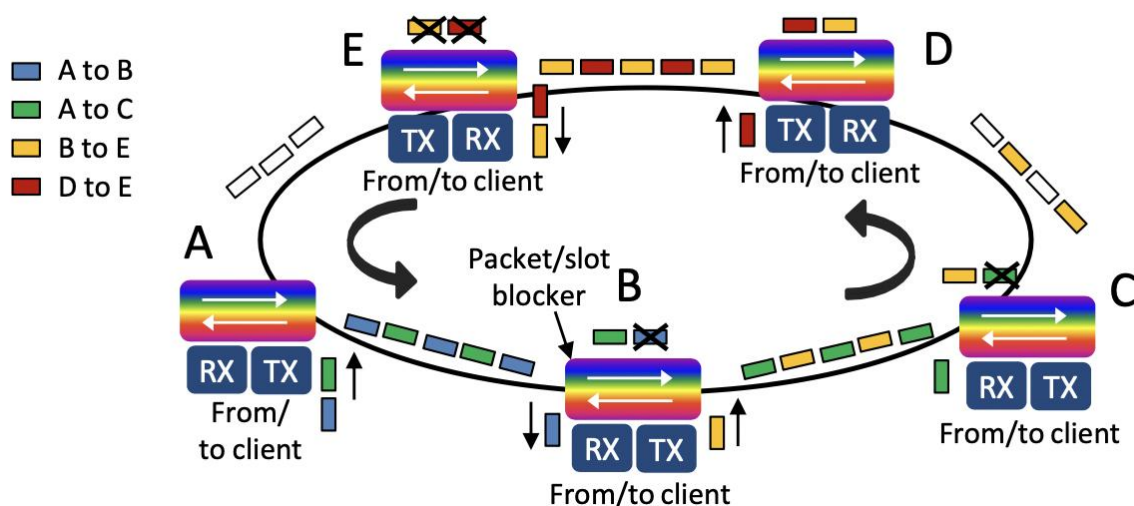
αποθήκευσης. Τα οπτικά buffer μπορούν να εφαρμοστούν χρησιμοποιώντας γραμμές καθυστέρησης ινών. ωστόσο είναι πολύ περιορισμένα και κουραστικά στη διαχείρισή τους. Μια άλλη προσέγγιση για την αποφυγή συγκρούσεων θα ήταν ο συγχρονισμός όλων των πακέτων από την προέλευσή τους. Ωστόσο, σε μια τοπολογία τύπου mesh, ο συγχρονισμός μεγάλου αριθμού κόμβων δεν είναι πρακτικός λόγω του μεγάλου αριθμού συνδέσεων με διαφορετικά μήκη. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες προτάσεις που βασίζονται σε πλέγμα OPS συνήθως εκτελούνται κάτω από σχετικά χαμηλά φορτία χωρητικότητας δικτύου (λιγότερο από 50% (Kitayama K. I. et al., 2015; Miao W. et al., 2014) προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα συγκρούσεων. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση οι πόροι του δικτύου πρέπει να είναι αρκετά διεσταλμένοι.



Εικόνα 20: Optical packet switching networks when using a mesh-like topology. (Nokia Bell-Labs, 2015)

Ένα τέτοιο ζήτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας μια τοπολογία δακτυλίου, που περιγράφεται στην Εικόνα 10. Σε ένα δίκτυο δακτυλίου, πολλοί κόμβοι συνδέονται μέσω ενός μόνο δακτυλίου ινών και τα δεδομένα ανταλλάσσονται χρησιμοποιώντας πολυπλεξικές χρονοθυρίδες. Κάθε χρώμα πακέτου που απεικονίζεται στην Εικ. 10 σχετίζεται με έναν μοναδικό κόμβο πηγής και προορισμού. Η απόρριψη και η προσθήκη πακέτων έξω ή και μέσα στον δακτύλιο

μπορεί να πραγματοποιηθεί απλά χρησιμοποιώντας οπτικούς ζεύκτες. Σε αυτήν την περίπτωση, κάθε δέκτης θα επιλέξει το πακέτο που τον ενδιαφέρει. Στους οπτικούς δακτυλίους, κάθε κόμβος έχει μόνο ένα ζεύγος ινών εισόδου/εξόδου, επομένως δεν συμβαίνει πραγματική μεταγωγή πακέτων. Ωστόσο, καθώς τα δεδομένα διασχίζονται διαφανώς μέσα από τους κόμβους, απαιτείται ένας οπτικός αποκλειστής πακέτων/υποδοχής για τη διαγραφή των ληφθέντων πακέτων, επιτρέποντας έτσι την επαναχρησιμοποίηση της χρονικής θυρίδας. Η χωρητικότητα σε ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας το WDM ως πρόσθετη διάσταση κοινής χρήσης. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί είτε πομπό με δυνατότητα γρήγορης ρύθμισης είτε δέκτες (ή και τα δύο) να αντιμετωπίζουν το μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει.



Εικόνα 21: Optical packet switching networks when using a ring topology. (Nokia Bell-Labs, 2015)

Στα δίκτυα δακτυλίου, ο συγχρονισμός πακέτων μπορεί να επιτευχθεί εύκολα, αφού όλα τα πακέτα ταξιδεύουν μέσω του ίδιου μέσου (ένας δακτυλίου ινών). Επομένως, οι συγκρούσεις μπορούν να αποφευχθούν και το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει φορτία υψηλής χωρητικότητας κοντά στο 100%, γεγονός που βελτιώνει περαιτέρω τη χρήση των πόρων.

4.3. Προοπτικές Εξέλιξης των Τεχνολογιών Οπτικής Μεταγωγής σε Μελλοντικά Κέντρα Δεδομένων

Λόγω της περιορισμένης επεκτασιμότητας και της υψηλής πολυπλοκότητας της καλωδίωσης, η μεταγωγή ethernet δεν είναι κατάλληλη για κέντρα δεδομένων

επόμενης γενιάς (NGDC). Στο σχεδιασμό των διασυνδέσεων για NGDCs, το πρώτο βήμα είναι η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας μεταγωγής. Η καλύτερη λύση στα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα NGDC είναι η χρήση οπτικής τεχνολογίας στα κέντρα δεδομένων. Η παραπάνω λύση έχει αναπτυχθεί ευρέως σε δίκτυα επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων (Lam et al., 2012). Οι κύριες κινητήριες δυνάμεις πίσω από την ανάπτυξη οπτικών δικτύων μεγάλης χωρητικότητας είναι οι πάροχοι περιεχομένου και οι φορείς εκμετάλλευσης κέντρων δεδομένων μεγάλης κλίμακας. Οι ιδιότητες όπως η εξαιρετικά υψηλή χωρητικότητα, το μικρό αποτύπωμα και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας καθιστούν την οπτική μετάδοση την καλύτερη επιλογή για ένα δίκτυο κέντρων δεδομένων. Αυτές οι τρεις ιδιότητες συζητούνται λεπτομερώς παρακάτω.

Εξαιρετικά Υψηλή Χωρητικότητα

Στις μέρες μας, στα συστήματα τηλεπικοινωνιών, η τεχνολογία οπτικών ινών θεωρείται ως το καλύτερο κανάλι επικοινωνίας με την έννοια ότι παρέχει εύρος ζώνης THz (Sacham et al., 2007). Για αποτελεσματική χρήση αυτού του τεράστιου εύρους ζώνης, το WDM (Wavelength Division Multiplexing) έχει αναπτυχθεί για την εκκίνηση πολλαπλών καναλιών παράλληλα στην ίδια ίνα. Σε ένα DWDM (πολυπλεξία με διαίρεση πυκνού μήκους κύματος) μπορούν να επιτευχθούν 100 MHz, 50 MHz ή ακόμη μικρότερη απόσταση καναλιών, ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση δεκάδων καναλιών σε μια ίνα. Στα NGDCs αναφέρεται μεγάλος αριθμός διακομιστών που αφορούν πυρήνες, επομένως, είναι προβλέψιμο ότι η ποσότητα της κίνησης που θα μεταδοθεί μέσω διαφόρων συνδέσεων θα υπερβαίνει κατά πολύ τη χωρητικότητα των διαθέσιμων ηλεκτρονικών συνδέσεων. Η κύρια λύση αυτού του προβλήματος είναι να αυξηθεί σημαντικά η καλωδίωση στο σύστημα μέσω αυτής της απαραίτητης ποσότητας εύρους ζώνης που είναι εγγυημένη μεταξύ των κόμβων. Αυτή η λύση όμως έχει ως αποτέλεσμα σοβαρή έλλειψη χώρου και πρόβλημα διαρροής ισχύος. Ωστόσο, με τη χρήση οπτικών ινών μπορεί να επιτευχθεί η ίδια χωρητικότητα με πολύ χαμηλή απώλεια μετάδοσης.

Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

Ένας από τους κύριους πρωταγωνιστές των οπτικών ζεύξεων και διακοπών είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (Sacham et al., 2007; Yoo et al., 2006). Με τη χρήση οπτικών ινών είναι εφικτό να δημιουργηθούν αρκετά μακριές ζεύξεις χωρίς την

ανάγκη αναγέννησης, καθώς η απώλεια οπτικής ίνας είναι πολύ χαμηλή (περίπου 0,2 db/km). Επίσης, ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης bit καθιστά την οπτική μεταγωγή σε τεχνολογία αποδοτικής ισχύος. Με άλλα λόγια, ένας οπτικός διακόπτης καταναλώνει ισχύ ανεξάρτητα από το εύρος ζώνης του σήματος που αλλάζει. Ως εκ τούτου, στους οπτικούς διακόπτες, η ισχύς ανά μονάδα εύρους ζώνης θα μπορούσε να είναι εξαιρετικά χαμηλή σε σύγκριση με τους ηλεκτρονικούς διακόπτες.

Μικρό Αποτύπωμα

Η άλλη βασική ιδιότητα των οπτικών συσκευών είναι το μικρό αποτύπωμα, η ιδιότητα του οποίου ευθυγραμμίζεται καλά με τις απαιτήσεις του κέντρου δεδομένων (Yoo et al., 2011). Παρά τη σημαντική χωρητικότητα, η ίνα έχει μέγεθος μόνο 125 μm. Τα στοιχεία μεταγωγής οπτικών πακέτων θα μπορούσαν να είναι συμπαγή μέσω φωτονικής ολοκλήρωσης. Η φωτονική ολοκλήρωση μεγάλης κλίμακας αναμένεται να βελτιώσει την αξιοπιστία, την κατανάλωση ενέργειας, το κόστος κατασκευής και να μειώσει το συνολικό μέγεθος του συστήματος (Nicholes et al., 2010).

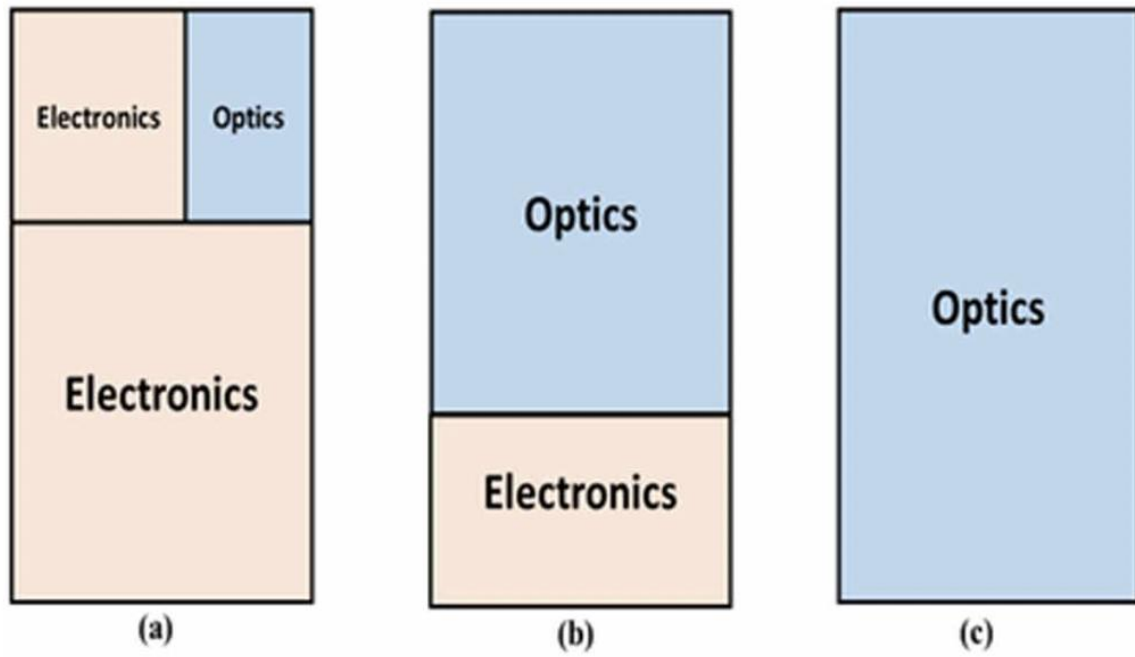
Τα χαρακτηριστικά που συζητήθηκαν παραπάνω καθιστούν την οπτική τεχνολογία την πιο κατάλληλη τεχνολογία σε συστήματα κέντρων δεδομένων επόμενης γενιάς. Παρά αυτές τις ιδιότητες, δεν πρέπει να αγνοούμε τις ελλείψεις του οπτικού τομέα. Οι δυνατότητες επεξεργασίας στον ηλεκτρονικό τομέα είναι καλύτερες από τον οπτικό τομέα. Ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια στον οπτικό τομέα είναι η μη διαθεσιμότητα οπτικών buffer, ενώ οι ηλεκτρονικές RAM μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως buffer στον ηλεκτρονικό τομέα (Yoo et al., 2006; Hunter et al., 1998; Chang et al., 2006). Ως εκ τούτου, στόχος μας είναι να ενοποιήσουμε τα οφέλη του οπτικού και ηλεκτρονικού τομέα για να βελτιώσουμε τη συνολική σχεδίαση ενός διακόπτη.

Η εισαγωγή της οπτικής μεταγωγής στο κέντρο δεδομένων ακολουθεί μια εξελικτική τάση. Στα κέντρα δεδομένων αυτή τη στιγμή, η οπτική μετάδοση χρησιμοποιείται για συνδέσμους από σημείο σε σημείο μέσω πολυτροπικών ινών και η οπτική μεταγωγή απουσιάζει εντελώς. Με τη χρήση της υβριδικής προσέγγισης που χρησιμοποιεί οπτικούς συνδέσμους και ηλεκτρονικούς διακόπτες, το κύριο μειονέκτημα είναι η μετατροπή O/E (οπτική σε ηλεκτρική) και E/O (ηλεκτρική σε οπτική) που απαιτείται

στις θύρες του μεταγωγέα. Αναμένουμε ότι ο πολλαπλασιασμός της οπτικής μεταγωγής στα NGDC θα ακολουθήσει μια τάση όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 11. Όπως στην Εικόνα 11(α), στην αρχιτεκτονική κέντρων δεδομένων πολλαπλών σταδίων, η οπτική μεταγωγή θα αρχίσει να εμφανίζεται στα NGDC στην ανώτερη βαθμίδα. Με άλλα λόγια, μπορούμε να περιμένουμε ότι μέσα στα rack του διακομιστή η κίνηση δεδομένων δεν είναι αρκετά μεγάλη για να μεταδοθεί μέσω οπτικών συνδέσεων. Ωστόσο, καθώς συγκεντρώνουμε περισσότερα στην ιεραρχία, οι ροές μεγάλης διάρκειας γίνονται πιο κοινές και ένα δίκτυο οπτικής μεταγωγής μπορεί να είναι επωφελές. Όπως στην Εικόνα 11(α) στην ανώτερη βαθμίδα, η ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων συνυπάρχει επίσης με την οπτική μεταγωγή, επομένως η ηλεκτρονική μεταγωγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά των βραχύβιων ροών με οικονομικά αποδοτικότερο τρόπο.

Τα όρια του δικτύου οπτικών μεταγωγέων στα NGDC μπορούν ακόμα να εξελίσσονται σε 2 διαστάσεις αναλογικά με την πάροδο του χρόνου. Η οπτική μεταγωγή θα ωριμάσει έως ότου δεν υπάρχει πλέον ανάγκη ηλεκτρονικού δικτύου μεταγωγής στην ανώτερη βαθμίδα όπως φαίνεται στην Εικόνα 11(β). Επιπλέον, καθώς αυξάνεται η κίνηση, τα όρια του οπτικού υφάσματος υποχωρούν στην αρχιτεκτονική του κέντρου δεδομένων πολλαπλών σταδίων. Στο μέλλον, καθώς αναφέρεται η πρόοδος στην τεχνολογία πολυπύρηνων επεξεργαστών, προβλέπουμε ότι η χρήση οπτικών θα είναι πανταχού παρούσα στα κέντρα δεδομένων, διεισδύοντας σε διακομιστές, rack server ακόμη και σε τσιπ πολλαπλών πυρήνων (εικόνα 11(γ)). Σε αυτό το στάδιο τα ηλεκτρονικά θα αντιμετωπίσουν σοβαρό πρόβλημα στην αντιμετώπιση των απαιτήσεων του εύρους ζώνης ακόμη και μέσα στα τσιπ.

Η παραπάνω συζήτηση δείχνει ότι η χρήση της τεχνολογίας οπτικής μεταγωγής πακέτων σε συστήματα κέντρων δεδομένων βελτιώνει τη συνολική απόδοση των κέντρων δεδομένων (DC).



Εικόνα 22: Evolution of Optical Switching in NGDCs (Shukla et al., 2019)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Δικτύωση Καθορισμένη από Λογισμικό (SDN) και Οπτικά Δίκτυα σε Δίκτυα Κέντρων Δεδομένων

5.1. Η 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:

- α) την παρακολούθηση αλλαγών τοπολογίας
- β) την εγκατάσταση κανόνων προώθησης
- γ) τις υπολογιστικές διαδρομές
- δ) 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 (Shalimov et al., 2013).

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:

- α) το φιλτράρισμα
- β) το buffer
- γ) η καταμέτρηση πακέτων κτλ

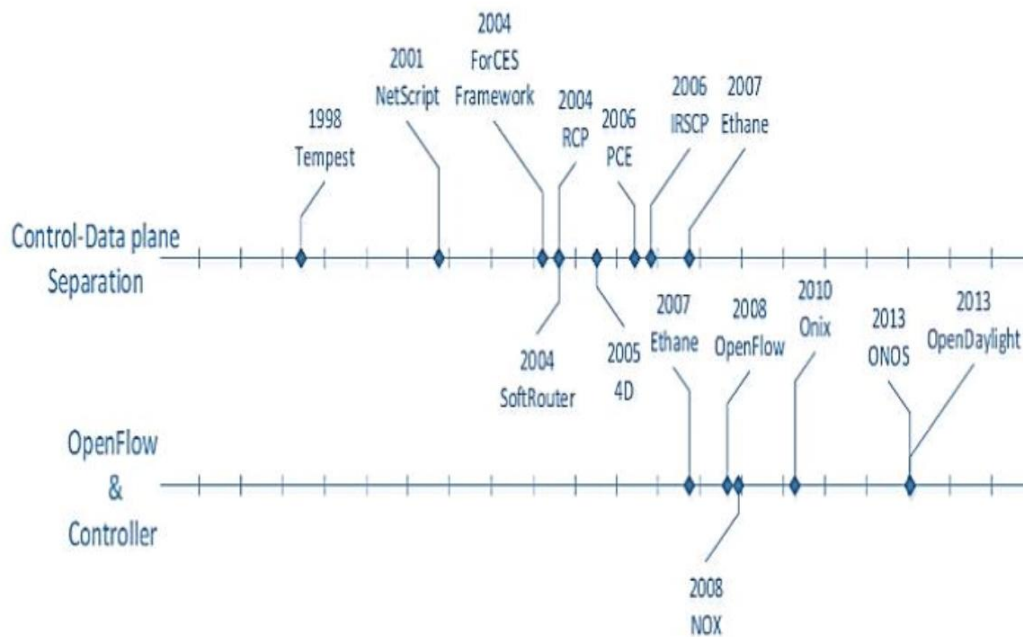
Στην περίπτωση του SDN, το επίπεδο ελέγχου εντοπίζεται συγκεντρωμένο, ελέγχει ένα κατανεμημένο επίπεδο του data plane και μπορεί να εφαρμοστεί πλήρως στο λογισμικό και να εγκατασταθεί στο υλικό. Ως εκ τούτου, ένα SDN μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία δικτύωση ή ένα δίκτυο ορισμένο από λογισμικό όπως

προαναφέραμε. 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 (Tootoonchian et al., 2012). 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:

- α) η δρομολόγηση
- β) η πολυεκπομπή
- γ) η ασφάλεια
- δ) ο έλεγχος πρόσβασης
- ε) η διαχείριση εύρους ζώνης
- στ) η ενεργειακή απόδοση
- ζ) μορφές διαχείρισης πολιτικής

Αυτός ο διαχωρισμός παρέχει μια πιο ευέλικτη, προγραμματιζόμενη, οικονομικά αποδοτική και καινοτόμο δικτυακή αρχιτεκτονική (Azodolmolky et al., 2013). 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 μέσων 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 για το οποίο θα συζητήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 23: Χρονοδιάγραμμα SDN.⁹

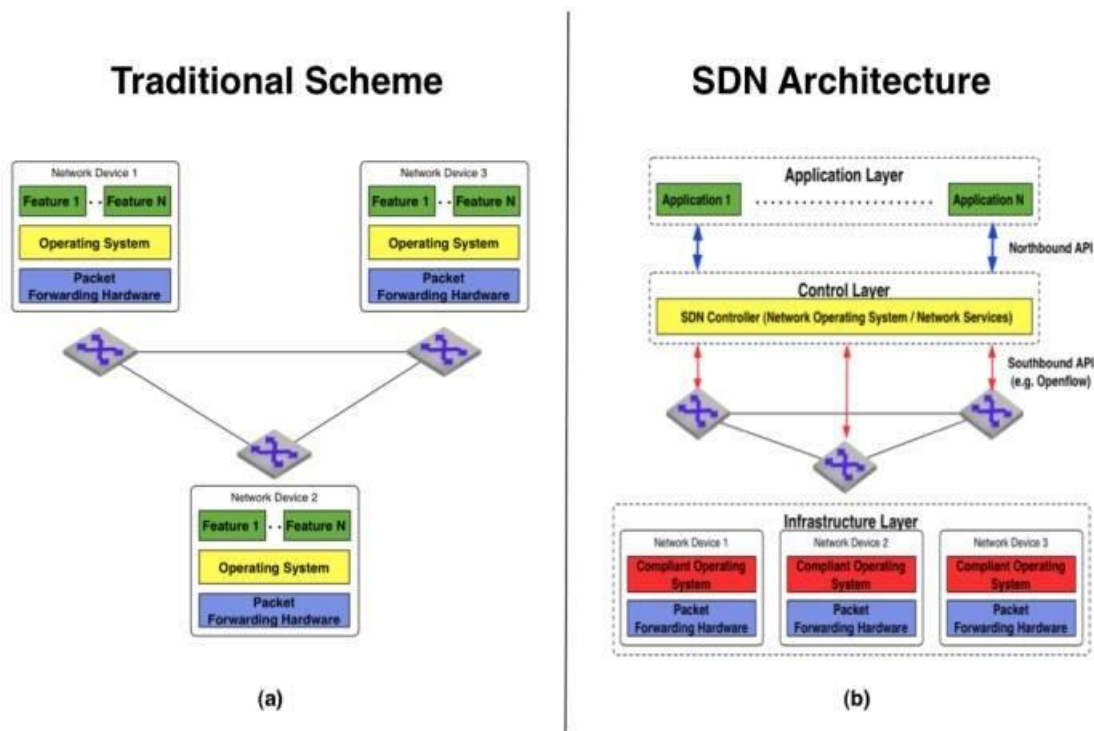
Ο βασικός στόχος της αρχιτεκτονικής SDN είναι να επιτευχθεί ο διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων. Επιπρόσθετα, το SDN υποστηρίζει ανοικτές διεπαφές μεταξύ των συσκευών στο επίπεδο ελέγχου αλλά και στο επίπεδο δεδομένων αντίστοιχα. Επιπλέον δίνει τη προγραμματισμού από εξωτερικές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

5.2. Από τα παραδοσιακά δίκτυα στο SDN

Στα παραδοσιακά δίκτυα συνδυάζονται τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων. Κάθε κόμβος είναι υπεύθυνος για δύο λειτουργίες όπως αναφέραμε και παραπάνω. 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). Ο ρόλος των μεταγωγέων (switches)

⁹ <https://www.dhimanchowdhury.com/2017/11/14/sdn-api-and-protocols-forces-forwarding-and-control-element-separation/>

αναλύεται όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο αλλά θα γίνει μία συνοπτική περιγραφή και στο παρόν κεφάλαιο με βάση το θέμα του SDN που αναλύουμε.



Εικόνα 24: 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 (Diego Kreutz et al., 2014). 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 κατανεμημένη (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 κατανεμημένο μοντέλο σε μια πιο συγκεντρωτική προσέγγιση (Hyojoon Kim et al., 2013). 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 (Shie-Yuan 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 (Shie-Yuan Wang et al., 2015).

5.3. Η Ανάπτυξη των SDN Controllers

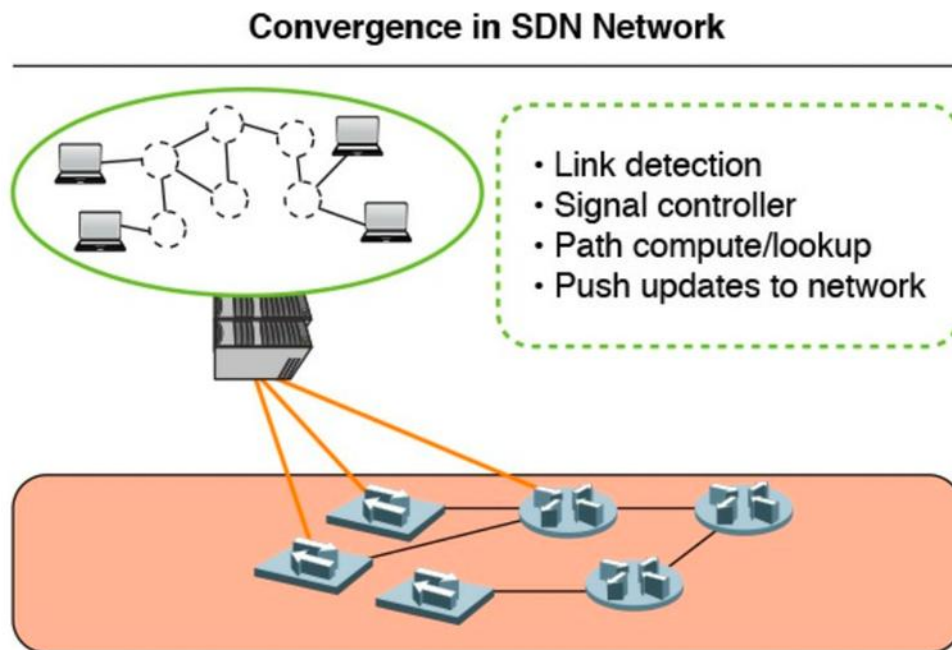
Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για δίκτυα που καθορίζονται από λογισμικό έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών SDN Controllers. Ενώ οι περισσότεροι από αυτούς τους ελεγκτές SDN έχουν αναπτυχθεί σε ακαδημαϊκό περιβάλλον, ορισμένοι από αυτούς έχουν αποκτήσει ένταση στη βιομηχανία, όπως τα NOX, Beacon και Floodlight. Ένας πίνακας κοινών ελεγκτών SDN αποτυπώνεται στην Εικόνα 14. Μελλοντικά, αυτοί οι ελεγκτές πρόκειται να αναπτυχθούν σε μεγάλα και επεκτάσιμα δίκτυα όπως κέντρα δεδομένων. 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 and C	NEC
Node.Flow	JavaScript	DreamersLab
OpenDaylight	Java	Cisco and OpenDaylight

Εικόνα 25: SDN Controllers

Ομοίως, 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. Η εργασία που παρουσιάζεται σε αυτό το άρθρο διαφέρει από όλες τις προηγούμενες μελέτες, καθώς καμία προηγούμενη μελέτη δεν έχει εξετάσει το OpenDaylight SDN Controller.



Εικόνα 26: OpenFlow Network

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

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. Ωστόσο, αυτό που δεν είναι τόσο σαφές είναι πώς λειτουργεί αυτός ο ελεγκτής ή ακόμη και αν ταιριάζει τελικά στην τοπολογία του δικτύου μας.

5.4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 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. Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται σενάρια όπου έχουν προταθεί ή εφαρμοστεί λύσεις SDN.

5.4.1. Data Centers

Τα Data Centers έχουν εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια , προσπαθώντας συνεχώς να αντιμετωπίζουν ολοένα και υψηλότερες και ταχέως μεταβαλλόμενες απαιτήσεις . Τα παραδοσιακά Data Centers 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 Data Centers συχνά προβαίνουν σε ενέργειες (πχ VM's Migration) ώστε να εξισορροπήσουν traffic patterns με τις αντίστοιχες απαιτήσεις . Τα σημερινά Data Centers έχουν πολλές σχεδιαστικές απαιτήσεις , όπως η εύκολη μετάβαση των εικονικών μηχανών , η αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των servers και η ελάχιστη διαμόρφωση των switches και των κεντρικών υπολογιστών (Pritesh Ranjan , 2014). Λόγω των δικτυακών προκλήσεων αναφορικά με τα παραπάνω , συχνά τα Data Centers 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 . Για τους παραπάνω ακριβώς λόγους, η αρχιτεκτονική SDN συνιστάται ιδιαίτερα.

Επιπλέον, σύμφωνα με τους Heller et al . (Brandon Heller), μια ολοένα και πιο σημαντική πτυχή είναι η κατανάλωση ενέργειας στα Data Centers 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 . Παρολαυτά οι συγκεκριμένες υποδομές συνεχίζουν να καταναλώνουν περίπου το 10% - 20% της συνολικής ενέργειας (3 δις kW / h το 2006). 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.

Η συγκεκριμένη λύση παρουσιάζει εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ 25-62% υπό διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας.

5.4.2. Δίκτυα οπτικών δικτύων

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, τα αποτελέσματα αποδίδουν καρπούς πιο συγκεκριμένα η καλύτερη αξιοποίηση του δικτύου λόγω της συνολικής εικόνας, η προγραμματισμένη ντετερμινιστική κατανομή των πόρων με τη μείωση των προβλέψεων και άλλα (Pritesh Ranjan, 2014). Επιπλέον, η προσέγγιση αυτή καθιστά 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.

5.4.3. Σημεία ανταλλαγής διαδικτύου (IXP)

Το σημερινό IXP απασχολεί το BGP ως inter-domain πρωτόκολλο δρομολόγησης, το οποίο έχει μερικούς περιορισμούς, ενώ η κίνηση μπορεί να κατευθυνθεί μόνο με βάση το πρόθεμα IP του προορισμού. Η ανάπτυξη του SDN σε ένα IXP υπόσχεται ευκαιρίες όπως η απελευθέρωσή του από τους περιορισμούς των πρωτοκόλλων Διαδικτύου, την προηγμένη εξισορρόπηση φορτίου και άλλα.

5.4.4. Δίκτυα Επιχειρήσεων

Οι επιχειρήσεις συχνά χρησιμοποιούν μεγάλα δίκτυα, ενώ παράλληλα διαθέτουν αυστηρές απαιτήσεις ασφάλειας και απόδοσης. Επιπλέον, διαφορετικά περιβάλλοντα επιχειρήσεων μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικές απαιτήσεις, χαρακτηριστικά και πληθυσμούς χρηστών. Η επαρκής διαχείριση είναι εξαιρετικά σημαντική σε περιβάλλοντα επιχειρήσεων και το SDN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιβολή και την προσαρμογή μέσω προγραμματισμού των πολιτικών δικτύου, καθώς και για την παρακολούθηση της δραστηριότητας δικτύου και την ρύθμιση της απόδοσης του δικτύου. Επιπλέον, το SDN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απλοποίηση του δικτύου, απομακρύνοντάς το από τα middle-boxes και ενσωματώνοντας τη λειτουργικότητά του μέσα στον network controller (Bing Xiong, 2016).

5.4.5. Ασύρματη πρόσβαση στα Δίκτυα

Πολλές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στη συνδεσιμότητα στο πλαίσιο δικτύων ασύρματης πρόσβασης που βασίζονται σε υποδομές, όπως η κινητή και το Wi-Fi. Η συντριπτική πλειοψηφία ζήτησης υπηρεσιών από τον τελικού χρήστη για υπηρεσίες εφαρμογών προέρχεται από κινητές συσκευές συνδεδεμένες στο δίκτυο μέσω Wi-Fi. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να εξεταστεί ο ρόλος που θα διαδραματίσει το SDN στα ασύρματα LAN σήμερα και να καθορίσει τον τρόπο με τον οποίο ο ρόλος αυτός θα εξελιχθεί τα επόμενα χρόνια. Για παράδειγμα, το έργο Open Roads (Kok-Kiong Yap, 2009) προβλέπει έναν κόσμο όπου οι χρήστες μπορούν να κινούνται σε διαφορετικές ασύρματες υποδομές, τις οποίες μπορεί να διαχειρίζονται οι διάφοροι πάροχοι.

5.4.6. 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 επίσης η δυνατότητα να παρέχεται ενοποιημένος έλεγχος τεχνολογίας για δίκτυα οπτικών μεταφορών διευκολύνοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ δικτύων μεταγωγής πακέτων και κυκλωμάτων. Σύμφωνα με την OTWG που δημιούργησε το ONF το 2013, τα οφέλη από την εφαρμογή του SDN και του προτύπου 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).

5.4.7. Οικιακή Χρήση και Μικρές Επιχειρήσεις

Πολλά έργα έχουν εξετάσει τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το SDN σε μικρότερα δίκτυα, όπως εκείνα που υπάρχουν στο σπίτι ή στις μικρές επιχειρήσεις. Καθώς αυτά τα περιβάλλοντα καθίστανται όλο και πιο πολύπλοκα, η ανάγκη για πιο προσεκτική διαχείριση του δικτύου και αυστηρότερη ασφάλεια έχει αυξηθεί αντίστοιχα. Δυστυχώς, δεν είναι πρακτικό να υπάρχει ειδικός διαχειριστής δικτύου σε κάθε σπίτι και γραφείο (Stephen Mallon, 2016). Η Feamster προτείνει ότι τα δίκτυα αυτά θα πρέπει να λειτουργούν με τρόπο «συνδέστε και ξεχάστε», δηλαδή

με outsourcing της διαχείρισης με τη υποστήριξη ειδικών και ότι αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω του ελέγχου των προγραμματιζόμενων switches και της εφαρμογής κατανεμημένων αλγορίθμων παρακολούθησης δικτύου και συμπερασμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση πιθανών προβλημάτων ασφαλείας (Hyojoon Kim, 2013).

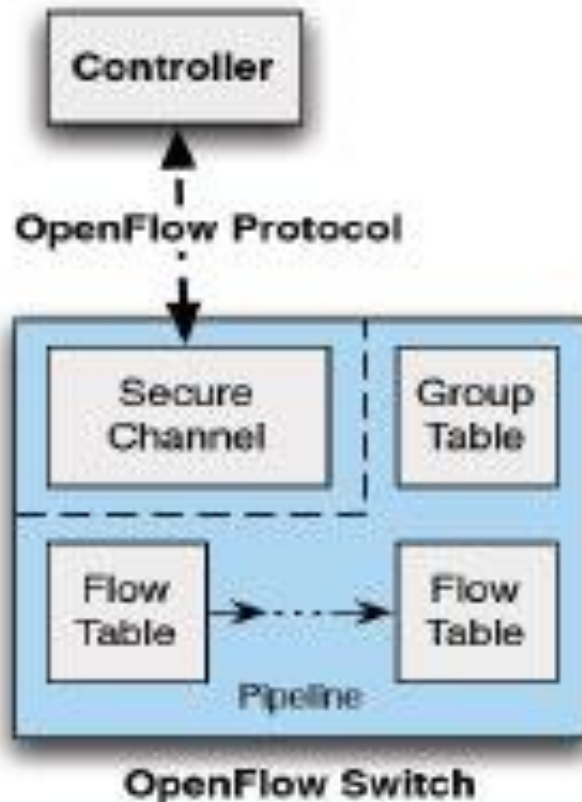
5.5. Το πρωτόκολλο OpenFlow

Το πρωτόκολλο OpenFlow (OF) είναι ένα πρότυπο στην αρχιτεκτονική δικτύωσης που ορίζεται από λογισμικό (SDN). Αυτό το πρωτόκολλο ορίζει την επικοινωνία μεταξύ ενός ελεγκτή SDN και της συσκευής / πράκτορα του δικτύου.

Όπως αναφέρθηκε, το πρωτόκολλο OpenFlow θέτει τα θεμέλια για την επικοινωνία μεταξύ ενός ελεγκτή SDN και μιας συσκευής δικτύου. Αυτό το πρωτόκολλο αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από ερευνητές του Πανεπιστημίου Στάνφορντ το 2008 και υιοθετήθηκε για πρώτη φορά από την Google στο δίκτυο κορμού τους το 2011-2012. Η διαχείριση του γίνεται πλέον από το Open Networking Foundation (ONF).

Το OpenFlow είναι το τυπικό πρωτόκολλο νότιας κατεύθυνσης (Southbound) που χρησιμοποιείται μεταξύ του ελεγκτή SDN (controller) και του μεταγωγέα (switch). Ο ελεγκτής SDN παίρνει τις πληροφορίες από τις εφαρμογές και τις μετατρέπει σε καταχωρήσεις ροής, οι οποίες τροφοδοτούνται στον διακόπτη μέσω του OF. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση στατιστικών μεταγωγών και θυρών στη διαχείριση δικτύου.

Το πρωτόκολλο OpenFlow δημιουργείται μόνο μεταξύ ενός ελεγκτή και του μεταγωγέα. Δεν επηρεάζει το υπόλοιπο δίκτυο. Εάν μια σύλληψη πακέτων επρόκειτο να ληφθεί μεταξύ δύο μεταγωγέων σε ένα δίκτυο, και οι δύο συνδεδεμένοι στον ελεγκτή μέσω άλλης θύρας, η σύλληψη πακέτων δεν θα αποκάλυπτε κανένα μήνυμα OF μεταξύ των μεταγωγέων. Είναι αυστηρά για χρήση μεταξύ ενός μεταγωγέα και του ελεγκτή. Το υπόλοιπο δίκτυο δεν επηρεάζεται.



Εικόνα 27: The OpenFlow Protocol (Mukherjee et al., 2017)

Έναρξη καναλιού OpenFlow

Το πρωτόκολλο OpenFlow λειτουργεί στο πρωτόκολλο TCP. Το τυπικό πρωτόκολλο είναι το TCP 6633 για το OF V1.0 και το 6653 για το OF V1.3+. Πρέπει να υπάρχει σύνδεση IP μεταξύ του ελεγκτή και των διακοπών για να δημιουργηθεί μια σύνδεση OF. Το κανάλι OF σχηματίζεται μόνο μετά από μια επιτυχημένη χρήση του TCP. Πιο συγκεκριμένα:

- Ο διακόπτης-μεταγωγέας στέλνει ένα πακέτο "HELLO" για να το εισαγάγει στον ελεγκτή ώστε να ξεκινήσει η επικοινωνία καναλιού OF. Ο διακόπτης στέλνει επίσης πληροφορίες όπως η υψηλότερη έκδοση του OF που υποστηρίζει. Ο ελεγκτής απαντά στο μήνυμα hello με την υψηλότερη υποστηριζόμενη έκδοση OF. Στη συνέχεια, ο διακόπτης διαπραγματεύεται το υψηλότερο επίπεδο της έκδοσης OpenFlow που υποστηρίζουν και οι δύο.
- Μετά τη διαπραγμάτευση της έκδοσης, ο ελεγκτής στέλνει ένα μήνυμα "FEATURE_REQUEST". Αυτό το μήνυμα ζητά ουσιαστικά από τον διακόπτη τις υποστηριζόμενες δυνατότητες του OF του, όπως τον αριθμό των

υποστηριζόμενων πινάκων ροής, των υποστηριζόμενων ενεργειών κ.λπ. Ο διακόπτης απαντά σε αυτό με ένα μήνυμα "FEATURE_REPLY" που αναφέρει όλες τις δυνατότητές του μαζί με το μοναδικό αναγνωριστικό ή το αναγνωριστικό διαδρομής δεδομένων (DPID) .

- Μετά από αυτό, λέγεται ότι το κανάλι OpenFlow έχει εγκατασταθεί με επιτυχία μεταξύ του διακόπτη και του ελεγκτή. Η σύνδεση μεταξύ του ελεγκτή και του διακόπτη είναι απαραίτητη καθώς είναι ο μόνος τρόπος επικοινωνίας ενός διακόπτη με έναν ελεγκτή. Για να διασφαλιστεί αυτή η σύνδεση, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ένα πρωτόκολλο όπως το TLS αντί για μια σύνδεση TCP. Εδώ, ο ελεγκτής και ο διακόπτης πρέπει να διαθέτουν τα κατάλληλα πιστοποιητικά και κλειδιά για μια επιτυχημένη σύνδεση TLS. Αυτό αποτρέπει την κατασκοπεία στο κανάλι OF.



Εικόνα 28: The OpenFlow Architecture (Egilmez et al., 2012)

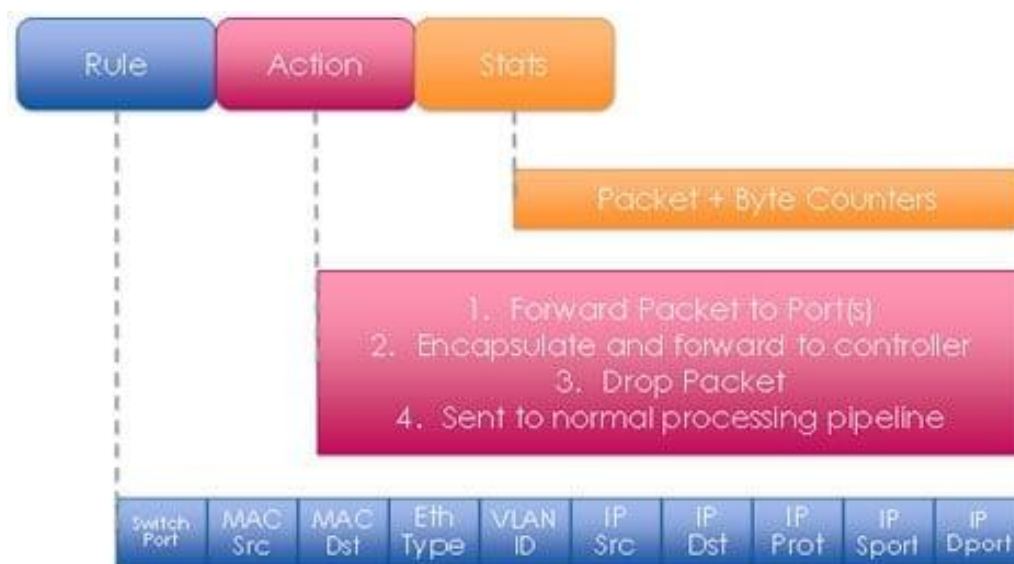
OpenFlow tables and Flow entries

Οι πίνακες ροής είναι σαν τον πίνακα MAC/CAM ενός παραδοσιακού διακόπτη-μεταγωγέα. Οι πίνακες ροής αποθηκεύουν καταχωρήσεις ροής ή ροές που λένε στον μεταγωγέα SDN τι να κάνει με ένα πακέτο όταν πρόκειται για μια εισερχόμενη θύρα. Ο διακόπτης θα αντιστοιχίσει συγκεκριμένες παραμέτρους όπως η διεύθυνση IP, ο αριθμός θύρας, η διεύθυνση MAC, το αναγνωριστικό VLAN κ.λπ. και θα επιλέξει την

καταχώρηση που ταιριάζει καλύτερα από τον πίνακα και θα εκτελέσει στη συνέχεια την ενέργεια που σχετίζεται με αυτήν την καταχώρηση. Οι ενέργειες θα μπορούσαν να είναι η απόρριψη του πακέτου, η προώθηση του σε διαφορετική θύρα, η κατάκλιση του πακέτου ή η αποστολή του στον ελεγκτή για περαιτέρω επιθεώρηση. Εάν ένας μεταγωγέας δεν έχει καταχώρηση για ένα πακέτο, ο μεταγωγέας μπορεί να έχει μια προεπιλεγμένη καταχώρηση ή καταχώρηση "TABLE_MISS". Αυτή η καταχώρηση έχει τη χαμηλότερη προτεραιότητα και οι ενέργειες μπορεί να είναι είτε η απόρριψη του πακέτου είτε η αποστολή του στον ελεγκτή.

Όταν ο ελεγκτής λαμβάνει αυτό το είδος πακέτου από ένα μεταγωγέα, το στέλνει στην εφαρμογή που εκτελείται στο επίπεδο εφαρμογής, η οποία επεξεργάζεται το πακέτο και ενημερώνει τον ελεγκτή εάν χρειάζεται να εισαχθεί μια νέα καταχώρηση ροής στον πίνακα ροής του μεταγωγέα. Εάν συμβαίνει αυτό, ο ελεγκτής θα εισαγάγει μια καταχώρηση ροής στον διακόπτη.

Το επόμενο πακέτο του ίδιου είδους θα αντιμετωπιστεί από τον μεταγωγέα στο επίπεδο δεδομένων καθώς έχει ήδη μια καταχώρηση και θα γίνουν οι κατάλληλες ενέργειες. Αυτό βελτιώνει την αποτελεσματικότητα του δικτύου κατά έναν τεράστιο παράγοντα.



Εικόνα 29: Flow-Table Entries That Can Be Manipulated in an OF Switch (Morad & Emad Ali, 2018)

5.5.1. Πλεονεκτήματα της χρήσης OpenFlow

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα του OpenFlow και του SDN παρά των παραδοσιακών δικτύων:

- Το SDN επιτρέπει τον διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου και των δεδομένων, πράγμα που σημαίνει ότι οι μεταγωγείς μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλους τους πόρους του υλικού τους για την απλή προώθηση δεδομένων αντί για υπολογιστικές διαδρομές.
- Το OpenFlow παρέχει έναν εύκολο τρόπο επικοινωνίας μεταξύ ελεγκτή και μεταγωγέα, που υλοποιείται εύκολα σε ένα υπάρχον δίκτυο.
- Οι περισσότερες τρέχουσες συσκευές υποστηρίζουν το OpenFlow, δεν είναι ενεργοποιημένο από προεπιλογή, αλλά μπορούμε εύκολα να το ενεργοποιήσουμε και να το χρησιμοποιήσουμε για μετάβαση στο SDN.
- Παρέχει ασφάλεια με σύνδεση TLS για την αποφυγή κατασκοπείας και επιθέσεων DoS στον ελεγκτή ή/και στο δίκτυο.
- Το OpenFlow δεν αλλάζει τη διαμόρφωση ενός διακόπτη. Απλώς ενημερώνει τους πίνακες ροής, οι οποίοι ορίζουν τη διαδρομή για ένα πακέτο.

Αν και φαίνεται ότι το OpenFlow είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το SDN, είναι απλώς μια τυπική εφαρμογή του SDN σε έναν οργανισμό. Υπάρχουν πολλά άλλα μέσα για να προγραμματίσουμε τους διακόπτες SDN και να εισαγάγουμε καταχωρήσεις ροής στους πίνακες ροής του.

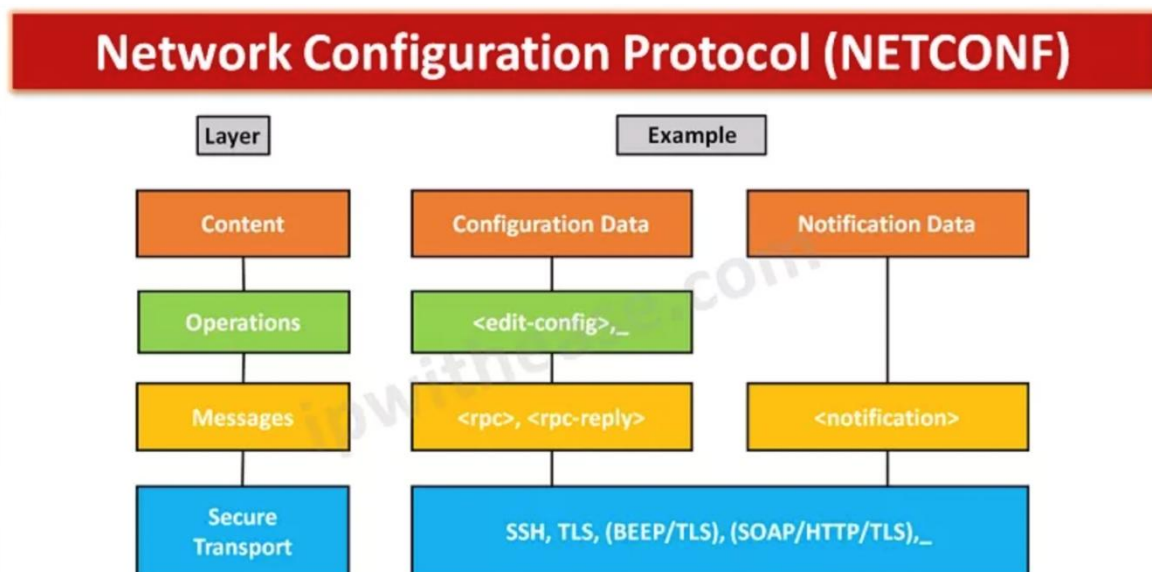
Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά μερικά πρωτόκολλα που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αντί για το OpenFlow. Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται το πρωτόκολλο NETCONF το οποίο θα συγκριθεί σε δεύτερο χρόνο με το OpenFlow.

- REST API: Τα REST API είναι η πιο δημοφιλής επιλογή μετά το OpenFlow για επικοινωνία με τους διακόπτες. Όλες οι εφαρμογές ελεγκτών υποστηρίζουν επίσης μια μονάδα REST.
- Πρωτόκολλα διαχείρισης: Πρωτόκολλα όπως τα SSH, NETCONF και SNMP θα μπορούσαν επίσης να διαχειριστούν έναν διακόπτη με δυνατότητα OF από τον ελεγκτή. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται γενικά για παλιές συσκευές που δεν υποστηρίζουν OpenFlow.

5.6. Το πρωτόκολλο NETCONF

Το NETCONF είναι ένα πρωτόκολλο που μπορεί να διαχειριστεί, να διαμορφώσει και να εγκαταστήσει τη νέα διαμόρφωση συσκευής του εκάστοτε δικτύου. Οι λειτουργίες του πραγματοποιούνται πάνω από ένα επίπεδο απομακρυσμένης διαδικασίας (RPC). Το NETCONF χρησιμοποιεί ως γλώσσα την XML που βασίζεται σε κωδικοποίηση δεδομένων για μηνύματα πρωτοκόλλου. Τα μηνύματα πρωτοκόλλου ανταλλάσσονται στην κορυφή ενός πρωτοκόλλου ασφαλούς μεταφοράς.

Το NETCONF προορίζεται κυρίως να χρησιμοποιηθεί ως μηχανισμός διαμόρφωσης συσκευής, ενώ το SNMP χρησιμοποιείται συνήθως για παρακολούθηση, δημοσκόπηση και ειδοποίηση σφαλμάτων. Και τα δύο πρωτόκολλα αναφέρουν πληροφορίες διαχείρισης που είναι χρήσιμες για το NNMi (Network Node Manager). Το NETCONF είναι ο μόνος υποψήφιος για αντικατάσταση του CLI (command-line interface) για τη διαχείριση διαμόρφωσης προγραμματιζόμενων δικτύων. Όσον αφορά το SDN, το NETCONF αναφέρεται συνήθως ως ένα API με κατεύθυνση προς το νότο (Southbound).



Εικόνα 30: NETCONF Protocol – Network Configuration Protocol¹⁰

Το πρωτόκολλο NETCONF συχνά χωρίζεται εννοιολογικά σε τέσσερα επίπεδα:

¹⁰ <https://networkinterview.com/what-is-netconf-protocol/>

1. Το επίπεδο Content (περιεχομένου) έχει δεδομένα διαμόρφωσης και δεδομένα ειδοποίησης.
2. Το επίπεδο Operations (λειτουργίες) ορίζει ένα σύνολο λειτουργιών βασικού πρωτοκόλλου για ανάκτηση και επεξεργασία των δεδομένων διαμόρφωσης.
3. Το επίπεδο Messages (μηνύματα) είναι υπεύθυνο για την κωδικοποίηση κλήσεων απομακρυσμένης διαδικασίας (RPC) και ειδοποιήσεων.
4. Το επίπεδο Secure Transport (ασφαλούς μεταφοράς) διαθέτει μια ασφαλή και αξιόπιστη μεταφορά μηνυμάτων μεταξύ ενός πελάτη και ενός διακομιστή.

Το NNMi χρησιμοποιεί το NETCONF για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τη συσκευή δηλαδή, πληροφορίες μόνο για ανάγνωση. Το NNMi δεν χρησιμοποιεί το NETCONF για την τροποποίηση των διαμορφώσεων των συσκευών ή για την παρακολούθηση μετρήσεων κατάστασης ή απόδοσης.

Το NETCONF είναι ένα πρωτόκολλο εντολών και απόκρισης με μορφή XML που εκτελείται κυρίως μέσω Secure Shell (SSH). Το πρωτόκολλο NETCONF είναι παρόμοιο κατά κάποιο τρόπο με την παραδοσιακή διεπαφή γραμμής εντολών της κονσόλας συσκευών (CLI), με τη διαφορά ότι οι εντολές και τα αποτελέσματα με μορφή XML έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές διαχείρισης και όχι για ανθρώπινη αλληλεπίδραση με τη συσκευή. Το NETCONF είναι ένα σχετικά νέο πρωτόκολλο διαχείρισης. Επομένως, δεν είναι τόσο ευρέως διαθέσιμο στους προμηθευτές συσκευών σε σύγκριση με το SNMP.

Εάν ένας προμηθευτής εφαρμόζει το NETCONF σε μια συσκευή που διαχειρίζεται το NNMi, αξίζει να υπογραμμιστούν τα εξής:

- Οι εντολές NETCONF είναι γενικά πιο συγκεκριμένες για τον προμηθευτή και δεν δημοσιοποιούνται τόσο καλά όσο τα τυπικά MIB (management information base) και ειδικά για τον προμηθευτή στο SNMP (Simple Network Management Protocol). Κατά συνέπεια, η δυνατότητα του NNMi να κάνει χρήση του NETCONF είναι ακόμα αρκετά περιορισμένη.
- Όταν ένας συγκεκριμένος προμηθευτής εφαρμόζει το NETCONF στις συσκευές του και αναφέρει τις πληροφορίες διαχείρισης που χρειάζεται το NNMi, πρέπει να προσθέσει αυτήν την υποστήριξη NETCONF για μία συγκεκριμένη συσκευή στο NNMi.

5.6.1. Λειτουργίες

Το NETCONF είναι ένα πρωτόκολλο εντολών και απόκρισης με μορφή XML που εκτελείται κυρίως μέσω Secure Shell (SSH). Το πρωτόκολλο NETCONF είναι κατά κάποιο τρόπο ανάλογο με την παραδοσιακή διεπαφή γραμμής εντολών της κονσόλας συσκευών (CLI), εκτός από το γεγονός ότι οι εντολές και τα αποτελέσματα με μορφή XML έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές διαχείρισης. Οι λεπτομέρειες της επικοινωνίας NETCONF μεταξύ του NNMi και επομένως της διαχειριζόμενης συσκευής είναι διαφανείς στον χρήστη NNMi. Ωστόσο, η επόμενη επισκόπηση θα μπορούσε επίσης να είναι χρήσιμη για την αντιμετώπιση προβλημάτων:

- Ένας πελάτης NETCONF δημιουργεί μια σύνδεση SSH με τον διακομιστή NETCONF στη διαχειριζόμενη συσκευή. Τα έγκυρα διαπιστευτήρια ονόματος χρήστη και κωδικού πρόσβασης SSH πρέπει να καθοριστούν από τον πελάτη και να πιστοποιηθούν από τη συσκευή.
- Η εφαρμογή πελάτη και οι δυνατότητες ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ των συσκευών με τη μορφή μηνυμάτων <hello>.
- Ο πελάτης εκκινεί αιτήματα στη συσκευή με τη μορφή μηνυμάτων κλήσης απομακρυσμένης διαδικασίας (RPC), συμπεριλαμβανομένων των τυπικών λειτουργιών <get> ή <get-config>, καθώς και τυχόν λειτουργιών για συγκεκριμένο προμηθευτή που έχουν οριστεί για τη συσκευή.
- Η συσκευή ανταποκρίνεται ανάλογα με τα αποτελέσματα των λειτουργιών εντός του είδους των απαντητικών μηνυμάτων RPC.
- Όταν η εφαρμογή πελάτη ολοκληρώσει την αποστολή αιτημάτων και την επεξεργασία των απαντήσεων, στέλνει ένα μήνυμα RPC <close-session> στη συσκευή.
- Η συσκευή επιβεβαιώνει με ένα μήνυμα απάντησης <ok> RPC.
- Τέλος, και οι δύο πλευρές τερματίζουν τη σύνδεση SSH.

5.6.2. Ενεργοποίηση και διαμόρφωση πρωτοκόλλου ρύθμισης παραμέτρων δικτύου (NETCONF) σε διαχειριζόμενη συσκευή

Ίσως χρειαστεί να ενεργοποιήσουμε και να διαμορφώσουμε ρητά το NETCONF στη διαχειριζόμενη συσκευή προτού το NNMi μπορέσει να επικοινωνήσει με αυτήν τη συσκευή.

Γενικά, στη διαχειριζόμενη συσκευή πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Ενεργοποίηση του NETCONF είτε στην προεπιλεγμένη θύρα NETCONF TCP 830 είτε στην τυπική θύρα SSH TCP 22.
- Διαμόρφωση των διαπιστευτηρίων ονόματος χρήστη και κωδικού πρόσβασης SSH στη συσκευή για πρόσβαση επικοινωνίας NETCONF. Το NNMi απαιτεί πρόσβαση μόνο για ανάγνωση.

5.7. OpenFlow εναντίον Netconf: Η σύγκριση πρωτοκόλλων

Υπάρχουν πολλά πρωτόκολλα προγραμματισμού και διαμόρφωσης δεδομένων που κάνουν τη ροή των πληροφοριών απρόσκοπτη στα δίκτυα. Μεταξύ αυτών των πρωτοκόλλων, το OpenFlow και το Netconf θεωρούνται δημοφιλή και ευρέως χρησιμοποιούμενα όταν πρόκειται για δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (SDN).

Όταν αναζητάτε ένα εξειδικευμένο πρωτόκολλο που μπορεί να προγραμματίσει τους πίνακες προώθησης που βρίσκονται εντός ενός μεταγωγέα, τότε το OpenFlow τίθεται σε χρήση. Από την άλλη πλευρά, το Netconf είναι πιο ευέλικτο στη φύση του και μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε είδους διαμόρφωση. Είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο όταν αναζητάμε ένα πρωτόκολλο που δεν εξαρτάται από τον τύπο δεδομένων, προκειμένου να παραδώσουμε μια επιτυχημένη διαμόρφωση. Παρακάτω αποτυπώνονται αναλυτικά οι διαφορές του OpenFlow και του NETCONF στην Εικόνα 20.

FEATURE	OPENFLOW	NETCONF
Function Type	The basic function of this protocol is forwarding the tables of an openflow switch.	It is a kind of data agnostic type configuration protocol that is flexible to various types of works.
Working for SDN	Effectively conducive to SDN as it can easily implement the separation of the control and the data planes.	Netconf is not conducive with the separation of the control and the data planes.
Specialized Task	Meant for a function that cannot be configured easily to a software over which the networking device is running. With the help of OpenFlow, you would be able to directly modify the forwarding plane.	It is advisable when you wish to reconfigure a device.
The Installation of Entries	It is much more simpler when compared with Netconf, especially due to the fact that it is vendor- and device independent. For example, It enables you to install the identical forwarding entries (along with the DROP action) via OpenFlow onto any of the OpenFlow-enabled switch.	It is not independent and follows the standard vendor and device dependent process while installing route maps based on policy-based routing, static MPLS in/out label mappings, access lists, etc. For example, you can build an ACL over a Junos switch, router, or Cisco NX-OS/XR/IOS, but the actual data of the concerned Netconf message is going to be vendor-specific. In order to support the devices built by different vendors, it is essential to implement the functionality that is vendor-specific to your Netconf controller.
The State of Entries	The entries created in the forwarding table are temporary in nature. They do not appear in the device configuration and are lost on link loss or device reload.	Whatever you configure with Netconf can be seen in the device configuration. It can be saved right from running configuration to a permanent one and the changes can be saved at will.
Mutual Function in SDN Network	In the SDN network, the protocol can add new functionality wherever required.	Netconf while working with OpenFlow on SDN can configure the current software operating in the networking devices.

Εικόνα 31: OPENFLOW VS NETCONF ¹¹

¹¹ <https://networkinterview.com/what-is-netconf-protocol/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα

6.1. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια υλοποίησης της παρούσας εργασίας αναλύσαμε τις τάσεις των σημερινών Data Centers και μελετήσαμε τις ανάγκες τους με σκοπό να προτείνουμε στη συνέχεια λύσεις αναφορικά με τα οπτικά φυσικά στρωματά που να καλύπτουν τόσο τις βραχυπρόθεσμες όσο και τις μακροπρόθεσμες απαιτήσεις. Σήμερα, οι νεοεμφανιζόμενες υπηρεσίες cloud δημιουργούν μια τεράστια ζήτηση εύρους ζώνης στα Data Centers τα οποία αυξάνονται με γρήγορους ρυθμούς, (σχεδόν διπλασιάζονται) κάθε χρόνο στους μεγαλύτερους παρόχους υπηρεσιών. Για να χειριστούν ένα τέτοιο όγκο κίνησης, οι μεγάλες εγκαταστάσεις φιλοξενούν εκατοντάδες χιλιάδες εξυπηρετητές, οι οποίοι συνδέονται συνήθως μέσω ενός σύνθετου δικτύου Closed Clos, το οποίο αποτελείται από πολλά στάδια μεταγωγής που περιλαμβάνουν χιλιάδες switches. Προωθούμενα από τη μεγάλη χωρητικότητα και την εκτεταμένη χρήση τους, τα οπτικά συστήματα έχουν γίνει η κυρίαρχη τεχνολογία που χρησιμοποιείται σήμερα για τη διασύνδεση switch-to-switch και switch-to-server. Για την αντιμετώπιση της συνεχώς αυξανόμενης κίνησης, τα Data Centers συνεχώς αναβαθμίζουν υποδομές τους. Με ταχύτητες 10-Gb/s και 40-Gb/s, οι πομποδέκτες και οι θύρες των switches λειτουργούν σήμερα σε εγκαταστάσεις δεδομένων. Ωστόσο, οι πρόσφατα τυποποιημένες μονάδες 25 και 100-Gb/s αναμένεται να ανέλθουν σύντομα. Επιπλέον, η Ethernet Alliance ήδη εργάζεται για την τυποποίηση 200 και 400Gb/s, όπου επιδιώκεται οι τελικές εφαρμογές να υιοθετήσουν την τάση των τετραπλών λωρίδων (quad-lane trend) και, ως εκ τούτου, απαιτούνται ποσοστά 50 και 100-Gb/s data ανά λωρίδα, αντίστοιχα. Τέτοιες διασυνδέσεις υψηλής ταχύτητας δεδομένων θα αναπτυχθούν πολύ, πιθανώς χρησιμοποιώντας προηγμένες μορφές διαμόρφωσης (δηλ. PAM-4), οι οποίες ελαχιστοποιούν τον ρυθμό δεδομένων των επί του παρόντος χρησιμοποιούμενων σχημάτων PAM -2, ενώ χρησιμοποιούν το ίδιο εύρος ζώνης. Ως εκ τούτου, τα ποσοστά λωρίδων 50-Gb/s μπορούν να επιτευχθούν με το περιορισμένο εύρος ζώνης των σημερινών 25G στοιχείων. Παρόλα αυτά, όταν αυξάνεται σε 100-Gb/s ανά λωρίδα, ενώ χρησιμοποιούνται διαγράμματα διαμόρφωσης PAM-4, τα symbol Rates πρέπει να αυξηθούν στα 50-56 GBd. Η υλοποίηση τέτοιων διασυνδέσεων είναι πολύ δύσκολη επειδή απαιτεί την ανάπτυξη νέων εξαρτημάτων υψηλού εύρους ζώνης, σε

τομείς ηλεκτρονικής και φωτονικής, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις αυστηρές απαιτήσεις των δεδομένων όπως το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας. Αξιοποιώντας το χαμηλό κόστος των συστημάτων IM-DD και την αποτελεσματικότητα των μορφών προηγμένης διαμόρφωσης όπως οι PAM-4 και PAM-8, έχουν συζητηθεί διάφορες προσεγγίσεις για την επίτευξη ικανοτήτων 100-Gb/s και παραπάνω. Τα ηλεκτρικά σήματα υψηλής ταχύτητας δημιουργήθηκαν με ενσωματωμένο SP-DAC, το οποίο επιτρέπει τον διπλασιασμό του ρυθμού συμβόλων εισόδου ενώ παράγει διαμόρφωση πλάτους έως 8 επιπέδων παλμού. Με αυτόν τον τρόπο η σημερινή διαθέσιμη τεχνολογία 25-28 Gelectronics μπορεί να εισαχθεί απευθείας στο SP-DAC, παράγοντας στην περίπτωση αυτή σήματα 56-GBd PAM-8 (σήματα 168 Gb/s). Επιπλέον, αυτό το κύκλωμα εκπέμπει αρκετή τάση για να κατευθύνει άμεσα έναν διαμορφωτή, αποφεύγοντας έτσι τη χρήση των οδηγών ενισχυτών, γεγονός που απλοποιεί τον σχεδιασμό του πομπού. Η τελική χωρητικότητα μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας συνεχείς αναμεταδότες, οι οποίοι αυξάνουν κατά 4 φορές τη φασματική απόδοση των πομποδεκτών IM-DD. Οι ολοκληρωμένοι σύμφωνοι πομποδέκτες με βάση το πυρίτιο που παρουσιάζονται στις μέρες μας, στο μέλλον θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε χαμηλότερο κόστος ανά bit. Αρκεί κάποιος να συνειδητοποιήσει ότι η πιο δαπανηρή δέσμη ενός DSP συνεκμετάλλευσης είναι η χρωματική αντιστάθμιση διασποράς, η οποία δεν απαιτείται από τα Data Centers λόγω της μικρής της εμβέλειας. Ως εκ τούτου, θεωρώντας ότι η εξέλιξη των οπτικών συστημάτων βασίζεται περισσότερο στα Data Centers από ό,τι στα long-haul συστήματα καθώς επίσης και ότι στα μελλοντικά συστήματα IM/DD θα περιλαμβάνεται ένα ASIC για να εκτελεσθεί αποκωδικοποίηση και ενδεχομένως εξισορρόπηση, ένα χαμηλού κόστους συμβατό με ένα πομποδέκτη αλλά και βελτιστοποιημένο για εφαρμογές κέντρου δεδομένων. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα να καθιστούσε δυνατή τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας ανά πομποδέκτη και ανά μήκος κύματος πράγμα που θα οδηγούσε σε δραστική μείωση του αριθμού των στοιχείων δικτύου δηλαδή τους αναμεταδότες, τους αναστολείς θυρίδων και τις ίνες. Παρόλα αυτά, απαιτούνται υψηλές προοπτικές τόσο στην ηλεκτρονική όσο και στην φωτονική ολοκλήρωση για την αποτελεσματική αύξηση της χωρητικότητας των κέντρων δεδομένων μειώνοντας ταυτόχρονα το υπερβολικό κόστος και την κατανάλωση ενέργειας που υπάρχουν σήμερα στα Data Centers.

Επιπρόσθετα στην παρούσα εργασία, παρουσιάστηκε και συζητήθηκε η αρχιτεκτονική της δικτύωσης που ορίζεται από το λογισμικό (SDN). Το SDN επιτρέπει τον άμεσο προγραμματισμό των λειτουργιών προώθησης, διασφαλίζοντας την αποτελεσματική αφαίρεση της υποκείμενης υποδομής. Το SDN έχει πειραματιστεί και εφαρμοστεί με επιτυχία σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων όπως τα Κέντρα Δεδομένων και συνεχίζει στοχεύοντας την επέκταση της αρχιτεκτονικής SDN ώστε να λειτουργεί σε οπτικά δίκτυα. Το SDN βασίζεται σε πρωτόκολλα επικοινωνίας με κατεύθυνση προς το νότο (Southbound) για να παρέχει άμεση δυνατότητα προγραμματισμού του επιπέδου προώθησης των κόμβων δικτύου. Παρουσιάστηκαν τα δύο πιο σχετικά πρωτόκολλα νότιας κατεύθυνσης: OpenFlow και NETCONF. Το πρώτο είναι ευρέως διαδεδομένο και έχει σχεδιαστεί κυρίως για να λειτουργεί σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Το τελευταίο παρουσιάζει ενδιαφέρουσα ευελιξία για εφαρμογή στο συγκεκριμένο πλαίσιο των οπτικών δικτύων.

Στο σημερινό τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον, η χρήση της οπτικής τεχνολογίας δεν περιορίζεται στην τεχνολογία μεταγωγής, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές κέντρων δεδομένων. Οι καλύτερες εφικτές λύσεις όλων των προβλημάτων που αντιμετωπίζει το δίκτυο κέντρων δεδομένων είναι η χρήση τεχνολογιών οπτικής μεταγωγής ταχείας επεξεργασίας στον πυρήνα της δομής τους. Συζητήθηκαν μερικά αξιοσημείωτα σχέδια διακοπών στον τομέα της οπτικής επικοινωνίας και των σχεδίων των κέντρων δεδομένων. Τα ακόλουθα συμπεράσματα προκύπτουν μετά από κριτική αξιολόγηση του σχεδιασμού του διακόπτη βάσει της βιβλιογραφίας που μελετήθηκε:

- Τόσο η οπτική όσο και η ηλεκτρική τεχνολογία συνυπάρχουν για τα επόμενα χρόνια.
- Η χρήση ενός οπτικού συστήματος μεταγωγής πακέτων παρέχει μια εφικτή λύση για τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το τρέχον σύστημα κέντρων δεδομένων.
- Για δίκτυα υψηλής ταχύτητας, η εναλλαγή οπτικών πακέτων θα παραμείνει ως τεχνολογία επόμενης γενιάς.
- Η εμπορευματοποίηση συντονισιμων μετατροπέων μήκους κύματος θα είναι πρωτοποριακή στο σχεδιασμό του συστήματος οπτικών κέντρων δεδομένων.

6.2. Μελλοντική Έρευνα Και Προοπτικές Εξέλιξης

Η άνοδος του cloud computing και άλλων αναδυόμενων διαδικτυακών εφαρμογών έχουν δημιουργήσει την ανάγκη για πιο ισχυρά κέντρα δεδομένων σε κλίμακα αποθήκης δηλαδή data warehouse. Αυτά τα κέντρα δεδομένων περιλαμβάνουν εκατοντάδες χιλιάδες διακομιστές που πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω δικτύων διασύνδεσης υψηλής απόδοσης και χαμηλής καθυστέρησης (Kachris et al, 2013). Με την ταχεία ανάπτυξη των εφαρμογών Διαδικτύου, τα κέντρα δεδομένων έχουν γίνει μάρτυρες των απαιτήσεων για όλο και περισσότερο χώρο αποθήκευσης, υπολογιστική ισχύ και εύρος ζώνης επικοινωνίας. Στο σημερινό τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον, χιλιάδες διακομιστές, έχουν συνηθίσει να ανταποκρίνονται σε βαριά συστήματα κέντρων δεδομένων. Σε μία έκθεση έρευνας που δόθηκε από τη Cisco («Cisco Global index», 2011), η ετήσια παγκόσμια κυκλοφορία των κέντρων δεδομένων αναμενόταν να φτάσει αρκετά zetta-byte μέχρι το τέλος του 2017 γεγονός που συνέβη. Στο εγγύς μέλλον, η κίνηση δεδομένων που δημιουργείται μεταξύ τους στα κέντρα δεδομένων και εντός του κέντρου δεδομένων αναμένεται να αναπτυχθεί εκτενώς. Αυτή η αύξηση της κίνησης, δημιουργεί την ανάγκη τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών δικτύων υψηλής απόδοσης για δίκτυα κέντρων δεδομένων εντός και εκτός. Στο σημερινό δίκτυο ηλεκτρικών κέντρων δεδομένων, η κύρια πρόκληση στο σχεδιασμό του κέντρου δεδομένων είναι η κατανάλωση ενέργειας της υποδομής, κυρίως λόγω των συναφών λειτουργικών δαπανών (OPEX). Σύμφωνα με σχετικές μελέτες, τα δίκτυα κέντρων δεδομένων καταναλώνουν περίπου το 10-20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας IT των τοποθεσιών των κέντρων δεδομένων, και αυτό αναμένεται να αυξηθεί σύντομα στο εγγύς μέλλον.

Αναδυόμενες εφαρμογές όπως η Μηχανική Μάθηση θέτουν υψηλότερες απαιτήσεις όσον αφορά την ευελιξία και την επεκτασιμότητα των δικτύων κέντρων δεδομένων. Από τη μία πλευρά, είναι δύσκολο για την τοπολογία σταθερού δικτύου να ταιριάζει με τα πρότυπα κυκλοφορίας διαφορετικών νευρωνικών δικτύων. Από την άλλη πλευρά, η ταχεία ανάπτυξη των δεδομένων εκπαίδευσης, του μεγέθους του μοντέλου και των απαιτήσεων των υπολογιστών έχει οδηγήσει σε μια διαρκώς αυξανόμενη κλίμακα δικτύων κέντρων δεδομένων. Οι παραδοσιακές ηλεκτρικές διασυνδέσεις δεν έχουν τη δυνατότητα προσαρμογής της τοπολογίας του δικτύου και του εύρους ζώνης επικοινωνίας, με αποτέλεσμα σημαντική σπατάλη πόρων και

υψηλό κόστος επέκτασης. Στις μέρες μας, εισάγονται οπτικές διασυνδέσεις για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων λόγω του υψηλού εύρους ζώνης, της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και της δυνατότητας επαναδιαμόρφωσής τους. Οι μελλοντικές τάσεις και προκλήσεις των οπτικών διασυνδέσεων στα κέντρα δεδομένων συζητούνται από τις πτυχές της τεχνολογίας οπτικής μετάδοσης, της τεχνολογίας οπτικής μεταγωγής και του ελέγχου και διαχείρισης οπτικού δικτύου.

Η ταχεία ανάπτυξη της μηχανικής μάθησης και του υπολογιστικού νέφους έχει φέρει άνευ προηγουμένου ευκαιρίες και προκλήσεις στα δίκτυα κέντρων δεδομένων. Με την ευρεία εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης και των μεγάλων δεδομένων, τα χαρακτηριστικά επικοινωνίας και οι απαιτήσεις κίνησης των κέντρων δεδομένων έχουν αλλάξει δραματικά. Τα παραδοσιακά δίκτυα κέντρων δεδομένων αποτελούν τοπολογίες πλέγματος και δακτυλίου που βασίζονται σε ηλεκτρικούς διακόπτες. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα σημαντικά ζητήματα σε αυτά τα δίκτυα κέντρων δεδομένων:

1. Οι τοπολογίες σταθερών δικτύων δύσκολα μπορούν να προσαρμοστούν στα μοτίβα κυκλοφορίας διαφορετικών νευρωνικών δικτύων.
2. Η επεκτασιμότητα των δικτύων διασύνδεσης δεν ικανοποιεί τα ταχέως αυξανόμενα δεδομένα εκπαίδευσης, το μέγεθος του μοντέλου και τις απαιτήσεις υπολογιστών.

Αυτά τα ζητήματα θέτουν υψηλότερες απαιτήσεις στα δίκτυα επικοινωνίας για καλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα όσον αφορά τη βέλτιστη υποστήριξη μιας ποικιλίας εφαρμογών και υπηρεσιών. Οι οπτικές διασυνδέσεις έχουν λάβει μεγάλη προσοχή από τους ερευνητές ως μια πολλά υποσχόμενη λύση. Σε σύγκριση με τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις, οι οπτικές διασυνδέσεις με μεγάλο εύρος ζώνης και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι πιο πιθανό να πληρούν τις παραπάνω απαιτήσεις. Τα τελευταία χρόνια, σε συνδυασμό με διάφορα μοτίβα κίνησης κέντρων δεδομένων και νέες συσκευές οπτικής μεταγωγής, οι ερευνητές έχουν προτείνει πολλές οπτικές διασυνδέσεις.

Οι οπτικές διασυνδέσεις έχουν μεγάλες δυνατότητες αντιμετώπισης ζητημάτων όπως το εύρος ζώνης, η καθυστέρηση και η κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, η ανάπτυξη οπτικής μετάδοσης, μεταγωγής, ελέγχου και διαχείρισης έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ευελιξία και την επεκτασιμότητα των κέντρων δεδομένων.

Οι αναδυόμενες εφαρμογές οδηγούν τα δίκτυα κέντρων δεδομένων προς μεγαλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα. Η σύγκλιση διαφόρων τεχνολογιών θα φέρει περισσότερες ευκαιρίες στις μελλοντικές οπτικές διασυνδέσεις για κέντρα δεδομένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Gahsinsky I. Warehouse-scale datacenters: the case for a new approach to networking, Open Networking Summit. Palo Alto, CA, USA: Stanford University; October 2011.
- [2] Guis I. Enterprise data center networks, Open Networking Summit, Santa Clara, CA, USA; April 2012.
- [3] Ι. Μελετόπουλου, “Τεχνικές σύνταξης διπλωματικής εργασίας”, *Διπλωματική εργασία*, Τμήμα Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Συστημάτων, ΠΑΔΑ, 2004.
- [4] Singh, A., Ong, J., Agarwal, A., Anderson, G., Armistead, A., Bannon, R., ... & Vahdat, A. (2016). Jupiter rising: A decade of clos topologies and centralized control in Google's datacenter network. *Communications of the ACM*, 59(9), 88-97.
- [5] P. E. Ceruzzi, A History of Modern Computing. MIT press, 2015. [Online]. Available: <http://english.360elib.com/datu/T/EM290636.pdf>
- [6] G. Lee, Cloud Networking: Understanding Cloud-Based Data Center Networks. Morgan Kaufmann, 2014.
- [7] M. K. Weldon, The Future X Network: A Bell Labs Perspective. CRC Press, 2016.
- The encyclopedia of information technology. Atlantic, 2007.
- [8] Netcraft, “Netcraft web server survey,” 2009. [Online]. Available: <http://news.netcraft.com/archives/2016/07/19/july-2016-web-server-survey.html>
- [9] A. Singh, P. Germano, A. Kanagala, J. Provost, J. Simmons, E. Tanda, J. Wanderer, U. Hölzle, S. Stuart, A. Vahdat, J. Ong, A. Agarwal, G. Anderson, A. Armistead, R. Bannon, S. Boving, G. Desai, and B. Felderman, “Jupiter rising: a decade of clos topologies and centralized control in Google's datacenter network,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 45, no. 4, pp. 183–197, 2015. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2785956.2787508>
- [10] A. Hammadi and L. Mhamdi, “A survey on architectures and energy efficiency in Data Center Networks,” *Computer Communications*, vol. 40, pp. 1–21, 2014.
- [11] A. Greenberg, J. R. Hamilton, N. Jain, S. Kandula, C. Kim, P. Lahiri, D. A. Maltz, P. Patel, and S. Sengupta, “VL2: a scalable and flexible data center network,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 39, no. 4, pp. 51–62, 2009. [Online]. Available: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1594977.1592576>

- [12] N. Farrington and A. Andreyev, "Facebook's data center network architecture," in Optical Interconnects Conference, 2013, pp. 49–50. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6552917>
- [13] C. Decusatis, "Optical interconnect networks for data communications," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 32, no. 4, pp. 544–552, 2014. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6584001>
- [14] Broadcom, "High-Density 25/100 Gigabit Ethernet StrataXGS® Tomahawk Ethernet Switch Series." [Online]. Available: <https://www.broadcom.com/products/Switching/Data-Center/BCM56960-Series>
- [15] Mellanox, "SN2700: Spectrum-based 32-port 100GbE Open Ethernet Platform," 2016. [Online]. Available: http://www.mellanox.com/related-docs/prod_eth_switches/PB_SN2700.pdf
- [16] Y. Sverdlik, "Here's How Much Energy All US Data Centers Consume," 2016. [Online]. Available: <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2016/06/27/heres-how-much-energy-all-us-data-centers-consume/>
- [17] A. Greenberg, P. Lahiri, D. A. Maltz, P. Patel, and S. Sengupta, "Towards a next generation data center architecture: scalability and commoditization," in Proc. ACM workshop on Programmable routers for extensible services of tomorrow, 2008, pp. 57–62.
- [18] Rich Miller, "Google Data Center FAQ," 2012. [Online]. Available: <http://www.datacenterknowledge.com/google-data-center-faq-part-2/>
- [19] J. Clark, "The rise of mega data centers," The Data Center Journal, May. 2012.
- [20] <https://www.datacenterknowledge.com/>
- [21] Cisco global cloud index: forecast and methodology, 2016–2021. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.html>
- [22] Cisco visual networking index: forecast and trends, 2017–2022. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>
- [23] A. S. G. Andrae, and T. Edler, "On global electricity usage of communication technology: trends to 2030," Challenges, vol. 6, no. 1, pp. 117-157, Apr. 2015.
- [24] NGMN 5G white paper. <https://www.ngmn.org/5g-white-paper/5g-white-paper.html>

- [25] Coriant Blog, "Evolution of the data center interconnect ecosystem," 2016. <http://www.coriant.com/blog/2016/05/12/evolution-of-the-data-center-interconnect-dci-ecosystem/>
- [26] Zhang, L., Chen, J., Agrell, E., Lin, R., & Wosinska, L. (2019). Enabling technologies for optical data center networks: Spatial division multiplexing. *Journal of Lightwave Technology*, 38(1), 18-30.
- [27] Yoo, S. J. B. (2006, December). Optical packet and burst switching technologies for the future photonic Internet. *Journal of Lightwave Technology*, 24(12), 4468–4492. doi:10.1109/JLT.2006.886060
- [28] Yoo, S. J. B. (2011, March/April). Energy efficiency in the future Internet: The role of optical packet switching and optical-label switching. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 17(2), 406–418. doi:10.1109/JSTQE.2010.2076793
- [29] Shacham, A., & Bergman, K. (2007, July/August). Building ultralow-latency interconnection networks using photonic integration. *IEEE Micro*, 27(4), 6–20. doi:10.1109/MM.2007.64
- [30] Nicholes, S. C. (2010, February). An 8×8 InP monolithic tunable optical router (MOTOR) packet forwarding chip. *Journal of Lightwave Technology*, 28(4), 641–650. doi:10.1109/JLT.2009.2030145
- [31] Hunter, D. K., Chia, M. C., & Andonovic, I. (1998, December). Buffering in optical packet switches. *Journal of Lightwave Technology*, 16(12), 2081–2094. doi:10.1109/50.736577
- [32] Chang, G.-K., Yu, J., Yeo, Y.-K., Chowdhury, A., & Jia, Z. (2006, May). Enabling technologies for next generation optical packet-switching networks. *Proceedings of the IEEE*, 94(5), 892–910. doi:10.1109/JPROC.2006.873433
- [33] Lam. (2010). Optical network technologies for data centre networks. OFC/NFOEC 2010, NWA3.
- [34] Lam, C. F., Liu, H., Koley, B., Zhao, X., Kamalov, V., & Gill, V. (2010, July). Fiber optic communication technologies: What's needed for datacentre network operations? *IEEE Communications Magazine*, 48(7), 32–39. doi:10.1109/MCOM.2010.5496876
- [35] 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
- [36] Ola Salman, Imad Elhajj, Ayman Kayssi, Ali Chehab, "SDN Controllers: A Comparative Study", 2016

- [37] SDX Central, “The Future of Network Virtualization and SDN Controllers”, <https://www.sdxcentral.com>, 2016
- [38] 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
- [39] Ian F. Akyildiz, Ahyoung Lee, Pu Wang, Min Luo, Wu Chou, “A roadmap for traffic engineering in SDN-OpenFlow networks”, Elsevier Computer Networks 71 (2014) 1– 30
- [40] Brandon Heller, Rob Sherwood, Nick McKeown, “The Controller Placement Problem”, HotSDN’12, 2012
- [41] Hyojoon Kim, Nick Feamster, “Improving Network Management with Software Defined Networking”, IEEE Communications Magazine, 2013
- [42] Bruno Astuto A. Nunes, Marc Mendonca, Xuan-Nam Nguyen, Katia Obraczka, and Thierry Turletti, “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, 16 (3), pp.1617 - 1634
- [43] Diego Kreutz, Fernando M. V. Ramos, Paulo Verissimo, Christian Esteve Rothenberg, Siamak Azodolmolky and Steve Uhlig, Member, “Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey”, <https://arxiv.org/abs/1406.0440>, 2014
- [44] 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
- [45] Sangjin Han, Norbert Egiy, Aurojit Panda, Sylvia Ratnasamy, Guangyu Shiy, and ScottShenker. “Network Support for Resource Disaggregation in Next-Generation Datacenters.” October 2013.
- [46] Pedro Bispo, Daniel Corujo, Rui L. Aguiar “A Qualitative and Quantitative assessment of SDN controllers”, 20171nlemational Young Engineers Forum (YEF~ECE), 2017
- [47] Sandra Scott-Hayward, “Design and deployment of secure, robust and resilient SDN controllers”, Network Softwarization, 2015 1st IEEE Conference
- [48] K. I. Kitayama, Y. C. Huang, Y. Yoshida, R. Takahashi, T. Segawa, S. Ibrahim, T. Nakahara, Y. Suzaki, M. Hayashitani, Y. Hasegawa, Y. Mizukoshi, and A. Hiramatsu, “Torus-topology data center network based on optical packet/agile circuit switching with

intelligent flow management,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 1063–1071, 2015.

- [49] W. Miao, J. Luo, S. Di Lucente, H. Dorren, and N. Calabretta, “Novel flat datacenter network architecture based on scalable and flow-controlled optical switch system,” *Optics Express*, vol. 22, no. 3, p. 2465, 2014. [Online]. Available: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-22-3-2465>
- [50] A. Gnauck, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, and T. Li, “HighCapacity Optical Transmission Systems,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 9, pp. 1032–1045, 2008. [Online]. Available: <http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=jlt-26-9-1032>
- [51] G. P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems,” 2002.
- [52] Nokia, “PSE-2 super coherent technology,” 2016. [Online]. Available: <https://networks.nokia.com/products/pse-2-super-coherent-technology>
- [53] Minkenberg, C., Krishnaswamy, R., Zilkie, A., & Nelson, D. (2021). Co-packaged datacenter optics: Opportunities and challenges. *IET Optoelectronics*, 15(2), 77-91.
- [54] Nagarajan, R., Lyubomirsky, I., & Agazzi, O. (2021). Low Power DSP-Based Transceivers for Data Center Optical Fiber Communications (Invited Tutorial). *Journal of Lightwave Technology*, 39(16), 5221-5231.
- [55] 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, pp. 233–242, 2016. [Online]. Available: <http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=jlt-34-2-233>
- [56] 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, pp. 1096–1098, 2015
- [57] 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, p. AM1B.3. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ACPC-2015-AM1B.3>
- [58] 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,

p. Th3C.2. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2014-Th3C.2>

- [59] 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_π,” in Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2015, p. Th4E.3. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2015-Th4E.3>
- [60] M. Y. S. Sowailam, T. M. Hoang, M. Morsy-Osman, M. Chagnon, D. Patel, S. Paquet, C. Paquet, I. Woods, O. Liboiron-Ladouceur, and D. V. Plant, “400-G Single Carrier 500-km Transmission With an InP Dual Polarization IQ Modulator,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 11, pp. 1213–1216, 2016.
- [61] A. Samani, M. Chagnon, D. Patel, V. Veerasubramanian, S. Ghosh, M. Osman, Q. Zhong, and D. V. Plant, “A Low-Voltage 35-GHz Silicon Photonic Modulator-Enabled 112-Gb/s Transmission System,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 1–13, 2015.
- [62] C. Doerr, L. Chen, D. Vermeulen, T. Nielsen, S. Azemati, S. Stulz, G. McBrien, X. M. Xu, B. Mikkelsen, M. Givehchi, C. Rasmussen, and S. Y. Park, “Single-chip silicon photonics 100-Gb/s coherent transceiver,” in Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2014, p. TH5C.1.
- [63] 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, pp. 14 263–14 287, 2015. [Online]. Available: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-23-11-14263>
- [64] H. Huang, S. R. Nuccio, Y. Yue, J. Y. Yang, Y. Ren, C. Wei, G. Yu, R. Dinu, D. Parekh, C. J. Chang-Hasnain, and A. E. Willner, “Broadband Modulation Performance of 100-GHz EO Polymer MZMs,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 23, pp. 3647–3652, 2012.
- [65] P. Groumas, Z. Zhang, V. Katopodis, A. Konczykowska, J. Y. Dupuy, A. Beretta, A. Dede, J. H. Choi, P. Harati, F. Jorge, V. Nodjadjim, 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, pp. 407–418, 2016.

- [66] 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, pp. 1–4.
- [67] Neophotonics, “56G EML,” 2016. [Online]. Available: <https://www.neophotonics.com/product/56g-eml/>
- [68] S. Kanazawa, H. Yamazaki, Y. Nakanishi, T. Fujisawa, and K. Takahata, “Transmission of 214-Gbit/s 4-PAM signal using an ultra-broadband lumped-electrode EADFB laser module,” in Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC). Anaheim, C.A.: OSA, 2016, p. Th5B.3. [Online]. Available: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2016-Th5B.3>
- [69] Fujitsu, “40 Gb/s NRZ LiNbO external modulator,” 2005. [Online]. Available: <http://www.fujitsu.com/downloads/OPTCMP/lineup/40gln/40Glnnrz-catalog.pdf>
- [70] O. Kharraz and D. Forsyth, “Performance comparisons between PIN and APD photodetectors for use in optical communication systems,” *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 124, no. 13, pp. 1493–1498, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402612002859>
- [71] Finisar, “40 GHz Single High-speed photoreceiver,” 2016. [Online]. Available: <https://www.finisar.com/optical-components/xprv2021a>
- [72] J. D. H. Alexander, “Clock recovery from random binary signals,” *IEEE Electronics Letters*, vol. 11, no. 22, pp. 541–542, 1975.
- [73] K. Mueller and M. Muller, “Timing Recovery in Digital Synchronous Data Receivers,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 24, no. 5, pp. 516–531, 1976.
- [74] C. Hogge, “A self correcting clock recovery circuit,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 3, no. 6, pp. 1312–1314, 1985.
- [75] 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, pp. 378–379.
- [76] 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), 387–399 (2003)

- [77] Krishnamoorthy, A.V., et al.: Progress in low-power switched optical interconnects. IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 17(2), 357–376 (2011) 48. Doany, F.E., et al.: Terabit/sec VCSEL-based 48-channel optical module based on Holey CMOS transceiver IC. J. Lightwave Technol. 31(4), 672–680 (2013)
- [78] 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. OSA (2013). p. OTu3H.2. <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2013-OTu3H.2>
- [79] Kuchta, D: High speed VCSELs and Co-packaging for short reach communication within Cloud and high performance computing. In: 24th Microoptics Conference (MOC), OSA (2019), pp. 298–299
- [80] Knebel, P. et al.: Gen-Z Chipset for Exascale fabrics. In: 2019 IEEE Hot Chips Symposium, IEEE (2019), pp. 1–22
- [81] Sun, C., et al.: Single-chip microprocessor that communicates directly using light. Nature. 528, 534–538 (2015)
- [82] Minkenberg, C., et al.: Reimagining datacenter Topologies with integrated silicon photonics. J. Opt. Commun. Netw. 10(7), B126–B139 (2018). <http://jocn.osa.org/abstract.cfm?URI=jocn-10-7-B126>
- [83] 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). OSA (2019), p. M4D.7
- [84] Intel demonstrates industry-first co-packaged optics ethernet switch. Intel (2020). <https://tinyurl.com/qs7m9dl>
- [85] Co-packaged optics external laser source guidance document v1.0. CPO Collaboration (2020)
- [86] Co-packaged optical module discussion document v1.0. CPO Collaboration (2019)
- [87] LightCounting, Lightcounting ethernet optics report. (2020)
- [88] Kachris, C., Kanonakis, K., & Tomkos, I. (2013). Optical interconnection networks in data centers: recent trends and future challenges. IEEE Communications Magazine, 51(9), 39-45.

