



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Πολυμερική Τεχνολογία Διαμορφωτών και Σχεδίαση
Οπτικών Κόμβων για Υψίρρυθμες και Ευέλικτες Οπτικές
Διασυνδέσεις Εντός και Μεταξύ Υπολογιστικών Κέντρων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειος Κατωπόδης

Αθήνα, Δεκέμβριος 2018



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

**Πολυμερική Τεχνολογία Διαμορφωτών και Σχεδίαση
Οπτικών Κόμβων για Υψίρρυθμες και Ευέλικτες Οπτικές
Διασυνδέσεις Εντός και Μεταξύ Υπολογιστικών Κέντρων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειος Κατωπόδης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ηρακλής Αβραμόπουλος
Νικόλαος Ουζούνογλου
Νικόλαος Πλέρος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την Δεκεμβρίου 2018.

.....
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Κωνσταντίνος Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Αθανάσιος Γιαννακόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Γεώργιος Κανελλος
Λέκτορας Παν/μιου Μπρίστολ
Ηνωμένου Βασιλείου

Nikos
Pleros

.....
Νικόλαος Πλέρος
Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ

.....
Νεκτάριος Κοζύρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Digitally signed by Nikos Pleros
DN: cn=Nikos Pleros, ou=Attitude
University of Thessaloniki,
c=Greece, email=pleros@cc.uoi.gr, c=GR
Date: 2018.12.21 09:55:01 +0200

Αθήνα, Δεκέμβριος 2018

.....
Βασίλειος Κατωπόδης

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Βασίλειος Κατωπόδης, 2018.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στον σημερινό κόσμο η χρήση καθώς και ο ίδιος ο τηλεπικοινωνιακός τομέας είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την καθημερινή ζωή του ανθρώπου, αποσκοπώντας στην βελτίωση της ίδιας της ζωής. Προς αυτό τον σκοπό, έχουν συμβάλει η πρόσφατη πρόοδος σε έξυπνες συσκευές, οι κινητές υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, το cloud – computing, ο μεγάλος όγκος μεταφοράς αρχείων και η εμφάνιση του διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things) οδηγώντας κατ' επέκταση σε εκθετική αύξηση των απαιτήσεων κίνησης δεδομένων σε παγκόσμιο επίπεδο, με αποτέλεσμα τον τριπλασιασμό της παγκόσμιας κυκλοφορίας IP στο διάστημα από 2015 έως 2021. Συνεπώς, οι απαιτήσεις αυτές οδηγούν σε ολοένα και περισσότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των δικτύων με αποτέλεσμα να μην μπορούν να ικανοποιηθούν πλήρως οι αυξανόμενες ανάγκες παρά μόνο με τη χρήση των οπτικών δικτύων μετάδοσης δεδομένων, τα οποία αποτελούν την μοναδική λύση προς την εξυπηρέτηση τέτοιων απαιτήσεων. Και αυτό συμβαίνει διότι η ικανοποίηση των απαιτήσεων της χωρητικότητας εξαρτάται από δύο παράγοντες. Κατά πρώτον, εντοπίζεται εξάρτηση από την χωρητικότητα των διασυνδέσεων για την επικοινωνία και την μεταφορά των δεδομένων εντός των υπολογιστικών κέντρων και κατά δεύτερον στη μεταφορά αυτών μεταξύ απομακρυσμένων υπολογιστικών κέντρων, λαμβάνοντας υπόψη την αποτελεσματικότητα και το χαμηλό κόστος.

Με βάση τα τωρινά δεδομένα, οι διασυνδέσεις εντός των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων χρησιμοποιούν διεπαφές 10 και 40 Gb/s με σχήμα διαμόρφωσης πλάτους δύο επιπέδων (on-off keying, OOK) και χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (wavelength division multiplexing, WDM), ενώ οι μεταγωγείς Ethernet θα υιοθετήσουν συνδέσεις 100 Gb/s καθιστώντας αναγκαία τη χρήση οπτικών τεχνολογιών υψηλής ταχύτητας. Σε αυτό το πλαίσιο, ο στόχος θα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων οπτικών λύσεων που θα επιτρέψουν την απλή, άμεση μετάβαση από ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 10 Gb/s σε 40 Gb/s και τελικά σε 100 Gb/s ή ακόμα σε μεγαλύτερους ρυθμούς (π.χ. 400 Gb/s), ενώ παράλληλα θα οδηγήσουν στη μείωση του φυσικού μεγέθους των συσκευών και της κατανάλωσης ενέργειας, ώστε να ικανοποιηθούν πλήρως οι σύγχρονες απαιτήσεις.

Σε αυτή τη γενική εικόνα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι ώρες αιχμής της διαδικτυακής κυκλοφορίας αυξάνονται ταχύτερα από ό,τι η μέση διαδικτυακή κίνηση, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι απαιτήσεις για τη χωρητικότητα του δικτύου εξελίσσονται σε όλο και πιο μεγάλες και δυναμικές, με αποτέλεσμα να πέφτει το βάρος στο δίκτυο κορμού μέσω των στοιχείων εισόδου/εξόδου (διακόπτες ακρών), τα οποία αντιστοιχούν στις διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων. Για να εξυπηρετηθεί αυτό το μέγεθος των δεδομένων, οι διακόπτες ακρών τελευταίας τεχνολογίας είναι εξοπλισμένοι σήμερα με πολλαπλές διεπαφές, κάθε μια με 10, 40, 100 ή ακόμα και 400 Gb/s συνολικής χωρητικότητας. Εντούτοις όμως, ο αυξανόμενος αριθμός των υπηρεσιών οδηγεί πολύ σύντομα σε ροές δεδομένων που μπορούν να αγγίζουν ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 1 Tb/s, με αποτέλεσμα αυτές οι διεπαφές να πρέπει να αναβαθμιστούν και να υποστηρίζουν παρόμοιες χωρητικότητες προκειμένου να συμβαδίζουν. Συνεπώς, οι τρέχουσες εφαρμογές 100G βασισμένες στη διπλή πόλωση διαμόρφωση μετατόπισης φάσης με ορθογωνισμό (DP-QPSK) φαίνονται ήδη ξεπερασμένες. Αυτό υπαγορεύει ότι η επόμενη μετάβαση από 100 Gb/s σε 400 Gb/s και περαιτέρω προς το 1Tb/s οπτικών καρτών γραμμής βασισμένων στην υψηλότερη τετραγωνισμένη διαμόρφωση πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) είναι επιτακτική για το άμεσο μέλλον, λαμβάνοντας υπόψη και την ευελιξία στη διαχείριση αυτής της χωρητικότητας προκειμένου να απλοποιηθεί ο σχεδιασμός του δικτύου και να βελτιστοποιηθεί ο διαμοιρασμός πολύτιμων πόρων όπως οι γραμμές των οπτικών ινών και οι οπτικές διασυνδέσεις του δικτύου. Μέχρι στιγμής, η ευελιξία των οπτικών πομποδεκτών (διεπαφές Tx/Rx πολλαπλών ροών) έχει ληφθεί υπόψη κυρίως στα πλαίσια των οπτικών συνδέσεων από σημείο σε σημείο σε ένα ευέλικτο περιβάλλον πλέγματος και στην περίπτωση της εφαρμογής μεμονωμένων και πολλαπλών φερόντων ως δυνατότητα των πομποδεκτών να προσαρμόσουν το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, το σχήμα διαμόρφωσης, την εφικτή απόσταση μετάδοσης και την κατανομή του μήκους κύματος των μεταδιδόμενων σημάτων.

Οι παράγοντες που εμποδίζουν σήμερα την ανάπτυξη πομποδεκτών υπερ-υψηλών ταχυτήτων της τάξεως των 100 Gb/s καθώς και των πομποδεκτών πολλαπλών ροών με χωρητικότητες terabit είναι η

απουσία ενός ευέλικτου συνδυασμού πλατφορμών ολοκλήρωσης που μπορεί να κάνει διαθέσιμα υψηλής απόδοσης φωτονικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα για λειτουργία υπερ-υψηλής ταχύτητας με χωρητικότητα gigabit και terabit.

Εναρμονιζόμενη με τις προαναφερθείσες απαιτήσεις και ανάγκες, η παρούσα διδακτορική διατριβή χωρίζεται σε δύο μέρη και πιο συγκεκριμένα στις υψίρρυθμες οπτικές διασυνδέσεις με χρήση οπτικών πομπών εντός υπολογιστικών κέντρων δεδομένων καθώς και των αντίστοιχων ευέλικτων για διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, στηριζόμενες και οι δύο στην τεχνολογία οπτικών πολυμερών. Τα οπτικά πολυμερή αποτελούν μια νέα και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία υλικών για τις οπτικές επικοινωνίες, παρουσιάζοντας οπτικές δομές, τόσο ενεργές με εξαιρετικά υψηλή ηλεκτρο-οπτική απόκριση (EO response) για τη χρήση σε συμβολομετρικές διατάξεις διαμόρφωσης τύπου Mach-Zehnder, όσο και παθητικές ικανές να υλοποιούν πολύπλοκα οπτικά δίκτυα δρομολόγησης του φωτός για την υποστήριξη κυκλωμάτων πομποδεκτών πολλαπλών ροών. Κατ' επέκταση, το πρώτο μέρος αυτής της διατριβής εστιάζει στη χρήση και στις ιδιότητες της πολυμερικής ηλεκτρο-οπτικής πλατφόρμας για την κατασκευή συμβολομετρικών πομπών ικανών να διαμορφώσουν οπτικά σήματα εισόδου με εγκάρσιους μαγνητικούς ρυθμούς TM μέχρι τα 100 Gb/s καθώς και στη μελέτη της τεχνολογίας σχημάτων απευθείας διαμόρφωσης με χρήση NRZ-OOK.

Το συγκεκριμένο οπτικό πολυμερές υπερσχύει έναντι των υπολοίπων οπτικών πλατφορμών ολοκλήρωσης καθότι παρουσιάζει εξαιρετικά ταχεία ηλεκτρο-οπτική απόκριση, με αναλογικό εύρος ζώνης > 65 GHz για οπτικές δομές διαμόρφωσης Mach-Zehnder. Συνεπώς, με βάση τον πολυμερικό ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή Mach-Zehnder και την υβριδική ολοκλήρωση μιας ενεργής δομής λέιζερ ανάδρασης ανεστραμμένη κατά 90° μοίρες υλοποιείται ένας ολοκληρωμένος πομπός σε συνδυασμό με την χρήση ηλεκτρονικού κυκλώματος πολυπλεξίας και ενίσχυσης δυαδικών σημάτων τελικού παραγόμενου ρυθμού 100 Gb/s κατασκευασμένου στην πλατφόρμα InP-DHBT. Αυτός ο ολοκληρωμένος οπτικός πομπός σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στα πλαίσια της ερευνητικής ευρωπαϊκής συνεργασίας POLYSYS, στοχεύοντας στην αναβάθμιση και την αύξηση της χωρητικότητας των δεδομένων των επικοινωνιακών συστημάτων παρέχοντας μια τεχνολογία ολοκλήρωσης για απλή σειριακή 100 Gb/s rack-to-rack και chip-to-chip συνδεσιμότητα. Η αξιολόγησή του επιτεύχθηκε μέσω εργαστηριακών πειραμάτων επίδειξης στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (Ε.Φ.Ε) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK παρουσιάζοντας επιτυχή λειτουργία χωρίς λάθη για ρυθμούς μετάδοσης 80, 90 και 100 Gb/s.

Το δεύτερο μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής σχετίζεται με την παρουσίαση και την ανάπτυξη ευέλικτων οπτικών πομποδεκτών καθώς και των ευέλικτων οπτικών κόμβων με χωρητικότητα terabit και ευελιξία ως προς τον ορισμό των οπτικών ροών, την κατανομή των μηκών κύματος, τον αριθμό των υποφερόντων, την δυνατότητα επιλογής της πόλωσης και τη διαμόρφωση ανώτερης τάξης m-QAM με στόχο τα ελαστικά οπτικά δίκτυα και πιο συγκεκριμένα τα τμήματα του δικτύου που αφορούν το μητροπολιτικό τμήμα και το τμήμα του πυρήνα του δικτύου. Η ανάπτυξη των ευέλικτων οπτικών πομποδεκτών πολλαπλών ροών στηρίζεται στην υβριδική ολοκλήρωση της παθητικής πολυμερικής πλατφόρμας ολοκλήρωσης χαμηλών απωλειών (PolyBoard) για την δημιουργία πολύπλοκων οπτικών κυκλωμάτων δρομολόγησης με την φωτονική τεχνολογία InP και συνδυάζεται με ηλεκτρο-οπτικούς διαμορφωτές ορθογωνιότητας IQ-MZM και ηλεκτρονικά κυκλώματα σε InP-DHBT με σκοπό την παραγωγή ταυτόχρονα πολλαπλών οπτικών ροών έως 64 Gbaud. Αυτές οι οπτικές ροές μπορούν να μεταφέρουν πληροφορία σε μεταβλητό μήκος κύματος και τύπο διαμόρφωσης m-QAM ($m = 4, 16, 64$) ανάλογα με την απόσταση μετάδοσης και τον όγκο των δεδομένων του σήματος, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τη συνολική χωρητικότητα μέσω επιλεκτικότητας στην πόλωση, χρησιμοποιώντας ένα ανεπτυγμένο λογισμικό καθορισμένης οπτικής (software defined optics, SDO) σε labview και FPGA. Για πρώτη φορά δίνεται αυτή η δυνατότητα της επιλογής του είδους της πόλωσης (μονής ή διπλής) από ένα ευέλικτο πομποδέκτη πολλαπλών ροών, επιτυγχάνοντας διπλασιασμό της τελικής χωρητικότητας.

Παράλληλα, έχοντας ως βάση τους ευέλικτους πομποδέκτες πολλαπλών ροών σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε οπτικός κόμβος με ευελιξία στο μήκος κύματος (colorless) και στην κατεύθυνση

(directionless) ικανός να εκμεταλλευτεί πλήρως τις δυνατότητες των πολλαπλών ροών, ο οποίος υλοποιήθηκε με χρήση των επιλεκτικών μεταγωγέων μήκους κύματος (wavelength selective switches, WSS). Το συγκεκριμένο σύστημα αξιολογήθηκε σε εργαστηριακές συνθήκες παρουσιάζοντας δυναμική λειτουργία με m-QAM σχήματα διαμόρφωσης ως 28 Gbaud και σύμφωνη μετάδοση χωρίς λάθη μετά από 100 km μονότροπης οπτικής ίνας.

Λέξεις Κλειδιά

Οπτική Διαμόρφωση, Ολοκληρωμένοι Οπτικοί Πομποί 100 Gb/s, Οπτικές Διασυνδέσεις εντός Υπολογιστικών Κέντρων, Σχήματα Διαμόρφωσης Ανώτερης Τάξης, Οπτικοί Πομποί Πολλαπλών Ροών, Πολυμερική Τεχνολογία, Πλατφόρμα Λογισμικού Καθορισμένης Οπτικής (SDO), Ευέλικτος Οπτικός Κόμβος, Οπτικά Δίκτυα Κορμού, Οπτικά Δίκτυα Πρόσβασης, Τετραφασική Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης (QPSK), Τετραγωνισμένη Διαμόρφωση Πλάτους (QAM), Ηλεκτροοπτικός Διαμορφωτής Mach Zehnder (MZM), Διαμορφωτής Ορθογωνιότητας Mach Zehnder (IQ-MZM), Επιλεκτικοί Μεταγωγείς Μήκους Κύματος (WSS)

Abstract

In today's world, use of telecommunications as well as the sector itself are inextricably linked to the everyday life of man, aiming at improving his own life. To this end, recent advances in smart devices, mobile voice and data services, cloud data, large file transfer and the Internet of Things have contributed to an exponential increase in traffic requirements globally, resulting in a tripling of global IP traffic between 2015 and 2021. Consequently, these requirements have led to an increasing use of the available bandwidth of networks, in order to fully meet the increasing needs by using only optical networks, which are the only solution to serve such requirements. And this is because the satisfaction of the capacity requirements depends on two factors. Firstly, there is a dependence on the capacity of the interfaces for communication and transfer of data within the data centers, and secondly on their transfer between remote data centers, taking into account efficiency as well as low cost.

Based on the current data, interfaces within data centers use 10 and 40 Gb/s interfaces with on-off-keying (OOK) format and wavelength division multiplexing (WDM), while Ethernet switches will adopt connections 100 Gb/s, making it necessary to use high-speed optical technologies. In this context, the objective should focus on the development of integrated optical solutions that will allow simple, direct switching from 10 Gb/s data rates to 40 Gb/s and ultimately to 100 Gb/s or even higher speeds 400 Gb/s), while reducing the physical size of the devices and power consumption to fully meet current requirements.

In this general picture, it should be taken into account that peak Internet traffic times are growing faster than average online traffic, suggesting that network capacity requirements are evolving into ever greater and more dynamic, resulting in the weight in the core network dropping through the input/output elements (edge switches), which correspond to the interfaces between data centers. In order for data of such size to be accommodated, state-of-the-art edge switches are now equipped with multiple interfaces, each with 10, 40, 100 or even 400 Gb/s of total capacity. However, the increasing number of services very soon leads to data flows that can reach transmission rates of up to 1 Tb/s, so these interfaces need to be upgraded and support similar capacities to keep pace. Consequently, the current applications based on 100 Gb/s dual-polarization Quadrature Phase Shift Keying (DP-QPSK) seem already obsolete. This dictates that the next transition from 100 Gb/s to 400 Gb/s and further to 1 Tb/s Quadrature Amplitude Modulation (QAM) based optical line cards is imperative for the immediate future, also taking into account the flexibility in managing this capacity in order to simplify network design and optimize the sharing of valuable resources such as fiber optic lines and network optical interfaces. So far, the flexibility of the optical transceivers (Tx/Rx interfaces) has been taken into account mainly in the context of point-to-point optical connections in a flexible grid environment, and in the case of the application of single and multiple carriers as the ability of the transceivers to adjust the transmission rate, modulation format, configuration format, transmission reach available and wavelength allocation of the transmitted signals. The factors currently hindering the development of ultra-high-speed transceivers of the order of 100 Gb/s and multi-flow transmitters with terabit capacities is the absence of a flexible combination of integration platforms that can make available high-performance photonic and electronic circuits for ultra-high speed with gigabit and terabit capacity.

In accordance with the above-mentioned requirements and needs, this PhD dissertation is divided into two parts, namely high-speed optical interfaces employing optical transmitters inside data centers as well as the corresponding flexible for interconnections between data centers, both based on the technology of the optical polymers. Optical polymers are a new and promising material technology for optical communications, presenting optical structures both active with extremely high electro-optical response (EO-response) for the development of Mach-Zehnder interferometers and passive capabilities to implement complex photonic routing networks to support multiflow transceiver circuits. Consequently, the first part of this dissertation focuses on the use and properties of the polymeric electro-optical platform for the development of interferometric transmitters capable of modulating input signals with TM mode of up to 100 Gb/s as well as in the study of modulation technology using NRZ-OOK format.

This particular optical polymer takes precedence over the other integration platforms as it exhibits an extremely fast electro-optical response with a 3-dB bandwidth > 65 GHz for optical Mach-Zehnder modulation structures. Accordingly, based on the hybrid integration of a distributed feedback laser structure inverted by 90 degrees with the EO polymer Mach-Zehnder modulator, an integrated transmitter is implemented in combination with the use of a 100 Gb/s electrical data multiplexing and driving circuit on the InP-DHBT platform. This integrated optical transmitter was designed and built within the framework of the European research project POLYSYS, aiming to upgrade and increase data communication system capacity by providing integration technology for simple 100 Gb/s rack-to-rack and chip-to-chip connectivity. Its evaluation was achieved through laboratory experiments at the National Technical University of Athens with NRZ-OOK modulation format demonstrating error-free operation for transmission rates of 80, 90 and 100 Gb/s.

The second part of this thesis is related to the demonstration and development of flexible optical transceivers and the flexible optical nodes with terabit capacity and flexibility in the definition of optical flows, wavelength allocation, number of subcarriers, polarization sliceability and m-QAM modulation format targeting elastic optical networks and more specifically metropolitan and core segments. The implementation of flexible multiflow optical transceivers is based on hybrid integration of the passive polymer low loss integration platform (PolyBoard) for the development of complex optical routing circuits with the InP photonic technology and is combined with EO IQ-MZ modulators and high-speed electronic circuits in InP-DHBT in order to produce multiple optical flows up to 64 Gbaud. These optical flows can transfer data to a variable wavelength and type of m-QAM modulation ($m = 4, 16, 64$) depending on the transmission distance and the volume of signal data, further increasing the total capacity through selection of the polarization, using a developed software control in labview and FPGA. For first time this capability of choosing the type of polarization (single or dual) is given by a flexible multiflow transceiver, achieving a doubling of the final capacity.

At the same time, based on the flexible multiflow transceivers, a colorless and directionless optical node was designed and developed to fully exploit the capability of multiple flows, which implemented using wavelength selective switches. This system was evaluated in laboratory conditions demonstrating dynamic operation with m-QAM modulation format up to 28 Gbaud and error-free coherent transmission over 100 km of standard single-mode fiber (SSMF).

Keywords

Optical Interfaces for Intra-Datacenter Connectivity, Optical Modulation, Integrated Optical Transmitters 100 Gb/s, Advanced Modulation formats, Multi-flow Optical Transmitters, Polymer Technology, Software Defined Optics Platform (SDO), Flexible Optical Node, Quadrature Amplitude Modulation (QAM), Electro-optic Mach Zehnder Modulator, Quadrature Mach-Zehnder Modulator (IQ-MZM), Wavelength Selective Switches (WSS)

Ευχαριστίες

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου την περίοδο 2011-2018. Ένα όνειρο που γεννήθηκε στην εφηβική μου ηλικία κατά τη διάρκεια των πανελληνίων εξετάσεων, το οποίο όμως δεν μπορούσε να πραγματοποιηθεί εκείνη την δεδομένη στιγμή. Ωστόσο, η δύναμη της θέλησής μου και η ακούραστη προσήλωση στον στόχο μου, το όνειρο μου καταφέρνει να γίνει πραγματικότητα.

Για τον λόγο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αβραμόπουλο, διευθυντή του Εργαστηρίου και επιβλέποντα καθηγητή της διατριβής μου. Ο κ. Αβραμόπουλος είναι ένα φωτεινό παράδειγμα δημιουργικού ανθρώπου, ο οποίος καθοδηγεί την ομάδα του χρησιμοποιώντας την υψηλή ευφυΐα και ευρηματικότητά του ώστε να μπορέσουν να γεννηθούν νέες ιδέες που προάγουν την καινοτομία και φέρουν σημαντικά αποτελέσματα στο εργαστήριο.

Φυσικά, δεν θα μπορούσα να μην σταθώ και την ανθρώπινη πλευρά του κ. Αβραμόπουλου, ο οποίος ήταν δίπλα και στις δύσκολες προσωπικές στιγμές που προέκυψαν κατά την παρουσία μου στο εργαστήριο και θα ήθελα να τον ευχαριστήσω από καρδιάς για την υποστήριξή του.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ολόθερμα τον μετά-διδαστορικό ερευνητή κ. Χρήστο Κουλουμέντα, τον οποίο νιώθω και ως μέντορά μου, για την ουσιαστική και πλήρη στήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας και για τις πολύτιμες συμβουλές οι οποίες αποτέλεσαν οδηγό στην επιτυχημένη ερευνητική μου πορεία.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην ομάδα με την οποία συνεργάστηκα καθ' όλη τη διάρκεια της επιστημονικής μου διατριβής και πιο συγκεκριμένα τους κκ. Παναγιώτη Γκρούμα, Κωστή Χριστογιάννη, Λευτέρη Γουναρίδη, Χρήστο Τσώκο και Ηλία Μυλωνά για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Ευχαριστίες για την αρμονική συνύπαρξή μας στο ΕΦΕ, τη συνεργασία και την εν γένει βοήθεια που προσέφεραν οφείλω τόσο στα νεότερα όσο και παλαιότερα μέλη Δημήτρη Αποστολόπουλο, Παρασκευά Μπακόπουλο, Μαριλύ Σπυροπούλου, Γιάννη Γιαννούλη, Γιάννη Λαζάρου, Γιάννη Κανάκη, Νίκο Ηλιάδη, Χάρη Ζέρβο, Γιάννη Πουλόπουλο, Χρήστο Σπαθαράκη, Bernhard Schrenk, Μάριο Μπουγιούκο, Κωνσταντίνα Καντά, Βάσια Λαμπροπούλου και Πόλυ Βλάση.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους Haik Mardoyan από τα εργαστήρια Nokia Bell Labs της Γαλλίας, την Agnieszka Konczykowska, Jean-Yves Duport από τα III-V lab της Nokia Γαλλίας για την βοήθειά τους καθώς και τη συμβολή τους στα πειράματα αυτής της διατριβής.

Δεν θα μπορούσα να ξεχάσω τον καθηγητή Νίκο Πλέρο για τις όμορφες συζητήσεις που είχαμε κατά καιρούς, όπως και τον υποψήφιο διδάκτωρ Γιώργο Ντάμπο για τη φιλοξενία του στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω προς τον Δημήτρη Καλαβρουζιώτη, παλαιότερο μέλος του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών για την υποστήριξή του στις πιο δύσκολες στιγμές της ζωής μου.

Από καρδιάς ευχαριστώ τους ανθρώπους, οι οποίοι με ενδιαφέρουν, προσμονή, εμπιστοσύνη και πολύτιμες συμβουλές στήριξαν αυτήν την προσπάθεια. Αναφέρομαι στην αδελφή μου Αλεξάνδρα, στον πατέρα μου Μηνά και στην γιαγιά μου Αλεξάνδρα, η οποία φρόντισε να υπάρχει η κατάλληλη ενέργεια μέσω των «μαγικών» πορτοκαλάδων κατά τη διάρκεια της παρουσίας μου στο εργαστήριο, και τους ξεχωριστούς φίλους, συνταξιδιώτες στη ζωή, Δημήτρη Συκά, Μάριο Γώγο, Βρεττό Μουλό, Κώστα Ριρή, Θεοδωρή Χελιώτη, Σταυρούλα Γκιθώνα, Χρήστο Σκάνδαλο και Άγγελο Γούπιο. Επίσης, τις πιο βαθιές ευχαριστίες οφείλω στην σύντροφο μου Μαίρη Κορδώση που με στοργή και αγάπη με βοήθη να εξελίσσομαι και να προοδεύω.

Για το τέλος κράτησα τα πιο «δύσκολα» λόγια, τα οποία αφορούν την αγαπημένη μου μητέρα Έρη Κόλτηρη, η οποία με τις πολύτιμες συμβουλές της και την καθοδήγησή της συνέβαλλε αποφασιστικά ώστε να ακολουθήσω τις επιλογές μου και το όνειρο μου και με στήριξε σε αυτή τη δύσκολη πορεία όσο βρισκόταν

στη ζωή. Χωρίς την αγάπη, τη δύναμη και την υπομονή της, η προσπάθεια θα ήταν πολύ πιο δύσκολη. Ανταποδίδω την αγάπη της και της αφιερώνω με ευγνωμοσύνη την παρούσα διατριβή. Γνωρίζω πολύ καλά ότι παραμένει δίπλα μου σε κάθε μου βήμα.

«Η Σοφία είναι η κόρη της εμπειρίας»

Leonardo da Vinci

Βασίλης Κατωπόδης

Αθήνα, Δεκέμβριος 2018

Στη μητέρα μου Έρη

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	5
Abstract	8
Ευχαριστίες	10
Κατάλογος Εικόνων	18
Κατάλογος Πινάκων.....	24
Πίνακας Συντμήσεων	25
Σύντομη Ιστορία των Τηλεπικοινωνιών.....	31
Κίνητρο και Δομή Διατριβής	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	41
Τεχνολογία Σχημάτων Διαμόρφωσης Ανώτερης Τάξης για Οπτική Μετάδοση Πληροφορίας και Πολυμερικά Υλικά	41
1.1 Επιτεύγματα και Προκλήσεις της Τεχνολογίας των Οπτικών Τηλεπικοινωνιών	41
1.2 Κατηγοριοποίηση Δικτύων	42
1.3 Προδιαγραφές Ιδανικών Δικτύων	43
1.4 Τεχνολογία Σχημάτων Απευθείας Διαμόρφωσης κατά Πλάτος.....	45
1.4.1 Πηγή Laser	45
1.4.2 Οπτικός Διαμορφωτής.....	46
1.4.3 Διαμορφωτής Mach-Zehnder (MZM)	47
1.4.4 Διαγράμματα Αστερισμού Ανωτέρων Σχημάτων Διαμόρφωσης.....	51
1.4.5 Διαμόρφωση κατά QPSK	53
1.4.6 Διαμόρφωση με Τετραγωνικούς Σχηματισμούς QAM	54
1.4.7 Οπτικός Δέκτης (Optical Receiver).....	55
1.4.8 Εμπρόσθιο τμήμα ανίχνευσης (Receiver Front-end)	55
1.5 Τεχνολογία Υλικών-Πολυμερικά Υλικά	57
1.5.1 Συμβατικές Οπτικές Τεχνολογίες Ολοκλήρωσης για την Ανάπτυξη Υψίρρυθμων Διεπαφών..	58
1.5.2 Χρήση ΕΟ Πολυμερικών Υλικών για τη Σχεδίαση και Ανάπτυξη Διαμορφωτών	60
1.5.3 Ανάπτυξη Ηλεκτρο-οπτικής Πολυμερικής Πλατφόρμας μέσω Μονολιθικής και Υβριδικής Φωτονικής Ολοκλήρωσης	63
1.6 Παθητική Πολυμερική Πλατφόρμα για τη Σχεδίαση και Ανάπτυξη Ευέλικτων Οπτικών Πομποδεκτών Πολλαπλών Ροών.....	65
1.6.1 Παθητικός Πολυμερικός Κυματοδηγός και Σχεδίαση Θερμικού Ηλεκτροδίου	67

1.6.2 Οπτικά Ρυθμιζόμενα Φίλτρα στην Παθητική Πολυμερική Πλατφόρμα	69
1.6.3 Οπτικά Ρυθμιζόμενα Φίλτρα-Ανακλαστήρες Πλέγματος Bragg	70
1.6.4 Μεταβλητές Οπτικοί Εξασθενητές	72
1.6.5 Μεταβλητές Οπτικοί Εξασθενητές Βασισμένοι σε 1x1 MMI	72
1.6.6 Μεταβλητές Οπτικοί Εξασθενητές Βασισμένοι σε MZI	73
1.6.7 Θερμο-οπτικοί Μεταγωγείς Φωτός.....	74
Σύνοψη και Συμπεράσματα Κεφαλαίου 1	78
Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 1	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	85
Απαιτήσεις Οπτικών Πομποδεκτών για Υποστήριξη Υπερ-Υψηλών Οπτικών Διασυνδέσεων Εντός και Μεταξύ Υπολογιστικών Κέντρων.....	85
2.1 Εισαγωγή.....	85
2.2 Τάσεις στην Εξέλιξη των Υπολογιστικών Κέντρων	85
2.3 Έννοια του ομοσπονδιακού Data Center (Federated Data Center).....	91
2.4 Παγκόσμια Υπολογιστικά Κέντρα βασισμένα σε Αρχιτεκτονική WAN	93
2.5 Εξέλιξη Κυκλοφορίας Δεδομένων	94
2.6 Τάσεις των Αναγκών σε Εύρος Ζώνης και Προβλεπόμενη Εξέλιξη του Δικτύου	95
2.7 Ανάπτυξη Δικτυακού οπτικού Εξοπλισμού Για την Ικανοποίηση Μελλοντικών Αναγκών των Οπτικών Δικτύων	97
2.8 Πύλη Υπολογιστικού Κέντρου.....	101
2.9 Αρχιτεκτονικές και Απαιτήσεις Οπτικών Συστημάτων για Διασυνδέσεις Υπολογιστικών Κέντρων.....	101
2.9.1 Αρχιτεκτονική Μεταγωγής Οπτικού Κυκλώματος (optical circuit switching).....	102
2.9.2 Αρχιτεκτονική Μεταγωγής Ηλεκτρονικών Πακέτων (electronic packet switching).....	103
2.9.3 Αρχιτεκτονική Μεταγωγής Οπτικών Πακέτων (optical packet switching).....	103
Σύνοψη και Συμπεράσματα Κεφαλαίου 2	109
Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 2	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	113
Πειράματα Υπερ-Υψηλών Ρυθμών Οπτικής Μετάδοσης Δεδομένων με Σχήμα Απευθείας Διαμόρφωσης βασισμένα στη Χρήση Ολοκληρωμένων Πολυμερικών Πομπών για Αρχιτεκτονική Οπτικής Διασύνδεσης Υπολογιστικών Συστημάτων εντός Υπολογιστικών Κέντρων.....	113
3.1 Εισαγωγή.....	113
3.2 Πειραματική Διάταξη από την Πλευρά του Πομπού 100 Gb/s.....	113
3.3 Προκαταρκτικά Αποτελέσματα από την Πλευρά του Πομπού 100 Gb/s	116
3.4 Πειραματική Διάταξη Οπτικού Δέκτη 100 Gb/s	119

3.5 Προκαταρκτικά Αποτελέσματα από την Πλευρά του Δέκτη 100 Gb/s	120
3.6 Πειραματική Αξιολόγηση του Ολοκληρωμένου Οπτικού Πομπού βασισμένου σε Πολυμερική Τεχνολογία στα 100 Gb/s.....	121
3.6.1 Περιγραφή Ολοκληρωμένης Διάταξης Οπτικού Πολυμερικού Πομπού	121
3.6.2 Πειραματική Αξιολόγηση 80-100 Gb/s του Οπτικού Πομπού σε Back-to-Back Λειτουργία: Πρώτη Οπτική Διάταξη Αξιολόγησης μέχρι 80 Gb/s	122
3.6.3 Πειραματική Αξιολόγηση 80-100 Gb/s σε Back-to-Back λειτουργία: Δεύτερη Οπτική Διάταξη Αξιολόγησης μέχρι 100 Gb/s	124
3.7 Εφαρμογή Οπτικών Πομπών 100 Gb/s σε Αρχιτεκτονική Οπτικής Μεταγωγής Κυκλώματος για Οπτικές Διασυνδέσεις εντός Υπολογιστικών Κέντρων	127
Σύνοψη & Συμπεράσματα Κεφαλαίου 3	128
Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 3	130
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	131
Σχεδίαση και Ανάπτυξη Οπτικού Κόμβου Για Ευέλικτες Οπτικές Διασυνδέσεις Μεταξύ Υπολογιστικών Κέντρων Δεδομένων με Χρήση Πομποδεκτών Πολλαπλών Ροών	131
4.1 Εισαγωγή	131
4.2 Εξέλιξη και Έννοια του Ευέλικτου Οπτικού Δικτύου	131
4.3 Εφαρμογή Ευέλικτων Πομποδεκτών σε Μητροπολιτικά Δίκτυα	134
4.4 Εφαρμογή Ευέλικτων Πομποδεκτών σε Δίκτυα Κορμού	134
4.5 Εφαρμογή Ευέλικτων Πομποδεκτών σε Υπολογιστικά Κέντρα Δεδομένων	134
4.6 Σενάρια Χρήσης των Ευέλικτων Πομποδεκτών	135
4.6.1 Σενάρια Χρήσης για Μητροπολιτικό Τμήμα Δικτύου (Metro segment)	135
4.6.2 Σενάρια Χρήσης για Δίκτυα Κορμού	139
4.6.3 Σενάρια Χρήσης για Υπολογιστικά Κέντρα Δεδομένων	139
4.7 Απαιτήσεις Πομποδεκτών για τα Διαφορετικά Σενάρια Χρήσης	141
4.8 Σχήματα Διαμόρφωσης Πομποδεκτών για Μητροπολιτική Εφαρμογή και Εφαρμογή σε Υπολογιστικά Κέντρα Δεδομένων	142
4.9 Σχήματα Διαμόρφωσης Πομποδεκτών για Εφαρμογή σε Δίκτυα Κορμού	143
4.10 Περιγραφή των Προτεινόμενων Ευέλικτων Πομποδεκτών Πολλαπλών Ροών	143
4.11 Εφαρμογή των Προτεινόμενων Πομποδεκτών σε Αρχιτεκτονικές Δικτύων	148
4.12 Εφαρμογή Προτεινόμενων Ευέλικτων Πομποδεκτών σε Συμπλέγματα DC και Μητροπολιτικό Δίκτυο Κορμού (Medium Haul)	150
4.13 Εφαρμογή Προτεινόμενων Ευέλικτων Πομποδεκτών σε VDCN και Εθνικά Δίκτυα Μεγάλων Αποστάσεων (Long Haul)	151
4.14 Εφαρμογή Προτεινόμενων Ευέλικτων Πομποδεκτών σε Ηπειρωτικά Δίκτυα	151
4.15 Σχεδίαση Οπτικού Φωτονικού Κόμβου για Πομποδέκτες Πολλαπλών Ροών	152

4.16 Προτεινόμενοι Ευέλικτοι Πομποδέκτες σε Συνδυασμό με το OTN	155
4.17 Επίπεδο OTN για Χαρτογράφηση και Εξυπηρέτηση της Κίνησης των Πελατών	156
4.18 Προτεινόμενοι Ευέλικτοι Πομποδέκτες Πολλαπλών Ροών Μέσα στους Ευέλικτους Οπτικούς Κόμβους	161
4.19 Υλοποίηση Λογισμικού Ελέγχου Οπτικών Συσκευών μέσω Πλατφόρμας SDO	165
4.20 Ανάπτυξη Διεπαφής SDO για Ευέλικτους Πομπούς Πολλαπλών Ροών	166
4.21 Επεξεργαστής OTN	169
4.22 Υλοποιημένος Διανομέας Ροής OTN	174
4.23 Λειτουργία Προκωδικοποιητή OTN	175
4.24 Αναμεταδότης FPGA	179
4.25 Ανάπτυξη πλατφόρμας FPGA για την Παραγωγή Πολλαπλών Ρυθμών και Πολλαπλού Αριθμού Ηλεκτρικών Πομπών για την Υποστήριξη των Ευέλικτων Πομπών Πολλαπλών Ροών.....	180
4.26 Ανάπτυξη του SDO agent με Χρήση του Προγράμματος LabVIEW	198
Σύνοψη & συμπεράσματα Κεφαλαίου 4	206
Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 4	208
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	211
Αξιολόγηση Υψηλών Ρυθμών Οπτικής Μετάδοσης Δεδομένων με Σχήματα Διαμόρφωσης Ανώτερης Τάξης με χρήση Οπτικών Πομπών Πολλαπλών Ροών βασισμένοι σε Παθητική Πολυμερική Πλατφόρμα για Ευέλικτα Οπτικά Δίκτυα Κορμού	211
5.1 Εισαγωγή.....	211
5.2 Ευέλικτοι Οπτικοί Πομποδέκτες Πολλαπλών Ροών με Βάση τις Οπτικές Μονάδες O.....	212
5.3 Χαρακτηρισμός Πολυμερικών Θερμο-οπτικών Μεταγωγών στην Παθητική Πολυμερική Πλατφόρμα PolyBoard.....	213
5.4 Χαρακτηρισμός Πολυμερικών Διατάξεων Δρομολόγησης βασισμένη σε Θερμο-οπτικούς Μεταγωγείς.....	216
5.5 Δοκιμές Λειτουργίας της Ευελιξίας των Ευέλικτων Οπτικών Πομπών	219
5.6 Προκαταρκτική Πειραματική Διάταξη με FPGA μέχρι 28 Gbaud	222
5.7 Πειραματική Αξιολόγηση Ευέλικτων Οπτικών Πομπών με Σχήματα Διαμόρφωση m-QAM.....	223
Σύνοψη & Συμπεράσματα Κεφαλαίου 5	228
Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 5	230
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	231
Σύνοψη Διατριβής και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	231
6.1 Εισαγωγή.....	231
6.2 Πολυμερική Τεχνολογία Διαμορφωτών και Σχεδίαση Οπτικών Κόμβων για Υψίρρυθμες και Ευέλικτες Οπτικές Διασυνδέσεις Εντός και Μεταξύ Υπολογιστικών Κέντρων	231

6.3 Προτάσεις για Περεταίρω Ερεύνα για τις Οπτικές Διασυνδέσεις Εντός και Μεταξύ Υπολογιστικών Κέντρων.....	234
Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 6	238
Λίστα Επιστημονικών Δημοσιεύσεων.....	240
Παράρτημα Α – Κώδικες σε γλώσσα Verilog.....	243

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Κίνηση διαδικτύου κατά τη διάρκεια ενός λεπτού. Πηγή: Intel infographic [23].	32
Εικόνα 1.2: Έσοδα από την αγορά των ενεργών οπτικών καλωδίων από την CIR Inc. [26].	33
Εικόνα 1.3: Η IP κίνηση εκφόρτωσης κατά την ευέλικτη οπτική μεταφορά ως κατεύθυνση της ανάπτυξης για ένα ευέλικτο/συγκλίτων δίκτυο κορμού [48].	36
Εικόνα 1.4: (α) Χρωματική διασπορά σε μονότροπη οπτική ίνα σε σχέση με το μήκος κύματος διάδοσης και (b) η εξασθένηση που επιφέρει η ίδια ίνα σε ένα οπτικό σήμα σε σχέση με το μήκος κύματος του σήματος [70].	42
Εικόνα 1.5: Χαρακτηριστική δομή τηλεπικοινωνιακών δικτύων με βάση την έκταση τους [71].	43
Εικόνα 1.6: Φασματική πυκνότητα ισχύος εξόδου λέιζερ (Lorentzian κατανομή γραμμών).	46
Εικόνα 1.7: Δομή ενός διαμορφωτή Mach-Zehnder (MZM).	47
Εικόνα 1.8: Συνάρτηση μεταφοράς ενός MZM με $V_{\pi} = 4.0V$ (Η απώλεια εισόδου παραμελείται).	48
Εικόνα 1.9: (α) Παραγωγή διαμορφωμένου σήματος OOK και (b) BPSK ανάλογα με την τάση οδήγησης στα ηλεκτρόδια του MZM.	49
Εικόνα 1.10: Διαγράμματα αστερισμού: (α) διαμορφωμένου σήματος OOK και (b) διαμορφωμένου σήματος BPSK.	50
Εικόνα 1.11: Δομή ενός IQ-διαμορφωτή κατασκευασμένου από δύο MZMs και ένα ολισθητή φάσης $\pi/2$ φάσης. Τα MZMs λειτουργούν σε κατάσταση push-pull.	50
Εικόνα 1.12: Ένας διαμορφωτής IQ διπλής πόλωσης ικανός να διαμορφώνει δύο ορθογώνιες πολώσεις του φωτός λέιζερ.	51
Εικόνα 1.13: Σύμφωνα σχήματα διαμόρφωσης QAM και η επιτεύξιμη φασματική τους απόδοση.	53
Εικόνα 1.14: Βασική αρχή δημιουργίας ενός οπτικού QSPK σήματος με τη χρήση ενός διαμορφωτή IQ, αναπαριστώντας τα δυαδικά ηλεκτρικά σχήματα οδήγησης, τα στάδια της διαμόρφωσης με τη μορφή διαγραμμάτων αστερισμού και την εξέλιξη της φάσης του τελικού διαμορφωμένου σήματος συναρτήσει την οπτικής ισχύος εξόδου του.	54
Εικόνα 1.15: Βασική αρχή λειτουργίας σήματος 16-QAM με τη χρήση ενός διαμορφωτή IQ. Τα ηλεκτρικά 4-PAM σήματα στο παράδειγμα αυτό δημιουργούνται με το συνδυασμό δύο δυαδικών ακολουθιών άνισου πλάτους και οδηγούν ξεχωριστά τον κάθε MZM. Επιπλέον αποτυπώνεται τόσο το διάγραμμα οφθαλμού του 16-QAM σχήματος όσο και το διάγραμμα αστερισμού του.	54
Εικόνα 1.16: Δομή ενός σύμφωνου οπτικού δέκτη πόλωσης και φάσης. PBS: διαχωριστής δέσμης πόλωσης, LO: τοπικός ταλαντωτής, PD: φωτοδιόδος, ADC: αναλογικός σε ψηφιακό μετατροπέας.	56
Εικόνα 1.17: Διαφορετικοί τρόποι υλοποίησης σύμφωνης οπτικής ανίχνευσης.	57
Εικόνα 1.18: (α) Δομή ηλεκτρο-οπτικού πολυμερικού συστήματος υλικών βασισμένου στη χρήση φιλοξενούμενου χρωμοφόρου εντός πολυμερούς υλικού υποδοχής και (b) διαδικασία πόλωσης του χρωμοφόρου εντός της μήτρας υποδοχής.	60
Εικόνα 1.19: Εγκάρσια τομή ηλεκτρο-οπτικού πολυμερικού κυματοδηγού με χρήση (α) της δομής M1 και (b) της δομής M3.	61
Εικόνα 1.20: (α) Σχηματικό GDS του διαμορφωτή 100 Gb/s και (b) διάγραμμα αναλογικού εύρους ζώνης σε σχέση με τη συχνότητα του EO πολυμερικού chip.	62
Εικόνα 1.21: Φωτογραφίες μικροσκοπίου δοκιμαστικών δομών κυματοδηγού.	62
Εικόνα 1.22: Φωτογραφία του chip διαμορφωτή 100 Gb/s.	62
Εικόνα 1.23: Χαρακτηριστικά πόλωσης του διαμορφωτή 100 Gb/s. Ο άξονας Y είναι η κανονικοποιημένη οπτική ισχύς.	63
Εικόνα 1.24: Φωτογραφίες: (α) δύο 1x2 MMI συζεύκτες, και (b) ένας συζεύκτης 1x4 MMI. (c) Κοντινή όψη ενός 1x2 συζεύκτη με πλάτος 12 μm , (d) κατασκευασμένη δομή BG, (e) συνάρτηση μεταφοράς BG με βύθισμα στα 1574,3 nm, (f) φωτογραφία συντονισμένου λέιζερ (tunable laser) με InP GC και BG στο EO πολυμερικό chip, και (g) οπτική μονάδα (assembly) του πομπού 100 Gb/s.	63
Εικόνα 1.25: (α) Οπτικό υποσύνολο υβριδικής ολοκλήρωσης ενός EO πολυμερικού MZM με μια πηγή LD από InP και (b) σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ολοκληρωμένου πολυμερικού πομπού 100 Gb/s.	65
Εικόνα 1.26: Ενιαίος πομποδέκτης 2.5 Gb/s βασισμένος στην πολυμερική παθητική πλατφόρμα από το HHI.	66
Εικόνα 1.27: Προσομοιωμένη εγκάρσια διατομή παθητικού πολυμερικού κυματοδηγού.	67
Εικόνα 1.28: Σχηματική απεικόνιση της διατομής του πολυμερικού κυματοδηγού με θερμικό ηλεκτρόδιο στην κάτω πλευρά του περιβλήματος του πολυμερούς.	67
Εικόνα 1.29: Θερμική προσομοίωση που δείχνει την κατανομή θερμοκρασίας στον πολυμερικό κυματοδηγό από το (α) άνω, (b) θαμμένο και (c) πλευρικό θερμοαντήρα (ηλεκτρόδιο).	68
Εικόνα 1.30: Συγκρίσεις κατανομής θερμοκρασίας για τις τρεις διατάξεις θερμοαντήρα: (α) κατά μήκος του κεντρικού επιπέδου X και (b) κατά μήκος του κεντρικού επιπέδου Y.	69
Εικόνα 1.31: (α) Σχηματική διάταξη του πλέγματος Bragg του πολυμερικού κυματοδηγού (χωρίς cladding στην κορυφή). (b) Φωτογραφία SEM του εγχάρκτου πυρήνα κυματοδηγού. (c) Εικόνα μικροσκοπίου της κατασκευασμένης συσκευής με θερμοαντήρα πυθμένα, αυλακώσεις αέρα και επιφάνειες επαφής (contact pads).	70
Εικόνα 1.32: (α) Φάσματα ανάκλασης ενός πολυμερικού πλέγματος Bragg κατά τη διάρκεια της θερμικής ρύθμισης. (b) Μετατόπιση μήκους κύματος Bragg σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ηλεκτρική ισχύ στο θερμοαντήρα πυθμένα.	70

Εικόνα 1.33: (a) Σχηματική διάταξη ενός λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας με εύρος συντονισμού μήκους κύματος που χωρίζεται σε δύο διαδρομές. (b) Επικαλυμμένα φάσματα λέιζερ κατά τη διάρκεια της ρύθμισης. (c) Μετατόπιση του μήκους κύματος λέιζερ σε σχέση με την ισχύ του θερμαντήρα.	71
Εικόνα 1.34: (a) Σχηματική διάταξη του VOA με βάση το 1x1 MMI. Οι πλευρικοί θερμαντήρες παράγουν μια κατανεμημένη διαβάθμιση (a distributed index gradient) προς το κέντρο του MMI. (b) Φωτογραφία SEM που δείχνει τους θερμαντήρες κατά μήκος της πλευράς της ράβδου πολυμερούς (polymer ridge).	73
Εικόνα 1.35: (a) Σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της μέτρησης (συνεχόμενη μπλε γραμμή) και της προσομοίωσης (διακεκομμένη κόκκινη γραμμή) του VOA με βάση το MMI. (b) Απόκριση μήκους κύματος για $P = 0$ mW (κατάσταση ON) και $P = 10,1$ mW (κατάσταση OFF).	73
Εικόνα 1.36: (a) Σχηματική διάταξη του VOA με βάση το MZI που αποτελείται από δύο 1x2 MMIs και ένα παράλληλο τμήμα κυματοδηγού. (b) Μετρηθείσα εξασθένηση της οπτικής ισχύος σε σχέση με την ισχύ του πλευρικού θερμαντήρα. (c) Απόκριση μήκους κύματος μέτρησης σε $P=0$ mW (κατάσταση ON) και $P=1.8$ mW (κατάσταση OFF).	74
Εικόνα 1.37: (a) Σχηματική απεικόνιση του TOS που βασίζεται σε δομή τύπου Y με πρόσθετους VOAs. (b) και (c) φωτογραφίες SEM που δείχνουν τους διασταυρούμενους πλευρικούς θερμαντήρες στην τομή TOS και VOA.	75
Εικόνα 1.38: (a) Τα φάσματα εκπομπής του TOS σε κατάσταση χωρίς ρύθμιση. (b) Χαρακτηριστικά μεταγωγής όταν ο πλευρικός θερμαντήρας 1 είναι ρυθμισμένος.	76
Εικόνα 1.39: (a) Φωτογραφία του λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας που μπορεί να αλλάξει πόλωση. Το InP GC και το πλακίδιο $\lambda/2$ είναι ασφαλισμένα με εποξικά μέσα στο παθητικό polyboard. (b) Προσομοιωμένα χαρακτηριστικά TOS. Χαρακτηριστικά ρύθμισης μήκους κύματος λέιζερ για τις διαδρομές με ρυθμό: (c) TE και (d) TM.	77
Εικόνα 2.1: Παραδοσιακές (πάνω) και cloud (κάτω) αρχιτεκτονικές υπολογιστικών συστημάτων.	87
Εικόνα 2.2: Η εξέλιξη του ρυθμού δεδομένων εισόδου/εξόδου (Input/Output) και η έγκριση των προτύπων Ethernet [151].	89
Εικόνα 2.3: Τμήματα δικτύου σε παγκόσμιο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που εξυπηρετούνται από τις οπτικές διασυνδέσεις.	90
Εικόνα 2.4: Κατανεμημένη και συγκεντρωτική ενορχήστρωση ενοποιημένων κέντρων δεδομένων.	92
Εικόνα 2.5: Παγκόσμιο δίκτυο υπολογιστικών κέντρων της Google.	93
Εικόνα 2.6: Αρχιτεκτονική υπολογιστικών κέντρων της Google.	93
Εικόνα 2.7: Τρέχουσες ροές κυκλοφορίας σε διεπαφές κόμβων στο μητροπολιτικό δίκτυο.	96
Εικόνα 2.8: Μεσοπρόθεσμες ροές στις διεπαφές κόμβων στο μητροπολιτικό δίκτυο.	96
Εικόνα 2.9: Μακροπρόθεσμες ροές κυκλοφορίας σε διεπαφές κόμβων στο μητροπολιτικό δίκτυο.	97
Εικόνα 2.10: Απεικόνιση της αναμενόμενης ενέργειας και της αύξησης του κόστους σε ένα δίκτυο.	100
Εικόνα 2.11: Κύριες προκλήσεις που σχετίζονται με τις διασυνδέσεις των κέντρων δεδομένων.	101
Εικόνα 2.12: Δίκτυο οπτική μεταγωγή κυκλώματος.	102
Εικόνα 2.13: Δίκτυο ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων.	103
Εικόνα 2.14: Οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων με χρήση τοπολογίας που μοιάζει με πλέγμα (mesh-like topology).	104
Εικόνα 2.15: Οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων με χρήση τοπολογίας δακτυλίου.	105
Εικόνα 2.16: 100-GE βυσαματούμενοι συντελεστές μορφής (Από τον κατάλογο προϊόντων της Finisar [189]) και υπόδειγμα συσκευής υποστήριξης μεταγωγής με θύρες 32x100 GE (Από την εταιρία Netberg [195]).	107
Εικόνα 2.17: (Πάνω) Ηλεκτρικό σήμα δύο επιπέδων και (κάτω) τεσσάρων επιπέδων. Με την αύξηση των δύο σταθμών στο πολύ-επίπεδο σήμα τεσσάρων επιπέδων επιτυγχάνεται διπλασιασμός του ρυθμού μετάδοσης, απαιτώντας όμως υψηλότερο σηματοδορυβικό λόγο.	108
Εικόνα 3.1: Απεικονιστικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης για τη λειτουργία και τον έλεγχο του οπτικού πομπού 100 Gb/s.	114
Εικόνα 3.2: Τα βασικά ηλεκτρονικά δομικά στοιχεία του πειραματικού οπτικού συστήματος από την πλευρά του οπτικού πομπού: (a) διπλασιαστής συχνότητας και (b) το στάδιο του "διαχωρισμού-και-ολίσθησης".	115
Εικόνα 3.3: Άποψη της ηλεκτρικής διάταξης του πειραματικού οπτικού συστήματος με τον 4:1 πολυπλέκτη και τον 1:4 αποπολυπλέκτη.	115
Εικόνα 3.4: Το διάγραμμα οφθαλμού του ηλεκτρικού σήματος των 12.5 Gb/s στην έξοδο του PPG.	116
Εικόνα 3.5: Το διάγραμμα οφθαλμού για μια από τις τέσσερις εισόδους 12.5 Gb/s του 4:1 πολυπλέκτη.	116
Εικόνα 3.6: Ηλεκτρικό σήμα εξόδου 50 Gb/s στην έξοδο του 4:1 πολυπλέκτη.	117
Εικόνα 3.7: Το ηλεκτρικό σήμα των 50 Gb/s της εξόδου του πολυπλέκτη 4:1 μετά την ενίσχυσή του.	117
Εικόνα 3.8: Το διάγραμμα οφθαλμού του ηλεκτρικού ρολογιού 50 GHz που οδηγούσε τον ενσωματωμένο ηλεκτρονικό 2:1 MUX του οπτικού πομπού.	118
Εικόνα 3.9: (a) Πλάτος οφθαλμού, (b) χρόνος ανόδου, (c) χρόνος καθόδου και (d) μέγιστο πλάτος (V_{pp}) του πολυπλεγμένου σήματος 50 Gb/s ως συνάρτηση της τάσης πολώσεως του πολυπλέκτη.	118
Εικόνα 3.10: (a) Διαμορφωμένο οπτικό σήμα 50 Gb/s με χρήση ενός εμπορικά διαθέσιμου LiNbO_3 διαμορφωτή. ...	119
Εικόνα 3.11: Απεικονιστικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης για τη λειτουργία και τον έλεγχο του 100 Gb/s οπτικού πομπού.	120

Εικόνα 3.12: (a) ηλεκτρικό σήμα 50Gb/s στην είσοδο του αποπολυπλέκτη και (b) το τελικό 12.5 Gb/s σήμα εξόδου.	120
Εικόνα 3.13: Κύριες δομικές μονάδες και η τελική συναρμολόγηση του 100 Gb/s οπτικού πομπού: (a) Οπτική υποδιάταξη, (b) μικροφωτογραφία κυκλώματος MUX-DRV chip, and (c) διάταξη οπτικού πομπού.	121
Εικόνα 3.14: 1 ^η Πειραματική διάταξη με χρήση του EAM στο δέκτη. Οι αναγραφόμενες συχνότητες και οι ρυθμοί των δεδομένων αντιστοιχούν σε λειτουργία 80 Gb/s και κλιμακώνονται ανάλογα σε 90 και 100 Gb/s.	122
Εικόνα 3.15: Διαγράμματα οφθαλμού στην έξοδο του πομπού για ρυθμούς μετάδοσης 80, 90 and 100 Gb/s. Τα αντίστοιχα φάσματα είναι κεντραρισμένα στα 1551.3 nm με 0.01 nm ανάλυση.	123
Εικόνα 3.16: Αξιολόγηση ρυθμού λαθών του οπτικού σήματος 80 Gb/s: Διαγράμματα οφθαλμού (a) 1 ^{ου} και (b) 2 ^{ου} 40 Gb/s καναλιού στην έξοδο του EAM, και (c) καμπύλες BER.	124
Εικόνα 3.17: Ο δέκτης 100 Gb/s που αποτελείται από pin-αποπολυπλέκτη και χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του 100G πομπού.	125
Εικόνα 3.18: Πειραματική διάταξη βασισμένη στη χρήση του 100 Gb/s pin δέκτη-αποπολυπλέκτη. Οι αναγραφόμενες συχνότητες και οι ρυθμοί των δεδομένων αντιστοιχούν σε λειτουργία 80 Gb/s και κλιμακώνονται ανάλογα σε 90 και 100 Gb/s.	126
Εικόνα 3.19: Διαγράμματα οφθαλμού των ηλεκτρικών σημάτων στην έξοδο του ολοκληρωμένου δέκτη μετά την ανίχνευση και την 1:2 ηλεκτρονική αποπολυπλέξια: (a) 40 Gb/s ηλεκτρικό κανάλι που αντιστοιχεί σε 80 Gb/s οπτικό σήμα, και (b) 50 Gb/s ηλεκτρικό κανάλι που αντιστοιχεί σε 100 Gb/s οπτικό σήμα.	126
Εικόνα 3.20: RF-φάσματα των σημάτων ηλεκτρικού ρολογιού στην έξοδο του διπλασιαστή συχνότητας (a) 40 GHz, και (b) 50 GHz. Αυτά τα σήματα ρολογιού τροφοδοτούσαν το κύκλωμα MUX-DRV του πομπού και το κύκλωμα αποπολυπλέκτη του ολοκληρωμένου δέκτη όταν λειτουργούσε σε 80 ή 100 Gb/s, αντίστοιχα. Η διαφορά μεταξύ της δεύτερης και της θεμελιώδους αρμονικής είναι μικρότερη από 12,5 dB και στις δύο περιπτώσεις.	126
Εικόνα 3.21: Αξιολόγηση BER του οπτικού πομπού 100 Gb/s σε: (a) 80 Gb/s, και (b) 100 Gb/s οπτικού σήματος. Και στις δύο περιπτώσεις, τα κανάλια 1-4 αντιστοιχούν στο πρώτο 40 ή 50 Gb/s κανάλι και τα κανάλια 5-8 στο δεύτερο αντίστοιχα.	127
Εικόνα 3.22: Σενάριο δικτύωσης και προτεινόμενη πειραματική διάταξη για τη χρήση του υπό εξέταση οπτικού πομπού 100 Gb/s μέσα σε ένα δίκτυο εντός υπολογιστικού κέντρου βασισμένο σε ένα δακτύλιο τύπου μεταγωγής οπτικού κυκλώματος. Ο δακτύλιος διασυνδέει τους ψηφιακούς διακόπτες που βρίσκονται στην κορυφή των μεμονωμένων σημείων DC PODs χρησιμοποιώντας συνδυασμό πομποδεκτών 40 και 100 Gb/s.	128
Εικόνα 4.1: Ιδέα ευέλικτου πλέγματος πάνω στο οπτικό φάσμα.	132
Εικόνα 4.2: Ιδέα sliceable Bandwidth Variable Transponders (S-BVT).	133
Εικόνα 4.3: Εξέλιξη λειτουργίας οπτικού αναμεταδότη.	133
Εικόνα 4.4: Διάγραμμα κατανομής των κόμβων των δακτυλίων του μητροπολιτικού περιφερειακού δικτύου WDM της Telecom Italia.	136
Εικόνα 4.5: Μικρής απόστασης δακτύλιοι A και B συνολικού μήκους 30.5 km και 61 km αντίστοιχα και με 3 κόμβους έκαστος.	136
Εικόνα 4.6: Μεσαίας απόστασης δακτύλιος C συνολικού μήκους 143.4 km με 5 κόμβους και μεγάλης απόστασης δακτύλιος D συνολικού μήκους 320,8 km με 7 κόμβους.	137
Εικόνα 4.7: Μεγάλης απόστασης δακτύλιος E συνολικού μήκους 647.2 km με 7 κόμβους.	137
Εικόνα 4.8: Πιθανή εξέλιξη του περιφερειακού μητροπολιτικού οπτικού δικτύου μεταφοράς σε βραχυπρόθεσμο/μεσοπρόθεσμο διάστημα.	138
Εικόνα 4.9: Πιθανή εξέλιξη του περιφερειακού μητροπολιτικού οπτικού δικτύου μεταφοράς σε μεσοπρόθεσμο/μακροπρόθεσμο διάστημα.	139
Εικόνα 4.10: Αρχιτεκτονική της υποδομής υπολογιστικών κέντρων δεδομένων.	140
Εικόνα 4.11: Εξέλιξη της αρχιτεκτονικής της υποδομής υπολογιστικών κέντρων δεδομένων.	141
Εικόνα 4.12: Σχηματικά διαγράμματα των προτεινόμενων οπτικών πομπών και δεκτών πολλαπλών ροών (modules 1-4).	144
Εικόνα 4.13: Σχηματικό διάγραμμα του προτεινόμενου οπτικού πομπού και πομποδέκτη πολλαπλών ροών με χωρητικότητα έως 1.5 Tb/s.	145
Εικόνα 4.14: Γενική αρχιτεκτονική του αναμεταδότη πολλαπλών ροών υλοποιούμενου από τις προτεινόμενες συσκευές πολλαπλών ροών.	149
Εικόνα 4.15: Βασικές λειτουργίες που πρέπει να υποστηρίζουν τα ευέλικτα οπτικά δίκτυα.	152
Εικόνα 4.16: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας WSS.	153
Εικόνα 4.17: Γενική δομή ROADM WSS με C, CD και CDC Add/Drop μπλοκ.	154
Εικόνα 4.18: NxM WSS A/D μπλοκ υλοποιημένο από ένα 1xN και ένα 1xM WSS.	154
Εικόνα 4.19: Contention συμπεριφορά των A/D μπλοκ υλοποιημένα από δύο 1xN WSS στοιχεία (αριστερό μέρος) και ολοκληρωμένο NxM contentionless WSS στοιχείο (δεξιό μέρος).	155
Εικόνα 4.20: Γενική αρχιτεκτονική ευέλικτων πομποδεκτών πολλαπλών ροών μαζί με το τμήμα του OTN.	156
Εικόνα 4.21: Επισκόπηση της γενικής διαστρωμάτωσης OTN (ITU-T G.872 [240]).	156

Εικόνα 4.22: Καθεστώς χαρτογράφησης και πολυπλεξίας των σημάτων OTN συμπεριλαμβανομένων των σημάτων πέραν 100G.....	158
Εικόνα 4.23: Χαρτογράφηση μήκους κύματος Lambda ενός OTUCn (Lambda Mapping of OTUCn).....	158
Εικόνα 4.24: Ολοκληρωμένη δομή πολυπλεξίας και χαρτογράφησης των OTCn σε κανάλια μέσων.	159
Εικόνα 4.25: Παράδειγμα κατακερματισμού ενός πλαισίου OTUCn σε υπο-πλαίσια ($n \times 100G$ στα αριστερά ή με μεγαλύτερη διακριτικότητα στα δεξιά).....	160
Εικόνα 4.26: Παράδειγμα κατανομής ενός πλαισίου OTUCn σε λογικές γραμμές. (a) Περίπτωσης ενός OTUCn FEC (μονό " $n \times 100G$ " FEC). (b) Περίπτωση 'ή'xOTUC1 ανεξάρτητου FEC ανά 100G κανάλι.	160
Εικόνα 4.27: Προτεινόμενος οπτικός πομποδέκτης βασισμένος στην αρχιτεκτονική ενός ή δυο οπτικών φορέων (single and dual carrier architecture).....	162
Εικόνα 4.28: Προτεινόμενος οπτικός πομποδέκτης βασισμένος στην αρχιτεκτονική δύο ή τεσσάρων οπτικών φορέων (dual and quad carrier architecture).....	162
Εικόνα 4.29: Αρχιτεκτονική μονάδας οπτικής διανομής πολλαπλών ροών: χωρίς φίλτρο (αριστερά) ή με φίλτρο (δεξιά) το τμήμα του πομπού.	163
Εικόνα 4.30: Αρχιτεκτονική μονάδας οπτικής διανομής πολλαπλών ροών: χωρίς φίλτρο (αριστερά) ή με φίλτρο (δεξιά) το τμήμα του δέκτη.....	163
Εικόνα 4.31: Αρχιτεκτονική μονάδας οπτικής διανομής πολλαπλών ροών αξιοποιώντας WSSs (είτε σταθερού είτε ευέλικτου πλέγματος) για τη δρομολόγηση των οπτικών ροών.	164
Εικόνα 4.32: Αρχιτεκτονική μονάδας οπτικής διανομής πολλαπλών ροών αξιοποιώντας WSSs ευέλικτου πλέγματος για τη συνάθροιση υπερ-καναλιών και τη δρομολόγηση των οπτικών ροών.....	165
Εικόνα 4.33: Αρχιτεκτονική SDN και η επέκτασή της προς τα κάτω στο στρώμα οπτικής μεταφοράς που βασίζεται στη χρήση των προτεινόμενων ευέλικτων πομποδεκτών και του SDO agent. Η βόρεια επικοινωνία (northbound) προς τον ελεγκτή SDN πραγματοποιείται μέσω της διασύνδεσης SDN (με βάση το εκτεταμένο Openflow) και της νότιας επικοινωνίας (southbound) προς τον οπτικό εξοπλισμό μεταφοράς (ευέλικτοι προτεινόμενοι πομποδέκτες και στοιχεία WSS) επιτυγχάνεται μέσω της διεπαφής SDO και του SDO agent.	166
Εικόνα 4.34: Αρχιτεκτονική της διεπαφής SDO και τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία του: Η μονάδα επεξεργασίας δεδομένων αποτελείται από τον α) επεξεργαστή OTN για τη χαρτογράφηση και την ενθυλάκωση των δεδομένων των πελατών σε πλαίσια OTN, β) τον διανομέα ροής για την οργάνωση των δεδομένων με τις κατάλληλες ροές, γ) τον προκωδικοποιητή για την παραγωγή των κατάλληλων δεδομένων I και Q για την οδήγηση των προτεινόμενων πομπών και δ) της πλακέτας FPGA για την παραγωγή των αντίστοιχων ηλεκτρικών δεδομένων στον επιλεγμένο ρυθμό μετάδοσης. Το λογισμικό του SDO agent ελέγχει άμεσα το μήκος κύματος των ολοκληρωμένων πηγών λείζερ και ρυθμίζει το καθεστώς λειτουργίας των ευέλικτων πομπών για τη δημιουργία μονών ή πολλαπλών οπτικών ροών. Επιπλέον, ελέγχει τον αριθμό των σημάτων στις εισόδους των ολοκληρωμένων SPDACs με βάση το επιλεγμένο σχήμα διαμόρφωσης και επικοινωνεί με τη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων μέσω ενός συνόλου γενικών παραμέτρων λειτουργίας και με την πλακέτα FPGA για τον έλεγχο του επιλεγμένου ρυθμού συμβόλων.	167
Εικόνα 4.35: Καθεστώς λειτουργίας για την επίδειξη της λειτουργίας πολλαπλών ροών υποστηριζόμενα από την προτεινόμενη συσκευή 3. Ο SDO agent διασυνδέεται άμεσα με τους θερμο-οπτικούς διακόπτες των παθητικών πολυμερικών δομών (polyboards) και με τα ηλεκτρόδια των φραγμάτων περίθλασης Bragg των InP chips κέρδους της μονάδας πομπού και επίσης με τα ευέλικτα WSSs για τη ρύθμιση του προτεινόμενου οπτικού κόμβου.	168
Εικόνα 4.36: Back-end και front-end συσκευές μονάδας O. (a-b) Συσκευασμένες συσκευές και οι αντίστοιχες μάσκες σχεδίασης τους (c-d).....	169
Εικόνα 4.37: (a) Ιεραρχία OTN και (b) τύποι OTU με τους αντίστοιχους ονομαστικούς ρυθμούς μετάδοσης (ITU-T G.709).	170
Εικόνα 4.38: Δομή πολλαπλού πλαισίου OTN.	170
Εικόνα 4.39: Επεξεργασία FEC βασισμένη στους κώδικες (255,239) Reed Solomon.....	171
Εικόνα 4.40: Διόρθωσης σφαλμάτων των κατεστραμμένων συμβόλων μέσω των κωδικών RS (255,239) του FEC. Η μεταβλητή numerrors δείχνει τον αριθμό των διορθωμένων σφαλμάτων ανά μεταδιδόμενη υποσειρά OTU μιας δομής πολλαπλού 2-πλαισίου. Η έξοδος -1 αντιστοιχεί σε ένα σφάλμα αποκωδικοποίησης στην περίπτωση που ο αριθμός ή τα καταστραμμένα συμβόλων είναι μεγαλύτερα από τις δυνατότητες του FEC.	172
Εικόνα 4.41: (a) Χαρτογράφηση OTN και αρχές πολυπλεξίας, (b) πολυπλεξία ενός ODU1 σε ODU2 μέσω ODTUG2. [ITU-T G.709 Rec [242]].....	173
Εικόνα 4.42: Χαρτογράφηση OTN και εφαρμογή πολυπλεξίας για την παραγωγή πολυπλεγμένου σήματος 400G OTU5.	174
Εικόνα 4.43: Διάγραμμα λειτουργίας του διανομέα ροής. Κάθε αίτηση πελάτη εισέρχεται στο διανομέα ροής υπό τη μορφή ενθυλακωμένων δεδομένων OTU, τα οποία κατόπιν υποβάλλονται σε επεξεργασία με βάση τον αριθμό των οπτικών φερόντων και του σχήματος πολυπλεξίας πόλωσης της αντίστοιχης οπτικής ροής, ώστε να παράγουν τις κατάλληλες ροές δεδομένων πελάτη που θα οδηγήσουν τα IQ MZMs των ευέλικτων προτεινόμενων οπτικών μονάδων. Το διάγραμμα δείχνει τα βήματα που πρέπει να ακολουθούνται για τις υποστηριζόμενες περιπτώσεις λειτουργίας για την προτεινόμενη μονάδα πομπού 3.....	174

Εικόνα 4.44: Αρχή λειτουργίας του προκωδικοποιητή για τη δημιουργία των κατάλληλων εισερχόμενων μοτίβων δεδομένων που θα τροφοδοτήσουν τα SPDACs των προτεινόμενων ευέλικτων μονάδων για την παραγωγή οπτικών ροών με σχήμα διαμόρφωσης: (a) QPSK, (b) 16QAM και (c) 64QAM.	175
Εικόνα 4.45: (a) Σχηματική πλατφόρμα κοινής προσομοίωσης Matlab-VPI, (b) υλοποίηση προτεινόμενου πομπού 3 στο πρόγραμμα VPI TransmissionMaker.	176
Εικόνα 4.46: Ρύθμιση παραμέτρων για την κοινή προσομοίωση Matlab-VPI μέσω των αρχείων Macros του VPI. ...	177
Εικόνα 4.47: Παράμετροι κοινής προσομοίωσης που εισάγονται από το χρήστη μέσω του παραγόμενου αρχείου Macro. Το καθεστώς λειτουργίας έχει οριστεί στη περίπτωση 1.	178
Εικόνα 4.48: (a) Ηλεκτρικά σήματα με προπαραμόρφωση στο Matlab για 50 GBaud QPSK, 16QAM and 64QAM, και (b) η αντίστοιχη χαρτογράφηση τους από bits σε σύμβολο.	178
Εικόνα 4.49: Ο αναμεταδότης FPGA της Xilinx (Xilinx XC7VH580T-G2HCG1155E) με 24x13.1 Gb/s (πομποδέκτες GTH) και 8x28.05 Gb/s (πομποδέκτες GTZ) γραμμές και δυνατότητα παραγωγής διαφόρων πρωτοκόλλων επικοινωνίας.	179
Εικόνα 4.50: Δοκιμαστικά σήματα που παράγονται από την πλακέτα FPGA. Εδώ απεικονίζονται τρία σήματα δεδομένων 28.05 Gb/s, χρησιμοποιώντας πομποδέκτες GTZ και ένα ρολόι 14.025 GHz.	179
Εικόνα 4.51: Απεικονιστικό διάγραμμα του κυκλώματος 3-bit Selector-PowerDAC.	181
Εικόνα 4.52: (a) Διάταξη και (b) μικροφωτογραφία του κυκλώματος SPDAC3B.	182
Εικόνα 4.53: Διαδικασία εγγραφής και ανάγνωσης DRP.	184
Εικόνα 4.54: (a) DRP controller εντός του design και χρήση λογικής με βάση τις ανάγκες του χρήστη και (b) εσωτερικό μπλοκ διάγραμμα του DRP controller.	185
Εικόνα 4.55: Σχηματικό διάγραμμα drp controller μετά το στάδιο της σύνθεσης στο vivado.	189
Εικόνα 4.56: Σχηματική απεικόνιση της υλοποιημένης διάταξης txrd_srdac2 σε επίπεδο κυκλωμάτων.	191
Εικόνα 4.57: Εσωτερικά κυκλώματα του UART controller μετά τη σύνθεση.	191
Εικόνα 4.58: Αντικείμενο που δημιουργείται από την υπομονάδα αποστολής (Transmit instance).	193
Εικόνα 4.59: Αντικείμενο που δημιουργείται από την υπομονάδα αποδέκτη (Receive instance).	194
Εικόνα 4.60: Ηλεκτρικά σήματα στις εξόδους των πομπών: (a) ένας ενεργός πομπός δεδομένων 12.5 Gb/s και ρολόι 6.25 GHz, (b) τρεις ενεργοί πομποί 12.5 Gb/s και ρολόι 6.25 GHz, (c) δύο ενεργοί πομποί 6.25 Gb/s και ρολόι 3.125 GHz και (d) τέσσερις ενεργοί πομποί 6.25 Gb/s και ρολόι 3.125 GHz.	198
Εικόνα 4.61: Έλεγχος οπτικού εξοπλισμού μεταφοράς μέσω του λογισμικού SDO agent αναπτυγμένο στο LabVIEW: (a) πρόδρομος μονάδα 0, (b) Finisar WSSs: 1x9 Flexgrid (αριστερά) και 1x4 100 GHz σταθερού πλέγματος (δεξιά) και (c) έξοδοι πλακέτας FPGA συνδεδεμένοι στις εισόδους των δύο SPDACs.	199
Εικόνα 4.62: Πρόσοψη του αναπτυγμένου SDO agent σε περιβάλλον LabVIEW.	200
Εικόνα 4.63: Πρόσοψη διεπαφής SDO agent: Επιλογή εξοπλισμού (αριστερά) και το παράθυρο διαλόγου αναφοράς λαθών (δεξιά).	201
Εικόνα 4.64: Πρόσοψη διεπαφής SDO agent: Πλαίσιο επιλογής καθεστώτος λειτουργίας.	201
Εικόνα 4.65: Πρόσοψη διεπαφής SDO agent: (Αριστερά) πλαίσιο επιλογής καναλιού ITU μαζί με παράθυρα μικρο-ρύθμισης ρευμάτων Bragg και οπτικής φάσης και πλαίσιο αναφορά κατάστασης WSS. (Δεξιά) Πίνακες χαρτογράφησης των ρευμάτων, των καναλιών και των μηκών κύματος των δύο λέιζερ με επιλεξιμότητα ως προς το μήκος κύματος.	202
Εικόνα 4.66: Πρόσοψη διεπαφής SDO agent: αναπαράσταση ευέλικτου οπτικού πομπού 3.	203
Εικόνα 4.67: Πρόσοψη διεπαφής SDO agent: Λυχνίες ένδειξης ενεργοποιημένων θυρών των στοιχείων WSS στις εξόδους του προτεινόμενου πομπού 3.	203
Εικόνα 4.68: Πρόσοψη διεπαφής SDO agent: Αναφορά κατάστασης της κεντρικής μονάδας ILX.	204
Εικόνα 4.69: Απεικονιστική αναπαράσταση λειτουργίας του SDO με βάση το προτεινόμενο πομπό 3 για τα τέσσερα καθεστώτα λειτουργίας.	205
Εικόνα 4.70: Πρόσοψη διεπαφής SDO agent: πλαίσιο επιλογής 16 δυνατών καταστάσεων λειτουργίας του FPGA σχετικά με το σχήμα διαμόρφωσης και το ρυθμό μετάδοσης των παραγόμενων οπτικών ροών του πομπού 3.	205
Εικόνα 5.1: Σχηματική απεικόνιση του πομπού πολλαπλών οπτικών ροών βασισμένος σε δύο οπτικά chips (οπίσθια και εμπρόσθια μονάδα 0) κατασκευασμένα στην παθητική πολυμερική πλατφόρμα για την δημιουργία, τη δρομολόγηση και το χειρισμό της πόλωσης των οπτικών ροών. Η διάταξη αντιστοιχεί σε μια ολοκληρωμένη εκδοχή του πομπού, όπου μια τετραπλή συστοιχία MZM τοποθετείται μεταξύ των πολυμερικών δομών για να σχηματίσουν δύο IQ διαμορφωτές.	212
Εικόνα 5.2: Πολυμερικός θερμο-οπτικός μεταγωγέας. Όταν δεν διαρρέεται από ρεύμα (ΚΛΕΙΣΤΟ), το φως κυματοδηγείται εξίσου και από τους δυο κλάδους. Όταν ένας κλάδος διαρρέεται από ρεύμα (ΑΝΟΙΧΤΟ), το φως κυματοδηγείται από τον αντίθετο κλάδο.	213
Εικόνα 5.3: Διάταξη οπτικού δρομολογητή βασισμένου σε πολυμερικούς θερμο-οπτικούς μεταγωγείς (οπίσθια μονάδα 0 - back-end PolyBoard).	214
Εικόνα 5.4: Διάταξη μπροστινού μέρους οπτικού δρομολογητή παραγωγής οπτικών σημάτων μονής ή διπλής πόλωσης βασισμένου σε πολυμερικούς θερμο-οπτικούς μεταγωγείς (εμπρόσθια μονάδα 0 - front-end PolyBoard).	214

Εικόνα 5.5: Φωτογραφία συσκευής (<i>back-end PolyBoard</i>) χωρίς το κάλυμμα της και κοντινή φωτογραφία του πολυμερικού <i>chip</i> . Τα επιμέρους στοιχεία φαίνονται με τα βέλη.	215
Εικόνα 5.6: Φωτογραφία συσκευής (<i>front-end PolyBoard</i>) χωρίς το κάλυμμα της και κοντινή φωτογραφία του πολυμερικού <i>chip</i> . Τα επιμέρους στοιχεία φαίνονται με τα βέλη.	215
Εικόνα 5.7: Πειραματική διάταξη για το χαρακτηρισμό του πολυμερικού δρομολογητή.	216
Εικόνα 5.8: Φάσματα εξόδου για διαφορετικά μήκη κύματος σε πλέγμα 100 Ghz.	217
Εικόνα 5.9: (α) Πειραματική διάταξη για την δοκιμή της μετατόπιση του μήκος κύματος των λέιζερ των οπτικών πομπών, και (b) η διάταξη σχεδίασης του <i>wavelength locker</i>	219
Εικόνα 5.10: Διάταξη για την δοκιμή της ευελιξίας στο πεδίο του σχήματος διαμόρφωσης και του ρυθμού μετάδοσης των οπτικών πομπών πολλαπλών ροών με βάση τη μονάδα πομπού 3.	220
Εικόνα 5.11: (Αριστερά) Ευέλικτο οπτικό φίλτρο (WSS) <i>Fixgrid 100GHz 1x4</i> και (δεξιά) <i>WSS Flexgrid 1x9</i>	221
Εικόνα 5.12: Πειραματική οπτική διάταξη για την αξιολόγηση οπτικών συσκευών μετάδοσης που υποστηρίζουν προηγμένα σχήματα διαμόρφωσης μέχρι 28 Gbaud.	222
Εικόνα 5.13: (α, c) Διάγραμμα οφθαλμού οπτικού σήματος QPSK και 16QAM 28 Gbaud και (b) τα αντίστοιχα διαγράμματα αστερισμού μετά από ψηφιακή επεξεργασία σήματος.	223
Εικόνα 5.14: Πομποί πολλαπλών ροών μέσα σε οπτικό κόμβο συνδεδεμένοι με διεπαφές δεδομένων στην ψηφιακή πλευρά και τα δύο WSSs στο οπτικό κομμάτι. Κάθε πομπός μπορεί να υποστηρίξει λειτουργία είτε ενός ή δύο οπτικών ροών. Ο SDO agent ελέγχει τον αριθμό, τον τύπο, το μήκος κύματος και την κατεύθυνση των ροών ελέγχοντας τις παραμέτρους του πομπού και των δύο μονάδων WSS.	224
Εικόνα 5.15: (α) Διάταξη μάσκας του οπίσθια (<i>back-end</i>) και μπροστινού (<i>front-end</i>) <i>polyboard</i> και η διασύνδεση μεταξύ των αντίστοιχων συσκευών μέσω δύο εμπορικών IQMs. Συσκευασμένες διατάξεις για την περίπτωση: (b) <i>back-end</i> , και (c) <i>front-end PolyBoards</i>	224
Εικόνα 5.16: (α) Φάσμα συντονισμού του ECL. (b) Συνάρτηση μεταφοράς στη θύρα μετάδοσης και ανάκλασης του PBS για το <i>front-end polyboard</i> για ρυθμούς TE και TM. Μετάδοση στα 1550 nm στο (c) άνω, και (d) το κάτω σκέλος του Y-συζεύκτη ως συνάρτηση της ηλεκτρικής ισχύος στο κάτω ηλεκτρόδιο.	225
Εικόνα 5.17: Πειραματική διάταξη 28 Gbaud για την επίδειξη της προτεινόμενης υλοποίησης του πομπού πολλαπλών ροών εντός τεσσάρων διαφορετικών δικτυακών σεναρίων.	226
Εικόνα 5.18: Οπτικά φάσματα στην έξοδο του πομπού για τα υπό εξέταση σενάρια 1-4.	227
Εικόνα 5.19: (Αριστερά) Διαγράμματα αστερισμού μετά από μετάδοση 100 km που αντιστοιχούν στα υπό μελέτη σενάρια 1-4. (Δεξιά) Πραγματικές μετρήσεις BER και εκτιμήσεις BER βασισμένες στο EVM για σήματα B2B και για μεταδιδόμενα σήματα (100 km).	228
Εικόνα 6.1: InP-DHBT 2:1-επιλογέας: (α) διάγραμμα κυκλώματος, (b) μικροφωτογραφία <i>chip</i> 1.2x1.5-mm ² , (c) τα διαγράμματα οφθαλμού εξόδου NRZ-OOK στα 140 και 204 Gb/s μετρούμενα με τις άκρες του δοκιμαστικού ακροδέκτη στο κύκλωμα (Tx) και με τα ανακτώμενα σήματα μετά την εξισορρόπηση από BtB (Rx).	234
Εικόνα 6.2: Χαρτης πορείας του πρότυπου Ethernet πέραν του 400 Gb/s [260].	235
Εικόνα 6.3: Προσέγγιση για τη (α) δημιουργία (Tx) και την (b) ανίχνευση (Rx) ρυθμών συμβόλων 128 Gbaud.	236

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Βασικές οπτικές ιδιότητες των ηλεκτρο-οπτικών υλικών M1 και M3 της GigOptix.	60
Πίνακας 2: Αριθμός των servers, μεταγωγέων και διασυνδέσεων σε κάθε cluster του υπολογιστικού κέντρου τύπου fat-three.	88
Πίνακας 3: Συνολικός Αριθμός των servers, μεταγωγέων και διασυνδέσεων σε ένα υπολογιστικό κέντρο.	88
Πίνακας 4: Τεχνολογία εφαρμογής, αριθμός ινών, απόσταση μετάδοσης και κατανάλωση ισχύος των συνηθέστερων χρησιμοποιούμενων βυσματούμενων μονάδων [186, 187, 188, 189, 190, 191].	105
Πίνακας 5: Αξιολόγηση διαγραμμάτων οφθαλμού των παραγόμενων οπτικών σημάτων στα 80, 90 and 100 Gb/s.	124
Πίνακας 6: Λίστα των δακτυλίων αναφοράς και οι κατηγορίες που αντιπροσωπεύουν.	136
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά στοιχεία των σεναρίων χρήσης στην περίπτωση των DCs.	141
Πίνακας 8: Απαιτήσεις πομποδεκτών για διαφορετικά σενάρια χρήσης.	142
Πίνακας 9: Διαμόρφωση πομποδεκτών για ελάχιστη κίνηση 100 Gb/s.	142
Πίνακας 10: Διαμόρφωση πομποδεκτών για ελάχιστη κίνηση 400 Gb/s.	143
Πίνακας 11: Διαμόρφωση πομποδεκτών για ελάχιστη κίνηση 1 Tb/s.	143
Πίνακας 12: Σύνοψη των βασικών χαρακτηριστικών των προτεινόμενων πομποδεκτών πολλαπλών ροών.	146
Πίνακας 13: Πλαίσια εφαρμογής βάση της απόστασης και του μέγιστου σχήματος διαμόρφωσης.	148
Πίνακας 14: Μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες απαιτήσεις για πομποδέκτες ή αναμεταδότες για διαφορετικά πλαίσια εφαρμογής του δικτύου.	149
Πίνακας 15: Πομποδέκτες 100G σταθερού πλέγματος συμβατοί για συμπλέγματα DC και μητροπολιτικά δίκτυα.	150
Πίνακας 16: Πομποδέκτες 400G που απαιτούν ευέλικτο πλέγμα συμβατοί για συμπλέγματα DC και μητροπολιτικά δίκτυα.	151
Πίνακας 17: Πομποδέκτες 100G σταθερού πλέγματος συμβατοί με VDCN και εθνικά δίκτυα.	151
Πίνακας 18: Πομποδέκτες 400G για εφαρμογή σε VDCN και εθνικά δίκτυα.	151
Πίνακας 19: Πομποδέκτες 1 Tb/s απαιτώντας ευέλικτο πλέγμα για εφαρμογή σε ηπειρωτικά δίκτυα.	152
Πίνακας 20: Πλαίσιο OTN και ρυθμοί μετάδοσης OTUk (k=1,2,3,4), όπως έχουν τυποποιηθεί σήμερα.	157
Πίνακας 21: Σενάρια χρήσης και ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων.	183
Πίνακας 22: Παράμετροι καθορισμού συχνότητας ρολογιού QPLL.	185
Πίνακας 23: Τιμές τάσης και ρεύματος για τα ενεργά στοιχεία του πολυμερικού δρομολογητή.	216
Πίνακας 24: Χαρακτηρισμός θερμο-οπτικού μεταγωγέα 2.	217
Πίνακας 25: Χαρακτηρισμός θερμο-οπτικού μεταγωγέα 1.	217
Πίνακας 28: Χαρακτηρισμός θερμο-οπτικών διακοπών 3 και 4 της front-end συσκευής.	218

Πίνακας Συντμήσεων

A/D	Add/Drop
AG	Administrative Aggregation
A/W	Amber/Watt
ASK	Amplitude Shift Keying
ADC	Analog-to-Digital Converter
APC	Amorphous PolyCarbonate
AR	Anti-Reflection
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BW	BandWidth
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BiCMOS	Bipolar-CMOS
BER	Bit Error Rate
BERT	Bit Error Rate Tester
BIP	Bit-Interleaved Parity
BG	Bragg Grating
CFP	C form Factor Pluggable
CAPEX	Capital Expenditure
cm	centimeter
CPU	Central Processing Unit
Clk	Clock
CWDM	Coarse Wavelength-Division Multiplexing
CDC	Colorless/Directionless/Contentionless
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CLBs	Configurable Logic Blocks
CBR	Constant BitRate
CW	Continuous Wave
CRM	Customer Relationship Management
DC	Data Center
DB	DataBase
dB	decibel
DL	Delay Line
DLI	Delay Line Interferometer
DEMUX	Demultiplexer
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
DPSK	Differential Phase Shift Keying
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DTIAs	Differential Transimpedance Amplifiers
DSP	Digital Signal Processing
DSO	Digital Storage Oscilloscope
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DAC	Digital-to-Analog Converter
DMT	Discrete Multi-Tone
Dm	Dispersion measure
Dw	Dispersion of Waveguide
DFB	Distributed Feedback Laser
DHBT	Double Heterojunction Bipolar Transistor
DRV	Driver

DP-QPSK	Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying
DRP	Dynamic Reconfiguration Port
EON	Elastic Optical Networking
ESE	Elastic Spectral Efficiency
EAM	Electro-absorption Modulator
EPS	electronic packet switching
ETDM	Electronic Time Division Multiplexing
EPIC	Electronic-Photonic Integrated Circuit
EO	Electro-Optic
EDFAs	Erbium Doped Fiber Amplifier
EVM	Error Vector Magnitude
ECLs	External Cavity Laser
ER	Extinction Ratio
FTTH	Fiber To The Home
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSM	Finite-State Machine
Flex-OXC	Flexible Optical Cross Connect
Flex-SEN	Flexible Service Edge Node
FEC	Forward Error Correction
FAS	Frame Alignment Signal
FSR	Free Spectral Range
fD	frequency Doubler
FWHM	Full Width at Half Maximum
GC	Gain Chip
GPIB	General Purpose Interface Bus
GMPLS	Generalized Multi-Protocol Label Switching
Gbaud	Giga baud
GE	Gigabit Ethernet
Gb/s	Gigabit per second
GHz	GigaHertz
GW/h	GigaWatt per hour
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
HR	High-Reflection
InP	Indium Phosphide
LC	inductor-capacitor
IT	Information and Technology
IQ	In-Phase & Quadrature
IL	Insertion Loss
IM-DD	Intensity Modulation - Direct Detection
ITU	International Telecommunication Union
JOH	Justification OverHead byte
kHz	kiloHertz
km	kilometer
LD	Laser Diode
LSB	Least Significant Bit
LCOS	liquid Crystal On Silicon
LiNbO₃	Lithium Niobate
LO	Local Oscillator

LAN	Local-Area Network
LR	Long Reach
LUT	Look-Up Table
MZM	Mach-Zehnder Modulator
Med	Medium Bit
MHz	MegaHertz
MOVPE	MetalOrganic Vapour Phase Epitaxy
MAN	Metropolitan Area Network
μm	micrometer
mW	milliWatt
MSB	Most Significant Bit
MCS	MultiCast Switches
MPO	Multi-fiber Push On
MFAS	MultiFrame Alignment Signal
MMF	MultiMode Fiber
MMI	Multi-Mode Interference
MUX	Multiplexer
MUX-DRV	Multiplexer-driver
MPLS	Multiprotocol Label Switching
3M	Multi-rate, Multi-format, Multi-reach
MSA	Multi-Source Agreement
MZI	MZ Interferometer
nm	nanometer
NEG	Negative
NRZ	Non-Return-to-Zero
OOK	On-Off Keying
OPEX	Operating Expenses
OAM	Operational Administrative and Maintenance
OAM&P	Operations Administration Maintenance and Provisioning
OCh	Optical Channel
ODU	Optical channel Data Unit
OTU	Optical channel Transport Unit
OCS	optical Circuit Switching
ODTUG	optical Data Tributary Unit Group
ODTU	Optical Data Unit Tributary
ODL	Optical Delay Line
OLT	Optical Line Termination
OPS	optical packet switching
OPLL	Optical Phase Locked Loop
OPM	Optical Power Monitoring
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OSA	Optical Spectrum Analyzer
OTH	Optical Transport Hierarchy
OTN	Optical Transport Network
OTSi	Optical Tributary Signal
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PON	Passive Optical Network
PSI	Payload Structure Identifier
PT	Payload Type

PSK	Phase Shift Keying
PS	Phase Shifter
PLL	Phase-Locked Loop
PD	PhotoDiode
PIC	Photonic Integrated Circuit
pm/V	picometer per Volt
ps	picosecond
PLC	Planar Lightwave Circuit
POF	Plastic Optical Fiber
POD	Point of Delivery
POP	Points of Presence
PBC	Polarization Beam Combiner
PBS	Polarization Beam Splitter
PC	Polarization Controller
PM	Polarization Maintaining
PMD	Polarization Mode Dispersion
PR	Polarization Rotator
PMMA	PolyMethyl MethAcrylate
POS	Positive
PSD	Power Spectral Density
PRBS	PseudoRandom Binary Sequence
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PPG	Pulse Pattern Generator
QPLL	Quad Phase-Locked Loop
QSFP	Quad Small-form Factor Pluggable
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RF	Radio Frequency
RAM	Random access memory
ROM	Read-Only Memory
Rx	Receiver
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
RIN	Relative Intensity Noise
RZ	Return-to-Zero
SEM	Scanning Electron Microscopic
SPDAC	Selector Power DAC
SON	Self-organizing Networks
SERDES	Serializer/Deserializer
SR	Short Reach
SMSR	Side-Mode Suppression Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
SOI	Silica-On-Silicon
Si	Silicon
SiGe	Silicon Germanium
SE	Single-Ended
S-BVT	Sliceable Bandwidth Variable Transponder
SFP	Small-form Factor Pluggable
SDO	Software Defined Optics
SDN	Software-Defined Networking
SE	Spectral Efficiency

SSS	Spectrum Selective Switch
SSMF	Standard Single-Mode Fiber
SONET/SDH	Synchronous Optical NETWORKing/Synchronous Digital Hierarchy
TCM	Tandem Connection Monitoring
TEC	Temperature Controller
Tb/s	Terabit per second
THz	TeraHertz
TOC	Thermo-Optic Coefficient
TOS	Thermo-Optic Switch
TO	Thermo-Optical
Tx	Transmitter
TE	Transverse Electric
TM	Transverse Magnetic
TG	Tributary Group
UTFE	Ultra-Thin Film Elements
UV	UltraViolet
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VOA	Variable Optical Attenuator
VCSELS	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
VSB	Vestigial Sideband
VDCN	Virtual Data Network Center
VM	Virtual Machine
Vpp	Voltage peak-to-peak
WSC	Warehouse Scale Computer
W/m/K	Watt per meter per Kelvin
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WSS	Wavelength Selective Switch
WAN	Wide Area Network

Σύντομη Ιστορία των Τηλεπικοινωνιών

Η σύγχρονη μορφή της επικοινωνίας εντοπίζεται από την έλευση του τηλέγραφου στα μέσα του δέκατου ένατου αιώνα, κατά τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικά σήματα για τη μετάδοση μηνυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις και παρουσιάστηκε μεγάλη ανάπτυξη στις ΗΠΑ και την Ευρώπη [1]. Η ηλεκτρική μετάδοση κυριάρχησε από τότε στον τρόπο επικοινωνίας. Αργότερα ανακαλύφθηκε το τηλέφωνο, το οποίο μεταδίδει τη φωνή σε μεγάλες αποστάσεις μετατρέποντάς την σε ηλεκτρικό σήμα. Βέβαια, εκτός από το περιορισμένο εύρος ζώνης, τα ηλεκτρικά καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν ως μέσο μετάδοσης είχαν απώλειες έως και 10 dB/km απαιτώντας αναμεταδότες σήματος σε κοντινές αποστάσεις, καθιστώντας το σύστημα δαπανηρό ως προς τη λειτουργία του [2]. Αντίθετα, η ασύρματη επικοινωνία βασίζεται στη χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων χωρίς την απαίτηση ύπαρξης μέσου μετάδοσης και εξελίχθηκε επίσης σε μεγάλο βαθμό για την εκπομπή ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών σημάτων. Η επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων με ηλεκτρομαγνητικά κύματα απαιτεί συνθήκες ορατότητας και επομένως η εφικτή απόσταση περιορίζεται από την καμπυλότητα της γης (περίπου 30 χλμ.), χωρίς την ύπαρξη άλλων εμποδίων (π.χ. κτίρια, βουνά κλπ.). Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 προβλέφθηκε ότι οι δορυφόροι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ασύρματη επικοινωνία [3]. Επομένως, η δορυφορική επικοινωνία κατέστη στο κέντρο της προσοχής, καθώς ένας γεωστατικός δορυφόρος μπορεί να παρέχει κάλυψη (σήματα λήψης και μετάδοσης) εντός της μισής φάσης της γης, ενώ ενδεχομένως να διατηρεί ένα σταθερό αποτύπωμα στην υδρόγειο. Οι πιο πρόσφατοι εμπορικοί δορυφόροι της σημερινής εποχής παρέχουν διακίνηση δεδομένων 140 Gb/s [4].

Το προϊόν του ρυθμού μετάδοσης (product-B) σε σχέση με την απόσταση (bit-rate distance-L) B·L των συστημάτων μετάδοσης στη δεκαετία του 1960 περιοριζόταν μόνο σε 100 Mb/s·km και διαπιστώθηκε ότι το BL μπορεί να αυξηθεί μερικές φορές χρησιμοποιώντας οπτικά κύματα [2]. Το 1960, εφευρέθηκε λέιζερ που θα χρησίμευε ως σύμφωνη οπτική πηγή (αντίγραφο του ταλαντωτή στην περιοχή RF) για μετάδοση πληροφορίας [5]. Το 1966, οι K. C. Kao et al. έδειξαν ότι μια διηλεκτρική ίνα με 1% υψηλότερο δείκτη διάθλασης από το περιβάλλον του μπορεί να χρησιμεύσει ως ένας οπτικός κυματοδηγός, ωστόσο οι απώλειες των υλικών που ερευνηθήκαν ήταν πολύ υψηλές [6]. Το 1970 οι επιστήμονες στο Corning Glass Works ανέπτυξαν την πρώτη μονότροπη οπτική ίνα χαμηλής απώλειας με εξασθένηση <20 dB/km εμποτίζοντας τιτάνιο σε πυρήνα γυαλιού πυριτίου (silica glass). Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, απέφερε τη δυνατότητα να μεταδίδει 65000 φορές περισσότερες πληροφορίες σε σχέση με το σύρμα χαλκού [7]. Η συνεχιζόμενη έρευνα για βελτιωμένη κατασκευή ινών είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της εξασθένησης και το 1978 το NTT δημιούργησε μονότροπη οπτική ίνα με συντελεστή εξασθένησης μόλις 0.2 dB/km σε μήκος κύματος 1550 nm [8]. Η πρώτη μη πειραματική σύνδεση με ίνες πραγματοποιήθηκε το 1975 στη Βρετανία. Μετά από δύο χρόνια, η πρώτη ζωντανή τηλεφωνική κλήση μεταδόθηκε μέσω οπτικών ινών στις ΗΠΑ. Η χαμηλή απώλεια των οπτικών ινών οδήγησε σε αυξημένη απόσταση τοποθέτησης των αναμεταδοτών (60-70 χλμ.) Κατ' επέκταση η χρήση οπτικών ινών για την μετάδοση τηλεφωνικών σημάτων αυξήθηκε εκτεταμένα στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Το πρώτο διατλαντικό οπτικό καλώδιο (TAT-8) αναπτύχθηκε το 1988 και μετέδιδε ταυτόχρονα 40000 τηλεφωνικά κανάλια μεταξύ ΗΠΑ, Βρετανίας και Γαλλίας [9]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτά τα συστήματα, απαιτείται η αναγέννηση του ηλεκτρικού σήματος από τους περιοδικούς αναμεταδότες, δεδομένου ότι η δυνατότητα ενίσχυσης σήματος στον οπτικό τομέα δεν ήταν διαθέσιμη. Η δυνατότητα αναγέννησης των ηλεκτρικών αναμεταδοτών περιοριζόταν μόνο σε ένα κανάλι.

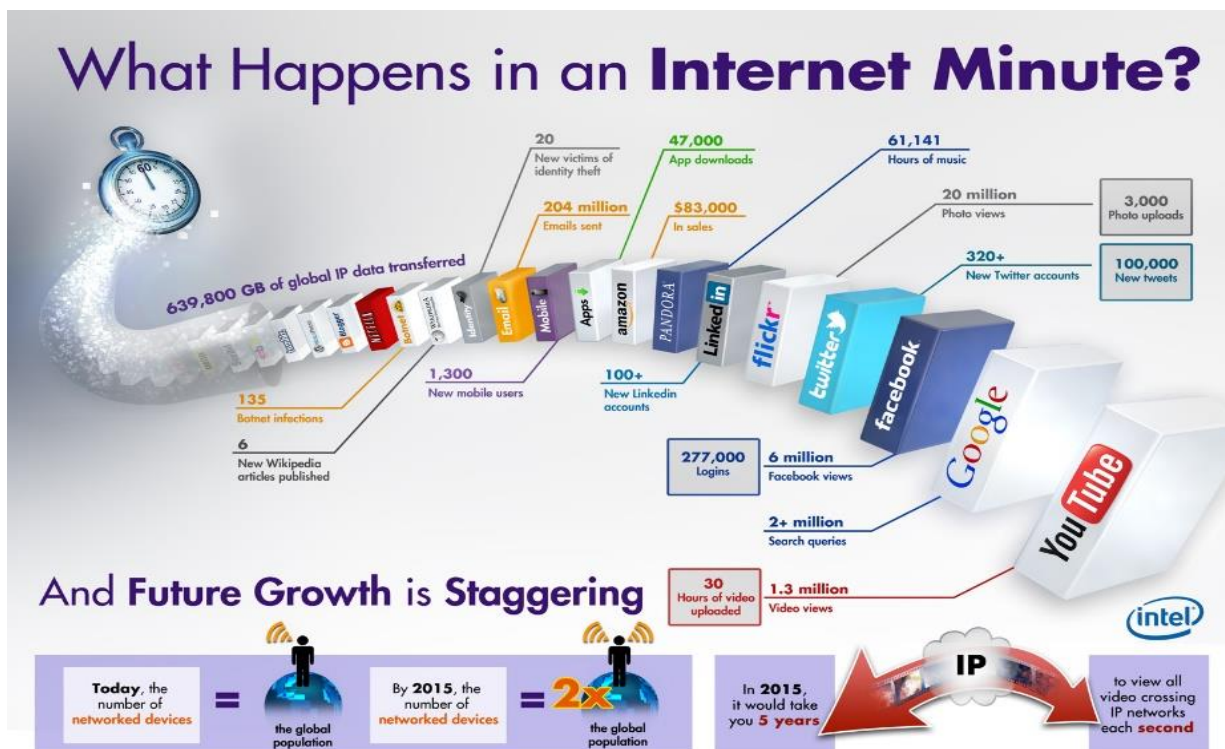
Προκειμένου να βελτιωθεί η ευαισθησία του δέκτη και να αυξηθεί η απόσταση των αναμεταδοτών, οι σύμφωνοι οπτικοί δέκτες χρησιμοποιώντας ομόδυνες (homodyne) και ετερόδυνες (heterodyne) τεχνικές κέρδισαν το ενδιαφέρον από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 [10,11]. Το 1986, ωστόσο, επιδείχθηκε ο πρώτος οπτικός ενισχυτής για ένα ευρύ παράθυρο μήκους κύματος γύρω από τα 1550 nm, ο οποίος απέφυγε τον περιορισμό λόγω της ευαισθησίας του δέκτη με αποτέλεσμα η έρευνα στις οπτικές επικοινωνίες να πήρε μια νέα κατεύθυνση. Στα επόμενα χρόνια, εισήχθησαν τα συστήματα που βασίζονται στην πολυπλεξία διαίρεσης του μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing, WDM), μεταφέροντας πολλαπλά κανάλια δεδομένων μέσα σε μία μόνο ίνα, αυξάνοντας τη συνολική διακίνηση δεδομένων της ίνας πολλαπλές φορές. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, ξεκίνησε η λειτουργία του διαδικτύου, το οποίο επέφερε ραγδαία ανάπτυξη, με αποτέλεσμα την εκθετική αύξηση των απαιτήσεων χωρητικότητας [12]. Στα επόμενα χρόνια, συστήματα με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 10 Gb/s ανά κανάλι είδαν ευρεία κλίμακα ανάπτυξη. Τα συστήματα αυτά βασίζονται στη διαμόρφωση της έντασης του πεδίου σε συνδυασμό με την τεχνολογία απευθείας ανίχνευσης. Στη συνέχεια, τα συστήματα πομποδέκτη που

παρείχαν ταχύτητα δεδομένων 40 Gb/s ανά κανάλι αναπτύχθηκαν επίσης με βάση την απευθεία ανίχνευση, ωστόσο αυτά τα συστήματα χρησιμοποίησαν διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (phase shift keying, PSK). Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι η μετάβαση σε ρυθμούς δεδομένων >40 Gb/s θα επωφελούνταν ιδιαίτερα με τη χρήση της σύμφωνης ανίχνευσης [13]. Ως αποτέλεσμα, επανεισάγεται η σύμφωνη οπτική επικοινωνία αυτή τη φορά ως μέσο ενίσχυσης της χωρητικότητας [14-16]. Σε αντίθεση με τα συστήματα απευθείας ανίχνευσης, τα σύμφωνα συστήματα μετάδοσης χρησιμοποιούν ψηφιακή επεξεργασία σήματος στον δέκτη για την άμβλυνση των απομειώσεων γραμμικής μετάδοσης. Το 2007, επιδείχθηκε η πρώτη σύμφωνη οπτική μετάδοση ενός καναλιού 100 Gb/s μέσω ζωντανού συνδέσμου που ακολουθήθηκε από την πρώτη εμπορική εφαρμογή το 2009 [17-19]. Η σύμφωνη οπτική μετάδοση έχει κερδίσει από τότε όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον τόσο εμπορικά όσο και στο κομμάτι της έρευνα λόγω των πολλά υποσχόμενων δυνατοτήτων της για μετάδοση υψηλής χωρητικότητας που θα οδηγούσε ακόμη και σε μείωση του κόστους ανά μεταδιδόμενο bit πληροφορίας.

Κίνητρο και Δομή Διατριβής

Η κίνηση του διαδικτύου (Internet Protocol, IP) συνεχίζει να αυξάνεται με ετήσιο ρυθμό σχεδόν 30% και έχει ήδη ξεπεράσει το όριο του επιπέδου zettabyte από το τέλος του 2016 [20], αγγίζοντας τα 3.3 zettabytes μέχρι το 2021 [21]. Αυτή η αύξηση οδηγείται από τη συνεχή ανάπτυξη μιας μεγάλης ποικιλίας από συναρπαστικές εφαρμογές για τους τελικούς χρήστες καθώς και από την εκρηκτική ανάπτυξη των cloud-based υπηρεσιών πληροφοριών και τεχνολογίας (Information and Technology, IT) που βασίζονται σε αρχιτεκτονικές «σύννεφου» (cloud) για τις επιχειρήσεις, οι οποίες καθορίζουν σήμερα τις οικονομίες των επιχειρησιακών υποδομών σε όλο τον κόσμο [22]. Η εικόνα 1.1 απεικονίζει σε συνοπτική μορφή, το τι συμβαίνει στο διαδίκτυο μέσα σε ένα λεπτό λαμβάνοντας υπόψη τις δημοφιλείς και πιο συχνά χρησιμοποιούμενες εφαρμογές.

Συνεπώς, ο όγκος αυτών των δεδομένων και των πληροφοριών που ανταλλάσσονται σε καθημερινή βάση δημιουργεί πραγματικές πιέσεις στα σύγχρονα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων, με αποτέλεσμα την ενσωμάτωση χιλιάδων servers, η οποία έχει δημιουργήσει την ανάγκη για τη μεταφορά μεγάλων όγκων δεδομένων μεταξύ των racks, των καρτών δικτύου και των συσκευών γρήγορα, αποτελεσματικά και με χαμηλό κόστος. Η συνδεσιμότητα είναι επομένως ένας βασικός παράγοντας, ο οποίος οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα ηλεκτρικά καλώδια και οι υποδομές χαμηλού κόστους δεν μπορούν να ανταποκριθούν σε αυτή την εκρηκτικά αυξανόμενη ζήτηση μεγαλύτερου εύρους ζώνης [24].

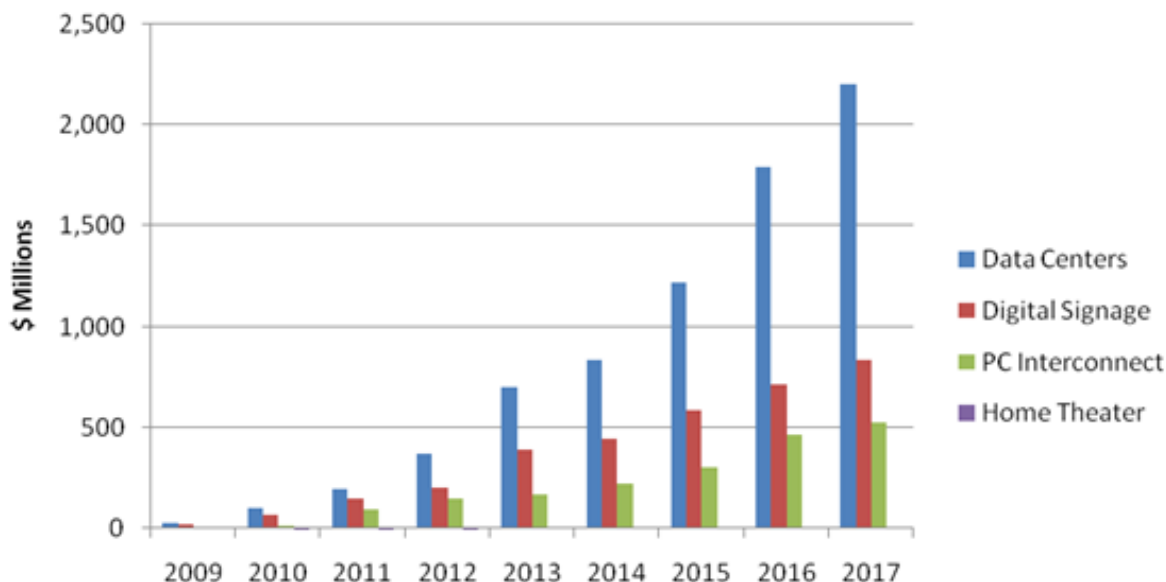


Εικόνα 1.1: Κίνηση διαδικτύου κατά τη διάρκεια ενός λεπτού. Πηγή: Intel infographic [23].

Ψάχνοντας σε αριθμούς, οι διακομιστές επόμενης γενιάς των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων χρησιμοποιούν διεπαφές 40 Gb/s ενώ οι διακόπτες Ethernet (Ethernet switches) θα υιοθετήσουν συνδέσεις 100 Gb/s καθιστώντας αναγκαία τη χρήση οπτικών τεχνολογιών υψηλής ταχύτητας. Σε αυτό το πλαίσιο, τα δεδομένα επικοινωνιών γίνονται ένα μοναδικό σημείο εισόδου για τη φωτονική και την ανάπτυξη ολοκληρωμένων λύσεων που θα επιτρέψουν την απλή, άμεση μετάβαση από ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 10 Gb/s σε 40 Gb/s και τελικά σε 100 Gb/s, ενώ παράλληλα θα οδηγήσουν στη μείωση του φυσικού μεγέθους των συσκευών και της κατανάλωσης ενέργειας [25]. Η "διείσδυση" της φωτονικής τεχνολογίας στα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων είναι ήδη εμφανής και οι οπτικές διασυνδέσεις τείνουν να αντικαταστήσουν τα ηλεκτρικά καλώδια μικρότερων αποστάσεων. Ξεκινώντας από τη συνδεσιμότητα rack-to-rack, προϊόντα ενεργών οπτικών καλωδίων είναι ήδη διαθέσιμα και έχουν δημιουργήσει μια εξειδικευμένη, αλλά ταχέως αναπτυσσόμενη αγορά.

Σύμφωνα με τις προβλέψεις της αγοράς, τα έσοδα που αφορούν τα ενεργά οπτικά καλώδια υπερέβησαν τα 700 εκατ. δολάρια ΗΠΑ, από το 2009 έως και το 2013. Προκειμένου να διατηρηθεί και να ενισχυθεί η αγορά αυτή, οι οπτικές λύσεις πρέπει να είναι εύκολα επεκτάσιμες, αξιόπιστες, να υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων >10 Gb/s και να συνεισφέρουν σε ένα "πράσινο" περιβάλλον εντός των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων.

AOC Shipments by Market Value



Εικόνα 1.2: Έσοδα από την αγορά των ενεργών οπτικών καλωδίων από την CIR Inc. [26].

Τα έσοδα που αφορούν την αγορά των ενεργών οπτικών καλωδίων αναμένεται να παρουσιάσουν μια σημαντική αύξηση τα επόμενα χρόνια, σύμφωνα με το γράφημα της εικόνας 1.2 [27]. Παρά το γεγονός ότι η ύφεση της οικονομίας είχε ένα σκληρό αντίκτυπο το 2010, οι πωλήσεις ενεργών οπτικών καλωδίων (137 εκατ. \$) μέσω νέων υλοποιήσεων και προϊόντων από τα τέλη του 2009 και μετά το 2010 αύξησαν έντονα τα έσοδα των ενεργών οπτικών καλωδίων τις χρονιές 2011 - 2012 αγγίζοντας τα 500 εκατ. \$. Αθροιστικά τα έσοδα της αγοράς των ενεργών οπτικών καλωδίων για το σύνολο της περιόδου των πέντε ετών (μέχρι το 2015) ήταν άνω των 2,5 δις. \$, με πάνω από 1,2 δις. \$ το 2015 και μόνο. Το 2017 χαρακτηρίζεται ως έτος ορόσημο καθώς τα κέρδη αναμένεται να αγγίξουν τα 2,2 δις. \$. Το παραπάνω γράφημα δείχνει αυτήν την εξέλιξη της αγοράς, από την οποία προκύπτει ότι η χρήση της οπτικής διασύνδεσης συνεχίζει να αυξάνεται. Η αγορά έχει δείξει αύξηση στα οπτικά καλώδια με αυξημένο εύρος ζώνης σε βάρος των περιορισμένων δυνατοτήτων καλωδίων χαλκού, με μειώσεις στο μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος για τα καλώδια τύπου USB, HDMI και DisplayPort.

Συνεπώς, η αυξανόμενη ζήτηση των ενεργών οπτικών καλωδίων έχει οδηγήσει στην καθημερινή χρήση τους, μεταφέροντας εκατοντάδες gigabit μέσα από εκατοντάδες μέτρα στα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων. Όσον αφορά την υλοποίησή τους δύο κύριες τεχνολογικές προσεγγίσεις έχουν ακολουθηθεί και κυριαρχήσει:

- Τα Laser Επιφανειακής Εκπομπής Κάθετης Κουλοότητας (Vertical-cavity surface-emitting lasers, VCSELs): Τα VCSELs αντιπροσωπεύουν μια οικονομικώς αποδοτική και επεκτάσιμη λύση για οπτικούς

πομποδέκτες κοντινών αποστάσεων και είναι η τεχνολογία που έχει επιλεγεί από επιχειρήσεις όπως η Finisar και η Mellanox [28-29]. Στα εμπορικά προϊόντα, τα VCSELs λειτουργούν στα 10 Gb/s και για να αυξήσουν το συνολικό ρυθμό μετάδοσής τους πέρα από 16 Gb/s, θα πρέπει να μετατοπιστούν σε παράλληλες οπτικές τοπολογίες [30]. Ενεργά οπτικά καλώδια μέχρι 12 κανάλια είναι εμπορικά διαθέσιμα [31] και απαιτούν ένα καλώδιο οπτικής ίνας 24 γραμμών, τους οδηγητές CMOS και ενισχυτές για όλους τους πομπούς και τους δέκτες καθώς και ολοκληρωμένα κυκλώματα πολυπλεκτών (multiplexers) και αποπολυπλεκτών (demultiplexers) και στις δύο άκρες της διασύνδεσης. Σε αυτές τις συσκευές ο συντελεστής μορφής (form factor) και η συνολική κατανάλωση ενέργειας καθορίζονται κυρίως από τα ολοκληρωμένα κυκλώματα CMOS. Προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος και η κατανάλωση ισχύος αυξάνοντας τη συνολική ρυθμο-απόδοση αυτών των πομποδεκτών, απαιτείται ο διαμοιρασμός των δεδομένων. Για αυτόν τον σκοπό τα VCSELs ωθούνται στα φυσικά όριά τους προκειμένου να αυξηθεί ο ρυθμός δεδομένων τους σε 40 Gb/s. Εντούτοις, 40 Gb/s VCSELs υπάρχουν μόνο ως ερευνητικά πρωτότυπα εκθέτοντας φτωχούς λόγους σβέσης (Extinction Ratio, ER) (~3 dB) και αμφισβητήσιμη αξιοπιστία [30]. Στηριζόμενοι σε αυτό το σημείο, η αξιοπιστία είναι ένα θέμα κλειδί: μέχρι σήμερα τα VCSELs μπορούν μόνο να διαμορφωθούν άμεσα μέχρι 20 Gb/s. Όταν επικρατούν ευρείες μεταβολές θερμοκρασίας τότε παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη μείωση στο κομμάτι της αξιοπιστίας τους.

- Διαμορφωτές πυριτίου (Silicon modulators): Η Luxtera έχει επιλέξει το πυρίτιο ως οικονομικός αποδοτική τεχνολογία για να εισέλθει στην αγορά των πομποδεκτών [32]. Η κύρια γραμμή παραγωγής της επιχείρησης περιλαμβάνει τους διαμορφωτές πυριτίου που ενσωματώνονται με παθητικά οπτικά στοιχεία και φωτοδέκτες SiGe σε μια συμβατή διαδικασία CMOS. Τα λέιζερ τοποθετούνται υβριδικά στο υπόστρωμα του πυριτίου χρησιμοποιώντας την διαδικασία εναπόθεσης ημιαγωγικών κυβικών δομών πάνω στις διαφορετικές επιστρώσεις τύπου γκοφρέτας. Επιπλέον, οι διαμορφωτές πυριτίου είναι περιορισμένοι σε ρυθμούς μετάδοσης 10 Gb/s και απαιτούνται πολλαπλές σειρές διαμορφωτών ώστε οι συσκευές να επιτύχουν μεγαλύτερες χωρητικότητες. Μια συσκευή 40 Gb/s (4x10 Gb/s) είναι ήδη στην αγορά ενώ συσκευές με υψηλότερες συνολικές χωρητικότητες που χρησιμοποιούν την τεχνολογία πυριτίου δεν υπάρχουν ως εμπορικά προϊόντα [32]. Ωθώντας το πυρίτιο προς ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s είναι δυσκολότερη από την περίπτωση των VCSELs. Το πρώτο βήμα έχει γίνει από τη Intel με την επίδειξη του πρώτου διαμορφωτή πυριτίου 40 Gb/s [33]. Ωστόσο όμως, αρκετά βήματα πρέπει να πραγματοποιηθούν ακόμα προκειμένου να αυξηθεί ο λόγος σβέσης (>1 dB), να μειωθούν τα 6V της τάσης οδήγησης ώστε να καταστεί ο συγκεκριμένος διαμορφωτής εμπορικά βιώσιμος.

Ο κορεσμός του ρυθμού μετάδοσης τόσο των VCSELs όσο και του πυριτίου πιέζει την ερευνητική προσπάθεια προς την έρευνα των ανώτερων σχημάτων διαμόρφωσης. Πρόσφατες δημοσιεύσεις παρουσίασαν οπτική μετάδοση πληροφορίας με ρυθμούς 30 Gb/s και 40 Gb/s μετά από 100m χρησιμοποιώντας 64-QAM και OFDM σχήματα διαμόρφωσης αντίστοιχα [34-35]. Παρόλο που τα ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης ευνοούν μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης σε σχέση με τα σχήματα διαμόρφωσης με χρήση απευθείας ανίχνευσης στο δέκτη, τα ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης απαιτούν πολύπλοκες αρχιτεκτονικές σχεδίασης τόσο στο κομμάτι του πομπού όσο και του δέκτη και είναι πιο απαιτητικά όσον αφορά ηλεκτρονικούς ψηφιακούς σε αναλογικούς μετατροπείς (Digital-to-Analog Converter, DAC) και αναλογικούς σε ψηφιακούς μετατροπείς (Analog-to-Digital Converter, ADC) υψηλής ταχύτητας αντίστοιχα. Η μετάβαση σε πολυπλοκότερα και απαιτητικότερα οπτικά συστήματα είναι απαγορευτική για την επόμενη γενιά των συστημάτων των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων και των διασυνδέσεων rack-to-rack καθώς πρέπει να είναι απλά και να παρέχουν με εύκολο τρόπο δυνατότητα αναβάθμισης της χωρητικότητάς τους. Το μήνυμα που προκύπτει είναι σαφές: το επόμενο βήμα που αφορά την αύξηση της χωρητικότητας των επόμενων γενιών των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων απαιτεί μια τεχνολογία ικανή να παρέχει εξαιρετικά-υψηλής ταχύτητας σειριακή διαμόρφωση και ανίχνευση καθώς και επεκτασιμότητα σε χωρητικότητες Tb/s, χωρίς να θυσιάζεται η απόδοση.

Η μετακίνηση σε μικρότερες αποστάσεις -οι επονομαζόμενες οπτικές διασυνδέσεις- έχουν διεισδύσει στη συνδεσιμότητα τόσο σε επίπεδο κάρτας όσο και σε επίπεδο πλακέτας. Μέχρι σήμερα, οι ερευνητικές προσπάθειες οδηγούνται από την Intel και IBM, προκειμένου να αναπτυχθεί μια θεμελιώδη ισχυρή οπτική πλακέτα για τη σύνδεση οπτικών καρτών και οπτικών chip [36-37]. Είναι ενδιαφέρον ότι το υλικό της επιλογής και για τις δύο εταιρείες είναι το πολυμερές. Η πολυμερική τεχνολογία κυματοδηγού υιοθετήθηκε, λόγω του χαμηλού κόστους του υλικού, της υψηλής πυκνότητας ολοκλήρωσης, των εξαιρετικών χαρακτηριστικών όσον αφορά την οπτική απώλεια (~0.04 dB/cm) και τις χαμηλές παρεμβολές (crosstalk). Πιο συγκεκριμένα, η IBM Terabus έχει επιτύχει συνδεσιμότητα chip-to-chip με συνολικό ρυθμό

μετάδοσης 300 Gb/s χρησιμοποιώντας τη λύση των VCSELs [38-39]. Είναι προφανές ότι μια πιθανή θύρα υψηλότερης ταχύτητας ανά έξοδο, θα αυξήσει δραματικά την απόδοση και την αξιοποίηση αυτών των οπτικών καρτών διασύνδεσης υψηλής απόδοσης. Η ταχύτητα μια τέτοιας θύρας δεν μπορεί να υποστηρίζεται από VCSELs και -όπως και στην περίπτωση των διασυνδέσεων rack-to-rack- η φωτονική τεχνολογία ολοκλήρωσης ικανή για σειριακή υπερ-υψηλή διαμόρφωση είναι το κομμάτι που λείπει από την επίτευξη Tb/s ταχυτήτων, μέσω υψηλής απόδοσης οπτικών καρτών διασύνδεσης. Ιδανικά, αυτή η λύση πρέπει να είναι από υλικό συμβατό με τις πολυμερικές κάρτες με σκοπό να επιτρέψει την απλή και δυναμικά μονολιθική ολοκλήρωση των διασυνδέσεων μεταξύ πλακετών.

Παρόλα αυτά όμως, στην παρούσα φάση ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων με οπτικό σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK περιορίζεται κυρίως από την πεπερασμένη ταχύτητα λειτουργίας των οπτικών διαμορφωτών. Ο LiNbO₃ διαμορφωτής Mach-Zehnder (MZ) είναι ο κοινότερος τύπος στη σημερινή τεχνολογία διαμόρφωσης οπτικού κύματος λόγω της γραμμικότητάς του και της δυνατότητας να λειτουργήσει εύκολα στα 40 Gb/s. Η μετάδοση 100G βασισμένη σε ένα διαμορφωτή LiNbO₃ έχει δειχθεί το 2007 σε αποδεκτή ποιότητα [40] με χρήση, εντούτοις, ενός οπτικού εξισωτή αντισταθμίζοντας το περιορισμένο εύρος ζώνης του LiNbO₃ modulator (<40 GHz). Επιπλέον, οι ηλεκτροοπτικοί MZ διαμορφωτές βασισμένοι σε ημιαγώγιμα υλικά μπορούν να υποστηρίξουν λειτουργία υψηλής-ταχύτητας. Το HHI έχει παρουσιάσει InP MZ διαμορφωτές με 3-dB εύρος ζώνης 50 GHz και V_{pp} 2.8 V, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα διαμόρφωσης 80 Gb/s με 9.5 dB λόγο σβέσης (Extinction Ratio, ER) [41]. Επίσης, οι ημιαγώγιμοι διαμορφωτές ηλεκτρο-απορρόφησης (EAM) επιτρέπουν τη γρήγορη λειτουργία και διαμόρφωση 80 Gb/s με ~10 dB λόγο σβέσης [28]. Η χαμηλή τάση οδήγησης από κορυφής-σε-κορυφή (V_{pp}) 2.5 V, το μικρό μήκος (~200 μm) και η δυνατότητα για μονολιθική ολοκλήρωση είναι τα κύρια πλεονεκτήματά τους. Επίσης, μεγάλες προσπάθειες επικεντρώνονται επίσης στους διαμορφωτές βασισμένους στο πυρίτιο, με στόχο τη σύγκλιση προς μια κοινή πλατφόρμα ολοκλήρωσης μεταξύ ηλεκτρονικών και φωτονικών κυκλωμάτων. Η Intel παρουσίασε το 2007 ένα MZ διαμορφωτή πυριτίου που λειτουργεί στα 40 Gb/s και επιτεύχθηκε με την έγχυση ελεύθερων-φορέων (free-carrier injection) [42]. Πιο συγκεκριμένα, η τάση οδήγησης και το συνολικό μήκος του διαμορφωτή πυριτίου ήταν 6V και 4mm αντίστοιχα. Τέλος, τα οπτικά πολυμερή παρουσιάζουν μεγάλους ΕΟ συντελεστές και ιδιότητες που ευνοούν τη λειτουργία σε υπερ-υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

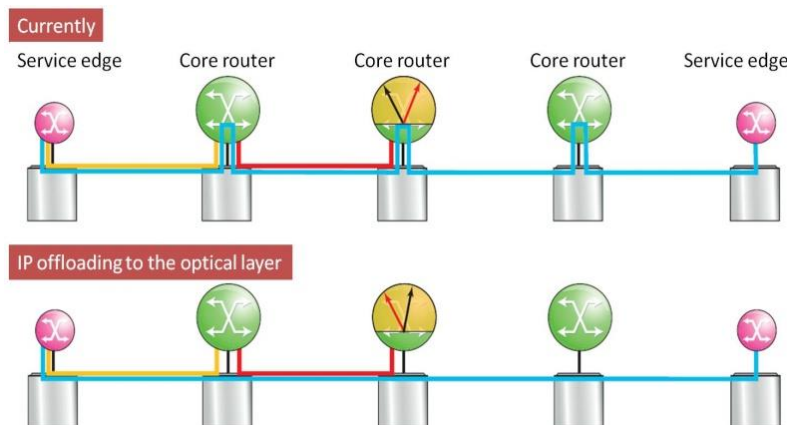
Από την άλλη πλευρά, αυτή η εντυπωσιακή αύξηση της διαδικτυακής κίνησης απεικονίζεται άμεσα, πέρα από τις διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, στο μέγεθος των δεδομένων που παράγονται από τις πηγές των τελικών ροών-μονοπατιών (φιλοξενούμενοι), που εισάγονται στο δίκτυο κορμού μέσω των στοιχείων εισόδου/εξόδου (διακόπτες ακρών-edge switches) και διαβαίνουν τον κορμό του IP cloud στο δρόμο τους προς τον τελικό προορισμό. Για να εξυπηρετηθεί αυτό το μέγεθος των δεδομένων, οι διακόπτες ακρών τελευταίας τεχνολογίας είναι εξοπλισμένοι σήμερα με πολλαπλές διεπαφές πελατών, κάθε μια με 10, 40, 100 ή ακόμα και 400 Gb/s συνολικής χωρητικότητας [43]. Εντούτοις, η μεγάλη ποικιλία των υπηρεσιών αναμένεται πολύ σύντομα να παράγει ροές δεδομένων που μπορούν να αγγίζουν ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 1 Tb/s, με αποτέλεσμα αυτές οι διεπαφές πελατών να πρέπει να αναβαθμιστούν και να υποστηρίζουν παρόμοιες χωρητικότητες προκειμένου να συμβαδίζουν [44]. Δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος της IP κίνησης κατευθύνεται σήμερα σε έναν σχετικά μικρό αριθμό τοποθεσιών, δεν αποτελεί έκπληξη ότι αυτή η ανάγκη έχει εμφανιστεί ήδη, με προεξέχοντα παραδείγματα να αφορούν τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων των μεγάλων προμηθευτών περιεχομένου όπως YouTube, Google, Facebook, Twitter, και πιο συγκεκριμένα τις πύλες (gateways) αυτών των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων που επιτρέπουν τη διασύνδεσή τους στις αρχιτεκτονικές πλέγματος (mesh) και τη συνεργασία τους σε εκτελούμενες εργασίες που αφορούν την επεξεργασία, την αποθήκευση και την εφεδρική αποθήκευση των δεδομένων (backup) (ή ακόμα και την αποκατάσταση από καταστροφή) [45].

Οι τεράστιες χωρητικότητες των ψηφιακών διεπαφών ασκούν με τη σειρά τους άμεση επίδραση στις απαιτήσεις των οπτικών διεπαφών γραμμής (linecards) των μεταγωγών άκρων (edge switches) και των πυλών διερχόμενης κίνησης (gateways) των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, που καθιστούν τις τρέχουσες 100G εφαρμογές βασισμένες στη διπλή πόλωση διαμόρφωση μετατόπισης φάσης με ορθογωνισμό (DP-QPSK) να φαίνονται ήδη ξεπερασμένες. Αυτό υπαγορεύει ότι η επόμενη μετάβαση από 100G σε 400G και περαιτέρω προς το 1T οπτικών καρτών γραμμής βασισμένων στην υψηλότερη τετραγωνισμένη διαμόρφωση πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) πρέπει να πραγματοποιηθεί στο κοντινό μέλλον [46]. Εντούτοις, κλιμακώνοντας την ικανότητα αυτών των διεπαφών προς ρυθμούς δεδομένων 1 Tb/s δεν είναι η μόνη απαίτηση. Η ευελιξία στη διαχείριση αυτής της χωρητικότητας είναι μια εξίσου κρίσιμη παράμετρος για την απόδοση των δικτύων λόγω της δυναμικής

φύσης της νέας IP κίνησης, η οποία συσχετίζεται με τη χρήση ενός μεγάλου αριθμού κινητών συσκευών και της κυριαρχίας των διαδικτυακών εφαρμογών βίντεο (π.χ. 1.3 εκατομμύρια προβολές βίντεο πραγματοποιούνται σε ένα διαδικτυακό λεπτό [23]). Μέχρι στιγμής όμως, η ευελιξία των οπτικών πομποδεκτών (διεπαφές Tx/Rx) έχει ληφθεί υπόψιν κυρίως στα πλαίσια των οπτικών συνδέσεων από σημείο σε σημείο σε ένα ευέλικτο περιβάλλον πλέγματος. Επιπλέον, έχει περιγραφεί και στην περίπτωση της εφαρμογής μεμονωμένων και πολλαπλών φερόντων ως δυνατότητα των πομποδεκτών να προσαρμόσουν το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (πολλαπλοί ρυθμοί δεδομένων-multirate), το σχήμα διαμόρφωσης (πολλαπλά σχήματα διαμόρφωσης, multi-format), την εφικτή απόσταση μετάδοσης (πολλαπλές αποστάσεις μετάδοσης, multi-reach) και την κατανομή του μήκους κύματος των μεταδιδόμενων σημάτων προκειμένου να απλοποιηθεί ο σχεδιασμός του δικτύου και να βελτιστοποιηθεί ο διαμοιρασμός πολύτιμων πόρων όπως οι γραμμές των οπτικών ινών και οι οπτικές διασυνδέσεις του δικτύου [47]. Αν και σημαντικός και πολύ επιτυχής στην προσέλευση ευρέως ενδιαφέροντος υπό το γενικό όρο «ελαστική οπτική δικτύωση» (Elastic Optical Networking, EON), αυτός ο τύπος ευελιξίας είναι ακόμα ελλιπής και σχεδόν ανίκανος να διαχειριστεί το τεράστιο μέγεθος των δεδομένων που προέρχονται από τις διεπαφές των πελατών μέσω των μεταγωγών άκρων.

Προκειμένου να φιλοξενηθεί αυτή η ικανότητα, η ανάπτυξη οπτικών πομποδεκτών πρέπει να πραγματοποιήσει ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός που σχετίζεται με σχεδιάσεις που επιτρέπουν τη λειτουργία εντός του πλαισίου των οπτικών συνδέσεων από ένα σημείο σε πολλαπλά σημεία (point-to-multi-point) με την αποτελεσματική διαχείριση της συνολικής χωρητικότητας. Αυτό πραγματοποιείται μέσα από τη δυνατότητα να συγκεντρώνει τη χωρητικότητα σε ένα μικρότερο αριθμό από μεγάλες ροές δεδομένων ή να τη διανείμει σε ένα μεγαλύτερο αριθμό από μικρές ροές δεδομένων, ανάλογα με την εισερχόμενη κίνηση από την πλευρά του πελάτη. Αυτό το επιπλέον επίπεδο ευελιξίας συμπληρώνει ο "κοινός τόπος" της περιγραφής με τον όρο «3M» (multi-rate, multi-format, multi-reach), με ένα τέταρτο «M» (multi-flow), που επιτρέπει μια άνευ προηγουμένου δυνατότητα για ευελιξία και αποδοτικότητα στη χρήση των πόρων, με προφανή οφέλη για τις κεφαλαιακές και λειτουργικές δαπάνες (CAPEX/OPEX) του δικτύου (δηλ. μειωμένη CAPEX/OPEX).

Η ανάπτυξη πομποδεκτών πολλαπλών ροών, έχει δύο προϋποθέσεις. Η πρώτη αφορά τη δυνατότητα ενός ψηφιακού συστήματος υποστήριξης (back-end) των πομπών που διασυνδέεται με τον πελάτη, ώστε να αναγνωρίζει τα δεδομένα που κατευθύνονται προς στον ίδιο προορισμό, και η ομαδοποίηση αυτών των δεδομένων σε ροές δεδομένων, χρησιμοποιώντας κατάλληλους κλωβούς μεταφοράς (containers). Η δεύτερη σχετίζεται με τη δυνατότητα του οπτικού μέρους των πομπών να χρησιμοποιεί αυτές τις ροές δεδομένων για τη διαμόρφωση οπτικών φερόντων και την παραγωγή μεταβλητού αριθμού ανεξάρτητων οπτικών ροών, οι οποίες μεταγόνται και διαδίδονται μέσα στο δίκτυο κορμού ως ενιαίες οντότητες και προσφέρουν τη δυνατότητα για τη μετατόπιση της IP κίνησης από τους δρομολογητές κορμού στο οπτικό επίπεδο, χρησιμοποιώντας άμεσα μονοπάτια [44,48]. Η πρώτη προϋπόθεση είναι σχετικά εύκολη, δεδομένου της ευκινησίας των ηλεκτρονικών συστημάτων επεξεργασίας και την ευελιξίας των δομών πληροφόρησης μέσω του ορισμού του οπτικού δικτύου μεταφοράς (optical transport network, OTN) [49]. Ωστόσο, η δεύτερη είναι πολύ πιο δύσκολη να επιτευχθεί, και αποτελεί πραγματικό τροχοπέδη σήμερα για την πρακτική εφαρμογή της δικτυακής ιδέας η οποία είναι συμπαγής, ισχυρή και υποστηρίζεται σθεναρά από μεγάλους κατασκευαστές συστημάτων όπως η NOKIA (πρώην Alcatel-Lucent) στην Ευρώπη [42] και η NTT στην Ιαπωνία [44].



Εικόνα 1.3: Η IP κίνηση εκφόρτωσης κατά την ευέλικτη οπτική μεταφορά ως κατεύθυνση της ανάπτυξης για ένα ευέλικτο/συγκλίνων δίκτυο κορμού [48].

Πιο συγκεκριμένα, ο παράγοντας που εμποδίζει σήμερα την ανάπτυξη των πομποδεκτών πολλαπλών ροών με χωρητικότητες terabit είναι η μη διαθεσιμότητα ενός ευέλικτου συνδυασμού πλατφορμών ολοκλήρωσης που μπορεί να κάνει διαθέσιμα υψηλής απόδοσης φωτονικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα για λειτουργία υψηλής ταχύτητας με χωρητικότητα terabit σε συνδυασμό με την υψηλή πολυπλοκότητα του οπτικού κυκλώματος που απαιτείται από το φωτονικό chip για την παραγωγή, το χειρισμό και την οπτική δρομολόγηση των οπτικών ροών. Επιπλέον, τα πράγματα τείνουν να γίνουν ακόμη πιο περίπλοκα, λόγω της συνήθους αλλά και εντελώς περιττής συσχέτισης της λειτουργίας των πολλαπλών ροών με τεχνικές οπτικής ορθογωνίας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), που απαιτούν μεγάλες συστοιχίες IQ διαμορφωτών (IQM) για την επίτευξη χωρητικότητας 1 Tb/s, περίπλοκες πηγές φωτός, γεννήτριες πολλαπλών φερόντων και συστήματα φιλτραρίσματος για την παραγωγή και τον διαχωρισμό των οπτικών φορέων, θέτοντας έτσι εντελώς εκτός από την εξίσωση την κατασκευή ενός πομπού πολλαπλών ροών ως μια συσκευή στηριζόμενη σε ένα ενιαίο ηλεκτρονικό-φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα (electronic-photonic integrated circuit, EPIC).

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, το LiNbO_3 αποτελεί το πιο ώριμο υλικό σύστημα για την κατασκευή MZM/IQMs, και παρά το μεγάλο μήκος (>3 cm) και την υψηλή τάση οδήγησης V_{π} (περίπου 4 V), αποτελεί το πιο κοινό σύστημα σε πρακτικές οπτικές τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Μεμονωμένα MZMs, IQMs και δίδυμα IQMs με βάση το LiNbO_3 είναι εμπορικά διαθέσιμα με εύρος ζώνης 20-30 GHz για συστήματα 10G, 40G και 100G που βασίζονται σε σχήμα διαμόρφωσης DP-QPSK [50,51]. Από την άλλη, οι διαμορφωτές πυριτίου (Si) είναι μια νέα πλατφόρμα, αλλά ταχύτατα εξελισσόμενη. Διαμορφωτές πυριτίου με εύρος ζώνης >20 GHz έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία με σχήμα διαμόρφωσης OOK για ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 40 Gb/s [52], έχοντας ωστόσο φτωχούς λόγους σβέσης (ER 6.5 dB), υψηλή τάση οδήγησης V_{π} (>5 V) και υψηλή οπτική απώλεια δομής (>6.5 dB). Πολύ πρόσφατα, IQMs και δίδυμα IQMs παρουσιάστηκαν επίσης για συστήματα 50G με σχήμα διαμόρφωσης QPSK [53] και για 100G συστήματα με DP-QPSK [54]. Οι GaAs διαμορφωτές είναι ακόμα πιο ώριμοι ως τεχνολογία για διαμόρφωση και είναι διαθέσιμοι ως μεμονωμένοι MZMs, IQMs και δίδυμοι IQMs [55-56] με εύρος ζώνης κοντά στα 25 GHz και V_{π} < 3.5 V. Οι InP διαμορφωτές αντιπροσωπεύουν από την άλλη πλευρά, την πιο ώριμη εναλλακτική λύση σε σχέση με την τεχνολογία LiNbO_3 . Κύρια πλεονεκτήματά της είναι η πυκνότητα ολοκλήρωσης, η χαμηλή τάση οδήγησης V_{π} , το υψηλό εύρος ζώνης και η δυναμική της για μονολιθική ολοκλήρωση μεγάλης κλίμακας [57]. Συσκευές με εύρος ζώνης άνω των 50 GHz με V_{π} 2.5V, 40 GHz με V_{π} 2.5V και 27 GHz με V_{π} 3.5V έχουν αναφερθεί για μεμονωμένα MZMs [58], IQMs [59] και δίδυμους IQMs [60]. Τέλος, οι πολυμερικοί διαμορφωτές έχουν τις μεγαλύτερες δυνατότητες για λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες λόγω του εξαιρετικά υψηλού ηλεκτροπτικού συντελεστή. Μεμονωμένα MZMs έχουν αναπτυχθεί από την GO με εύρος ζώνης 65 GHz και τάση οδήγησης V_{π} 3.5 V και έχουν δοκιμαστεί σε ολοκληρωμένους οπτικούς πομπούς με ρυθμούς μετάδοσης 100 Gb/s με αποτέλεσμα λειτουργία χωρίς σφάλματα με ER > 13 dB [61-62], όπως θα παρουσιαστούν σε αυτή την διατριβή. Χρησιμοποιώντας το ίδιο υλικό σύστημα, IQMs και δίδυμοι IQMs με υψηλότερο V_{π} (6.5 V) έχουν επίσης αναπτυχθεί για λειτουργία σε 40G συστήματα με σχήμα διαμόρφωσης DQPSK και σε 100G συστήματα με DP-QPSK [63], χρησιμοποιώντας χαμηλότερου εύρους ζώνης σχεδιασμούς.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να τονιστεί ότι τα MZMs/IQMs εξακολουθούν να αναπτύσσονται ως επί το πλείστον ως αυτόνομες συσκευές σε συνδυασμό με εξωτερικά λέιζερ, παθητικές οπτικές δομές και ηλεκτρονικά οδήγησης. Προσπάθειες για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων πομπών βρίσκουν κυρίαρχη την InP και την μονολιθική τεχνολογία βασισμένη στο υλικό InP. Αυτή η τεχνολογία έχει ως αποτέλεσμα δεκαπλές συστοιχίες πομπών σε ένα ενιαίο chip με δεκαπλή συστοιχία λέιζερ με απόσταση των οπτικών φερόντων κατά 200 GHz, εικοσαπλή σειρά IQM και δύο διατεταγμένα περιθλαστικά φράγματα κυματοδηγών (Arrayed Waveguide Gratings, AWGs), επιτρέποντας σχήμα διαμόρφωσης DP-QPSK για λειτουργία σε 40 [64] ή 100 Gb/s ανά οπτικό φέρον [65]. Άλλες προσπάθειες περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση LiNbO_3 IQMs με δομές κατασκευασμένες πάνω σε διοξείδιο του πυριτίου (silica-on-silicon) [66], την ολοκλήρωση δίδυμων InP IQM πάνω σε διοξείδιο του πυριτίου (silica-on-silicon) [67], και τη μονολιθική ολοκλήρωση δίδυμων IQM με πολωτικά στοιχεία στην πλατφόρμα SOI [54]. Τα MZMs/IQMs εξακολουθούν να αναπτύσσονται κυρίως ως αυτόνομες συσκευές και καμία από τις προσπάθειες αυτές δεν περιλαμβάνουν κοινή ολοκλήρωση με ηλεκτρικούς δυαδικούς οδηγητές (binary drivers) ή ψηφιακούς σε αναλογικούς μετατροπείς (DACs).

Έχοντας λάβει υπόψιν όλα τα παραπάνω και αναγνωρίζοντας τις ανάγκες καθώς και τις αδυναμίες των οπτικών διασυνδέσεων τόσο εντός όσο και μεταξύ υπολογιστικών κέντρων, αυτή η διατριβή στοχεύει στην κάλυψη και των δύο κατηγοριών κάνοντας το επόμενο βήμα με χρήση της οπτικής πολυμερικής

τεχνολογίας για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων οπτικών πομπών 100 Gb/s με απλό σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK καθώς και ευέλικτων πομπών πολλαπλών ροών με σχήματα ανώτερης τάξης (m-QAM) συνολικής χωρητικότητας 1 Tb/s. Η ανάπτυξη αυτών των πομποδεκτών επιτυγχάνεται μέσω ενός ευέλικτου συνδυασμού πλατφορμών ολοκλήρωσης που μπορούν να διαθέσουν φωτονικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα υψηλής απόδοσης για υψηλές ταχύτητες με χωρητικότητες gigabit και terabit. Αναλυτικότερα, η διατριβή αυτή χωρίζεται σε 6 κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο 1 αναλύονται οι βασικές έννοιες και οι οπτικές διατάξεις της τεχνολογίας τόσο των σχημάτων απευθείας διαμόρφωσης κατά πλάτος όσο και των σχημάτων ανώτερης τάξης κατά πλάτος και κατά φάση καθώς και οι αντίστοιχες τεχνικές ανίχνευσης οπτικής μετάδοσης, οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια. Στα πλαίσια αυτά, αρχικά περιγράφεται η αρχή λειτουργίας της δομής του οπτικού διαμορφωτή Mach-Zehnder (MZM) και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορεί να οδηγηθεί, ούτως ώστε να διαμορφώνει σήματα είτε ως προς το πλάτος (ένταση) είτε ως προς τη φάση τους. Βάσει του μοντέλου MZM, θα περιγραφεί η αρχή λειτουργίας του διαμορφωτή ορθογωνιότητας IQ-MZM και η διαδικασία δημιουργίας οποιοδήποτε τετραγωνικού διαγράμματος αστερισμού στο μιγαδικό επίπεδο, όπως QPSK και 16-QAM. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή της άμεσης καθώς και της σύμφωνης τεχνικής φώρασης (coherent detection) στο δέκτη, λαμβάνοντας υπόψη ότι μόνο ο δεύτερος τρόπος επιτρέπει την σωστή ανάκτηση δεδομένων τα οποία είναι διαμορφωμένα τόσο στη φάση όσο και στο πλάτος ανεξαρτήτως του σχήματος διαμόρφωσης και της μορφής του διαγράμματος αστερισμού του. Η συγκεκριμένη διάταξη που αναλύεται αφορά σύμφωνο οπτικό δέκτη που βασίζεται στη χρήση ενός οπτικού υβριδίου 90° και ενός τοπικού ταλαντωτή, αποτελώντας πρακτικά το οπτικό ανάλογο ενός ηλεκτρικού μίξερ που χρησιμοποιείται στη ηλεκτρονικές τηλεπικοινωνίες. Στην περίπτωση που ο συγκεκριμένος δέκτης διαφοροποίησης φάσης συνδυαστεί και με μία οπτική δομή διαχωρισμού των πολωτικών συνιστωσών, δίνεται η δυνατότητα λήψης διαμορφωμένων σημάτων στα οποία έχει εφαρμοστεί και η ευρέως διαδομένη τεχνική της πολυπλεξίας ως προς την πόλωση, διπλασιάζοντας πρακτικά τη φασματική αποδοτικότητα του καναλιού σε μία οπτική συχνότητα.

Στο δεύτερο μέρος του ίδιου κεφαλαίου γίνεται μια εκτενής ανάλυση στις ιδιότητες και στα πλεονεκτήματα της τηλεπικοινωνιακής πλατφόρμας οπτικής ολοκλήρωσης υψηλών επιδόσεων βασισμένη σε πολυμερικές διατάξεις και κυρίως ηλεκτρο-οπτικές συμβολομετρικές δομές τύπου Mach-Zehnder με εξαιρετικά ταχεία ηλεκτρο-οπτική απόκριση (EO response), επιδεικνύοντας υψηλούς ηλεκτρο-οπτικούς συντελεστές ικανούς να υποστηρίξουν ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 100 Gb/s για την κατασκευή ολοκληρωμένων πομπών για εφαρμογές διασύνδεσης εντός υπολογιστικών κέντρων. Με βάση πάντα τα οπτικά πολυμερή, παρουσιάζεται εκτενώς και μια δεύτερη πολυμερική παθητική πλατφόρμα φωτονικής ολοκλήρωσης μονορυθμικής λειτουργίας με χαμηλή απώλεια διάδοσης (0.5 dB/cm στα 1550 nm) και χαμηλό κόστος, η οποία επιδεικνύει μια μεγάλη ποικιλία μονολιθικά ολοκληρωμένων δομών (φράγματα περίθλασης Bragg, θερμο-οπτικούς διακόπτες, μεταβλητούς οπτικούς εξασθενητές). Με τη συγκεκριμένη πλατφόρμα επιτυγχάνεται εύκολα υβριδική ολοκλήρωση δομών InP, όπως τα chip κέρδους (gain chip, GC) και οι φωτοδιοδοί (PDs). Εκμεταλλευόμενοι αυτές τις δυνατότητες και με συνδυασμένη χρήση τους, επιτυγχάνεται η κατασκευή οπτικών δομών για την ανάπτυξη υψίρρυθμων ευέλικτων οπτικών πομπών πολλαπλών ροών για εφαρμογή σε ευέλικτα οπτικά δίκτυα.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται μια εκτενής ανάλυση σχετικά με την ανάγκη για χρήση υψίρρυθμων οπτικών πομποδεκτών λόγω των αυξημένων απαιτήσεων της κίνησης δεδομένων παγκοσμίως, που προκύπτουν τόσο από τους αυξημένους χρήστες όσο και από τις απαιτητικές εφαρμογές των επιχειρήσεων αναγκάζοντας τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων να πρέπει καλύψουν όλη αυτή τη ζήτηση και κυκλοφορία. Αναγνωρίζοντας όλους αυτούς τους λόγους, οι πάροχοι έπρεπε να στραφούν υποχρεωτικά στις οπτικές επικοινωνίες για να μπορέσουν να ανταπεξέλθουν στα δεδομένα της εποχής, βελτιώνοντας και πολλαπλασιάζοντας παράλληλα τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων. Κατ' επέκταση, οι οπτικές διασυνδέσεις χωρίστηκαν σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την απόσταση μετάδοσης. Η πρώτη αφορά τις διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων με μέγιστη απόσταση μετάδοσης έως 4 km, ενώ η δεύτερη σχετίζεται με τις διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων για αποστάσεις που μπορούν να αγγίζουν τα 5000 km ή ακόμα περισσότερο. Κατ' αυτό τον τρόπο γίνεται σαφές ότι αυτές οι δύο κατηγορίες είναι λογικό να διαφέρουν τόσο στην τεχνολογία όσο και στο είδος της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται για την επίτευξη των στόχων που αφορούν την κάλυψη της ζήτησης. Συνεπώς, στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα είδη των υπάρχοντων οπτικών πομποδεκτών καθώς και οι αρχιτεκτονικές δικτύωσης στις οποίες βρίσκουν εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη και τους προτεινόμενους υψίρρυθμους πομποδέκτες αυτής της διατριβής.

Το κεφάλαιο 3 εστιάζει στην κατασκευή και την αξιολόγηση ολοκληρωμένων πολυμερικών οπτικών πομπών υπερ-υψηλών ταχυτήτων βασισμένων σε οπτικό σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK για διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων εντός υπολογιστικών κέντρων για αποστάσεις μέχρι 2 km με ρυθμούς μετάδοσης έως 100 Gb/s. Με βάση την πολυμερική συμβολομετρική διάταξη τύπου Mach-Zehnder και την κόλληση μιας ενεργής δομής λείζερ ανάδρασης ανεστραμμένη κατά 90 μοίρες υλοποιείται ένας ολοκληρωμένος οπτικός πομπός σε συνδυασμό με την χρήση ηλεκτρονικού κυκλώματος πολυπλεξίας και ενίσχυσης δυαδικών σημάτων τελικού παραγόμενου ρυθμού 100 Gb/s κατασκευασμένου στην πλατφόρμα InP-DHBT. Παράλληλα, θα παρουσιαστούν η πειραματική τοπολογία υποστήριξης για την ορθή λειτουργία του πομπού 100 Gb/s όσο και οι ηλεκτρονικές συσκευές πολυπλεξίας και διπλασιασμού συχνότητας που είναι απαραίτητες για την υποστήριξη και την δημιουργία των δύο ηλεκτρονικών σημάτων εισόδου 50 Gb/s καθώς και του ηλεκτρικού ρολογιού 50 GHz. Στη συνέχεια, αυτός ο ολοκληρωμένος πομπός τοποθετήθηκε και αξιολογήθηκε μέσω δύο διαφορετικών εργαστηριακών πειραμάτων επίδειξης στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (Ε.Φ.Ε) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK παρουσιάζοντας επιτυχή λειτουργία χωρίς λάθη για ρυθμούς μετάδοσης 80, 90 και 100 Gb/s. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη πειραματική διάταξη υλοποιήθηκε για την αξιολόγηση του οπτικού πομπού για ρυθμούς μετάδοσης έως 80 Gb/s, καθώς χρησιμοποιήθηκε από την πλευρά του οπτικού δέκτη ένας οπτικός EAM, ο οποίος παίζει το ρόλο του οπτικού αποπολυπλέκτη και είναι ικανός να αποπολυπλέκει οπτικά το οπτικό διαμορφωμένο κανάλι 80 Gb/s σε δύο 40 Gb/s. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε μια τέτοια πειραματική τοπολογία αφορούσε το γεγονός της έλλειψης οπτικού δέκτη ικανού να ανιχνεύει οπτικά σήματα μέχρι 100 Gb/s. Ο περιορισμός στην ανίχνευση οπτικών σημάτων με ρυθμούς μεγαλύτερους των 80 Gb/s οφειλόταν στο περιορισμένο εύρος ζώνης του EAM ($BW < 24$ GHz). Γι αυτό το λόγο, με την έλευση ενός οπτικού δέκτη ικανού να ανιχνεύει οπτικά σήματα μέχρι 100 Gb/s χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη πειραματική διάταξη, όπου ο οπτικός EAM αντικαταστάθηκε από ένα ολοκληρωμένο pin-δέκτη ενσωματωμένο με ηλεκτρικό αποπολυπλέκτη 1:2 ικανό να ανιχνεύει οπτικών σημάτων με σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK μέχρι 100 Gb/s. Τέλος, παρουσιάζεται το πεδίο εφαρμογής του συγκεκριμένου πομπού 100 Gb/s εντός υπολογιστικών κέντρων και προτείνεται η καταλληλότερη αρχιτεκτονική, η οποία σχετίζεται με τοπολογία δακτυλίου με οπτικά κυκλώματα μεταγωγής (ring-based optical circuit switching domain) για διασυνδέσεις PODs (point of delivery) μέχρι 2 km.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται λεπτομερώς η έννοια των ευέλικτων οπτικών πομποδεκτών καθώς και το πεδίο εφαρμογής τους, αναλύοντας τον ορισμό του ευέλικτου οπτικού δικτύου. Με βάση αυτό το νέο τύπο δικτύου, γίνεται αναφορά στις τοπολογίες του μητροπολιτικού δικτύου, δικτύου κορμού και των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, καθώς σε αυτά τα δίκτυα εμφανίζεται η απαίτηση για συνολικές ρυθμηκότητες που να ξεπερνούν το 1 Tb/s καθώς και αυτοματοποιημένο έλεγχο. Όπως είναι κατανοητό, σε τέτοιου είδους δίκτυα είναι απαραίτητη η χρήση των προτεινόμενων οπτικών πομποδεκτών πολλαπλών ροών, πράγμα που συνεπάγεται την απαραίτητη χρήση οπτικών κόμβων με δυνατότητα ευελιξίας και ελέγχου. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται επιλεκτικοί μεταγωγείς μήκους κύματος (Wavelength Selective Switches, WSSs) και προτείνεται η καταλληλότερη σχεδίαση που αναδεικνύει στο μέγιστο βαθμό τις δυνατότητες των προτεινόμενων ευέλικτων οπτικών πομποδεκτών πολλαπλών ροών. Παράλληλα, μελετώνται οι τρόποι διασύνδεσης και μεταφοράς των ηλεκτρικών ροών δεδομένων του δικτύου μέσω ενθυλάκωσης αυτών σε ενός γενικού τύπου πλαισίου μεταφοράς γνωστό ως optical transport network (OTN), το οποίο αποτελεί το βασικό πρωτόκολλο μεταφοράς των δεδομένων των οπτικών δικτύων. Καθότι αυτοσκοπός των νέων αυτών δικτύων αποτελεί η ευελιξία καθώς και ο απομακρυσμένος έλεγχος πέραν από τις χωρητικότητες terabit, παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό μια τοπολογία ελέγχου τόσο των ευέλικτων πομποδεκτών όσο και της αρχιτεκτονικής του ευέλικτου κόμβου βασισμένης στη γραφική γλώσσα προγραμματισμού Labview, με το οποίο ελέγχονται τόσο οι οπτικές όσο και οι ηλεκτρικές παράμετροι του εν λόγω συστήματος, αποδίδοντας τις δυνατότητες των πολλαπλών οπτικών ροών, των πολλαπλών ρυθμών και των πολλαπλών σχημάτων διαμόρφωσης ανώτερης τάξης QAM. Ο έλεγχος των ηλεκτρικών παραμέτρων επιτυγχάνεται μέσω του προγραμματισμού μιας πλακέτας FPGA με χρήση της γλώσσας Verilog, αποδίδοντας κατά αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα αναπροσαρμογής σε πραγματικό χρόνο των λειτουργιών των ηλεκτρικών πομπών οδήγησης (του παραγόμενου ρυθμού δεδομένων όσο και του αριθμού των ενεργών πομπών) σε συνδυασμό με εξωτερικούς υψίρρυθμους ψηφιακούς σε αναλογικούς μετατροπείς τριών bits κατασκευασμένους σε InP-DHBT για την δημιουργία πολυεπίπεδων ηλεκτρικών σημάτων μέχρι οκτώ σταθμών σε ρυθμούς μέχρι 25 Gbaud, οι οποίοι οδηγούν τους ηλεκτροπτικούς διαμορφωτές ορθογωνιότητας (IQ-MZM).

Στο κεφάλαιο 5 θα παρουσιαστούν όλα τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν τους ευέλικτους οπτικούς πομποδέκτες, οι οποίοι μπορούν να παράγουν πολλαπλές οπτικές ροές ταυτόχρονα και βασίστηκαν στην υβριδική ολοκλήρωση της τεχνολογίας InP (δομές λείζερ) με παθητικές δομές δρομολόγησης του φωτός αναπτυγμένες στην παθητική πολυμερική πλατφόρμα ολοκλήρωσης χαμηλών απωλειών. Κάθε οπτική ροή μπορεί να μεταφέρει πληροφορία σε μεταβλητό μήκος κύματος και τύπο διαμόρφωσης (m-QAM) ανάλογα με την απόσταση μετάδοσης και τον όγκο των δεδομένων του σήματος, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τη συνολική χωρητικότητα μέσω επιλεκτικότητας στην πόλωση. Για πρώτη φορά δίνεται αυτή η δυνατότητα της επιλογής του είδους της πόλωσης (μονής ή διπλής) από ένα ολοκληρωμένο πομποδέκτη καθώς η επικρατούσα τάση προσέγγισης αφορά τη χρήση υπερ-καναλιών (superchannels) σε ολοκληρωμένα οπτικά κυκλώματα ενώ τελευταία παρουσιάστηκε η χρήση ευέλικτων (μεταβλητό σχήμα διαμόρφωσης αλλά σταθερό μήκος κύματος) superchannels χωρίς να έχει γίνει ιδιαίτερος λόγος για την ιδιότητα πολλαπλών ροών με πραγματική ευελιξία σε όλες τις οπτικές (φυσικό στρώμα) παραμέτρους όπως το μήκος κύματος, το σχήμα διαμόρφωσης, ο αριθμός των οπτικών φορέων, η επιλεκτικότητα στην πόλωση. Στη συνέχεια δείχθηκε η δημιουργία μέσω ενός πρωτότυπου ευέλικτου οπτικού πομποδέκτη μέχρι δύο οπτικών ροών δεδομένων με αλλαγή του τύπου διαμόρφωσης από διαμόρφωση κατά φάση QPSK στα 28 Gbaud σε ένα οπτικό φέρον και δύο ορθογώνιες πολώσεις (1-carrier DP-QPSK) σε QPSK μιας πόλωσης και 2 οπτικές φέρουσες (2-carrier QPSK) με χρήση ανεπτυγμένου λογισμικού σε labview και FPGA παρουσιάζοντας αξιόπιστη λειτουργία χωρίς λάθη μέσα από μετάδοση σε μονότροπη οπτική ίνα 100 km, χρησιμοποιώντας τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (Digital Signal Processing-DSP) για την ορθή ανάκτηση των δεδομένων στη μεριά του σύμφωνου δέκτη.

Τέλος, το κεφάλαιο 6 ανακεφαλαιώνει όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα διδακτορική διατριβή και παραθέτει συγκεκριμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα που στοχεύουν στη περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας στις σύγχρονες και νέες γενιάς οπτικές διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων καθώς και στα δίκτυα κορμού για τις διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων με χρήση των προτεινόμενων οπτικών πομπών πολλαπλών ροών με χρήση ανώτερων σχημάτων διαμόρφωσης. Αναλυτικότερα, η υιοθέτηση συστοιχιών 4 ή ακόμα και 8 πολυμερικών διαμορφωτών MZ σε συνδυασμό με την υβριδική ολοκλήρωση αντίστοιχων λείζερ εξωτερικής κοιλότητας και τη χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων InP-DHBT που επιτρέπουν πλέον ηλεκτρικούς ρυθμούς μετάδοσης έως 200 Gb/s, θα μπορούσε να αποτελέσει το επόμενο βήμα για πομποδέκτες με ρυθμούς μετάδοσης 400 ή 800 Gb/s ανά WDM κανάλι στα μελλοντικά οπτικά δίκτυα εντός υπολογιστικών κέντρων. Παράλληλα, η μείωση του αριθμού της συστοιχίας των πολυμερικών MZ μαζί με τη χρήση InP-DHBT DACs για την παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων τεσσάρων αντί δύο επιπέδων που οδηγεί στην διαμόρφωση PAM-4 και διπλασιασμό του τελικού ρυθμού δεδομένων θα μπορούσε επίσης να αποτελέσει μια λύση για τις μελλοντικές οπτικές διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων, ακολουθώντας τα πρότυπα του πρόσφατα ανακοινωθέν 400G Ethernet. Ιδιαίτερα για τα μελλοντικά ευέλικτα οπτικά δίκτυα κορμού, τα οποία θα υπακούουν στις αρχές του SDN, και τις ανάγκες τους για χωρητικότητα που μπορεί να ξεπερνά το 1 Tb/s ανά συσκευή, προτείνεται η αύξηση του εύρους ζώνης των ηλεκτροπτικών διαμορφωτών IQ (είτε πολυμερικών είτε InP) και του ρυθμού συμβόλων από 64 σε 128 Gbaud με χρήση ενός νέου concept που στηρίζεται στη διεμπλοκή (interleaving) ηλεκτρονικών σημάτων χαμηλότερων ρυθμών μετάδοσης, ακολουθώντας ένα συνδυασμό SiGe BiCMOS με InP-DHBT με στόχο έναν βέλτιστο συνδυασμό μεγάλου εύρους ζώνης, υψηλής συνολικής απόδοσης και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Τεχνολογία Σχημάτων Διαμόρφωσης Ανώτερης Τάξης για Οπτική Μετάδοση Πληροφορίας και Πολυμερικά Υλικά

1.1 Επιτεύγματα και Προκλήσεις της Τεχνολογίας των Οπτικών Τηλεπικοινωνιών

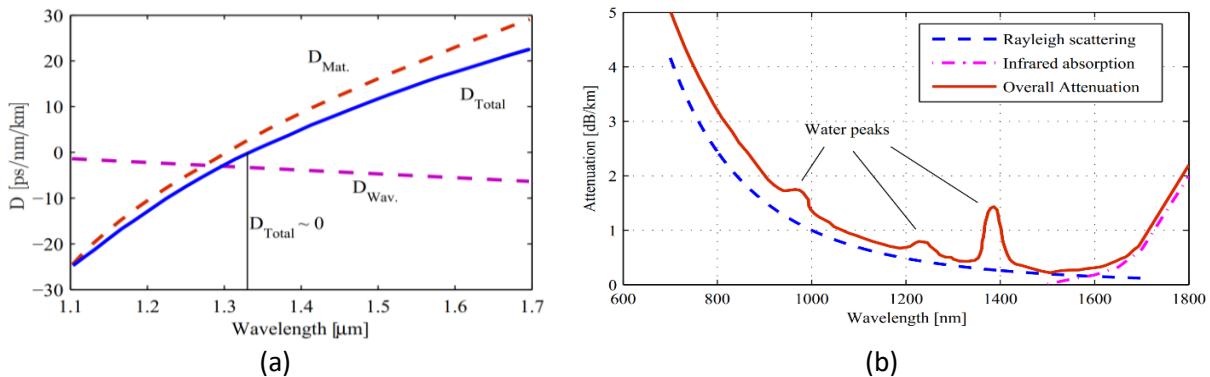
Η σημερινή κοινωνία βασίζεται στην ταχεία και αξιόπιστη ανταλλαγή πληροφοριών. Τα προηγμένα συστήματα επικοινωνίας υποστηρίζουν τη λειτουργία βιομηχανιών, επιχειρήσεων και τραπεζών, οχημάτων και συστημάτων μεταφοράς, ηλεκτρονικά είδη οικιακής ψυχαγωγίας καθώς και τη παγκόσμια ροή ειδήσεων και γνώσεων. Επιπλέον, η υψηλής ποιότητας μετάδοση βίντεο σε πραγματικό χρόνο μειώνει την ενεργοβόρα ανάγκη για μεταφορά εγγράφων και των ανθρώπων, συμβάλλοντας έτσι σε ένα βιώσιμο περιβάλλον. Πολλές αναδυόμενες υπηρεσίες και εφαρμογές, για παράδειγμα, ιατρική διάγνωση και θεραπεία, ασφάλεια και καθοδήγηση στην κυκλοφορία και το διαδίκτυο των πραγμάτων, περιμένουν στην γωνία, επεκτείνοντας ακόμη περισσότερο τις ανάγκες για επικοινωνίες υψηλής χωρητικότητας, όπως αναλύθηκαν παραπάνω. Τα μέσα πληροφόρησης που καθιστούν δυνατές αυτές τις υπηρεσίες αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από οπτικές ίνες. Κανένα άλλο γνωστό μέσο δεν μπορεί να υποστηρίξει και να συνδυάσει τις τεράστιες απαιτήσεις για ρυθμό δεδομένων, αξιοπιστία και ενεργειακή απόδοση. Μετά από πρωτοποριακά πειράματα στη δεκαετία του 1960 και του '70, οι οπτικές ίνες καθορίστηκαν για εμπορική ανάπτυξη στη δεκαετία του '80 και του '90, αντικαθιστώντας τα παλαιότερα καλώδια χαλκού και τους δορυφόρους επικοινωνίας για τη μετάδοση μεγάλων αποστάσεων. Ο αγώνας για συνεχώς καλύτερες επιδόσεις συνεχίζεται και η δυναμικότητα μιας ενιαίας ίνας έχει ενισχυθεί από πολλές τάξεις μεγέθους, από λίγα Gb/s το 1990 έως εκατοντάδες Tb/s σήμερα, που μέχρι στιγμής ανταποκρίνονται λίγο πολύ στην ταχεία ανάπτυξη της κοινωνίας αιτήματα.

Αναλυτικότερα, τα συστήματα επικοινωνίας με οπτικές ίνες παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι της ηλεκτρικής μετάδοσης χρησιμοποιώντας καλώδιο χαλκού. Αυτά τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν χαμηλή εξασθένιση, μεγάλη απόσταση μετάδοσης και υψηλή χωρητικότητα δεδομένων. Οι σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές ίνες παρουσιάζουν συντελεστές εξασθένισης κάτω από 0.2 dB/km σε εύρος ζώνης πολλών THz σε σύγκριση με δεκάδες dB/km των απωλειών για εύρος ζώνης μερικών εκατοντάδων MHz για τυπικό ομοαξονικό καλώδιο [68], δηλαδή περισσότερο από 10 Tb/s χωρητικότητας μπορούν να μεταδίδονται για αποστάσεις άνω των 10.000 χιλιομέτρων. Κατά συνέπεια, οι οπτικές ίνες έχουν αναπτυχθεί μαζικά στο δίκτυο του πυρήνα από την εισαγωγή τους στα μέσα της δεκαετίας του 1970 και σήμερα αποτελούν βασικό παράγοντα για την πρόσβαση και τις υπηρεσίες ευρυζωνικού διαδικτύου καθώς απαρτίζουν τον κύριο μεταφορέα της κίνησης του πρωτοκόλλου Internet (IP).

Ως οπτική τεχνολογία ορίζεται αρχικά το πλήθος των τεχνολογικών εκείνων λύσεων που αποτελούν μια point to point ενσύρματη γραμμή μετάδοσης και η οποία ιστορικά συνδέεται με τη χρήση οπτικής ίνας σα μέσο διάδοσης. Το βασικό στοιχείο για την επιλογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας για τις σύγχρονες ενσύρματες ψηφιακές επικοινωνίες είναι το εύρος ζώνης του διαύλου. Το τελευταίο σχετίζεται κυρίως με το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας, που σα μέσο μετάδοσης παρέχει εύρος ζώνης κατά πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες ενώ, δεν εμφανίζει ευαισθησία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Προφανώς η διάδοση των οπτικών επικοινωνιών βασίστηκε και στην ανάπτυξη άλλων components/διατάξεων όπως οπτικοί πομποί και δέκτες αλλά και ενισχυτές, οι οποίες αναφέρονται εν συντομία εδώ, καθώς και σε χρήση ανεπτυγμένων μεθόδων ψηφιακών επικοινωνιών όπως πολυπλεξία και προηγμένους τρόπους διαμόρφωσης. Σήμερα σαν οπτική τεχνολογία στα συστήματα επικοινωνιών ονομάζεται οτιδήποτε σχετίζεται με τη χρήση κάποιου από τα βασικά δομικά στοιχεία μιας point to point ζεύξης, με αποτέλεσμα να ονοματίζονται σαν οπτικά ασύρματα δίκτυα, τα συστήματα αυτά που ενώ χρησιμοποιούν την οπτική τεχνολογία των πομπών και δεκτών δεν χρειάζονται την οπτική ίνα σα μέσο διάδοσης.

Οπτική Ίνα [69]: Οι οπτικές ίνες χωρίζονται σε μονότροπες και πολύτροπες. Οι τελευταίες έχουν μεγάλη διατομή πυρήνα (50-85 μm) και συνεπώς οι διαδιδόμενες οπτικές ακτίνες μπορούν να θεωρηθούν σαν δέσμες και άρα μπορούν να διαδοθούν μέσω διαφορετικών διαδρομών μέσα στην ίνα. Αυτό μπορεί να φέρει καθυστέρηση στη μετάδοση δεσμών και άρα πιθανή χρονική διεύρυνση των οπτικών παλμών, ένα φαινόμενο που καλείται διασπορά τρόπων διάδοσης. Σαν αποτέλεσμα, η μετάδοση με πολύτροπες ίνες περιορίζεται σε λίγα χιλιόμετρα και ρυθμούς μετάδοσης που δεν υπερβαίνουν τα εκατοντάδες Mb/s. Το βασικό υλικό των οπτικών ινών είναι το silica (SiO_2). Τελευταία οπτικές ίνες με βάση πολυμερικά υλικά

(plastic optical fibres, POF) χρησιμοποιούνται ευρέως για εφαρμογές επικοινωνιών σε μικρές αποστάσεις. Το βασικό υλικό των πλαστικών οπτικών ινών είναι PMMA. Μικραίνοντας τη διατομή του πυρήνα της ίνας σε $\sim 8 \mu\text{m}$ έχουμε μονότροπη διάδοση και το πρόβλημα της διασποράς τρόπων διάδοσης απαλείφεται. Στο διάγραμμα φαίνεται η διασπορά και η εξασθένηση μιας μονότροπης ίνας, ο συνδυασμός των οποίων καθορίζει και τα μήκη κύματος λειτουργίας σε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η χρωματική διασπορά οφείλεται τόσο στην διασπορά υλικού (D_{Mat} στην εικόνα 1.4 (a)) όσο και στη διασπορά του κυματοδηγού (D_{W}) και σχετίζεται με την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από τη συχνότητα, οπότε οι διάφορες συχνότητες/μήκη κύματος που συνιστούν τον οπτικό παλμό διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες διευρύνοντας χρονικά έναν οπτικό παλμό. Αν και η χρωματική διασπορά περιορίζει το ρυθμό μετάδοσης σε μερικά Gb/s για εκατοντάδες χιλιόμετρα, η χρήση κατάλληλων παθητικών τρόπων αντιστάθμισης της διασποράς από τη μία αλλά και οπτικών ενισχυτών από την άλλη μπορεί να επεκτείνει την οπτική μετάδοση ενός καναλιού στα 10 Gb/s σε χιλιάδες χιλιόμετρα.



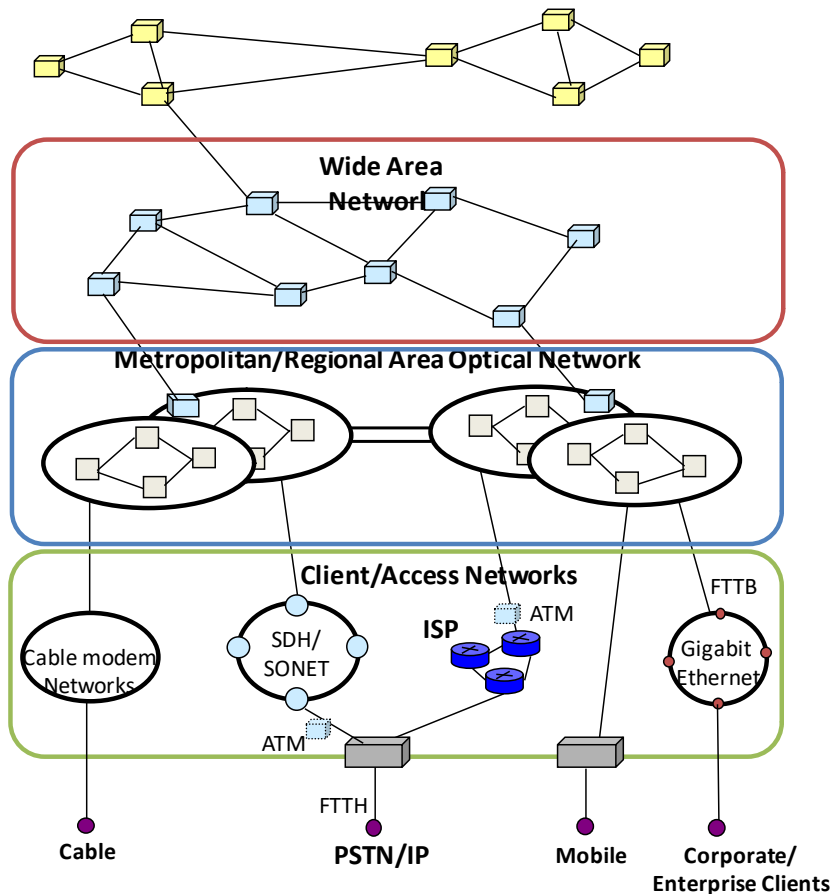
Εικόνα 1.4: (α) Χρωματική διασπορά σε μονότροπη οπτική ίνα σε σχέση με το μήκος κύματος διάδοσης και (β) η εξασθένηση που επιφέρει η ίδια ίνα σε ένα οπτικό σήμα σε σχέση με το μήκος κύματος του σήματος [70].

Οπτικοί Πομποί/Δέκτες: Ιστορικά η εξέλιξη των οπτικών ενσύρματων επικοινωνιών στηρίχτηκε τόσο στο εύρος ζώνης της ίνας όσο και στη διαθεσιμότητα κατάλληλων components που το καθιστούσαν αξιοποιήσιμο. Οι πιο απλοί οπτικοί πομποί που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα Light Emitting Diodes – LEDs. Η βασική αρχή λειτουργίας τους σχετίζεται με την αυθόρμητη εκπομπή και παράγουν ιδιαίτερα χαμηλή ισχύ. Τα πρώτα ημιαγωγικά lasers αντικαταστάθηκαν από πολλές γενιές ημιαγωγικών lasers για τηλεπικοινωνίες οι οποίες στόχευαν στο χαμηλό εύρος ζώνης εκπομπής, χαμηλό Threshold ρεύμα και στην υψηλή οπτική ισχύ εξόδου. Το εύρος ζώνης άμεσης διαμόρφωσης έπαψε να είναι ζήτημα σε ρυθμούς πάνω από 10 Gb/s με την χρήση εξωτερικού διαμορφωτή. Οι σημερινοί πομποί αποτελούνται από ημιαγωγικό laser (III-V ημιαγωγών όπως InGaAsP, AlGaInAs κτλ) τύπου Distributed Feedback Laser (DFB) σε συνδυασμό με ημιαγωγικό (συνήθως από InGaAsP) ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή σε διαμόρφωση Mach Zehnder για ρυθμούς πάνω από 40 Gb/s. Αντίστοιχη εξέλιξη είχαν και οι δέκτες, των οποίων οι διαμορφώσεις έχουν εξελιχθεί έτσι ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή απόκριση συχνότητας (>40 GHz γρήγορες φωτοδίοδοι) με ταυτόχρονη ανοχή ευθυγράμμισης και χαμηλό κόστος. Στον τομέα των ultra-fast δεκτών, έχει σημειωθεί πρόοδος σε travelling wave photodetectors, με υψηλή ισχύ κορεσμού και fast wave-guide avalanche photodiodes.

Οπτικοί Ενισχυτές: Η οπτική ίνα, λόγω εξασθένησης παρουσιάζει απώλειες οι οποίες συντελούν στην μείωση του μεταδιδόμενου σήματος. Η μεγάλη επανάσταση στις οπτικές επικοινωνίες επιτεύχθηκε με την εισαγωγή του οπτικού ενισχυτή σε συστήματα WDM, όπου το εύρος ζώνης της ίνας μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από πολλά μήκη κύματος. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι το εύρος ζώνης ενός τέτοιου συστήματος τελικά περιορίζεται και άρα καθορίζεται από το εύρος ζώνης του οπτικού ενισχυτή.

1.2 Κατηγοριοποίηση Δικτύων

Αν και κανείς μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλούς τρόπους για να κατηγοριοποιήσει τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, μια προσέγγιση είναι δυνατό να γίνει με βάση την έκτασή τους. Με τον όρο δίκτυα πρόσβασης (Access Networks), θεωρούνται τα δίκτυα αυτά με τα οποία διασυνδέεται απευθείας ένας χρήστης και αναφέρονται στα δίκτυα, είναι το τελευταίο στάδιο ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου πριν η πληροφορία φτάσει στον τελικό χρήστη. Στα δίκτυα πρόσβασης συμπεριλαμβάνονται και τα τοπικά δίκτυα (Local-Area Networks, LANs).



Εικόνα 1.5: Χαρακτηριστική δομή τηλεπικοινωνιακών δικτύων με βάση την έκτασή τους [71].

Η συνολική τους έκταση δεν υπερβαίνει τα μερικά χιλιόμετρα ενώ δεν απαιτείται να έχουν μεγάλη χωρητικότητα, καθώς απευθύνονται στον τελικό χρήστη ο οποίος ακόμα και στην περίπτωση των εταιρικών συνδέσεων έχει χαμηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης αλλά απαιτεί και χαμηλό κόστος. Αντίθετα τα μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Area Networks, MAN) συνήθως περιορίζονται σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, για παράδειγμα στα όρια ενός μεγάλου δήμου (μερικές δεκάδες χιλιόμετρα) και αποσκοπούν στη διασύνδεση και εξυπηρέτηση πολλαπλών δικτύων πρόσβασης. Οι απαιτήσεις ένα MAN δίκτυο είναι διαφορετικές. Εδώ έχει σημασία να είναι εύκολα επεκτάσιμα σε εύρος ζώνης αλλά να είναι και ευέλικτα αφού οι υπηρεσίες που υποστηρίζουν ποικίλουν. Τέλος τα δίκτυα ευρείας έκτασης (Wide Area Networks, WAN) αφορούν στη διασύνδεση γεωγραφικά απομακρυσμένων περιοχών και συνήθως ορίζονται σε επίπεδο χώρας. Είναι δυνατό, δε, να καλύπτουν μέχρι και υπερωκεάνιες αποστάσεις αν και αυτά συνήθως αφορούν σε μια κατηγορία από μόνα τους (Global Area Networks). Στα δίκτυα αυτά η τηλεπικοινωνιακή κίνηση πρέπει να συναθροίζεται σε μεγάλο μεγέθους οντότητες δεδομένων και είναι περισσότερο στατική και προβλέψιμη συγκριτικά με την κίνηση των μητροπολιτικών δικτύων.

1.3 Προδιαγραφές Ιδανικών Δικτύων

Ανεξάρτητα από το είδος και την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, η δικτυακή υποδομή θα πρέπει να μπορεί και ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις των υπηρεσιών οι οποίες σχετίζονται με την αντίστοιχη εφαρμογή και μπορεί να είναι είτε τηλεπικοινωνιακές είτε άλλους είδους τύπου cloud. Τα ιδανικά δίκτυα υποδομής θα πρέπει να μπορούν να εξυπηρετήσουν μεγάλα ποσά κίνησης μεταξύ πολύ απομακρυσμένων περιοχών με ποιότητα υπηρεσιών όπως αυτή καθορίζεται από τα εκάστοτε χαρακτηριστικά όλων των παρεχόμενων υπηρεσιών και τις ανάγκες των εφαρμογών. Παρακάτω αναλύονται δύο παραδείγματα: τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών πρέπει να μπορούν να συναθροίζουν τηλεφωνικές συνδέσεις που χαρακτηρίζονται από σταθερού εύρους ζώνης αμφίδρομες συνδέσεις με εγγυημένα δεσμευμένους δικτυακούς πόρους για όλο το χρόνο που διαρκεί η επικοινωνία (κύκλωμα) για την οποία ο χρήστης πληρώνει με δεδομένο αριθμό λαθών στα αποσταλμένα bits που δεν επηρεάζουν την ποιότητα συνομιλίας των δύο χρηστών. Από την άλλη, αν η εφαρμογή αφορά στην αποστολή ενός υψηλής ποιότητας video (ultra-high definition) για επεξεργασία σε κάποια εταιρεία είναι πιο σημαντική η δέσμευση των δικτυακών αλλά και των

υπολογιστικών πόρων που θα την αποθηκεύσουν, η ελαχιστοποίηση των λαθών αλλά και η ασφάλεια των δεδομένων από πιθανή υποκλοπή. Οι απαιτήσεις των εφαρμογών για ποιότητα υπηρεσίας σχετίζονται:

- **Υψηλή ταχύτητα σύνδεσης με δυνατότητα κλιμάκωσης:** Για κάθε ένα από τα παραπάνω δίκτυα οι χρήστες και οι υπηρεσίες μπορεί να ποικίλουν όμως δεν παύουν να απαιτούν συνεχώς νέες συνδέσεις με μεγαλύτερο εύρος ζώνης είτε αυτό είναι σε επίπεδο μεμονωμένου χρήστη και αφορά στο δίκτυο πρόσβασης είτε είναι σε επίπεδο σύνδεσης κόμβων δικτύου κορμού. Αυτό απαιτεί από το δίκτυο τόσο μεγάλο εύρος ζώνης όσο και δυνατότητα δέσμευσης κατά απαίτηση.
- **Ελάχιστη καθυστέρηση (Minimum delay):** οι συνδέσεις αυτές απαιτούν να πραγματοποιούνται στο συντομότερο δυνατό χρονικό διάστημα. Αυτό αφορά τόσο τη δυνατότητα της ίδιας της υποδομής να το υποστηρίξει όσο και του επιπέδου ελέγχου του δικτύου να μπορεί να «αντιδράσει» σε ικανό χρονικό διάστημα.
- **Ευελιξία και αναδιαρθρωσιμότητα (reconfigurability):** Επίσης, η δέσμευση των εκάστοτε resources θα πρέπει να γίνεται ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής, ώστε να έχει τη δυνατότητα να έχει διαθέσιμο ένα μεγάλο εύρος ζώνης ακόμα και για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Οι όροι αυτοί συνήθως συνυπάρχουν παρέχοντας τη δυνατότητα για δέσμευση εύρους ζώνης κατ' απαίτηση (bandwidth on demand). Σε αυτή την απαίτηση συμβάλλει και η ανάγκη για υποστήριξη κινητικότητα (mobility) στο δίκτυο πρόσβασης που κάνει την πρόβλεψη της κίνησης και του φόρτου, ανέφικτη σε κάποια δίκτυα.
- **Υψηλή διαθεσιμότητα δικτύου:** Το ποσοστό του χρόνου, κατά τον οποίο η υπηρεσία είναι διαθέσιμη στο χρήστη, θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλό. Τυπικά, οι τηλεπικοινωνιακοί φορείς παρέχουν 99.999% διαθεσιμότητα. Αυτό σχετίζεται και με τη δυνατότητα αποκατάστασης υπηρεσίας (restoration of service). Το χαρακτηριστικό αυτό είναι άμεση συνέπεια της υψηλής διαθεσιμότητας στο δίκτυο. Η συνεχής παροχή υπηρεσιών προϋποθέτει την άμεση αποκατάσταση οποιασδήποτε βλάβης στο δίκτυο. Ιδανική αποκατάσταση στις βλάβες σε ένα δίκτυο μπορεί να επιτευχθεί στην περίπτωση που το 50% του διαθέσιμου εύρους ζώνης δεσμεύεται για το σκοπό αυτό.
- **Security (Ασφάλεια):** Το δίκτυο σαν υποδομή πρέπει να επιβάλει ένα ελάχιστο επίπεδο ασφάλειας των δεδομένων που υποστηρίζει καθώς και να επιτρέπει τη διαμόρφωση διαφορετικών επιπέδων ασφαλείας από υποκλοπές σε διαφορετικές υπηρεσίες.

Μέσα σε αυτή τη νέα πραγματικότητα οι τηλεπικοινωνιακοί/δικτυακοί φορείς απαιτείται να κατασκευάζουν δίκτυα, τα οποία να έχουν τη δυνατότητα παροχής εύρους ζώνης όποτε και όπου χρειάζεται, αφού δεν μπορούν να είναι σε θέση να προβλέψουν ούτε τον τόπο, αλλά ούτε και το χρόνο ζήτησης μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας από κάποιον χρήστη. Στην ιδανική περίπτωση, η τεχνολογική υποδομή του δικτύου οφείλει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- **Ευελιξία (Flexibility) και γρήγορη αναδιαρθρωσιμότητα:** Οι τεχνολογίες είναι ευέλικτες όταν είναι αναδιαρθρώσιμες στο ρυθμό αναδιάρθρωσης του δικτύου έτσι ώστε να μην επιφέρουν καθυστερήσεις στην εγκαθίδρυση κάποιας σύνδεσης και στη μεταφορά των δεδομένων.
- **Διαφάνεια (transparency):** Η έννοια της διαφάνειας στα οπτικά δίκτυα έχει διάφορες έννοιες οι οποίες συνήθως στη βιβλιογραφία συγχέονται. Έτσι αναφέρεται η διαφάνεια στο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων (bit rate-transparency): Με τον όρο αυτό εννοείται η δυνατότητα του δικτύου να λειτουργεί επιτυχώς ανεξάρτητα από το συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων και συνήθως υπονοείται ότι μπορεί να γίνει αύξηση του ρυθμού μετάδοσης χωρίς να χρειάζεται μεγάλη αλλαγή στην υποδομή. Στην πράξη, η διαφάνεια στο ρυθμό μετάδοσης είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί, καθώς η ανάγκη για δημιουργία και αναγέννηση του σήματος στο μέγιστο ρυθμό απαιτεί τον a priori καθορισμό του ρυθμού μετάδοσης. Αναφέρεται επίσης η διαφάνεια στο πρωτόκολλο (protocol transparency) σαν τη δυνατότητα του δικτύου να λειτουργεί επιτυχώς ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο. Συνήθως τα οπτικά δίκτυα υποστηρίζουν τη λεγόμενη διαφάνεια στην υπηρεσία (service transparency): Είναι η δυνατότητα του δικτύου να λειτουργεί επιτυχώς για οποιοδήποτε τύπο δεδομένων, με οποιοδήποτε επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας.
- **Δυνατότητα χειρισμού πολλών granularities:** Άμεση συνέπεια της διαφάνειας του δικτύου στο είδος των δεδομένων είναι η ικανότητά του να χειρίζεται επιτυχώς μικρές οντότητες δεδομένων (granularity) αλλά και μεγάλες ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Για παράδειγμα, στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα το εύρος ζώνης της κάθε σύνδεσης είναι δεδομένο, αλλά σε περιπτώσεις εφαρμογών τύπου Grid computing για παράδειγμα δεν ισχύει το ίδιο και η ποσότητα των δεδομένων που πρέπει να αποσταλεί ποικίλει.

- **Δομοστοιχείωση (modularity):** Ένα δίκτυο είναι ευέλικτο υπό την έννοια ότι προσαρμόζεται εύκολα στα συνεχώς εξελισσόμενα δίκτυα και μπορεί να κλιμακωθεί χωρίς να πρέπει να αλλάξει ριζικά, για παράδειγμα να μπορεί να αναβαθμιστεί η χωρητικότητα που υποστηρίζει χωρίς αλλαγή της υποδομής παρά μόνο με αύξηση των πόρων.
- **Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας:** Η ολική κατανάλωση ενέργειας στις τηλεπικοινωνιακές υποδομές έχει γίνει ένα κρίσιμο ζήτημα για τη βιωσιμότητα των υπηρεσιών Internet. Σήμερα ένα μεγάλο εθνικό δίκτυο τηλεπικοινωνιών στην Ευρώπη καταναλώνει συνήθως περίπου 150-200 GW/h ανά έτος. Στην πραγματικότητα, περίπου το 9% των συνολικών ετήσιων OPEX οφείλεται στην κατανάλωση ενέργειας, δηλαδή οι περισσότεροι τηλεπικοινωνιακοί φορείς ξοδεύουν περίπου τρεις φορές περισσότερο σε OPEX από ό,τι σε CAPEX. Επειδή γενικά μεγάλο ποσοστό αυτής της ενέργειας φαίνεται να σπαταλιέται στις μετατροπές οπτικών σημάτων σε ηλεκτρονικά και το ανάποδο (οπτο-ηλεκτρο-οπτικές μετατροπές ή O-E-O).
- **Χαμηλό κόστος:** Θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως η βασικότερη παράμετρος ενός δικτύου από την πλευρά του παρόχου, καθώς αυτή η παράμετρος καθορίζει το χρονικό διάστημα που θα αναβαθμιστεί το δίκτυο ώστε να μπορεί να παράσχει υπηρεσίες με βάση τις νέες απαιτήσεις με της ζήτησης.

Παράλληλα, εκτός από τα παραπάνω χαρακτηριστικά των δικτύων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι μελέτες των τηλεπικοινωνιακών παρόχων εξοπλισμού που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του οπτικού τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα η ανάλυση της CISCO [20], όπου περιγράφεται ότι η παγκόσμια κίνηση IP αυξήθηκε κατά 45% κατά τη διάρκεια του 2009 και τετραπλασιάστηκε από το 2009 έως το 2014, φθάνοντας τα 64 exabyte (1 EB = 10^{18} bytes) ανά μήνα. Συνολικά, προβλέπεται ότι η κυκλοφορία IP θα αυξηθεί με ρυθμό 34% ετησίως κατά την ίδια περίοδο. Αυτή η αύξηση της ζήτησης για εύρος ζώνης τροφοδοτείται από την έκρηξη της τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας, της βιντεοκλήσης, των ευρυζωνικών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας και της εισαγωγής νέων εφαρμογών βίντεο που βασίζονται στο βίντεο, όπως ζωντανή μετάδοση, απομακρισμένη εργασία, gaming στο δίκτυο και διασκέψεις μέσω διαδικτύου. Για να αντιμετωπιστεί η αύξηση της ζήτησης εύρους ζώνης και να επιλυθούν τα προβλήματα κορεσμού στα δίκτυα, οι πάροχοι ωθούνται να αυξήσουν την ικανότητα των ήδη εγκατεστημένων οπτικών δικτύων, εισάγοντας κανάλια 100 Gb/s και πέρα σε συστήματα WDM.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω απαιτήσεις καθώς και για την μετάβαση σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και τη δημιουργία αποδοτικότερων οπτικών δικτύων, τα τελευταία χρόνια άρχισαν να εμφανίζονται στο προσκήνιο πέραν της απευθείας διαμόρφωσης κατά πλάτος, δύο καινούργιες τεχνικές, αυτές των σχημάτων διαμόρφωσης ανώτερης τάξης (Advanced Modulation Formats) και της ψηφιακής σύμφωνης φώρασης (Coherent Detection) στο δέκτη, οι οποίες θα περιγραφούν συνοπτικά στις παρακάτω ενότητες.

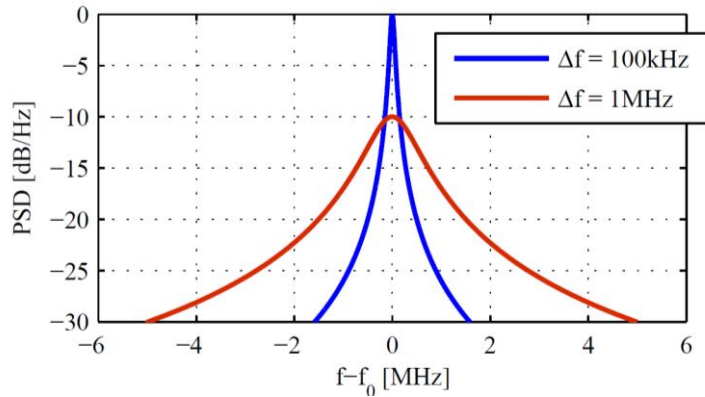
1.4 Τεχνολογία Σχημάτων Απευθείας Διαμόρφωσης κατά Πλάτος

1.4.1 Πηγή Laser

Η μετάδοση δεδομένων μέσω οπτικής ίνας απαιτεί ένα σύμφωνο οπτικό φέρον πάνω στον οποίο μπορούν να διαμορφωθούν τα δεδομένα. Μια ιδανική πηγή οπτικού φέροντος θα πρέπει να έχει σταθερό εύρος, αρκετά υψηλή ισχύ, σταθερή φάση και συχνότητα. Στην πραγματικότητα, αυτό δεν ικανοποιείται πάντοτε λόγω των στοιχείων (components) καθώς και των περιορισμών των υλικών. Παρ' όλα αυτά, οι ιδιότητες αυτές ικανοποιούνται σε μεγάλο βαθμό από τα λέιζερ που τις καθιστούν ως την επιλεγμένη πηγή του φέροντος για τις εφαρμογές οπτικών επικοινωνιών. Προκειμένου να επιτευχθεί η διέγερση των ηλεκτρονίων σε υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις που απαιτούνται για τη λειτουργία λέιζερ, χρησιμοποιείται ηλεκτρική άντληση. Ως αποτέλεσμα της αυθόρμητης εκπομπής ορισμένων φωτονίων στα λέιζερ, παρατηρούνται διακυμάνσεις πλάτους και φάσης στην έξοδο του λέιζερ, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς την απόδοση των σχημάτων διαμόρφωσης που χρησιμοποιούν τη διάσταση της φάσης του φέροντος για τη διαμόρφωση δεδομένων. Η διακύμανση της φάσης και του πλάτους της εξόδου του λέιζερ οδηγεί σε αυξημένο εύρος γραμμής (linewidth) λέιζερ, το οποίο μπορεί να προσεγγιστεί προσεκτικά με τη Lorentzian συνάρτηση γραμμής [72].

Οι περισσότεροι συνηθισμένοι τύποι λέιζερ που είναι διαθέσιμοι σήμερα, βασίζονται στην τεχνολογία διανεμημένης ανάδρασης (distributed feedback, DFB) για την παροχή εύρους γραμμής στην περιοχή του 1 MHz, καθιστώντας τα ελκυστικά για την παραγωγή οπτικών φερόντων. Το εύρος γραμμής της τάξεως 100 kHz και ακόμη χαμηλότερο μπορεί να επιτευχθεί με τα λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας (external cavity lasers, ECLs). Αν και ακριβότερα, τα ECLs είναι πολύ ελκυστικά για ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης, τα οποία είναι

συνήθως πιο ευαίσθητα στο εύρος γραμμής του λέιζερ [73, 74]. Η φασματική πυκνότητα ισχύος (power spectral density, PSD) της εξόδου λέιζερ εξαρτάται από τον σύμφωνο χρόνο και μπορεί να προσεγγιστεί ως Lorentzian συνάρτηση γραμμής. Το πλήρες πλάτος στο μισό μέγιστο (full width at half maximum, FWHM) της κατανομής φασματικής πυκνότητας ισχύος δίνει το εύρος γραμμής του λέιζερ (Δf). Για σύγκριση, η PSD της εξόδου δύο πηγών λέιζερ απεικονίζονται στην εικόνα 1.6 με εύρος γραμμής 100 kHz και 1 MHz αντίστοιχα.



Εικόνα 1.6: Φασματική πυκνότητα ισχύος εξόδου λέιζερ (Lorentzian κατανομή γραμμών).

Οι διακυμάνσεις φάσης που προκύπτουν ως αποτέλεσμα του εύρους γραμμής λέιζερ (Δf), ακολουθούν μια διαδικασία τυχαίου βηματισμού και η διακύμανσή της προσεγγίζεται ως εξής:

$$\sigma_{\varphi_{noise}}^2 = 2\pi\Delta f t_s \quad (1.1)$$

όπου t_s είναι ο χρόνος δειγματοληψίας ή παρατήρησης. Εκτός από τις διακυμάνσεις φάσης, η συχνότητα εξόδου της πηγής λέιζερ ποικίλλει και σε εύρος δυο εκατοντάδων MHz. Αν και τα συστήματα απευθείας ανίχνευσης είναι ανθεκτικά σε τέτοιες μικρές διακυμάνσεις, γίνεται ένας περιοριστικός παράγοντας για σύμφωνα σχήματα διαμόρφωσης που επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις τόσο του πομπού όσο και των λέιζερ του δέκτη. Η επίδραση των ατελειών του λέιζερ αυξάνεται με την αύξηση της περιόδου των συμβόλων των σύμφωνα διαμορφωμένων σημάτων. Τα σφάλματα συχνότητας και φάσης εκτιμώνται και μετράζονται στο ελάχιστο δυνατό με τη χρήση του DSP.

1.4.2 Οπτικός Διαμορφωτής

Κατ' επέκταση, για τη μετάδοση δεδομένων μέσω οπτικής ίνας, πρέπει να διαμορφώνονται πάνω σε ένα οπτικό φέρον. Σε γενικές γραμμές, τα προς μετάδοση δεδομένα τροποποιούν ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά ενός οπτικού φέροντος που ανιχνεύονται από τον δέκτη στο άλλο άκρο της σύνδεσης. Το σήμα δεδομένων μπορεί να διαμορφωθεί σε ένα φέρον ενός λέιζερ είτε με άμεση διαμόρφωση είτε με τη χρήση εξωτερικών διαμορφωτών. Στην τεχνική άμεσης διαμόρφωσης, τα ηλεκτρικά σήματα δεδομένων ελέγχουν το ρεύμα οδήγησης της πηγής λέιζερ, το οποίο με τη σειρά του μετατρέπεται σε διακύμανση της οπτικής ισχύος του λέιζερ.

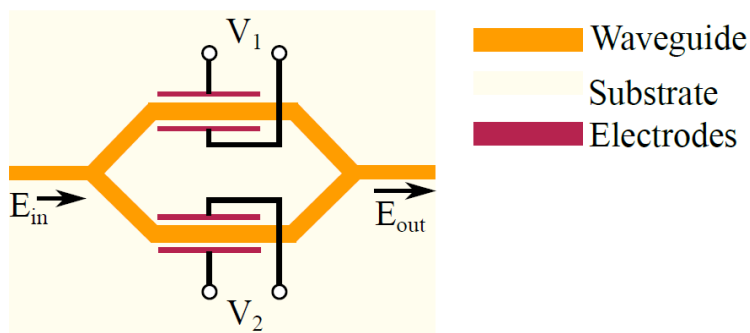
Παρόλο που η τεχνική είναι αρκετά απλή, οι εφαρμογές της περιορίζονται κυρίως σε εφαρμογές χαμηλού ρυθμού δεδομένων. Ο κύριος λόγος έγκειται στο γεγονός ότι με την άμεση διαμόρφωση του ρεύματος οδήγησης του λέιζερ προκαλείται ανεπιθύμητη διαμόρφωση συχνότητας (frequency chirp), η οποία διευρύνει το φάσμα του σήματος. Το διευρυμένο οπτικό φάσμα είναι πιο ευαίσθητο στις επιδράσεις της διάδοσης και περιορίζει την επιτεύξιμη μέγιστη εμβέλεια [75, 76]. Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός δεδομένων, αυξάνεται και η συχνότητα chirp, καθιστώντας τέτοια συστήματα ανέφικτα για μετάδοση υψηλής χωρητικότητας. Παρόλο που έχει επισημανθεί η ταχύτητα δεδομένων μέχρι 40 Gb/s με χρήση άμεσης διαμόρφωσης [77-78], στην πράξη αυτή η τεχνική διαμόρφωσης είναι περιορισμένη για συστήματα με ρυθμούς δεδομένων μέχρι 2.5 Gb/s.

Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό το frequency chirp από την πηγή λέιζερ, το οπτικό φέρον μπορεί να διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας έναν εξωτερικό διαμορφωτή. Η πηγή λέιζερ λειτουργεί σε κατάσταση συνεχούς κύματος (continuous wave, CW), καθώς το ρεύμα της δεν μεταβάλλεται για τη διαμόρφωση δεδομένων. Χρησιμοποιούνται συνήθως δύο είδη εξωτερικών διαμορφωτών, οι οποίοι ονομάζονται διαμορφωτής ηλεκτρο-απορρόφησης (electro-absorption modulator, EAM) και Mach-Zehnder (MZ modulator, MZM). Η αρχή λειτουργίας του EAM βασίζεται στο γεγονός ότι η ενέργεια διάκενου (bandgap) ενός ημιαγωγού μπορεί να μειωθεί εφαρμόζοντας μια εξωτερική τάση. Συνεπώς, εάν η συχνότητα της

πηγής λέιζερ επιλέγεται έτσι ώστε η προκύπτουσα ενέργεια ($E=hf$) να είναι μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού όταν δεν εφαρμόζεται τάση, το υλικό θα είναι διαφανές και το φως περνά διαμέσου. Όταν εφαρμόζεται μια εξωτερική τάση, μειώνεται η ενέργεια διάκενου του ημιαγωγού και το εισερχόμενο φως λέιζερ απορροφάται από το υλικό και δεν διέρχεται φως. Αποτελεσματικά, η ένταση του φωτός του λέιζερ μπορεί να διαμορφώνεται σύμφωνα με την ακολουθία των δεδομένων που πρόκειται να μεταδοθεί. Ωστόσο, με την αλλαγή στην απορρόφηση του υλικού του ημιαγωγού, ο δείκτης διάθλασής του επίσης αλλάζει, προκαλώντας κατ' αυτόν τον τρόπο μεταβαλλόμενες αλλαγές φάσης στην πηγή φωτός λέιζερ που διαμορφώνεται. Σαν αποτέλεσμα, ένα ορισμένο frequency chirp εισάγεται από τον EAM που παρόλα αυτά, είναι συνήθως πολύ χαμηλότερο από αυτό που προκαλείται εάν το λέιζερ είχε διαμορφωθεί απευθείας. Επιπλέον, η απόδοση του EAM εξαρτάται από τη συχνότητα του φέροντος, οι οποίοι βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα μετάδοσης χαμηλού κόστους που υποστηρίζουν ταχύτητες δεδομένων από 10 έως 40 Gb/s.

1.4.3 Διαμορφωτής Mach-Zehnder (MZM)

Ένα άλλο είδος εξωτερικού διαμορφωτή κάνει χρήση του ηλεκτρο-οπτικού φαινομένου που αποκαλείται επίσης φαινόμενο Pockels, κατά το οποίο ο δείκτης διάθλασης ορισμένων υλικών μπορεί να αλλάξει με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου σε αυτό. Ως αποτέλεσμα της αλλαγής του δείκτη διάθλασης, προκαλείται μια αλλαγή στη φάση του διαδιδόμενου οπτικού κύματος. Αυτή η αλλαγή στη φάση μπορεί να μετατραπεί σε αλλαγή στην ένταση του οπτικού κύματος με την εφαρμογή της αρχής της συμβολής. Ως εκ τούτου, αυτή η αρχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξωτερική διαμόρφωση του φωτός ενός λέιζερ. Μια τέτοια συσκευή μπορεί να κατασκευαστεί ως ολοκληρωμένη οπτική συσκευή ενσωματώνοντας τον οπτικό κυματοδηγό πάνω σε ένα υπόστρωμα. Το υπόστρωμα τυπικά κατασκευάζεται από LiNbO₃, ωστόσο, τα υλικά InP, GaAs και το electro-optic polymer μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν δίνοντας την δυνατότητα επίτευξης ρυθμών διαμόρφωσης μεγαλύτερων από 60 Gb/s [79,80]. Αυτή η συσκευή ονομάζεται διαμορφωτής Mach-Zehnder (MZM) και απεικονίζεται στην εικόνα 1.7. Η είσοδος φωτός στον κυματοδηγό του MZM κατανέμεται εξίσου στους δύο βραχίονες μέσω ενός 3-dB οπτικού συζεύκτη (optical splitter). Κάθε βραχίονας κυματοδηγού περιβάλλεται από τα ηλεκτρόδια έτσι ώστε ένα ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του βραχίονα να μπορεί να εφαρμοστεί με την χρήση μιας εξωτερικής τάσης. Τα εφαρμοζόμενα ηλεκτρικά πεδία διαμέσου των βραχιόνων MZM ελέγχουν την αλλαγή φάσης και στους δύο βραχίονες κατά το φαινόμενο Pockels. Μετά την καθυστέρηση φάσης στους μεμονωμένους βραχίονες, το φωτεινό κύμα (light wave) συμβάλλει στο επόμενο τμήμα.



Εικόνα 1.7: Δομή ενός διαμορφωτή Mach-Zehnder (MZM).

Με τον κατάλληλο έλεγχο της φάσης του φωτεινού κύματος και στους δύο βραχίονες, μπορεί να επιτευχθεί τόσο η προσθετική όσο και η αφαιρετική συμβολή. Κατά συνέπεια, η ένταση του φωτός στην έξοδο μπορεί να ελεγχθεί. Πρέπει να σημειωθεί ότι για να μεταβάλλεται η ένταση του φωτός στην έξοδο, είναι επαρκής η ρύθμιση του δείκτη διάθλασης σε έναν από τους βραχίονες του MZM. Ωστόσο, είναι συνήθως πρακτική η κατασκευή του MZM σε λειτουργία διπλής οδήγησης, όπου η τάση σε κάθε βραχίονα μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα. Η έξοδος του MZM παίρνει τη μορφή:

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2} (e^{i\varphi_1(t)} + e^{i\varphi_2(t)}) \quad (1.2)$$

όπου $\varphi_1(t)$ και $\varphi_2(t)$ είναι η φάση που προκαλείται στον άνω και στο κάτω βραχίονα του MZM οι οποίες υπολογίζονται ως:

$$\varphi_1(t) = \frac{V_1(t)}{V_{\pi 1}} \pi \quad (1.3)$$

$$\varphi_2(t) = \frac{V_2(t)}{V_{\pi 2}} \pi \quad (1.4)$$

,όπου V_1 και V_2 αντιπροσωπεύουν τις τάσεις που απαιτούνται για την επίτευξη μιας μετατόπισης φάσης σε σύγκριση με την είσοδο και για τους δύο βραχίονες, αντίστοιχα. Το MZM μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε λειτουργία push-push είτε σε λειτουργία push-pull. Λαμβάνοντας υπόψη το $V_{\pi 1} = V_{\pi 2} = V_{\pi}$ και $V_1(t) = V_2(t) = V(t)$, αμφότεροι οι βραχίονες του MZM προκαλούν την ίδια μετατόπιση φάσης επί του διαδιδόμενου φωτός, τα οποία μετά από επανένωση δίνουν ένα διαμορφωμένο ως προς τη φάση προϊόν. Ως εκ τούτου, ένα MZM λειτουργεί ως διαμορφωτής φάσης όταν χρησιμοποιείται σε λειτουργία push-push και η έξοδος σε αυτή την περίπτωση δίνεται από:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) e^{i \frac{V(t)}{V_{\pi}} \pi} \quad (1.5)$$

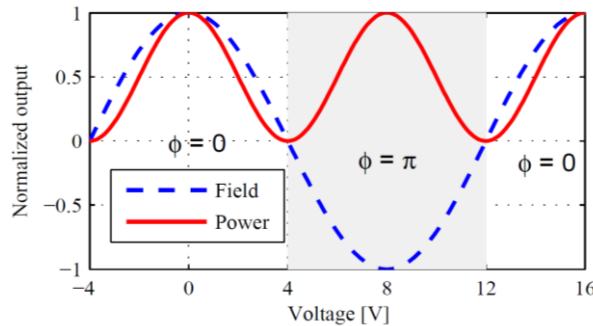
Κατά τη λειτουργία σε κατάσταση push-pull, η τάση που εφαρμόζεται και στους δύο βραχίονες του MZM είναι ίση αλλά αντίθετη στο σημείο σε σχέση με την άλλη. Ως αποτέλεσμα, η φάση που προκαλείται από τους βραχίονες του MZM είναι αντίθετη μεταξύ τους, η οποία όταν συνδυάζεται στον βραχίονα εξόδου έχει ως αποτέλεσμα διαμόρφωση πλάτους. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η εφαρμοζόμενη τάση δια μέσου των βραχίωνων MZM είναι $V_1(t) = -V_2(t) = V(t)/2$, η έξοδος σχετίζεται με την είσοδο με την ακόλουθη σχέση:

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2} \left(e^{i \frac{V(t)}{2V_{\pi}} \pi} + e^{-i \frac{V(t)}{2V_{\pi}} \pi} \right) = E_{in}(t) \cdot \cos\left(\frac{V(t)}{2V_{\pi}} \pi\right) \quad (1.6)$$

Με τετραγωνισμό της εξίσωσης 1.6 μπορεί να επιτευχθεί η σχέση μεταξύ ισχύος εισόδου και εξόδου που δίνεται ως:

$$P_{out}(t) = P_{in}(t) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{V(t)}{V_{\pi}} \pi\right) \right) \quad (1.7)$$

Η διαμόρφωση της έντασης του λέιζερ που επιτυγχάνεται με ένα MZM που λειτουργεί σε κατάσταση push-pull είναι απαλλαγμένη από chirp, γεγονός που το καθιστά πολύ ελκυστικό για ισχυρά συστήματα μετάδοσης μεγάλων αποστάσεων. Συνήθως το V του MZM καθορίζεται στα πληροφοριακά έγγραφα (data-sheets) και πιο συγκεκριμένα για το MZM με βάση το υπόστρωμα LiNbO3 είναι 3.5 Volts. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός MZM δίνεται στην εικόνα 1.8. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος του φωτός εξόδου μειώνεται λόγω της απώλειας εισαγωγής (insertion loss) της συσκευής αλλά παραμελείται στην περίπτωση της εικόνας 1.8. Τα MZMs χρησιμοποιούνται ευρέως για να παράγουν διαφορετικά είδη οπτικών παλμών, π.χ. μη επιστροφής στο μηδέν (non-return to zero, NRZ) και επιστροφής στο μηδέν (return to zero, RZ) με διάφορους κύκλους λειτουργίας (duty cycles) (33%, 50% και 66%). Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό σήμα ημιτονοειδούς κύματος με κατάλληλη ρύθμιση της τάσης πόλωσης. Μια τάση πόλωσης μπορεί να εφαρμοστεί για τη λειτουργία του MZM είτε στην ελάχιστη, τη μέγιστη ή στη μεσαία ισχύ του σημείο εξόδου, τα οποία ονομάζονται επίσης σημεία κατωφέρειας, κορυφής ή τετραγωνισμού της συνάρτησης μεταφοράς, αντίστοιχα.



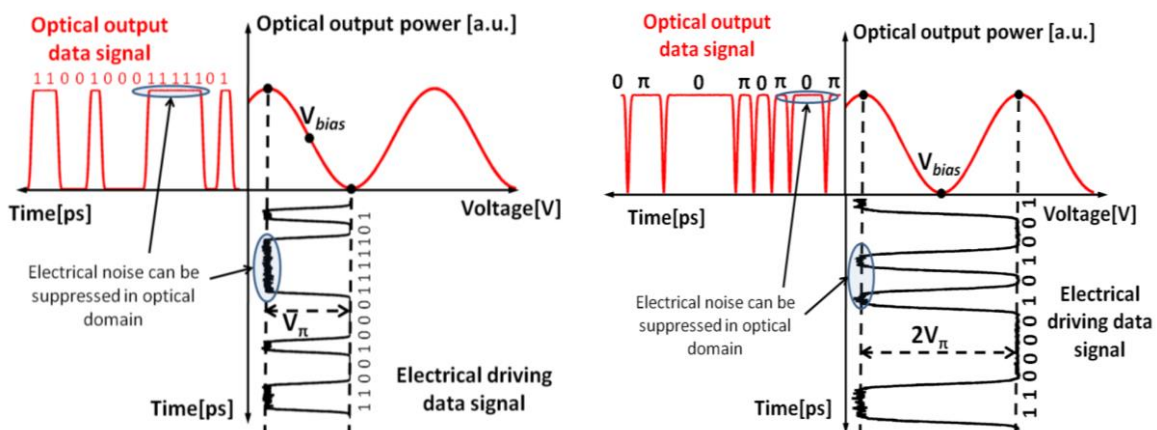
Εικόνα 1.8: Συνάρτηση μεταφοράς ενός MZM με $V_{\pi} = 4.0V$ (Η απώλεια εισόδου αγνοείται).

Παραδείγματος χάριν, για τη δημιουργία παλμών 50% RZ, το σημείο πόλωσης ρυθμίζεται στο σημείο τετραγωνισμού του MZM, ενώ για παλμούς 33% RZ, το κατάλληλο σημείο λειτουργίας βρίσκεται στην κορυφή της συνάρτησης μεταφοράς του MZM. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που η ισχύς εξόδου ενός MZM θεωρητικά φτάνει στο μηδέν όταν προκαλείται μετατόπιση φάσης μεταξύ του φωτός που διαδίδεται στον άνω και στο κάτω βραχίονα, στην πραγματικότητα αυτή η ιδανική συμπεριφορά δεν μπορεί να επιτευχθεί. Κατά συνέπεια, μια μικρή ποσότητα ισχύος διαφεύγει από το MZM ακόμα και όταν δεν πρέπει. Ως εκ τούτου, μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους ενός MZM είναι ο λόγος σβέσης του (extinction ratio, ER), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος εξόδου προς την ελάχιστη ισχύ εξόδου σε λογαριθμική κλίμακα.

$$ER = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out_max}}{P_{out_min}} \right) \quad (1.8)$$

Η τιμή του ER θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη, πράγμα που ουσιαστικά οδηγεί σε σαφή διάκριση μεταξύ των επιπέδων ισχύος των 'άσων' και των 'μηδενικών', αυξάνοντας έτσι την ποιότητα του σήματος μετάδοσης και τελικά την επιτεύξιμη απόδοση. Τα εμπορικά διαθέσιμα MZM έχουν ER σε εύρος μεταξύ 25-35 dB.

Όπως σημειώνεται από την εξίσωση 1.6 και επίσης από την εικόνα 1.8, η έξοδος ηλεκτρικού πεδίου ενός MZM ποικίλει περιοδικά με την τάση οδήγησης. Επιπλέον η φάση του οπτικού κύματος εξόδου επίσης μεταβάλλεται περιοδικά μεταξύ του 0 και της εφαρμοζόμενης τάσης (το γκριζο τμήμα στην εικόνα 1.8 αντιπροσωπεύει μία έξοδο μετατοπισμένη κατά φάση). Συνεπώς, ένας MZM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή σχημάτων διαμόρφωσης που κωδικοποιούν δυαδικά ψηφία μετάδοσης σε πλάτος (π.χ., διαμόρφωση on-off keying (OOK) και μετατόπισης πλάτους (amplitude shift keying, ASK) ή φάσης (π.χ binary phase shift keying, BPSK), όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.9, λαμβάνοντας υπόψη ένα τυχαία επιλεγμένο τμήμα ενός μοτίβου ψευδοτυχαίας ακολουθίας (pseudorandom binary sequence, PRBS).



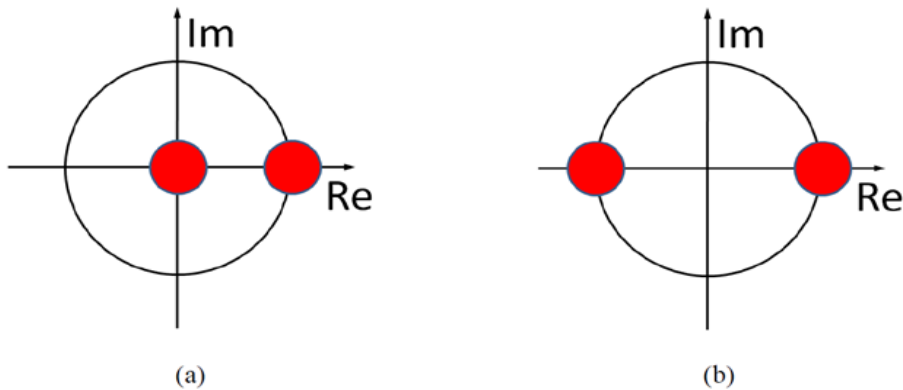
Εικόνα 1.9: (α) Παραγωγή διαμορφωμένου σήματος OOK και (β) BPSK ανάλογα με την τάση οδήγησης στα ηλεκτρόδια του MZM.

Αναλυτικότερα, για το σχήμα διαμόρφωσης OOK, ο MZM θα πρέπει να είναι πολωμένος στο σημείο τετραγωνισμού και το σήμα οδήγησης του θα πρέπει να έχει πλάτος από κορυφή σε κορυφή γύρω από V_{π} (V_{π} είναι η τάση που απαιτείται για την αλλαγή της φάσης του οπτικού σήματος εξόδου κατά π). Η μη γραμμικότητα του MZM έχει ως αποτέλεσμα την καταπίεση της μεταφοράς ηλεκτρικού θορύβου στον οπτικό τομέα. Βέβαια, το OOK έχει μια φτωχή φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency, SE) σε σύγκριση με τα πολυεπίπεδα σχήματα οπτικής διαμόρφωσης που συζητούνται στις επόμενες υποενότητες. Προκειμένου να ενισχυθεί ελαφρώς η SE, έχει προταθεί η διαφοροποίηση της διαμόρφωσης OOK της πλευρικής ζώνης (vestigial sideband, VSB). Το VSB-OOK έχει ένα πρακτικό SE περίπου 1 b/s/Hz [72]. Παρόλα αυτά, το OOK έχει χαμηλή ανοχή στις μη γραμμικές επιδράσεις μετάδοσης εξαιτίας του ισχυρού φέροντος του, γεγονός που το καθιστά ελκυστικό για ταχύτητες δεδομένων >40 Gb/s και για εφαρμογές μικρής απόστασης (διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων εντός υπολογιστικών κέντρων). Η επιλογή της διαμόρφωσης OOK σε αυτή την περίπτωση οφείλεται κυρίως στη δομή του πομπού χαμηλής πολυπλοκότητας και στη δυνατότητα ανίχνευσής του χρησιμοποιώντας απλώς έναν φωτοανιχνευτή (photodiode, PD).

Αντιστοίχα, ένας MZM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση της φάσης του οπτικού πεδίου όταν ο διαμορφωτής είναι πολωμένος στο μηδέν της συνάρτησης μεταφοράς (από την άποψη πλάτους) και οδηγείται με τάση πάνω από $2V_{\pi}$ (εικόνα 1.9 (b)). Παρόλο που χρειάζεται διπλάσια ισχύς RF για την επίτευξη διαμόρφωσης φάσης, η τρέχουσα γενιά διαμορφωτών έχει $2V_{\pi}$ περίπου 5V [81], τα οποία μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας εμπορικά διαθέσιμους ενισχυτές ευρείας ζώνης. Όπως στην περίπτωση του OOK, η μη γραμμικότητα της συνάρτησης μεταφοράς διαμορφωτή επιτρέπει την καταπίεση της μεταφοράς ηλεκτρικού θορύβου στον οπτικό τομέα. Θεωρητικά, το παραγόμενο οπτικό σήμα BPSK θα πρέπει να έχει ένα μοναδικό επίπεδο έντασης δεδομένου ότι δεν υπάρχει διαμόρφωση πλάτους. Στην πράξη, το ηλεκτρικό σήμα οδήγησης έχει πεπερασμένους χρόνους ανόδου και καθόδου, πράγμα που οδηγεί στην παρουσία μεταβάσεων μέσω του ελάχιστου σημείου της συνάρτησης μεταφοράς.

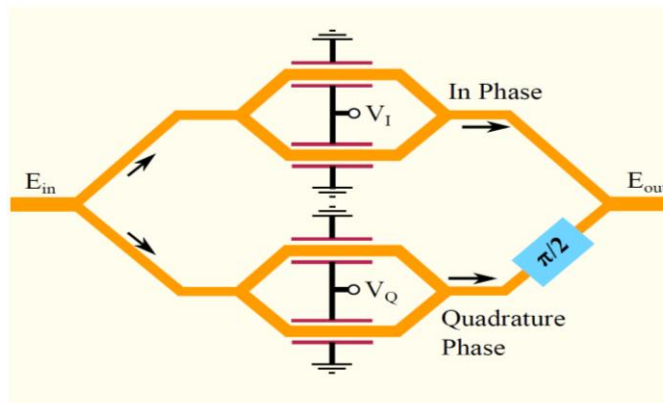
Μια βολική αναπαράσταση σημάτων με πλάτος και φάση διαμορφωμένων σημάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός διαγράμματος αστερισμού - της αναπαράστασης συμβόλων σημάτων σε ένα

σύνθετο επίπεδο. Για ένα δυαδικό σήμα διαμόρφωσης έντασης τα δύο σημεία αστερισμού (δηλαδή λογικά «ένα» και «μηδέν») βρίσκονται στα (0,0) και (1,0) για να τονιστεί ότι δεν υπάρχει διαμόρφωση φάσης (εικόνα 1.10 (a)). Για τα σήματα BPSK τα δύο σημεία αστερισμού είναι στα (1,0) και (-1,0) λόγω της παρουσίας ολίσθησης φάσης π μεταξύ των δύο (εικόνα 10 (b)).



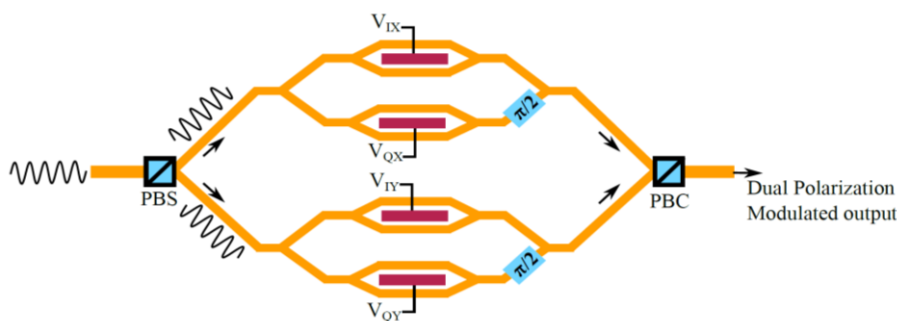
Εικόνα 1.10: Διαγράμματα αστερισμού: (a) διαμορφωμένου σήματος OOK και (b) διαμορφωμένου σήματος BPSK.

Από την άλλη πλευρά, για να επιτευχθεί αύξηση της SE και προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το στοιχείο τετραγωνισμού του οπτικού φέροντος για μετάδοση δεδομένων, απαιτείται ένας οπτικός διαμορφωτής ορθογωνιότητας (In-phase Quadrature, IQ). Ένα μοναδικό MZM μπορεί να ρυθμίσει τη φάση του οπτικού φέροντος κατά μήκος μιας συνιστώσας (είτε σε φάση είτε σε τετραγωνισμό-φάσης quadrature-phase) έτσι ώστε να επιτευχθεί η λειτουργικότητα ενός διαμορφωτή IQ, για τον οποίο απαιτούνται δύο MZMs. Η δομή ενός διαμορφωτή IQ που αποτελείται από MZMs φαίνεται στην εικόνα 1.11. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το εισερχόμενο φωτεινό κύμα εξισώνεται εξίσου σε δύο βραχίονες προτού υποβληθεί σε επεξεργασία από ένα MZM σε κάθε βραχίονα του διαμορφωτή. Μετά την εφαρμογή διαμόρφωσης πλάτους και/ή φάσης στο φωτεινό κύμα σε κάθε βραχίονα, εφαρμόζεται μια μετατόπιση φάσης $\pi/2$ στο φως που διαδίδεται στον κάτω βραχίονα. Ως αποτέλεσμα, τα διαμορφωμένα φωτεινά κύματα και στους δύο βραχίονες γίνονται ορθογώνια το ένα ως προς στον άλλο και διατηρούνται οι πληροφορίες που μεταφέρονται. Τα κανάλια -I και -Q μπορούν να εμφανιστούν ως ορθογώνιες διαστάσεις ενός καρτεσιανού επιπέδου δύο διαστάσεων (2-D). Ως εκ τούτου, ένας διαμορφωτής IQ βασισμένος σε MZMs μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία σχημάτων διαμόρφωσης με σημεία αστερισμού σε ένα επίπεδο 2-D, καθιστώντας τα ελκυστικά για συστήματα με υψηλή SE.



Εικόνα 1.11: Δομή ενός IQ-διαμορφωτή κατασκευασμένου από δύο MZMs και ένα ολισθητή φάσης $\pi/2$ φάσης. Τα MZMs λειτουργούν σε κατάσταση push-pull.

Επιπρόσθετα, καθώς η έξοδος μιας πηγής φωτός λέιζερ είναι γραμμικά πολωμένη, μπορεί να χωριστεί σε δυο συνιστώσες οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης. Καθεμία από τις συνιστώσες οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης μπορεί να διαμορφώνεται ανεξάρτητα, γεγονός που μπορεί να διπλασιάσει την SE που επιτυγχάνεται με το σχήμα διαμόρφωσης. Η διάσταση της πόλωσης του φωτός για τη διαμόρφωση δεδομένων ονομάζεται πολυπλεξία πόλωσης και αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται συνήθως από τη σημερινή γενιά σύμφωνων πομποδεκτών. Προκειμένου να διαμορφωθούν δεδομένα τόσο για την οριζόντια όσο και για την κατακόρυφη πόλωση του φωτός, απαιτούνται δύο IQ διαμορφωτές, ένας διαχωριστής πολωμένης δέσμης (polarization beam splitter, PBS) και ένας συνδυαστής πολωμένης δέσμης



Εικόνα 1.12: Ένας διαμορφωτής IQ διπλής πόλωσης ικανός να διαμορφώνει δύο ορθογώνιες πολώσεις του φωτός λέιζερ.

(polarization beam combiner, PBC). Τα PBS/PBC είναι ουσιαστικά παθητικά στοιχεία ικανά να διανέμουν ή να συνδυάζουν φως που αντιστοιχεί στις δύο καταστάσεις ορθογώνιας πόλωσης, αντίστοιχα. Τέτοιοι διαμορφωτές ονομάζονται διαμορφωτές διπλής πόλωσης IQ και είναι εμπορικά διαθέσιμοι από διάφορους προμηθευτές εξοπλισμού [82]. Η δομή ενός διπλού πολωτικού διαμορφωτή IQ φαίνεται στην εικόνα 1.12.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανεξάρτητη διαμόρφωση δεδομένων σε δύο ορθογώνιες πολώσεις φωτός χρησιμοποιείται εμπορικά μόνο για σύμφωνους οπτικούς δέκτες που βασίζονται σε ψηφιακή επεξεργασία σήματος (digital signal processing, DSP) για μετρίασμό των ατελειών των ινών. Στα συστήματα απευθείας ανίχνευσης, χρησιμοποιείται μόνο η συνδυασμένη ένταση φωτός χωρίς διάκριση των πολώσεων. Αν και θεωρητικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αμφότερες οι ορθογώνιες πολωτικές καταστάσεις του φωτός για τη μετάδοσή του, θα απαιτούσε ενεργό έλεγχο της πόλωσης στο άκρο του δέκτη, αφού η κατάσταση της πόλωσης του φωτός αλλάζει συνεχώς όταν μεταδίδεται μέσω μιας ίνας που αναπτύσσεται στο πεδίο [83].

Παρόλο που οι τυπικές τιμές της διασποράς τρόπων πολώσης (polarization mode dispersion, PMD) ενδέχεται να μην έχουν περιοριστικό αντίκτυπο στην απόδοση ακόμη και αν δεν αντισταθμίζονται, λόγω μιας μάλλον μεγάλης περιόδου συμβόλων που χρησιμοποιείται από συστήματα απευθείας ανίχνευσης (100 ps για σήματα 10 Gb/s OOK), η κατάσταση πόλωσης δεν μπορεί να προσαρμοστεί ταχέως στον οπτικό τομέα χωρίς τη βοήθεια του δέκτη DSP [84, 85]. Πρόσφατα προτάθηκε νέα αρχιτεκτονική για το δέκτη για την ανίχνευση σημάτων OOK διπλής πόλωσης με τη βοήθεια του δέκτη DSP [86]. Οι σύμφωνοι δέκτες βασίζονται στην αποπολυπλεξία πόλωσης στον ψηφιακό τομέα χρησιμοποιώντας τεχνικές φιλτραρίσματος [87, 88] και συνήθως χρησιμοποιούν την πολυμορφία της πόλωσης για την ενίσχυση της SE. Οι βασισμένοι σε LiNbO₃ διαμορφωτές IQ διπλής πόλωσης είναι ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος διαμορφωτής, ωστόσο άλλα υλικά υποστρώματος βρίσκονται επίσης υπό ενεργό έρευνα, για παράδειγμα η χρήση του υλικού InP μπορεί να παρέχει ένα μικρότερο αποτύπωμα, χαμηλότερη τάση V_π και υψηλότερο εύρος ζώνης που τα καθιστά απαραίτητα για τους πομποδέκτες υψηλής ταχύτητας δεδομένων [89,90]. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτή τη διατριβή βασίζονται σε διαμορφωτές MZ κατασκευασμένους σε EO polymer υλικό και σε διαμορφωτές IQ πάνω στα υλικά InP και LiNbO₃.

1.4.4 Διαγράμματα Αστερισμού Ανωτέρων Σχημάτων Διαμόρφωσης

Με χρήση των διαμορφωτών IQ που περιεγράφηκαν παραπάνω, είναι εφικτό τα bits δεδομένων που πρόκειται να μεταδοθούν πρώτα να χαρτογραφούνται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και κατ' επέκταση θέσεις με συγκεκριμένες τιμές πριν από την εφαρμογή της διαμόρφωσης των παλμών. Οι καταστάσεις αυτές, μπορούν να αναπαρασταθούν εύκολα σε ένα διάγραμμα αστερισμού, το οποίο πρακτικά αποτυπώνει τις επιτρεπόμενες λογικές τιμές της μιγαδικής περιβάλλουσας του σήματος στο μιγαδικό επίπεδο (I, Q) ακολουθώντας τις βασικές αρχές των ψηφιακών επικοινωνιών.

Αναλυτικότερα, η περιβάλλουσα του διαμορφωμένου σήματος $E(t)$ μπορεί να εκφραστεί και ως άθροισμα του πραγματικού και του φανταστικού της μέρους σύμφωνα με την εξίσωση:

$$E(t) = \text{Re}\{E(t)\} + j\text{Im}\{E(t)\} \quad (1.9)$$

Όπου $\text{Re}\{E(t)\}$ και $\text{Im}\{E(t)\}$ αναπαριστούν τη «σε-φάση» [In-phase (I)] και την «ορθογώνια» [Quadrature (Q)] συνιστώσα του οπτικού φέροντος. Θεωρώντας λοιπόν ανεπτυγμένη μορφή του οπτικού σήματος, όπως αυτή ορίστηκε στην εξίσωση 1 καθώς και την αναπαράσταση ενός μιγαδικού αριθμού $z = \chi + j\psi = |r| \cdot e^{j\theta}$ στο καρτεσιανό μιγαδικό επίπεδο, οι συνιστώσες I και Q των οπτικών σημάτων θα ορίζονται ως:

$I(t)=\text{Re}\{E(t)\}$ και $Q(t)=-\text{Im}\{E(t)\}$. Συνεπώς λοιπόν η μιγαδική περιβάλλουσα του παλμού μπορεί να οριστεί ως:

$$E(t) = I(t) - jQ(t) \quad (1.10)$$

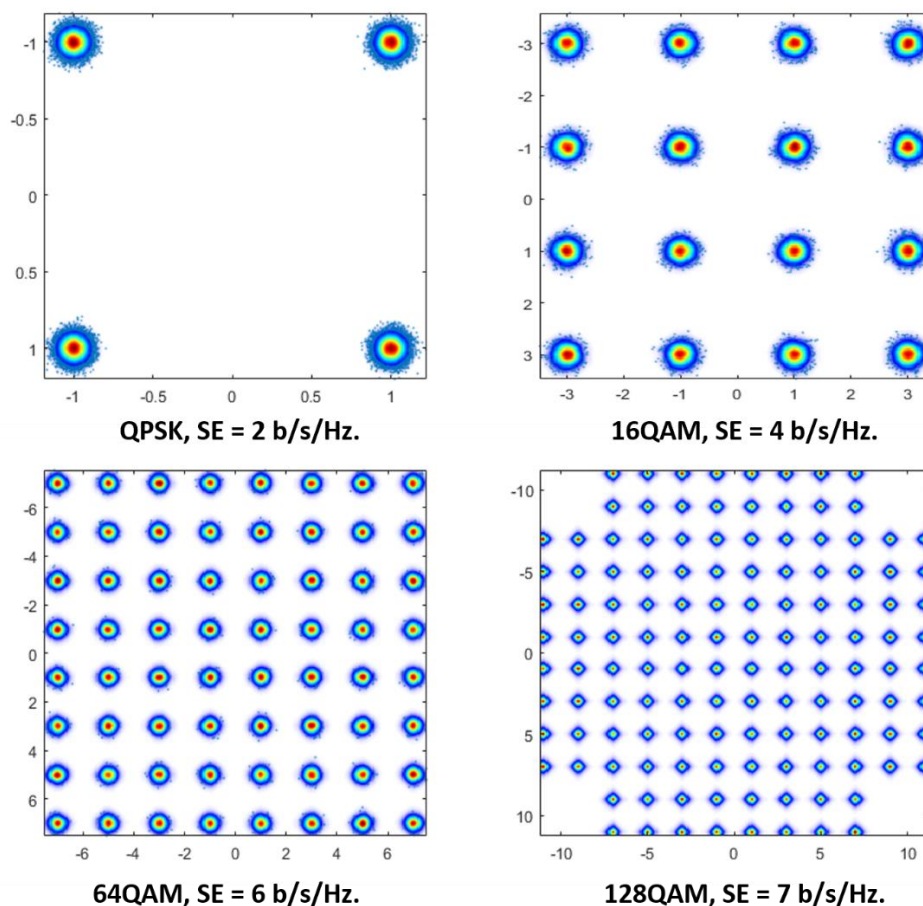
και οποιαδήποτε στροφή φάσης που επιδέχεται το οπτικό φέρον κατά τη διαμόρφωσή του μπορεί να αναπαρασταθεί με θετικό πρόσημο στο καρτεσιανό μιγαδικό επίπεδο (I,Q), συμβαδίζοντας με τις βασικές παραδοχές που συναντώνται στη βιβλιογραφία για τις ψηφιακές επικοινωνίες.

Υπάρχει διαθέσιμη μια μεγάλη ποικιλία σχημάτων διαμόρφωσης, τα οποία κωδικοποιούν δεδομένα είτε στο πλάτος είτε στη φάση ή αμφότερα στο οπτικό φέρον. Ανάλογα με την τάξη διαμόρφωσης, ένα ή περισσότερα bits μπορούν να διαμορφωθούν σε κάθε σύμβολο μετάδοσης αυξάνοντας έτσι τη SE. Ωστόσο, η βελτίωση της SE επιτυγχάνεται με κόστος τη μειωμένη ανοχής στο θόρυβο του ASE και των μη γραμμικών στρεβλώσεων. Πριν από την εμφάνιση της σύμφωνης τεχνολογίας ανίχνευσης, τα δεδομένα κωδικοποιούνταν είτε στην ένταση του οπτικού φορέα είτε στη φάση του διαφορικά, τα οποία μπορούσαν να ανιχνευθούν με την αρχή της απευθείας ανίχνευσης. Λόγω της απλότητας της αρχιτεκτονικής του πομπού και δέκτη, τα συστήματα απευθείας ανίχνευσης εξακολουθούν να είναι τα πιο ευρέως αναπτυγμένα συστήματα. Εντούτοις, η SE τέτοιων συστημάτων περιορίζεται μέχρι 2 b/s/Hz χρησιμοποιώντας διαφορική Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης με Τετραγωνισμό (differential quadrature phase shift key, DQPSK). Η ποικιλομορφία πόλωσης δεν χρησιμοποιείται σε αυτές τα σχήματα λόγω δυσκολιών στην παρακολούθηση της πόλωσης από εμπορικές οπτικές συσκευές. Η σύμφωνη τεχνολογία ανίχνευσης επέτρεψε τη χρήση διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων.

Η εικόνα 1.13 αναπαριστά μια σειρά από ιδανικά διαγράμματα αστερισμού, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης και μπορούν να δημιουργηθούν με παραπάνω από έναν τρόπους με τη χρήση διαφορετικών οπτικών διαμορφωτών. Τα μπλε στίγματα αναπαριστούν το σύνολο των δυνατών καταστάσεων διαμόρφωσης (συμβόλων). Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση της OOK διαμόρφωσης οι καταστάσεις διαμόρφωσης αντιστοιχούν σε δύο κανονικοποιημένα επίπεδα ισχύος το 0 και το 1, τα οποία αποτυπώνονται με δύο κόκκινες τελείες στα σημεία (0,0) και (1,0) του μοναδιαίου κύκλου του μιγαδικού επιπέδου (I,Q). Συνεχίζοντας την περιγραφή των διαγραμμάτων αστερισμού της εικόνας 13, στην περίπτωση της BPSK διαμόρφωσης, οι καταστάσεις διαμόρφωσης του σήματος εμφανίζονται ως κόκκινες τελείες στα άκρα του μοναδιαίου κύκλου έχοντας διαφορά φάσης ίση με π .

Τέλος, πέραν των παραδοσιακών δυαδικών σχημάτων διαμόρφωσης OOK και BPSK, φαίνονται και τρία διαγράμματα αστερισμού που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τρόπους διαμόρφωσης με το σχήμα QPSK. Και στις τρεις περιπτώσεις, οι διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης καταλήγουν στις ίδιες καταστάσεις διαμόρφωσης με διαφορά φάσης $\pi/2$. Επίσης, γίνεται εμφανές ότι ορισμένες μέθοδοι οδηγούν σε μεταβάσεις που έχουν καθόλα τη διάρκεια σταθερό πλάτος, δηλαδή η τροχιά ακολουθεί την εξωτερική περίμετρο του μοναδιαίου κύκλου, ενώ άλλες οδηγούν σε μεταβολές την ένταση του πεδίου καθώς διαμορφώνεται η φάση τους. Η διαδικασία διαμόρφωσης σημάτων κατά QPSK θα αναλυθεί περαιτέρω στην παρακάτω υπο-ενότητα 1.4.5. Όλα αυτά τα παραδείγματα αποδεικνύουν το πόσο χρήσιμο εργαλείο απεικόνισης μπορούν να καταστούν τα διαγράμματα αστερισμού, εφόσον έχουν τη δυνατότητα να αποτυπώνουν τη φύση της διαδικασίας διαμόρφωσης των οπτικών σημάτων. Στις πραγματικές συνθήκες μετάδοσης, οι καταστάσεις διαμόρφωσης στα διαγράμματα αστερισμού δεν εμφανίζονται ποτέ ως μικρές τελείες, εξαιτίας του θορύβου και της παραμόρφωσης του διαμορφωμένου σήματος από το σύνολο των υποβαθμίσεων του συνολικού δικτύου μετάδοσης που εισάγονται από τον πομπό μέχρι το δέκτη (θόρυβος ενισχυτών, πεπερασμένο ηλεκτρο-οπτικό (electro-optic, EO) εύρος λειτουργίας των διαμορφωτών, κτλ.).

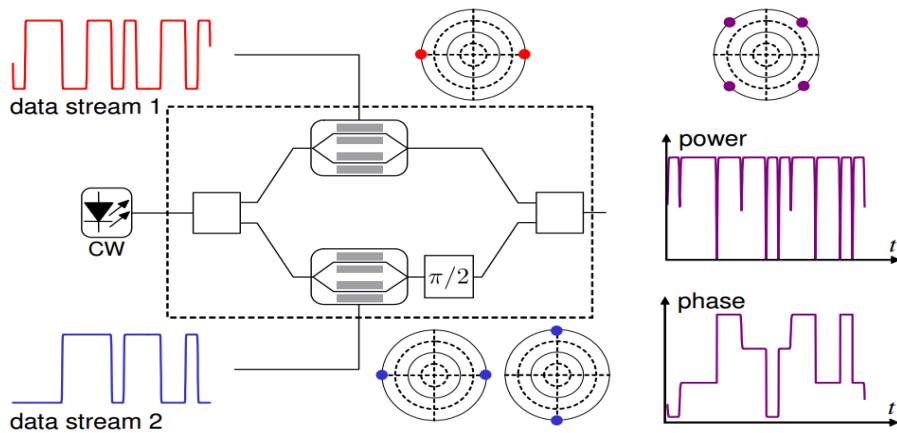
Παρόλο που αναμένεται υψηλότερη SE, η χρήση αυτών των προηγμένων σχημάτων διαμόρφωσης επιφέρει συνήθως υψηλότερη ποινή (penalty) κατά την εφαρμογή τους από τις τυπικές μορφές QAM. Στα πλαίσια αυτής της διατριβής και λόγω της διττής της φύσης όπως έχει δομηθεί, εξετάζονται αρχικά το απλό σχήμα NRZ-OOK αγγίζοντας ρυθμούς μετάδοσης έως και 100 Gb/s με ένα οπτικό φέρον με απευθείας ανίχνευση στο δέκτη για εφαρμογές διασύνδεσης εντός υπολογιστικών κέντρων και ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης m-QAM ($m = 4, 16, 64, 128$) με σύμφωνη ανίχνευση για εφαρμογές διασύνδεσης μεταξύ υπολογιστικών κέντρων.



Εικόνα 1.13: Σύμφωνα σχήματα διαμόρφωσης QAM και η επιτεύξιμη φασματική τους απόδοση.

1.4.5 Διαμόρφωση κατά QPSK

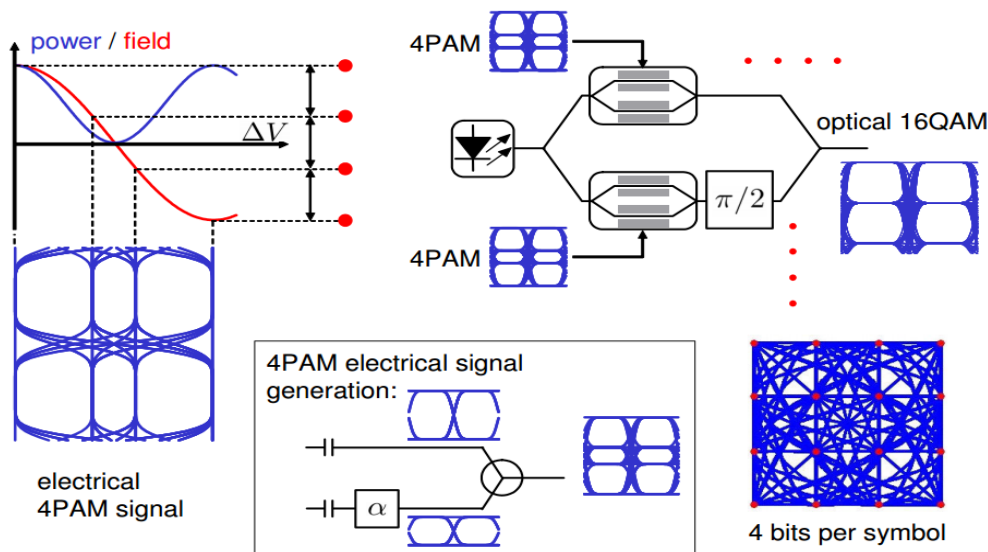
Η QSPK διαμόρφωση σημάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός διαμορφωτή IQ και παρουσιάζεται γραφικά στην εικόνα 1.14. Κάθε ένας από τους MZM οδηγείται από ένα δυαδικό ηλεκτρικό σήμα, και ακολουθεί την παραγωγή ενός BPSK σήματος με έναν διαμορφωτή MZM. Ο ολισθητής φάσης $\pi/2$ στον κάτω βραχίονα της συμβολομετρικής διάταξης αποσκοπεί στην περιστροφή του διαγράμματος αστερισμού του παραγόμενου BPSK κατά 90° μοίρες. Έπειτα από την συμβολή των δύο BPSK μετά τον συζεύκτη ισχύος εξόδου προκύπτει ένα οπτικό φέρον διαμορφωμένο κατά QSPK, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.14. Επειδή ένας MZM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διαμορφωτής φάσης επιτυγχάνοντας στροφή φάσης ακριβώς π στα διαμορφωμένα BPSK σήματα, η ιδιότητα αυτή των σημάτων παραμένει και μετά την σύνθεση των δύο BPSK σημάτων σε ένα QPSK σήμα. Παρόλα αυτά μία πρακτική δυσκολία στη σύνθεση του QSPK σήματος είναι η εύρεση του ακριβούς σημείου πόλωσης για την επίτευξη της στροφής φάσης κατά $\pi/2$ στο διαμορφωμένο BPSK σήμα που δημιουργείται από το κάτω άκρο του διαμορφωτή – διαδικασία η οποία εξασφαλίζει την ορθογωνιότητα ανάμεσα στα δύο BPSK σήματα. Το οπτικό διαμορφωμένο σήμα QPSK στην έξοδο του συμβολομετρικού διαμορφωτή IQ παρουσιάζει βυθίσματα στην ισχύ εξόδου του και πιο συγκεκριμένα δύο επιπέδων, όπου το ένα από αυτά αντιστοιχεί στη μετάβαση από τη κατάσταση διαμόρφωσης ανάμεσα στην 0 και την π , ενώ η άλλη στις ταυτόχρονες μεταβάσεις και των δύο BPSK σημάτων. Οι συγκεκριμένες μεταβάσεις μπορούν να γίνουν ορατές και στο διάγραμμα οφθαλμού της εικόνας 1.14, όπου οι τροχιές των μεταβάσεων που μπορούν να επιτευχθούν μπορεί να ακολουθούν είτε μια παράλληλη πορεία σε σχέση με τους άξονες I και Q είτε μία πορεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Το παραγόμενο σχήμα διαμόρφωσης QPSK στην έξοδο του διαμορφωτή μπορεί να ληφθεί είτε συμβολομετρικά, όπου η διαφορά φάσης ανάμεσα σε γειτονικά σύμβολα μετατρέπεται σε διαφορά πλάτους ακολουθώντας ένα επιπλέον στάδιο διαφορικής κωδικοποίησης, είτε με την τεχνική της σύμφωνης φώρασης που θα περιγραφεί στην υποενότητα 1.4.7.



Εικόνα 1.14: Βασική αρχή δημιουργίας ενός οπτικού QSPK σήματος με τη χρήση ενός διαμορφωτή IQ, αναπαριστώντας τα δυαδικά ηλεκτρικά σχήματα οδήγησης, τα στάδια της διαμόρφωσης με τη μορφή διαγραμμάτων αστερισμού και την εξέλιξη της φάσης του τελικού διαμορφωμένου σήματος συναρτήσει την οπτικής ισχύος εξόδου του.

1.4.6 Διαμόρφωση με Τετραγωνικούς Σχηματισμούς QAM

Τα σχήματα διαμόρφωσης QAM χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα ψηφιακά τηλεπικοινωνιακά συστήματα, έχοντας πλέον περίοπτη θέση στις οπτικές επικοινωνίες και πιο συγκεκριμένα στα δίκτυα κορμού και ραχοκοκαλιάς. Το σχήμα διαμόρφωσης QPSK που μελετήθηκε προηγουμένως, μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική περίπτωση διαμόρφωσης με 4-QAM όπου οι δυνατές καταστάσεις διαμόρφωσης είναι συνολικά 4. Ως ένα παράδειγμα διαμόρφωσης QAM, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα κορμού, τα οποία μελετώνται σε αυτή τη διατριβή θα θεωρηθεί η περίπτωση του σχήματος 16-QAM, βάσει του οποίου η διαμόρφωση του οπτικού φέροντος μπορεί να λάβει συνολικά 16 λογικές καταστάσεις με το κάθε σύμβολο να μεταφέρει τέσσερα συνολικά bits πληροφορίας. Το διάγραμμα αστερισμού του 16-QAM αποτυπώνει ένα σύνολο από δεκαέξι καταστάσεις διαμόρφωσης σε ένα τετραγωνικό πλέγμα του μιγαδικού επιπέδου (I,Q). Για την δημιουργία αυτών των λογικών καταστάσεων ο διαμορφωτής IQ θα πρέπει να οδηγείται από ηλεκτρικά σήματα διαμόρφωσης τεσσάρων επιπέδων, τα οποία πλέον δεν είναι δυαδικά αλλά φέρουν την ηλεκτρική διαμόρφωση πλάτους παλμού τεσσάρων επιπέδων (4 pulse amplitude modulation, 4-PAM). Τα ηλεκτρικά αυτά σχήματα μπορούν να δημιουργηθούν είτε με τη χρήση ενός ψηφιακού κυκλώματος DAC είτε με το συνδυασμό δύο δυαδικών ακολουθιών άνισου πλάτους με ένα ηλεκτρικό συζεύκτη ισχύος.



Εικόνα 1.15: Βασική αρχή λειτουργίας σήματος 16-QAM με τη χρήση ενός διαμορφωτή IQ. Τα ηλεκτρικά 4-PAM σήματα στο παράδειγμα αυτό δημιουργούνται με το συνδυασμό δύο δυαδικών ακολουθιών άνισου πλάτους και οδηγούν ξεχωριστά τον κάθε MZM. Επιπλέον αποτυπώνεται τόσο το διάγραμμα οφθαλμού του 16-QAM σχήματος όσο και το διάγραμμα αστερισμού του.

Όταν κάθε ένας από τους MZM του IQ διαμορφωτή είναι πολωμένος στη μικρότερη ισχύ μετάδοσή τους, τότε τα δύο ηλεκτρικά 4-PAM σήματα δεδομένων αντιστοιχίζονται σε τέσσερις δυνατές καταστάσεις ανά τεταρτημόριο του μιγαδικού επίπεδου (I,Q) δημιουργώντας ένα σήμα 16-QAM. Στην περίπτωση που ο κάθε MZM οδηγείται σε δύο συνεχόμενα τοπικά μέγιστα της συνάρτησης μεταφοράς της ισχύος του, αυτό θα οδηγήσει και στην μέγιστη ισχύ εξόδου του διαμορφωτή. Παρόλα αυτά για την περίπτωση αυτή, εξαιτίας της μη γραμμικής σχέσης ανάμεσα στο ηλεκτρικό πεδίο και την εφαρμοζόμενη τάση, η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρικά επίπεδα των 4-PAM σημάτων διαμόρφωσης θα πρέπει να αναπροσαρμοστούν, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.15. Για την ανίχνευση και αποκωδικοποίηση τέτοιων οπτικών σχημάτων διαμόρφωσης απαιτούνται σύμφωνοι οπτικοί δέκτες.

1.4.7 Οπτικός Δέκτης (Optical Receiver)

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ένα από τα πιο σύνθετα μέρη σε οποιοδήποτε σύστημα μετάδοσης είναι ο δέκτης. Με τα χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι δεκτών ικανών να αποκωδικοποιούν τα οπτικά διαμορφωμένα σήματα. Μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, δηλ. τους δέκτες απευθείας ανίχνευσης και τους σύμφωνους δέκτες. Τα πρώτα συστήματα εργάστηκαν πάνω στην αρχή της απευθείας ανίχνευσης και ο σχεδιασμός του δέκτη ήταν μάλλον απλός. Τέτοια συστήματα εξακολουθούν να είναι τα πλέον ευρέως αναπτυγμένα, ωστόσο η SE των εν λόγω συστημάτων είναι αρκετά περιορισμένη. Η νεότερη γενιά πομποδεκτών χρησιμοποιεί τεχνολογία σύμφωνης ανίχνευσης και είναι σε θέση να επιτύχει προϊόντα υψηλότερης απόστασης με υψηλότερο ρυθμό δεδομένων, πράγμα που δεν ήταν εφικτό με την τεχνολογία απευθείας ανίχνευσης. Καθώς η κυκλοφορία δεδομένων συνεχίζει να αυξάνει το διαθέσιμο φάσμα των ινών, συνειδητοποιείται ότι η σύμφωνη ανίχνευση θα γίνει η κυρίαρχη επιλογή αφού μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη SE και ευαισθησία του δέκτη. Στη συνέχεια συζητούνται τόσο οι αρχές απευθείας ανίχνευσης όσο και οι αρχές του σύμφωνου δέκτη.

1.4.8 Εμπρόσθιο τμήμα ανίχνευσης (Receiver Front-end)

Μια απλούστερη μορφή οπτικού δέκτη είναι ένας δέκτης απευθείας ανίχνευσης ο οποίος είναι ικανός να ανιχνεύει μόνο την ένταση του φωτός και να τη μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα. Ουσιαστικά χρησιμοποιείται μια φωτοδίοδος (PD) για το σκοπό αυτό, η οποία είναι μια φωτοευαίσθητη συσκευή μετατρέποντας έτσι τη διακύμανση της οπτικής έντασης σε ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα εξόδου μιας PD σχετίζεται με την ισχύ του προσπίπτοντος φωτός ως:

$$I = R \cdot P \quad (1.11)$$

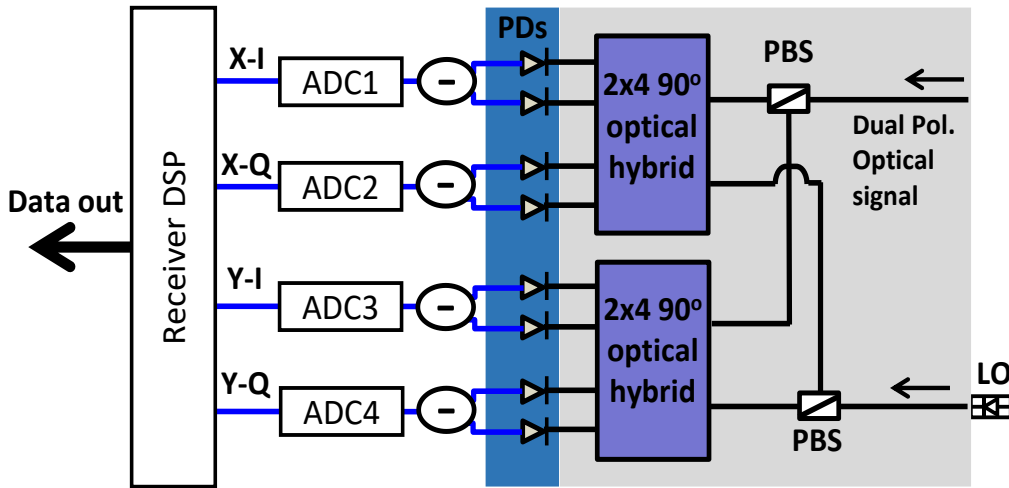
$$P = \frac{|A|^2}{2} \quad (1.12)$$

$$E(t) = A(t)e^{j(\omega_{Tx}t + \varphi)} \quad (1.13)$$

,όπου P είναι η χρονική μεταβαλλόμενη ισχύς σήματος που σχετίζεται με το πλάτος (A(t)) του πεδίου προσπίπτοντος φωτός (E(t)) και R είναι η απόκριση της PD που δίδεται ως:

$$R = \frac{e\eta}{h\omega} \quad (1.14)$$

,όπου e είναι το φορτίο ηλεκτρονίων, η είναι η κβαντική απόδοση του PD και h είναι η σταθερά του Planck. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τη PD μπορεί να ανιχνευθεί από ένα απλό κύκλωμα ανίχνευσης για να το μετατρέψει σε bits δεδομένων. Η πληροφορία της φάσης του οπτικού κύματος χάνεται στη διαδικασία της απευθείας ανίχνευσης. Για την περίπτωση κωδικοποιημένων σημάτων διαφορικής φάσης όπως η διαφορική μετατόπιση φάσης (differential phase shift keying, DPSK) και η DQPSK, το συμβολόμετρο γραμμών καθυστέρησης (delay line interferometer, DLI) προηγείται του δέκτη απευθείας ανίχνευσης. Ένα DLI μετατρέπει τις πληροφορίες διαφορικής φάσης σε διακυμάνσεις έντασης που είναι ανιχνεύσιμες από μια φωτοδίοδο [91]. Πριν από την εμφάνιση των οπτικών ενισχυτών (EDFAs), η ευαισθησία των δεκτών απευθείας ανίχνευσης αποτέλεσε σημαντική πρόκληση που οδήγησε σε έρευνα μεγάλης κλίμακας για το σύμφωνο σύστημα ανίχνευσης, καθώς επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ευαισθησία σε σχέση με τους πρώτους [92]. Τα σύμφωνα συστήματα ανίχνευσης έχουν γίνει και πάλι το επίκεντρο της έρευνας στα συστήματα μετάδοσης μεγάλης χωρητικότητας σε μεγάλες αποστάσεις ως μέσο ενίσχυσης της SE. Σε σύγκριση με την απευθείας ανίχνευση, οι σύμφωνοι δέκτες ανίχνευσης είναι πιο περίπλοκοι, αλλά μετατρέπουν την πλήρη πληροφορία του οπτικού πεδίου (δηλαδή πλάτος, φάση και πόλωση) στον ηλεκτρικό τομέα. Μόλις οι πληροφορίες βρίσκονται στον ηλεκτρικό τομέα μετατρέπονται στη συνέχεια στον ψηφιακό τομέα που χρησιμοποιεί υψηλής ταχύτητας αναλογικούς σε ψηφιακούς μετατροπείς (analog to digital converters, ADCs) για περαιτέρω επεξεργασία. Σε περίπτωση σύμφωνης οπτικής λήψης απαιτείται λέιζερ τοπικού



Εικόνα 1.16: Δομή ενός σύμφωνου οπτικού δέκτη πόλωσης και φάσης. PBS: διαχωριστής δέσμης πόλωσης, LO: τοπικός ταλαντωτής, PD: φωτοδιόδος, ADC: αναλογικός σε ψηφιακό μετατροπέας.

ταλαντωτή (local oscillator, LO), ο οποίος συνδέεται με το οπτικό σήμα πριν ανιχνευθεί από τις PDs. Η δομή ενός σύμφωνου οπτικού ποικιλόμορφου δέκτη διαφορικής φάσης και πόλωσης παρουσιάζεται στην εικόνα 1.16. Το σήμα διπλής πόλωσης πρώτα διαχωρίζεται από έναν PBS και εισάγεται σε δύο χωριστά 2x4 90° οπτικά υβρίδια (optical hybrids).

Ένα 2x4 90° υβρίδιο είναι μια οπτική διάταξη που συνδυάζει το σήμα με τον τοπικό ταλαντωτή και μπορεί βασικά να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό συζευκτών 3-dB και ενός ολισθητή φάσης 90° [93]. Μόνο η σύζευξη του σήματος (S) και του LO γίνεται σε αυτό το στάδιο και η πραγματική ανάμιξη λαμβάνει χώρα στις PDs, αφού ανιχνεύουν την ένταση του φωτός. Τα πεδία του σήματος και του τοπικού ταλαντωτή μπορούν να αναπαρασταθούν με την εξίσωση 1.13, με δείκτες S/LO που αντιπροσωπεύουν το σήμα και LO αντίστοιχα και τα τέσσερα ηλεκτρικά πεδία στην έξοδο του 2x4 90° οπτικού υβριδίου δίνονται ως:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} E_S + E_{LO} \\ E_S - E_{LO} \\ E_S + iE_{LO} \\ E_S - iE_{LO} \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι PDs ουσιαστικά δεν είναι ευαίσθητοι στη φάση του προσπίπτοντος σήματος, ωστόσο η διαδικασία σύζευξης του σήματος και του LO που προηγείται των PDs οδηγεί στη διατήρηση των πληροφοριών της φάσης. Μετά τις PDs, τα ρεύματα εξόδου μπορούν να ανιχνευθούν διαφορικά με τη διαδικασία να είναι γνωστή ως ισορροπημένη ανίχνευση (balanced detection), ωστόσο αυτή δεν είναι απαραίτητη καθώς η μη διαφορική ανίχνευση είναι επίσης επαρκής. Η ισορροπημένη ανίχνευση έχει το πλεονέκτημα ότι η ισχύς του σήματος σχεδόν διπλασιάζεται σε σχέση με τον θόρυβο λόγω της σύμφωνης προσθήκης που οδηγεί σε βελτίωση του SNR κατά 3 dB. Τα ρεύματα εξόδου μετά από την ισορροπημένη ανίχνευση μέσω των PDs που αντιστοιχούν σε μία πόλωση δίδονται ως:

$$I_1(t) = \frac{R}{4} A_s(t) A_{LO} \cos(\omega_{if} t + \varphi_n(t)) \quad (1.16)$$

$$I_2(t) = \frac{R}{4} A_s(t) A_{LO} \sin(\omega_{if} t + \varphi_n(t)) \quad (1.17)$$

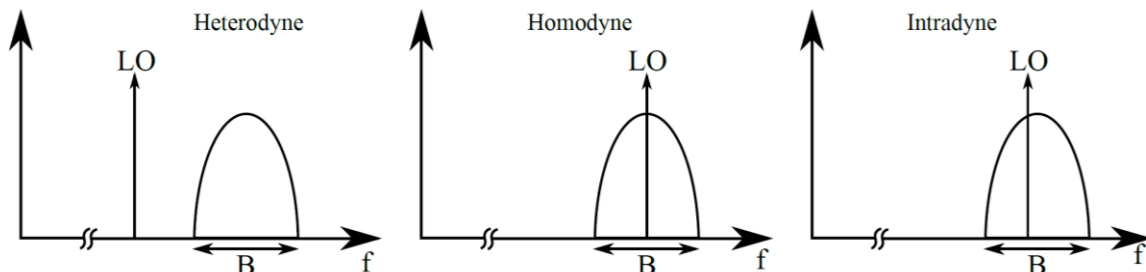
,όπου $\omega_{if} = |\omega_{Tx} - \omega_{LO}|$ είναι η ενδιάμεση συχνότητα και $\varphi_n(t)$ είναι ο θόρυβος φάσης ως αποτέλεσμα των ευρών γραμμής των λέιζερ του πομπό και του LO. Μετά τη μετατροπή στον ψηφιακό τομέα που χρησιμοποιεί ADCs (βλέπε εικόνα 1.16), το σύνθετο ληφθέν σήμα ανακατασκευάζεται στο ψηφιακό τομέα όπως:

$$X = IX + iQX \quad (1.18)$$

$$Y = IY + iQY \quad (1.19)$$

Η σύμφωνη ανίχνευση μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους οι οποίοι χαρακτηρίζονται σύμφωνα με την τιμή του ω_{if} σε σχέση με το εύρος ζώνης (B) του σήματος. Το εύρος ζώνης του προς ανίχνευση σήματος εξαρτάται από το ρυθμό συμβόλων και το σχήμα του παλμού. Διάφοροι τρόποι υλοποίησης της σύμφωνης ανίχνευσης φαίνονται στην εικόνα 1.17. Αν $\omega_{if} > B$ η βασική τεχνική σύμφωνης ανίχνευσης ονομάζεται ετερόδυνη ανίχνευση. Προκειμένου οι τεχνικές ανίχνευσης να μην επάγουν επιδράσεις υποβάθμισης λόγω φιλτραρίσματος στο σήμα που πρόκειται να ληφθεί, το εύρος

ζώνης των χρησιμοποιούμενων τμημάτων θα πρέπει να είναι αρκετά ευρύ. Μεγάλος περιορισμός του εύρους ζώνης συμβαίνει λόγω των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, δηλ. των PDs και ADCs στο σύμφωνο εμπρόσθιο τμήμα ανίχνευσης όπως φαίνεται στην εικόνα 16. Προκειμένου να ανιχνευθεί το σήμα που χρησιμοποιεί ετερόδυνη ανίχνευση, απαιτείται ένα ηλεκτρικό εύρος ζώνης $\sim (\omega_{if} + B/2)$. Δεδομένου ότι η τιμή του ω_{if} είναι μεγαλύτερη από το εύρος ζώνης σήματος (B) στην ετερόδυνη ανίχνευση, το εύρος ζώνης του ανιχνεύσιμου σήματος καθώς και ο ρυθμός των συμβόλων μετάδοσης είναι αρκετά περιορισμένοι.



Εικόνα 1.17: Διαφορετικοί τρόποι υλοποίησης σύμφωνης οπτικής ανίχνευσης.

Το ανιχνευόμενο ετερόδυνο σήμα μπορεί είτε να δειγματοληπτηθεί απευθείας από τους ADCs είτε μπορεί να μετατραπεί περαιτέρω (down converted) προς τα κάτω χρησιμοποιώντας RF LO που λειτουργεί με συχνότητα ω_{if} . Η άμεση δειγματοληψία των ετερόδυνων ληφθέντων σημάτων έθεσε επίσης απαιτήσεις αυστηρού εύρους ζώνης στους ADCs και δεν αποτελούν κατάλληλη επιλογή για μετάδοση υψηλού ρυθμού συμβόλων. Επιπλέον, για να διατηρείται απλή η σχεδίαση του δέκτη ελαχιστοποιώντας τα απαιτούμενα εξαρτήματα, αποφεύγονται επίσης οι μικτές RF. Αντίθετα, αν η συχνότητα του LO ταιριάζει απόλυτα με τη συχνότητα μετάδοσης σήματος, η προκύπτουσα είναι $\omega_{if} = 0$ και το σχήμα ανίχνευσης αποτελεί την ομόδυνη ανίχνευση. Προκειμένου να ευθυγραμμιστεί τέλεια η συχνότητα LO απαιτείται ένας μηχανισμός παρακολούθησης και ελέγχου συχνότητας, ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός βρόχου με κλειστή οπτική φάση (optical phase locked loop, OPLL) [94,95]. Ωστόσο, η χρήση του OPLL απαιτεί λέιζερ στενής ευρείας γραμμής σε πομπό και δέκτη και καθιστά τον σχεδιασμό του δέκτη αρκετά περίπλοκο και συνήθως αποφεύγεται. Στην πράξη, η συχνότητα των λέιζερ πομπού και LO μετατοπίζεται ελαφρώς με την πάροδο του χρόνου.

Εάν η συχνότητα του LO είναι κατά προσέγγιση ευθυγραμμισμένη με το κέντρο του σήματος και δεν είναι οπτικά ελεγχόμενη, το σχήμα ανίχνευσης ορίζεται ως ενδόδυνη ανίχνευση (intradyne detection). Η τιμή του ω_{if} σε αυτό το σχήμα ταλαντεύεται περίπου στο 1% του εύρους ζώνης σήματος. Ο οπτικός ή ηλεκτρικός έλεγχος συχνότητας αποφεύγεται για να απλοποιηθεί ο δέκτης, ωστόσο η συχνότητα και η διαφορά φάσης μεταξύ των λέιζερ πομπού και LO αντισταθμίζονται στον ψηφιακό τομέα όπου χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι DSP. Θεωρητικά, όλες οι τεχνικές σύμφωνης ανίχνευσης επιτυγχάνουν την ίδια ευαισθησία του δέκτη, ωστόσο λόγω των χαλαρών απαιτήσεων, το σύστημα ενδόδυνης ανίχνευσης είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο σύμφωνο σύστημα ανίχνευσης σε εμπορικά προϊόντα και είναι επίσης το σχήμα ανίχνευσης που χρησιμοποιείται σε αυτή τη διατριβή.

1.5 Τεχνολογία Υλικών-Πολυμερικά Υλικά

Έχοντας εξετάσει τις βασικότερες αρχές καθώς και τις διατάξεις που επιτρέπουν οπτική διαμόρφωση και ανίχνευση και ακολουθούνται σε αυτή τη διατριβή, στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζεται μια νέα τηλεπικοινωνιακή πλατφόρμα οπτικής ολοκλήρωσης υψηλών επιδόσεων βασισμένη σε πολυμερικές διατάξεις. Η προτεινόμενη πλατφόρμα εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες των πολυμερών για εξαιρετικά ταχεία διαμόρφωση οπτικών σημάτων και συγκεκριμένα τις δυνατότητες των υλικών αυτών να παρέχουν εξαιρετικά ταχεία ηλεκτρο-οπτική απόκριση (EO response) αλλά και να επιδεικνύουν υψηλούς ηλεκτρο-οπτικούς συντελεστές.

Αρχικά, γίνεται μια ανάλυση και παρουσίαση των συμβατικών οπτικών τεχνολογιών ολοκλήρωσης που επιτρέπουν οπτική διαμόρφωση σε υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, οι οποίες παρουσιάζουν και αυτές υψηλούς ηλεκτρο-οπτικούς συντελεστές. Στη συνέχεια, στο δεύτερο μέρος της παρούσας υποενότητας περιγράφεται μια EO πολυμερική δομή, συμπεριλαμβανομένων των βασικών οπτικών ιδιοτήτων της, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη διαμορφωτών Mach-Zehnder με εύρος ζώνης το οποίο υπερβαίνει τα 65 GHz. Στο πλαίσιο της διατριβής διερευνάται ο συνδυασμός ενός τέτοιου διαμορφωτή

μαζί με άλλες βασικές παθητικές δομές όπως συζεύκτες MMI (Multi-mode interference) και πλέγματα Bragg (BG), σε μία ενιαία ηλεκτρο-οπτική πολυμερική πλατφόρμα μέσω μονολιθικής ολοκλήρωσης, ούτως ώστε να προκύψει μια φωτονική πλατφόρμα με πολλαπλές λειτουργικότητες για εφαρμογές οπτικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων υψηλών επιδόσεων.

Στο τρίτο μέρος της υποενότητας γίνεται μια εκτενής περιγραφή της παθητικής πλατφόρμας φωτονικής ολοκλήρωσης μονορυθμικής λειτουργίας, η οποία βασίζεται και αυτή στα οπτικά πολυμερή και έχει αποδεδειγμένη δυνατότητα λειτουργίας ως χαμηλού κόστους και πολυλειτουργικής πλατφόρμας φωτονικής ολοκλήρωσης, καθώς χαρακτηρίζεται από χαμηλή απώλεια διάδοσης (0.5 dB/cm στα 1550 nm), μεγάλη ποικιλία μονολιθικά ολοκληρωμένων δομών (φράγματα περίθλασης Bragg, θερμο-οπτικούς διακόπτες, μεταβλητούς οπτικούς εξασθενητές) και δυνατότητα υβριδικής ολοκλήρωσης δομών InP, όπως τα chip κέρδους (gain chip, GC) και οι φωτοδιόδοι (PDs) με γρήγορο και εύκολο τρόπο [96]. Αυτές οι δομές αναλύονται και παρουσιάζονται τα πειραματικά τους αποτελέσματα καθώς η συνδυασμένη χρήση τους επιτρέπει την κατασκευή οπτικών δομών για την ανάπτυξη υψίρρυθμων ευέλικτων οπτικών πομπών πολλαπλών ροών για εφαρμογή σε ευέλικτα οπτικά δίκτυα όπως αναλύονται στο κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής.

1.5.1 Συμβατικές Οπτικές Τεχνολογίες Ολοκλήρωσης για την Ανάπτυξη Υψίρρυθμων Διεπαφών

Η αναγκαιότητα ανάπτυξης νέας γενιάς εξαιρετικά γρήγορων οπτικών πομπών εξαρτάται από τον τύπο του δικτύου αλλά και από τον τύπο της εφαρμογής. Αυτοί οι οπτικοί πομποί είναι δυνατό να σχεδιαστούν ούτως ώστε να αποτελούν τμήμα:

- συστημάτων μετάδοσης τα οποία λειτουργούν με άμεση ανίχνευση (direct detection) και σχήματα διαμόρφωσης NRZ-OOK
- συστημάτων άμεσης ανίχνευσης τα οποία χρησιμοποιούν πολυπλοκότερα σχήματα διαμόρφωσης όπως για παράδειγμα η διαμόρφωση πλάτους παλμού (PAM) και διαμόρφωση διακριτού τόνου (discrete multitone modulation, DMT)
- σύμφωνων συστημάτων τα οποία λειτουργούν με σχήματα διαμόρφωσης ανώτερης τάξης όπως QPSK και QAM

Όποιος κι αν είναι ο τύπος του συστήματος μετάδοσης ή της χρησιμοποιούμενης διαμόρφωσης, οι ανάγκες αύξησης του ρυθμού συμβόλων, και κατ' επέκταση του συνολικού ρυθμού bit, είναι διαρκείς, οδηγώντας αναπόφευκτα στην ανάπτυξη πομπών με αυξημένο ηλεκτρο-οπτικό (EO) εύρος ζώνης.

Ειδικά τα συστήματα μετάδοσης NRZ-OOK παραδοσιακά επέτρεπαν λειτουργίες στον υψηλότερο δυνατό ρυθμό συμβόλου και αντιπροσώπευαν πάντα το καλύτερο δυνατό πλαίσιο για την αξιολόγηση του δυναμικού του εύρους ζώνης για διαφορετικές τεχνολογίες πομπών. Από πρακτική άποψη, η ανάπτυξη εξαιρετικά γρήγορων πομπών OOK ικανών να φθάσουν σε ρυθμούς μεγαλύτερους από το ρυθμό που χρησιμοποιείται σήμερα (40 Gb/s) υποστηρίζοντας λειτουργίες στα 80 ή ακόμα και στα 100 Gb/s, προσελκύει στις μέρες μας το ενδιαφέρον για ανάπτυξη διεπαφών (interfaces) οι οποίες λειτουργούν σε ταχύτητες πολλαπλών 40 Gb/s, 100 Gb/s, πολλαπλών-100 Gb/s και οι οποίες μπορούν με τη σειρά τους να χρησιμοποιηθούν ως βάση για εφαρμογές οπτικών διασυνδέσεων (interconnects) μεταξύ κέντρων αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων (data centers, DCs) με κύρια χαρακτηριστικά την απλότητα, το χαμηλό κόστος και τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Ωστόσο η ανάπτυξη τέτοιου είδους πομπών παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις που αφορούν τόσο το οπτικό όσο και το ηλεκτρικό τους τμήμα.

Από την πλευρά του οπτικού τμήματος τέτοιων διατάξεων, ηλεκτροοπτικά υλικά όπως το LiNbO₃, το πυρίτιο ή το GaAs έχουν ένα εύρος ζώνης το οποίο τυπικά παραμένει κάτω από τα 40 GHz καθιστώντας αδύνατη τη λειτουργία στα 80 ή στα 100 Gb/s χωρίς την ανάγκη εξισορρόπησης (equalisation). Το InP μπορεί να έχει υψηλότερο εύρος ζώνης (> 40 GHz) και έχει χρησιμοποιηθεί στο πρόσφατο παρελθόν για την ανάπτυξη διαμορφωτών υψηλών ταχυτήτων Mach-Zehnder (Mach-Zehnder modulators, MZM) καθώς και διαμορφωτών ηλεκτρο-απορρόφησης (EAMs). Ειδικά δε για την κλάση διαμορφωτών EAM οδεύοντων κυμάτων, αυτοί είναι δυνατό να παρουσιάσουν πολύ υψηλό εύρος ζώνης, να συνδυαστούν με εξαιρετικά γρήγορα ηλεκτρονικά και να υποστηρίξουν λειτουργία σε ρυθμούς που φτάνει τα 100 Gb/s.

Μέχρι στιγμής, οι κύριες υλικές πλατφόρμες που εξετάζονται σήμερα για τα πολυ-λειτουργικά φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (photonic integrated circuits, PICs) σχετίζονται με το διοξείδιο του πυριτίου πάνω σε πυρίτιο (Silica-on-silicon), το φωσφίδιο του ινδίου (InP), το πυρίτιο πάνω σε μονωτή (silicon-on-insulator, SOI) και τα οπτικά πολυμερή. Πιο συγκεκριμένα:

- Το σύστημα διοξείδιο του πυριτίου πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου (Silica-on-silicon) [97] επιτρέπει την υβριδική ολοκλήρωση ημιαγώγιμων ενεργών στοιχείων, διαμορφωτών και φωτοδεκτών με παθητικά φωτονικά κυκλώματα. Τα κύρια πλεονεκτήματα του συνδέονται με τη χαμηλή απώλεια, την ακρίβεια στους κυματοδηγούς και την ευελιξία για την κατασκευή πολύπλοκων κυκλωμάτων. Κύρια μειονεκτήματα αυτής της πλατφόρμας, όμως, είναι η καθαρά παθητική φύση του υλικού του συστήματος και η μικρή διαφορά των δεικτών διάθλασης που απαιτεί κυματοδηγούς μεγάλου πάχους και μεγάλη ακτινική κάμψη μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την πυκνότητα ολοκλήρωσης.
- Η μονολιθική ολοκλήρωση του φωσφιδίου του ινδίου (InP) είναι πλέον ένα αποδεδειγμένα αξιόπιστο φωτονικό σύστημα ολοκλήρωσης μετά την επιτυχία της Infinera [98]. Η πλατφόρμα InP καθιστά δυνατή την ολοκλήρωση των DFB λέιζερ, γρήγορων διαμορφωτών, φωτοδεκτών και παθητικών στοιχείων που επιτρέπουν την υλοποίηση πυκνών, πολυσύνθετων φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε ένα μόνο στάδιο. Τα μειονεκτήματα αυτής της πλατφόρμας εντοπίζονται στις υψηλές απώλειες διάδοσης στο InP (~ 2 dB/cm), στην περίπλοκη διαδικασία υλοποίησης, η οποία οδηγεί σε ραγδαία πτώση του αριθμού των λειτουργικών δομών, όταν η πολυπλοκότητα του κυκλώματος αυξάνει. Για τον ίδιο λόγο παρουσιάζει απαγορευτικά υψηλό κόστος ανάπτυξης, εκτός εάν μεγάλος αριθμός λειτουργικών κυκλωμάτων είναι εγγυημένος.
- Silicon-on-insulator (SOI) [99] είναι ένα σχετικά νέο υλικό σύστημα που σχετίζεται με τη φωτονική ολοκλήρωση. Έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον, όπως τα φωτονικά κυκλώματα πυριτίου και μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας καθιερωμένες διαδικασίες CMOS που επιτρέπουν την κοινή ολοκλήρωση φωτονικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματα αυτής της πλατφόρμας αποτελούν η υψηλή απόδοση και ο υψηλός δείκτης διάθλασης και αντίθεσης μεταξύ των υλικών της πλατφόρμας SOI που επιτρέπουν στενούς κυματοδηγούς και υψηλή πυκνότητα ολοκλήρωσης. Τα κύρια μειονεκτήματα σχετίζονται με τις υψηλές απώλειες διάδοσης (έως 1 dB/cm), την έλλειψη πηγής λέιζερ στα 1550 nm και την σχετικά χαμηλή ταχύτητα των σημερινά διαθέσιμων διαμορφωτών πυριτίου.
- Τα παθητικά οπτικά πολυμερή (Optical polymers) [100] έχουν αναδειχθεί ως μια εναλλακτική λύση, εξαιρετικά χαμηλού κόστους φωτονική πλατφόρμα ολοκλήρωσης. Διαφανή οργανικά μόρια μπορούν να τοποθετηθούν στροφικά σχεδόν σε κάθε υπόστρωμα και μπορούν να κατασκευαστούν, προκειμένου να παρουσιάζουν χαμηλές απώλειες (~ 0.1 dB/cm) και ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών δεικτών διάθλασης (refractive index contrasts) που επιτρέπουν πυκνότερες ολοκλήρωσης υψηλότερες από την πλατφόρμα SOI. Επιπλέον, συγκεκριμένα μόρια διαθέτουν ένα εξαιρετικά υψηλό ηλεκτροοπτικό (Electro-Optic, EO) συντελεστή και εμφανίζονται ως οι ιδανικοί υποψήφιοι για συμπαγείς, οπτικούς διαμορφωτές εξαιρετικά-υψηλής ταχύτητας. Ωστόσο, μέχρι τώρα η επίπεδη πολυμερική τεχνολογία δεν είχε αξιοποιηθεί ως μια πλατφόρμα ολοκλήρωσης πολλαπλών χρήσεων, καθώς η πλειοψηφία των επιδείξεων σχετίζονταν είτε με διακριτούς οπτικούς διαμορφωτές είτε με απλούς επίπεδους κυματοδηγούς. Κατά αυτό τον τρόπο, το παθητικό πολυμερικό σύστημα αποδείχθηκε ως μια πλατφόρμα πολλαπλών χρήσεων, χαμηλού κόστους ιδιαίτερα κατάλληλη για τη χρήση σε chip-to-chip εφαρμογές και σε πομποδέκτες για οπτικές διασυνδέσεις rack-to-rack. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο δεύτερο μέρος αυτής της υποενότητας.

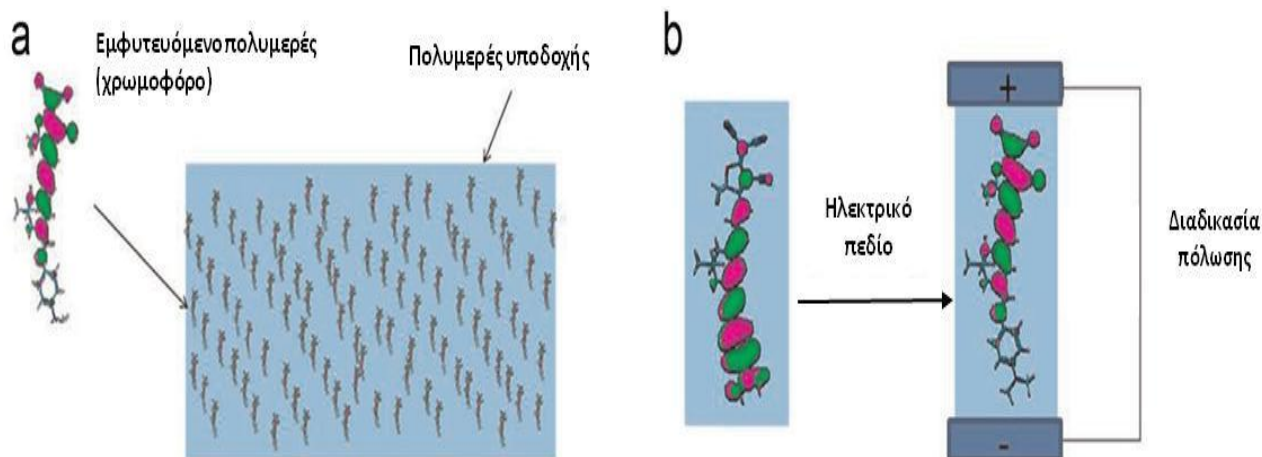
Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα σχετικά με την επίπεδη οπτική παθητική πολυμερική τεχνολογία έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη αποδοτικών και χαμηλού κόστους διαδικασιών για την κατασκευή ηλεκτροοπτικών διαμορφωτών υψηλής ταχύτητας, ως διακριτές μονάδες [101] και σε μια ποικιλία από καθαρά παθητικές δομές, συμπεριλαμβανομένων των κυματοδηγών χαμηλής απώλειας [102,103], των κατευθυντικών και πολυρυθμικών (Multi-Mode Interference, MMI) συζευκτών [104,105], των φραγμάτων περίθλασης Bragg (Bragg gratings) [106,107] και φίλτρων βασισμένων σε κοιλότητες μικρο-δαχτυλίων (micro-ring resonators) [108,109]. Οι προσπάθειες για την ολοκλήρωση ενεργών στοιχείων μαζί με επίπεδες πολυμερικές δομές έχουν πραγματοποιηθεί από το γερμανικό ινστιτούτο HHI και αναλύονται στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου.

Από την άλλη πλευρά, τα οπτικά πολυμερή με υψηλό EO συντελεστή θεωρούνται ως το υλικό σύστημα με τις καλύτερες προοπτικές για εξαιρετικά ταχεία οπτική διαμόρφωση, γεγονός το οποίο βασίζεται στα γρήγορα δυναμικά των γεφυρών μεταξύ ομάδων δοτών και των αποδεκτών εντός π-συζευγμένων πολυμένων πολυμερών. Αυτές οι προοπτικές έχουν ήδη επιβεβαιωθεί κατά το παρελθόν μέσω πειραματικών μετρήσεων του ηλεκτρο-οπτικού εύρους ζώνης των πολυμερούς σε τιμές άνω των 100 GHz [110]. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή τη διατριβή παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3 πειράματα επίδειξης οπτικής διαμόρφωσης στα 100 Gb/s με χρήση ολοκληρωμένου οπτικού πομπού βασισμένο σε EO πολυμερικό MZM καθώς και ολοκληρωμένες οπτικές διατάξεις κατασκευασμένες σε παθητικά οπτικά

πολυμερή στο κεφάλαιο 5 για την δημιουργία πολλαπλών οπτικών ροών είτε μονής είτε διπλής πόλωσης για τις διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων σε συνεργασία με εξωτερικά ηλεκτρονικά κυκλώματα δημιουργίας πολλαπλών επιπέδων ηλεκτρικών σημάτων βασισμένα σε τεχνολογία διπολικών τρανζίστορ διπλής ετεροένωσης InP (InP-DHBT) [111].

1.5.2 Χρήση ΕΟ Πολυμερικών Υλικών για τη Σχεδίαση και Ανάπτυξη Διαμορφωτών

Η βασική δομή ενός ηλεκτρο-οπτικού πολυμερικού συστήματος συνίσταται στην εμφύτευση ηλεκτρο-οπτικών χρωμοφόρων σε μια κατά τα άλλα παθητική πολυμερική μήτρα όπως φαίνεται στην εικόνα 1.18.



Εικόνα 1.18: (a) Δομή ηλεκτρο-οπτικού πολυμερικού συστήματος υλικών βασισμένου στη χρήση φιλοξενούμενου χρωμοφόρου εντός πολυμερούς υλικού υποδοχής και (b) διαδικασία πόλωσης του χρωμοφόρου εντός της μήτρας υποδοχής.

Τα ηλεκτρο-οπτικά χρωμοφόρα είναι μικρά μόρια με υψηλή υπερπολωσιμότητα σε μοριακό επίπεδο και με καλή χημική θερμική και φωτοχημική σταθερότητα ούτως ώστε να εξασφαλίζουν τη σταθερότητα του υλικού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής. Η σωστή πολική διάταξη των χρωμοφόρων στο υλικό υποδοχής διασφαλίζεται μέσω της πόλωσης του σύνθετου συστήματος χρησιμοποιώντας ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο σε θερμοκρασίες μέχρι την τιμή της θερμοκρασίας υαλώδους μετάβασης T_g του πολυμερούς. Τα χρωμοφόρα αποτελούνται από τρία διαφορετικά δομικά μπλοκ: ένα ήμισυ στο οποίο υπάρχει ισχυρός δότης ηλεκτρονίων, ένα ήμισυ στο οποίο είναι ισχυρός αποδέκτης ηλεκτρονίων και μια π-συζευγμένη γέφυρα η οποία ενώνει τα δύο παραπάνω ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματική ηλεκτρονική πόλωση μεταξύ των ημίσεων.

Η GigOptix [112] είναι η εταιρεία η οποία έχει αναπτύξει μια σειρά φωτοσταθερών χρωμοφόρων εμφυτευμένων μέσα σε amorphous polycarbonate (APC) και έχει προσπαθήσει να βελτιστοποιήσει το συνδυασμό του ηλεκτρο-οπτικού συντελεστή r_{33} (της τάξεως των 60-120 pm/V), την απώλεια οπτικής διάδοσης (σε τιμές κοντά στο 1 dB/cm), την ανοχή σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και τη σταθερότητα κατά τη διαδικασία κατασκευής. Αυτές οι προσπάθειες είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη δύο υλικών συστημάτων τα οποία έχουν ονομαστεί ως M1 και M3. Οι βασικές οπτικές ιδιότητες των συγκεκριμένων υλικών συστημάτων συνοψίζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1: Βασικές οπτικές ιδιότητες των ηλεκτρο-οπτικών υλικών M1 και M3 της GigOptix.

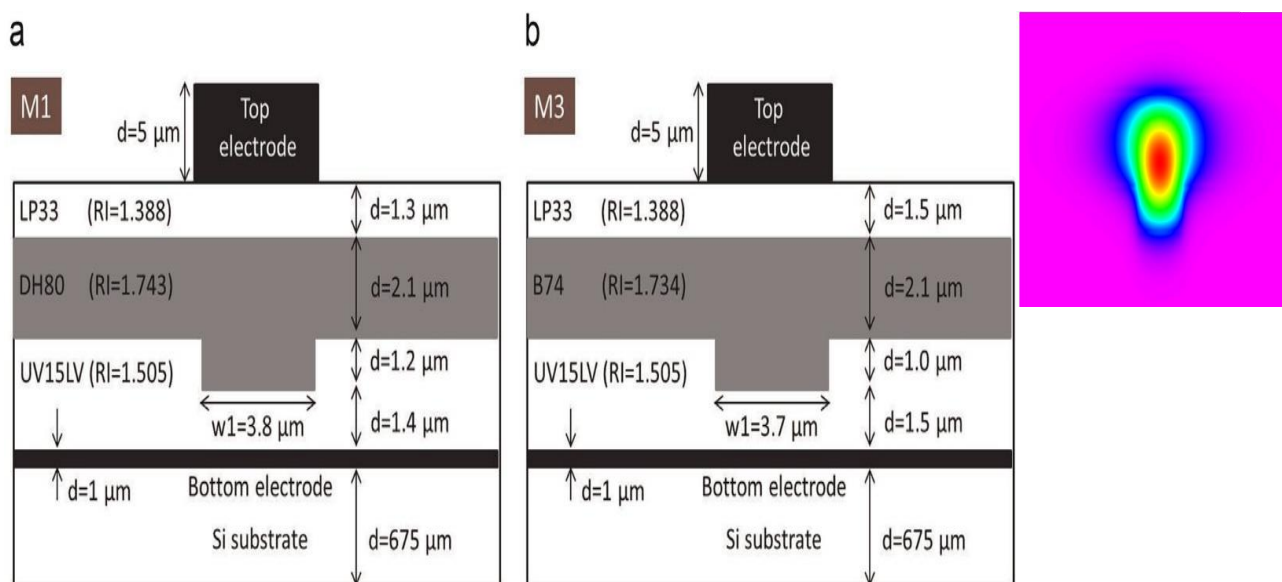
Χαρακτηριστικά	Υλικό M1	Υλικό M3
Απώλεια διάδοσης στα 1550 nm (dB/cm)	1.0	1.4
r_{33} στα 1550 nm (pm/V)	65	86
Χρωμοφόρα: T_g (°C)	~ 100	159
T_g ΕΟ πολυμερούς (°C)	140	170
Δείκτης διάθλασης (πολωμένου) στα 1550 nm (TM mode)	1.743	1.68

Αναλυτικότερα, το M1 εμφανίζεται να έχει ένα πλεονέκτημα όσον αφορά την οπτική απώλεια, αλλά το M3 εμφανίζεται να πλεονεκτεί όσον αφορά στην ανοχή σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας εξαιτίας της υψηλότερης τιμής της παραμέτρου T_g . Από την άλλη και τα δύο υλικά επιδεικνύουν υψηλό ηλεκτρο-οπτικό

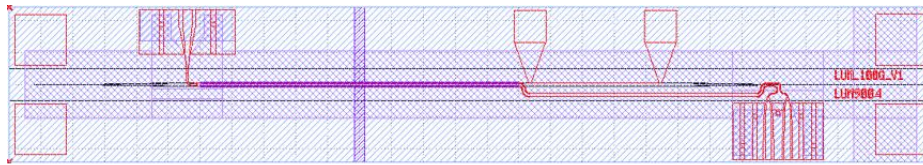
συντελεστή r_{33} όταν είναι πολωμένα, γεγονός που θέτει τις βάσεις για ισχυρό ΕΟ φαινόμενο, υπό την προϋπόθεση ότι οι πολυμερικοί κυματοδηγοί της οπτικής διάταξης που κατασκευάζεται από κάποιο από τα δύο υλικά, είναι σχεδιασμένοι κατά τέτοιον τρόπο ώστε να παρέχουν ισχυρή συγκράτηση του οπτικού πεδίου εντός της δομής κυματοδηγού. Η εικόνα 1.19 παρουσιάζει την εγκάρσια τομή καθεμιάς από τις δύο πλατφόρμες. Και στις δύο περιπτώσεις η δομή αντιστοιχεί σε ανεστραμμένο ραβδοειδές (inverted rib) αποτελούμενη από ένα υπόστρωμα πυριτίου και μια συσσωρευση πολυμερούς με πάχος περίπου 6 μm .

Στη δομή M1, η κωδική ονομασία του υλικού του πυρήνα είναι DH80 και έχει δείκτη διάθλασης (RI) ίσο με 1.743 υπό συνθήκες πόλωσης. Στη δομή M3, αυτό το υλικό αντικαθίσταται από ένα διαφορετικό υλικό, με κωδική ονομασία B74, το οποίο έχει RI ίσο με 1.734 υπό συνθήκες πόλωσης. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στην επάνω και στην κάτω επίστρωση είναι τα ίδια και στις δύο δομές. Επιπλέον, οι διαστάσεις των τριών στρωμάτων και οι διαστάσεις της ανεστραμμένης ράβδου κατά την κατακόρυφη και την εγκάρσια διεύθυνση είναι παρόμοιες, και σε συνδυασμό με τον δείκτη διάθλασης των υλικών έχουν παρόμοιες διαμέτρους προφίλ πεδίων (περίπου 2.8 και 4.6 μm στην κατακόρυφη και εγκάρσια διεύθυνση αντίστοιχα και για τις δύο περιπτώσεις υλικών). Τα δύο ηλεκτρόδια που είναι τοποθετημένα επάνω και κάτω από τη στοίβα πολυμερούς χρησιμοποιούνται για την πόλωση του υλικού του πυρήνα, ο οποίος επιτρέπει τη διαμόρφωση του εγκάρσιου (TM) ρυθμού διάδοσης εντός του κυματοδηγού.

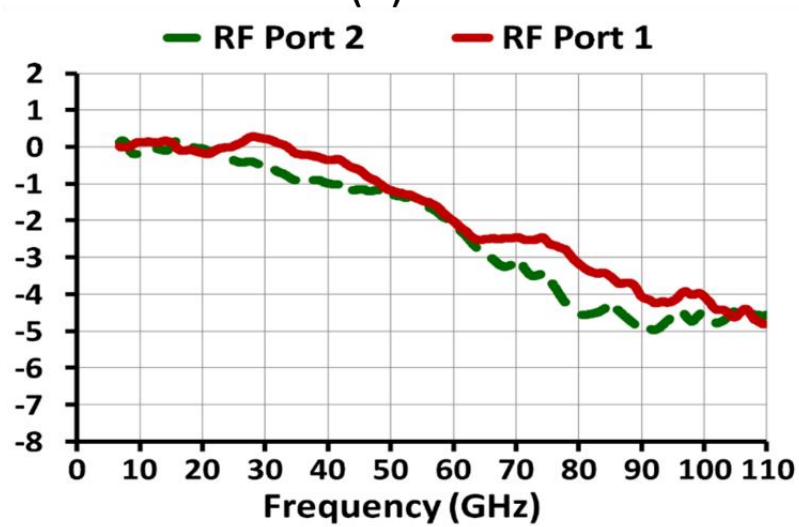
Χρησιμοποιώντας μία δομή κυματοδηγού, το βασικό MZM μπορεί να κατασκευαστεί ως ένας διαμορφωτής μονής οδήγησης με μηδενική διαμόρφωση συχνότητας (zero chirp) με χρήση εμπρόσθιας πόλωσης (poling) στους δύο βραχίονες του αντιστοιχίου συμβολόμετρου Mach-Zehnder και να ευθυγραμμιστούν προς την αντίθετη κατεύθυνση τα αντίστοιχα χρωμοφόρα. Η διάταξη (σχηματικό GDS) του διαμορφωτή 100 Gb/s φαίνεται στην εικόνα 1.20 (α). Πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο τα σήματα με TM πόλωση μπορούν να διαμορφωθούν λόγω των εγγενών ιδιοτήτων του ΕΟ πολυμερούς. Χρησιμοποιώντας προσεκτικά σχεδιασμένες microstrip γραμμές μεταφοράς ως ηλεκτρόδια οδήγησης, το συνολικό ηλεκτρο-οπτικό εύρος ζώνης μπορεί να υπερβαίνει τα 65 GHz, πράγμα που επιβεβαιώνεται από το σχήμα 1.20 (b) που αφορά το χαρακτηρισμό του εύρους ζώνης ενός εμπορικού ΕΟ διαμορφωτή της Gigortix διπλής οδήγησης. Το συνολικό μήκος του MZM είναι της τάξης των 11 mm, το συνολικό πλάτος της τάξης των 2.5 mm και το πλάτος της τάσης που απαιτείται για την μετατόπιση φάσης π (V_{π}) είναι περίπου 3.5 V. Περιλαμβάνονται επίσης δύο κυματοδηγοί αναφοράς, 250 μm πάνω και κάτω από τον διαμορφωτή, προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία σύζευξης με ίνες και ενεργά στοιχεία.



Εικόνα 1.19: Εγκάρσια τομή ηλεκτρο-οπτικού πολυμερικού κυματοδηγού με χρήση (α) της δομής M1 και (β) της δομής M3.



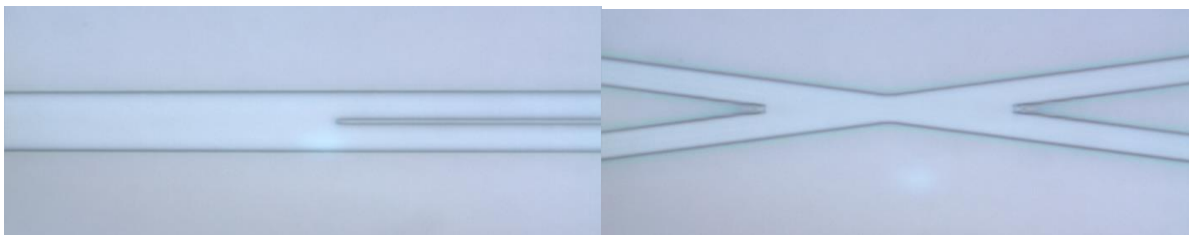
(a)



(b)

Εικόνα 1.20: (a) Σχηματικό GDS του διαμορφωτή 100 Gb/s και (b) διάγραμμα αναλογικού εύρους ζώνης σε σχέση με τη συχνότητα του ΕΟ πολυμερικού chip.

Ο ΕΟ διαμορφωτής κατασκευάζεται σε δίσκο (wafer) πυριτίου 6 ιντσών χρησιμοποιώντας μια σειρά μεθόδων περιδίνησης, σκλήρυνσης μέσω UV, επιμετάλλωσης, στίλβωσης και χάραξης. Η τεχνολογία είναι ώριμη και σταθερή, καθώς οι διαρθρωτικές ατέλειες διατηρούνται στο ελάχιστο. Η εικόνα 1.21 δείχνει τις δοκιμαστικές δομές κυματοδηγού υπό το μικροσκόπιο. Ορισμένες στρογγυλοποιήσεις σε αιχμηρές γωνίες είναι παρούσες λόγω του περιορισμού της ανάλυσης από τη διαδικασία φωτολιθογραφίας, αλλά οι παράμετροι παραμένουν εντός της ανοχής της συσκευής.



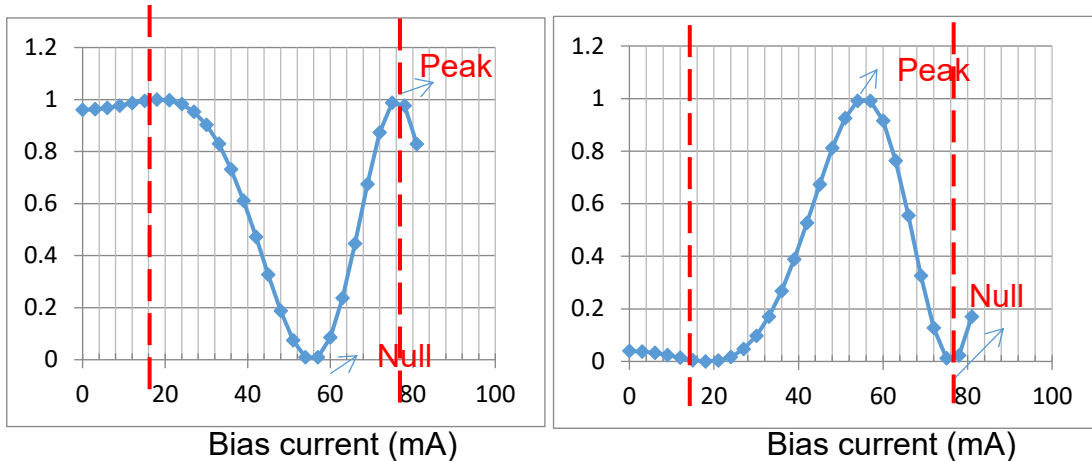
Εικόνα 1.21: Φωτογραφίες μικροσκοπίου δοκιμαστικών δομών κυματοδηγού.

Ο κατασκευασμένος διαμορφωτής 100 Gb/s παρουσιάζεται στο στην εικόνα 1.22.



Εικόνα 1.22: Φωτογραφία του chip διαμορφωτή 100 Gb/s.

Τα χαρακτηριστικά της πόλωσης των θερμικών ηλεκτροδίων του διαμορφωτή φαίνονται στην εικόνα 1.23. Υπάρχουν δύο τύποι απόκρισης του θερμαντήρα - πρώτα στο ελάχιστο (αριστερά) ή πρώτα στο μέγιστο (δεξιά) της καμπύλης. Οι θέσεις κορυφής (peak) και μηδενισμού (null) ποικίλλουν από chip σε chip. Η συσκευή πρέπει να είναι προκαταρκτικά χαρακτηρισμένη για να καθορίσει τις θέσεις κορυφής και μηδενισμού.

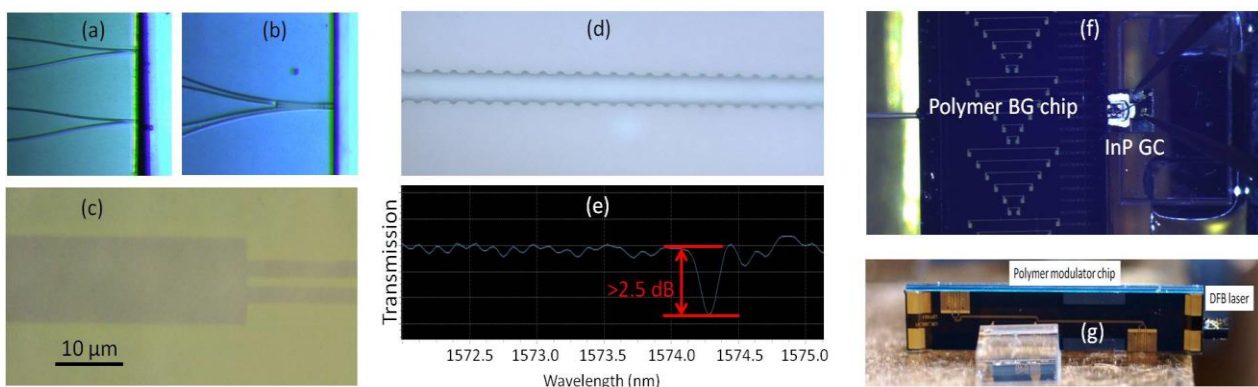


Εικόνα 1.23: Χαρακτηριστικά πόλωσης του διαμορφωτή 100 Gb/s. Ο άξονας Y είναι η κανονικοποιημένη οπτική ισχύς.

1.5.3 Ανάπτυξη Ηλεκτρο-οπτικής Πολυμερικής Πλατφόρμας μέσω Μονολιθικής και Υβριδικής Φωτονικής Ολοκλήρωσης

Η χρήση πολυμερών υλικών και η ανάπτυξη φωτονικών διατάξεων, παρόμοιων με αυτά που περιγράφηκαν παραπάνω θα μπορούσε να οδηγήσει στην περαιτέρω ανάπτυξη μια ολοκληρωμένη ολο-πολυμερικής πλατφόρμας με εφαρμογή σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα υψηλών ταχυτήτων ή σε συστήματα διασύνδεσης υπολογιστικών κέντρων. Μια τέτοια ολοκληρωμένη πλατφόρμα πολλαπλών χρήσεων είναι εφικτή μέσω του συνδυασμού:

- μονολιθικής ολοκλήρωσης δύο συγκεκριμένων παθητικών οπτικών διατάξεων (μαζί με τον διαμορφωτή MZ που περιγράφηκε παραπάνω): συζεύκτες MMI (multi-mode interference couplers) και πλέγματα περίθλασης Bragg (Bragg Gratings, BG)
- υβριδικής ολοκλήρωσης κυκλωμάτων κέρδους (Gain Chips, GC) και διόδων laser (Laser Diodes, LD)



Εικόνα 1.24: Φωτογραφίες: (a) δύο 1x2 MMI συζεύκτες, και (b) ένας συζεύκτης 1x4 MMI. (c) Κοντινή όψη ενός 1x2 συζεύκτη με πλάτος 12 μm , (d) κατασκευασμένη δομή BG, (e) συνάρτηση μεταφοράς BG με βύθισμα στα 1574,3 nm, (f) φωτογραφία συντονισμένου λέιζερ (tunable laser) με InP GC και BG στο ΕΟ πολυμερικό chip, και (g) οπτική μονάδα (assembly) του πομπού 100 Gb/s.

Οι συζεύκτες MMI χρησιμοποιούνται σε φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα στη θέση των συζευκτών τύπου Y (Y-splitters). Οι συζεύκτες Y έχουν έναν απλό σχεδιασμό και μπορούν να χωρίσουν την οπτική ισχύ με χαμηλή ανισορροπία, αλλά έχουν αρκετό μήκος και οδηγούν σε μεγάλα κυκλώματα. Η χρήση συζευκτών MMI είναι επομένως επιθυμητή, ειδικά όταν ο λόγος διαχωρισμού και ο αριθμός των θυρών εξόδου πρέπει να είναι υψηλοί. Στα πλαίσια της διατριβής μελετήθηκαν μονολιθικά 1:2 και 1:4 συζεύκτες MMI για τον διαχωρισμό του εισερχόμενου οπτικού κύματος και την παράλληλη λειτουργία πολλαπλών MZMs στην ΕΟ πολυμερική πλατφόρμα. Ο σχεδιασμός βασίστηκε στη χρήση μιας τρισδιάστατης μεθόδου διάδοσης δέσμης (3D-BPM) τόσο στις δομές M1 όσο και στις M3 από το ερευνητικό ινστιτούτο ΗΗΙ.

Οι εικόνες 1.24 (a) και (b) παρουσιάζουν εικόνες πολυμερικών chips με 1:2 και 1:4 συζεύκτες MMI. Μια πιο κοντινή όψη σε ένα συζεύκτη 1:2 φαίνεται στην εικόνα 1.24 (c). Για να αντισταθμιστούν οι αβεβαιότητες του δείκτη υλικού και οι ατέλειες κατασκευής, κάθε βέλτιστος σχεδιασμός επεκτάθηκε σε μια παραλλαγή της παραμέτρου σχεδιασμού που έχει οριστεί στη μάσκα. Η πειραματική δοκιμή των στοιχείων αποκάλυψε ότι το βέλτιστο πλάτος και μήκος της πολύτροπης περιοχής ήταν 12 μm και περίπου

135 μm για τους συζεύκτες 1:2 και 28 μm και περίπου 240 μm για τους συζεύκτες 1:4, αντίστοιχα. Για αυτές τις τιμές, η απώλεια εισαγωγής (insertion loss, IL) παραμένει χαμηλότερη από 0.8 dB και η ανισορροπία ισχύος στις εξόδους κάτω από 0.2 dB και στις δύο περιπτώσεις.

Τα BGs από την άλλη πλευρά είναι δομές που αντιπροσωπεύουν μια περιοδική ή σχεδόν περιοδική διαταραχή του ενεργού δείκτη διάθλασης ενός κυματοδηγού και δρουν ως οπτικά φίλτρα. Ένας αποτελεσματικός τρόπος για να υλοποιηθεί ένα BG στον ΕΟ πολυμερικό κυματοδηγό περιλαμβάνει τη διαταραχή του πλάτους της ράβδωσης στο στρώμα πυρήνα και τη δημιουργία μίας διάταξης "πλευρικού πλέγματος", όπως φαίνεται στην εικόνα 1.24 (d). Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί στην ανάλυση της κατασκευής που σχετίζονται με τη συμβατική φωτολιθογραφία της *i*-γραμμής που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των wafers, υιοθετήθηκαν διατάξεις 5^{ης} τάξης σύμφωνα με τη σχέση [113]:

$$m \cdot \lambda_B = 2 \cdot n_e \cdot \Lambda \quad (1.20)$$

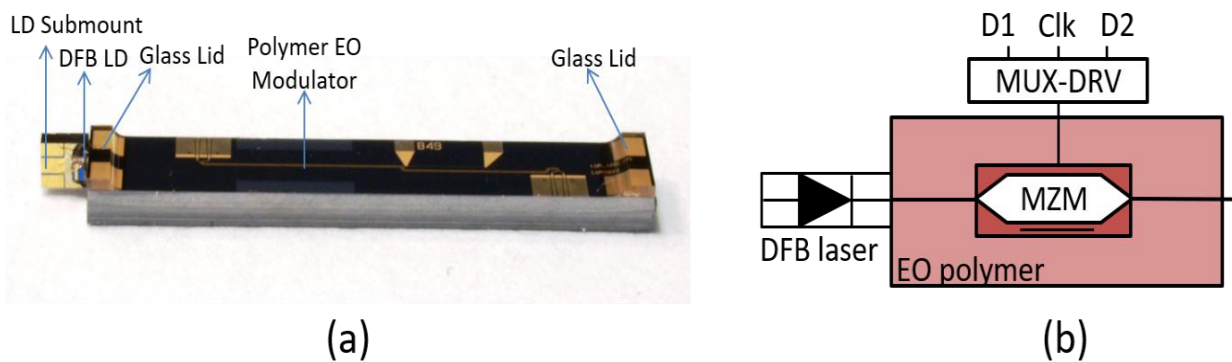
,όπου *m* η τάξη διάθλασης, λ_B το μήκος κύματος Bragg, n_e ο δείκτης ενεργού τρόπου λειτουργίας και Λ η περίοδος του πλέγματος. Χρησιμοποιώντας μια περίοδο 2.343 μm, ο αριθμός περιόδων και συνεπώς το συνολικό μήκος του BG ήταν μια ελεύθερη παράμετρος σχεδιασμού για να επιτευχθεί ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ της απώλειας εισαγωγής και της επιτεύξιμης ανακλαστικότητας στο λ_B . Η εικόνα 1.24 (d) παρουσιάζει συγκεκριμένα μια εικόνα από μικροσκόπιο του στρώματος πυρήνα κατά τη διάρκεια ενός ενδιάμεσου σταδίου της κατασκευής και η εικόνα 1.24 (f) απεικονίζει το τελικό πολυμερικό chip με βάση τη δομή M1 με BGs μεταβλητών μηκών. Όπως παρατηρήθηκε, τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν στο άνω στρώμα αυτού του chip για να ελέγχουν όλο το μήκος των BG και έδωσαν ένα μέσο για τον συντονισμό του λ_B μέσω της θερμο-οπτικής επίδρασης στο πολυμερές υλικό.

Παρά την περιορισμένη ανάλυση κατασκευής, θα μπορούσε να καταγραφεί αποτελεσματική λειτουργία για BGs με μεγάλο αριθμό περιόδων (δηλ. 800 περιόδους ή μήκους 1874.4 μm) και σχεδιασμών σκληρής διαταραχής (δηλαδή $w_1 = 3.8 \mu\text{m}$ και $w_2 = 6.3 \mu\text{m}$). Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.24 (e), για αυτές τις τιμές, εμφανίζεται μια καθαρή εμβάπτιση στο φάσμα πειραματικής ανακλαστικότητας του BG. Το αποτέλεσμα φίλτρου είναι 2.5 dB, το οποίο αντιστοιχεί σε ανακλαστικότητα περίπου 40%. Σημειώνεται ότι αυτή η ανακλαστικότητα επαρκεί για να υποστηρίξει την ανάπτυξη του φαινομένου λέιζερ μέσα σε τυπικές κοιλότητες λέιζερ.

Οι προσπάθειες για την περαιτέρω προώθηση της λειτουργικότητας της πολυμερικής ΕΟ πλατφόρμας περιελάμβαναν την υβριδική ολοκλήρωση των ενεργών στοιχείων InP χρησιμοποιώντας την τεχνική σύζευξης butt-end (butt-end-coupling technique) [114]. Οι σχετικές προσπάθειες αφορούσαν την ενσωμάτωση ενός chip κέρδους InP με έναν μόνο ανακλαστήρα σε ένα πολυμερές M1 chip με BGs, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.24 (f). Το BG που περιγράφηκε παραπάνω με ανακλαστικότητα 40% θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως ημι-διαφανές κάτοπτρο. Έτσι, η υβριδική δομή θα μπορούσε να δράσει ως λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας με την κοιλότητα να εκτείνεται τόσο πάνω από το InP όσο και στα τμήματα της πολυμερικής ΕΟ δομής. Η εικόνα 1.24 (f) απεικονίζει το σύστημα λέιζερ που λειτουργεί σε εγκάρσια ηλεκτρική (TE) πόλωση. Η απώλεια συζεύξεως στη διασύνδεση InP προς το ΕΟ πολυμερές ήταν περίπου 2 dB λόγω της ατελούς αλληλοεπικάλυψης μεταξύ των προφίλ λειτουργίας του InP και των πολυμερικών ΕΟ κυματοδηγών.

Το chip κέρδους θα μπορούσε να αντισταθμίσει, ωστόσο, αυτή την απώλεια και θα μπορούσε να προσφέρει ένα καθαρό κέρδος μέσα στην κοιλότητα. Η ευρεία ευθυγράμμιση του μήκους κύματος εκπομπής πάνω από 17 nm επιτεύχθηκε με τη θερμική μετατόπιση της ανάκλασης BG. Όπως ήδη περιγράφηκε, το ΕΟ φαινόμενο είναι παρόν μόνο για τις εγκάρσιους μαγνητικούς (transverse magnetic, TM) ρυθμούς. Καθώς, ωστόσο, το LD σχεδιάστηκε για να παρέχει ρυθμούς TE, ήταν αναγκαίο να περιστραφεί η πόλωση του λέιζερ είτε με την προσθήκη ενός πλακιδίου ημίσεος κύματος (half-wave plate) πριν από το πολυμερικό chip είτε με την περιστροφή του LD κατά 90° μοίρες. Η εικόνα 1.24 (g) δείχνει την οπτική μονάδα του πομπού χρησιμοποιώντας τη δεύτερη επιλογή. Η απώλεια συζεύξεως στη διασύνδεση InP προς το πολυμερικό chip ήταν 2.2 dB, η οποία είναι κοντά στην αντίστοιχη τιμή για τους ρυθμούς TE, καθώς το LD είχε μάλλον κυκλικό προφίλ λειτουργίας.

Η κατασκευή μιας πολυμερικής φωτονικής πλατφόρμας με τη μέθοδο που περιγράφηκε στις παραπάνω παραγράφους οδηγεί στην ουσία σε έναν ολοκληρωμένο πομπό υψηλών ταχυτήτων, της τάξης των 100 Gb/s με εφαρμογή σε τηλεπικοινωνίες ή σε οπτικές διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων διαχείρισης δεδομένων.



Εικόνα 1.25: (α) Οπτικό υποσύνολο υβριδικής ολοκλήρωσης ενός EO πολυμερικού MZM με μια πηγή LD από InP και (β) σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ολοκληρωμένου πολυμερικού πομπού 100 Gb/s.

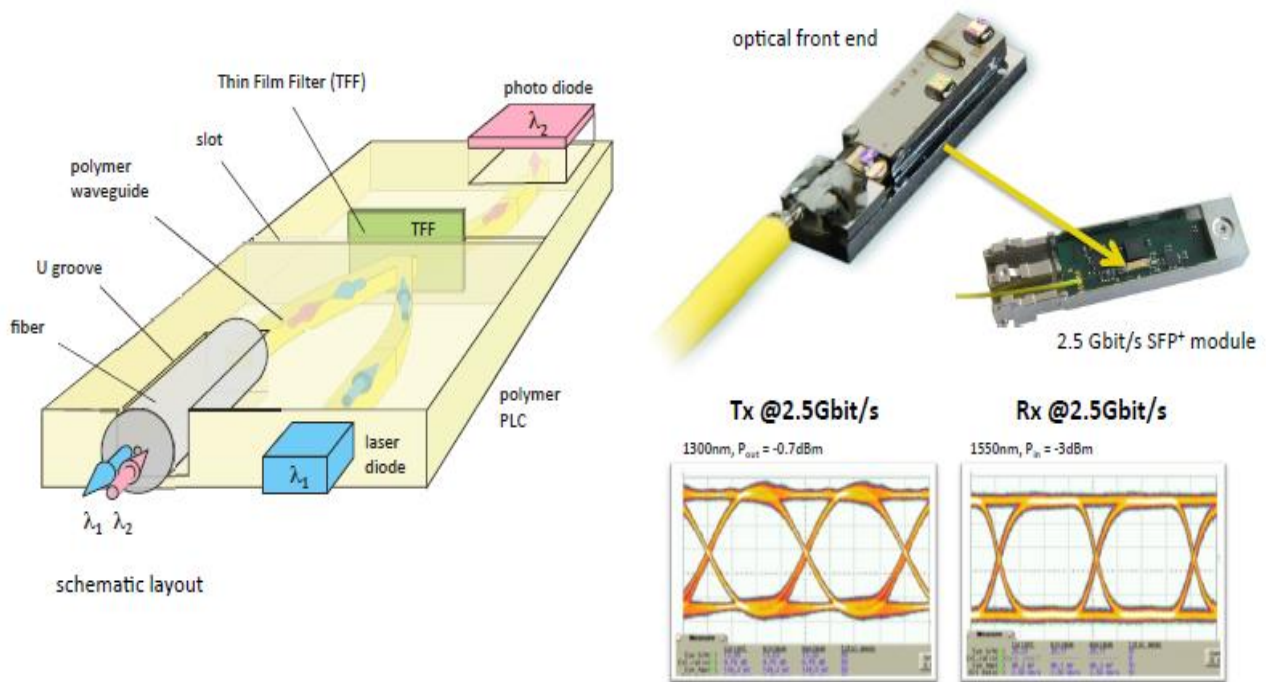
Αναλυτικότερα, μια τέτοια διάταξη βασίζεται στην υβριδική ολοκλήρωση ενός EO πολυμερικού διαμορφωτή MZ ολοκληρωμένου κυκλώματος με μια πηγή LD από InP (βλέπε εικόνα 1.25 (α)) και ένα ηλεκτρικό κύκλωμα πολυπλεξίας και οδήγησης (MUX-DRV), όπως φαίνεται στην εικόνα 1.25 (β). Η οπτική έξοδος της δίοδου laser συζευγνύεται με το EO chip. Το προκύπτον σήμα χρησιμοποιείται ως είσοδος για τον διαμορφωτή MZ και διαμορφώνεται κατά OOK από μια ανεξάρτητη ροή δεδομένων (data streams), την οποία παρέχει το κύκλωμα MUX-DRV σε ταχύτητες που μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 100 Gb/s. Στο τέλος το δύο διαμορφωμένο σήμα εξέρχεται από τη διάταξη του πομπού με τη βοήθεια οπτικής ινής με προσαρμοσμένο φακό (lensed fiber). Το κύκλωμα MUX-DRV λαμβάνει ως είσοδο ηλεκτρικά σήματα δεδομένων (D1 και D2) καθώς κι ένα ηλεκτρικό σήμα ρολογιού (Clk1) σε μισή συχνότητα από αυτή του ρυθμού μετάδοσης. Το πολυπλεγμένο σήμα που εμφανίζεται στην έξοδο του κυκλώματος εισάγεται στο MZM μέσω ενός σχήματος μονής οδήγησης. Αυτή η πρωτότυπη πειραματική συσκευή βασισμένη στην ηλεκτρο-οπτική πολυμερική πλατφόρμα ικανή να διαμορφώσει ηλεκτρικά δεδομένα μέχρι 100 Gb/s με σχήμα OOK παρουσιάζεται εκτενώς στο κεφάλαιο 3.

Τα επόμενα βήματα στην ανάπτυξη και χρήση των πολυμερικών EO κυκλωμάτων περιλαμβάνουν τον συνδυασμό της πολυμερικής EO πλατφόρμας με διαφορετικό τύπο πλατφόρμας φωτονικής ολοκλήρωσης για την ανάπτυξη πομπών με υψηλή λειτουργικότητα, υψηλή ευελιξία και υψηλή χωρητικότητα. Στα [115,116] περιγράφηκε ήδη ο συνδυασμός μιας παθητικής πολυμερικής πλατφόρμας με την πολυμερική EO πλατφόρμα, δεδομένης της συμβατότητας αυτών των πλατφορμών λόγω της κοινής τους βάσης υλικού και της συμπληρωματικότητάς τους ως προς τις οπτικές λειτουργίες που μπορούν να υποστηρίξουν.

1.6 Παθητική Πολυμερική Πλατφόρμα για τη Σχεδίαση και Ανάπτυξη Ευέλικτων Οπτικών Πομποδεκτών Πολλαπλών Ροών

Για την υλοποίηση των φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (photonic integrated circuits, PIC) διερευνώνται και εφαρμόζονται διάφορες τεχνολογίες πλατφόρμας. Εκτός από τις μονολιθικές λύσεις σε ημιαγωγούς III-V (κυρίως InP) και ημιαγωγούς πυριτίου, η υβριδική ολοκλήρωση έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον. Με ολοένα και αυξανόμενη πολυπλοκότητα της φωτονικής ολοκλήρωσης είναι προβλέψιμο ότι τόσο οι μονολιθικές όσο και οι υβριδικές τεχνολογίες τελικά θα συγχωνευθούν μεταξύ τους με συμπληρωματικό τρόπο για να καθιερώσουν μια διαδικασία ολοκλήρωσης φωτονικών πολλαπλών PIC. Ως κύρια υβριδική πλατφόρμα, χρησιμοποιείται κυρίως η τεχνολογία επίπεδων κυκλωμάτων φωτός (planar lightwave circuit, PLC) κατασκευασμένα σε διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂). Στο HHI έχουν αναπτύξει μια εναλλακτική PLC πλατφόρμα (που αναφέρεται ως PolyBoard [117]) η οποία βασίζεται σε κυματοδηγούς κατασκευασμένους από πολυμερικό υλικό.

Παρά τα εμφανή πλεονεκτήματα της τεχνολογίας του διοξειδίου του πυριτίου, η χρήση των πολυμερών πιστεύεται ότι παρέχει ξεχωριστά χαρακτηριστικά που επιτρέπουν πρόσθετες δυνατότητες σχεδίασης και επεξεργασίας για να βελτιώσουν την απόδοση και να επιτυγχάνουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής, όπως: απλή εναπόθεση στρώματος με χρήση περιστροφής (spinning), μικρο-μηχανική επεξεργασία που παρέχει οπτικής ποιότητας επιφάνειες/όψεις, αισθητά μεγάλο θερμο-οπτικό (thermo-optical, TO) συντελεστή σε συνδυασμό με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα για αποτελεσματικό/ή συντονισμό/μεταγωγή, εύκολο στην ολοκλήρωση εξαιρετικά λεπτών στοιχείων φιλμ (ultra-thin film elements, UTFE) για την εφαρμογή πολύ συμπαγών και ανεξάρτητων από την θερμοκρασία παθητικών οπτικών λειτουργιών, δυνατότητα συνδυασμού πολυμερικού υλικού με ένα ευρύ φάσμα άλλων υλικών κατηγοριών, και αντίθεση του δείκτη

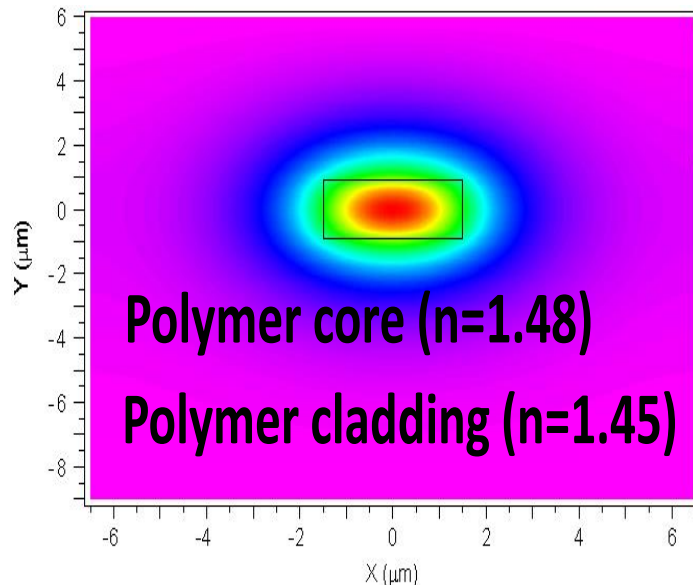


Εικόνα 1.26: Ενιαίος πομποδέκτης 2.5 Gb/s βασισμένος στην πολυμερική παθητική πλατφόρμα από το HHI.

διάθλασης $>1.5\%$ ικανή να παρέχει περαιτέρω μείωση του μεγέθους των chip. Η παρούσα υποενοότητα παρουσιάζει μια εκτενής περιγραφή της τεχνολογίας PolyBoard και παρουσιάζει πρόσφατες υλοποιήσεις αντίστοιχων οπτικών στοιχείων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή για την υλοποίηση και κατασκευή ευέλικτων οπτικών πομπών πολλαπλών ροών.

Η ιδέα της τεχνολογίας PolyBoard απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 1.26. Χρησιμοποιεί μια πλακέτα PLC με θαμμένους μονορυθμικούς κυματοδηγούς που σχηματίζονται σε μία στοιβάδα στρωμάτων (layer stack) εμπορικά διαθέσιμου πολυμερούς υλικού (ChemOptics, Κορέα) τοποθετημένο επί ενός υποστρώματος πυριτίου (silicon, Si) που χρησιμοποιείται σήμερα: διαμέτρου 4-6 ιντσών. Τα βασικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά αυτής της υβριδικής - και κατά συνέπεια αρθρωτής και ευέλικτης - πλατφόρμας ολοκλήρωσης είναι:

- 1) Θαμμένοι κυματοδηγοί με ρυθμιζόμενη τιμή δείκτη διάθλασης $\Delta n = 0.005 - 0.030$ για να χρησιμεύουν ως οπτικές διασυνδέσεις επί του chip (βλέπε εικόνα 1.27) και βάση για δομές οπτικών κυματοδηγών (π.χ., AWG), καθώς και δομές πλευρικών και κατακόρυφων στενώσεων (tapering).
- 2) Αποτελεσματικός θερμο-οπτικός συντονισμός που εκμεταλλεύεται αρκετά μεγάλο συντελεστή $TO (> 10^{-4} K^{-1})$ και εγγενώς χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των πολυμερών.
- 3) Παθητική ευθυγράμμιση και προσάρτηση μονορυθμικών ινών χρησιμοποιώντας χαραγμένες εγκάρσιες αυλακωτές εγκοπές σχήματος U, με μέση απώλεια σύζευξης μεταξύ SMF/κυματοδηγού $\sim 0,25$ dB (για $\Delta n = 0,011$)
- 4) Κατακόρυφη σύζευξη του φωτός που επιτυγχάνεται μέσω καθρεπτών ολικής εσωτερικής ανάκλασης 45° διαμορφωμένων στους κυματοδηγούς, με τον απλούστερο τρόπο με μικρομηχανική (μέσω κοπής σε μορφή κύβων)
- 5) Ολοκλήρωση φωτοανιχνευτών μέσω επιφανειακής τοποθέτησης οπίσθιων pin φωτοδιόδων (αποδεδειγμένο εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 60 GHz [118])
- 6) Σύζευξη τελικής επιφάνειας συσκευών λέιζερ χρησιμοποιώντας ενεργή ευθυγράμμιση και συγκόλληση (απώλεια σύζευξης: $\sim 2-4$ dB)
- 7) Εφαρμογή παθητικών οπτικών λειτουργιών με την ενσωμάτωση εξαιρετικά λεπτών στοιχείων φιλμ (ultra-thin film elements, UTFE) με απόδοση ανεξάρτητη από την θερμοκρασία. Τα UTFE αποτελούνται από διηλεκτρικά στρώματα σε φιλμ πολυμερικού υποστρώματος με συνολικό πάχος που κυμαίνεται από ~ 10 μm έως ~ 25 μm . Οι λειτουργίες που πραγματοποιούνται: διάφορα οπτικά φίλτρα, διαχωριστής δέσμης πόλωσης (εικόνα 1.26), περιστροφέας πόλωσης, και οπτικός ανακλαστήρας.

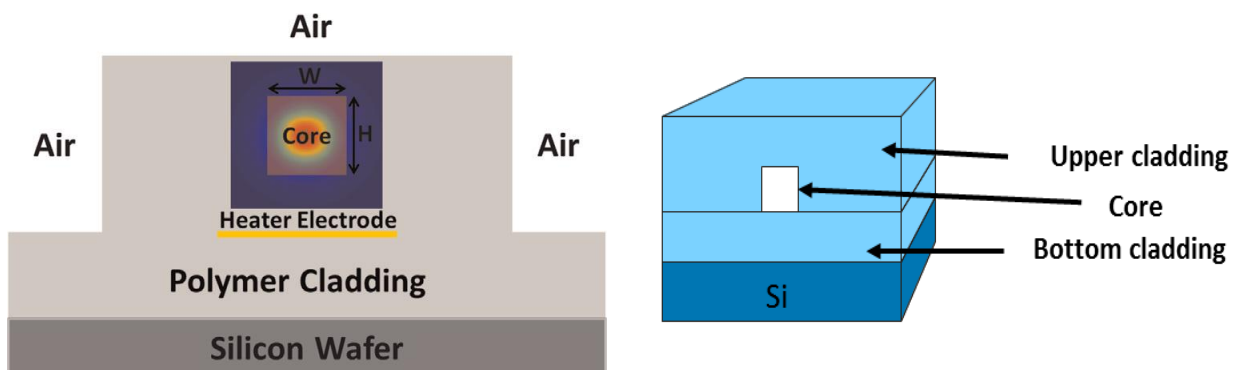


Εικόνα 1.27: Προσομοιωμένη εγκάρσια διατομή παθητικού πολυμερικού κυματοδηγού.

1.6.1 Παθητικός Πολυμερικός Κυματοδηγός και Σχεδίαση Θερμικού Ηλεκτροδίου

Σε αυτή την ενότητα γίνεται μια εκτενής παρουσίαση του τρόπου σχεδίασης των παθητικών πολυμερικών κυματοδηγών λαμβάνοντας υπόψη την καταλληλότερη σχεδίαση του θερμικού ηλεκτροδίου μέσω θερμικών προσομοιώσεων με τέτοιο τρόπο ώστε οι διατάξεις που παρουσιάζονται να επιτυγχάνουν τη μέγιστη δυνατή απόδοση σε οπτικά κυκλώματα που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία των ευέλικτων οπτικών πομπών πολλαπλών ροών. Οι οπτικές δομές που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα αφορούν οπτικά φίλτρα, οπτικά ρυθμιζόμενα φίλτρα-Ανακλαστήρες Πλέγματος Bragg, μεταβλητούς οπτικούς εξασθενητές βασισμένους σε 1x1 MMI και MZI και ρυθμιζόμενους θερμο-οπτικούς μεταγωγής φωτός.

Τα στρώματα οπτικών παθητικών πολυμερών σχηματίζονται συνήθως επί υποστρώματος πυριτίου (Si) με εναπόθεση μέσω περιστροφής και με επακόλουθες μεθόδους σκλήρυνσης με UV και θερμοκρασία. Οι πολυμερικοί κυματοδηγοί μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας κυρίως τις ακόλουθες τρεις μεθόδους [35]: (1) τυποποιημένες μεθόδους επεξεργασίας ημιαγωγών με φωτολιθογραφία και χάραξη αντιδραστικών ιόντων, (2) άμεση λιθογραφική σχεδίαση υπεριώδους ακτινοβολίας (Ultraviolet, UV) ακολουθούμενη από υγρό-χημικό ξέπλυμα, και (3) μαλακή χύτευση και αποτύπωση. Μια τυπική εγκάρσια τομή κυματοδηγού παρουσιάζεται στην εικόνα 1.27 και 1.28. Ο δείκτης περιβλήματος (cladding) είναι 1.45 και του πυρήνα είναι 1.48 σε μήκος κύματος 1550 nm, που λαμβάνεται από τα εμπορικά διαθέσιμα πολυμερή υλικά (σειρά ZPU-12 από την ChemOptics Inc.).

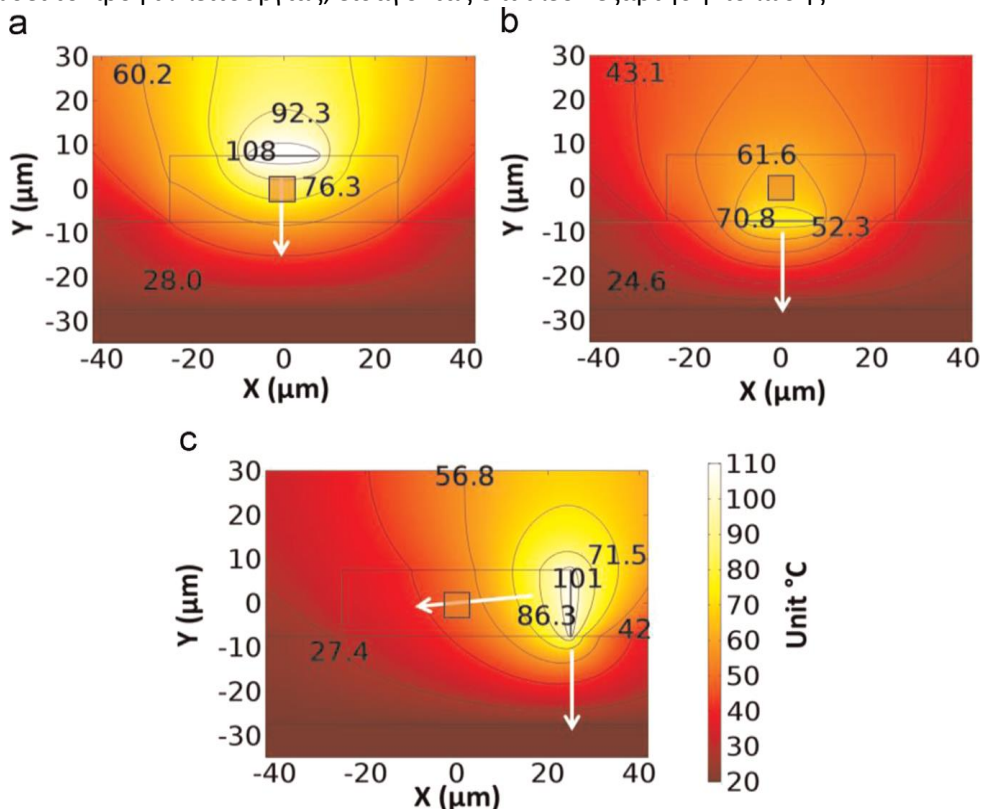


Εικόνα 1.28: Σχηματική απεικόνιση της διατομής του πολυμερικού κυματοδηγού με θερμικό ηλεκτρόδιο στην κάτω πλευρά του περιβλήματος του πολυμερούς.

Ο θαμμένος πυρήνας μονορυθμικού κυματοδηγού έχει ένα τετράγωνο σχήμα ($W = H = 3.2 \mu\text{m}$) για να ελαχιστοποιήσει τη διπλοδιαθλαστικότητα (birefringence) με τη διάμετρο του πεδίου οπτικής λειτουργίας (mode field) να είναι περίπου $4.2 \mu\text{m}$. Το θερμικό ηλεκτρόδιο τοποθετείται συνήθως κοντά στον πυρήνα κυματοδηγού για αποτελεσματική θέρμανση αλλά αρκετά μακριά για να αποφευχθεί η διατάραξη του οπτικού πεδίου. Επειδή ο αέρας έχει χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από το πολυμερές ($\sim 0,025 \text{ W/m/K}$ σε σύγκριση με την τιμή $\sim 0,3 \text{ W/m/K}$ σε θερμοκρασία δωματίου, η τιμή για το πυρίτιο είναι 163 W/m/K

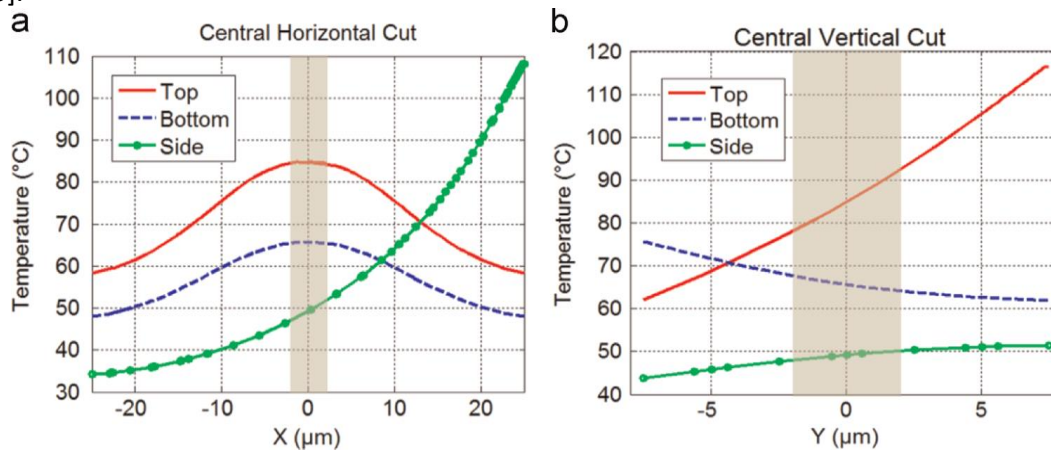
για σύγκριση), βαθιά χαρακώματα σκάβονται δίπλα στον κυματοδηγό για να περιοριστεί η θερμική ενέργεια, να βελτιωθεί η απόδοση συντονισμού και να μειωθεί η θερμική αλληλο-παρεμβολή (cross-talk). Ανάλογα με τις εφαρμογές, τα θερμικά ηλεκτρόδια μπορούν να τοποθετηθούν στην άνω πλευρά του περιβλήματος του πολυμερούς (άνω θερμαντήρας), μπορούν να θαφτούν κάτω από τον κυματοδηγό (κάτω θερμαντήρας) όπως φαίνεται στην εικόνα 1.28 ή να εναποτίθενται στο πλευρικό τοίχωμα του περιβλήματος (πλευρικός θερμαντήρας). Μέσω θερμικών προσομοιώσεων που έλαβαν χώρα στο ΗΗΙ με χρήση του εμπορικού λογισμικού COMSOL συγκρίθηκαν τα τρία συστήματα θερμαντήρων και τα αποτελέσματα ακολουθούν παρακάτω. Ο θερμαντήρας αποτελείται από χρυσό (Au) με πάχος 100 nm και πλάτος 15 μm .

Η θερμική πυκνότητα ισχύος του θερμαντήρα είναι 25 W/m με θερμοκρασία περιβάλλοντος μετρημένη στους 20°C. Το κατώτατο όριο του υποστρώματος πυριτίου θεωρείται ως απορροφητής θερμότητας (heat sink) και οι διανομές θερμοκρασίας σταθερής κατάστασης παρουσιάζονται στην εικόνα 1.29. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.29 (a), ο άνω θερμαντήρας παράγει την υψηλότερη θερμοκρασία (116°C) στην περιοχή όπου έχει τοποθετηθεί ο θερμαντήρας και επίσης στο κέντρο του κυματοδηγού (86°C), αλλά μπορεί να παρατηρηθεί μια ισχυρή αύξηση της θερμοκρασίας μέσω της περιοχής κυματοδηγού στην κατεύθυνση Y. Ο θερμαντήρας πυθμένα είναι λιγότερο αποδοτικός καθώς τοποθετείται πλησιέστερα στο υπόστρωμα πυριτίου (heat sink). Με την ίδια θερμική πυκνότητα ισχύος, η θερμοκρασία φτάνει μόνο στους 76°C στον θερμαντήρα και στους 66°C στο κέντρο του κυματοδηγού. Ωστόσο, η περιοχή κυματοδηγού θερμαίνεται ομοιόμορφα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.29 (b). Ο πλευρικός θερμαντήρας (πλευρικό ηλεκτρόδιο), από την άλλη πλευρά, παρέχει μια ισχυρή αύξηση θερμοκρασίας διαμέσου του κυματοδηγού στην κατεύθυνση X (σε επίπεδο), όπως υποδεικνύεται στην εικόνα 1.29 (c). Για την περαιτέρω διερεύνηση, η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος των κεντρικών επιπέδων X και Y εξάγεται και απεικονίζεται στην εικόνα 1.30 (a) και (b), αντίστοιχα. Η περιοχή λειτουργίας του κυματοδηγού (waveguide mode region) σημειώνεται με τη χρήση σκιασμών γραμμών. Για τον θερμαντήρα πυθμένα, η μεταβολή της θερμοκρασίας μέσω της περιοχής λειτουργίας (4.2 μm x 4.2 μm) υπολογίζεται ότι είναι 0,3°C στην κατεύθυνση X και 3.5°C στην κατεύθυνση Y. Για τον θερμαντήρα κορυφής αναμένεται πτώση θερμοκρασίας 14.5°C μέσω της περιοχής λειτουργίας στην κατεύθυνση Y ενώ η αλλαγή θερμοκρασίας στην κατεύθυνση X παραμένει κάτω από 0.5°C. Η κατάσταση του πλευρικού ηλεκτροδίου αντιστρέφεται, με πτώση θερμοκρασίας 5.1°C στην κατεύθυνση X και πτώση 1.9°C στην αρνητική κατεύθυνση Y. Συνοψίζοντας, ο θερμαντήρας είναι αποτελεσματικός, όμως η ισχυρή πτώση της θερμοκρασίας στην κατακόρυφη κατεύθυνση μπορεί να παραμορφώσει το προφίλ λειτουργίας, εισάγοντας επιπλέον εξάρτηση πόλωσης.



Εικόνα 1.29: Θερμική προσομοίωση που δείχνει την κατανομή θερμοκρασίας στον πολυμερικό κυματοδηγό από το (a) άνω, (b) θαμμένο και (c) πλευρικό θερμαντήρα (ηλεκτρόδιο).

Αντίθετα, ο θαμμένος θερμαντήρας πυθμένα θυσιάζει μερική από την θερμική απόδοση με αντάλλαγμα ένα πιο ομοιόμορφα θερμικό περιβάλλον για το οπτικό πεδίο. Επιπλέον, η ηλεκτρικά μονωτική πολυμερική ράβδωση (polymer ridge) που καλύπτει τον θερμαντήρα μπορεί επίσης να προστατεύσει από μόλυνση, ηλεκτρικές βραχυκυκλώσεις και εκκενώσεις. Το σύστημα θέρμανσης πυθμένα χρησιμοποιείται ευρέως σε συντονιζόμενες συσκευές λέιζερ, εξασφαλίζοντας επίσης μια μακροπρόθεσμη αξιόπιστη λειτουργία [119-121]. Ο πλευρικός θερμαντήρας είναι κατάλληλος για την αύξηση θερμοκρασίας στα επίπεδα οπτικά κυκλώματα (PLCs) στην κάθετη κατεύθυνση X και αποδεικνύεται χρήσιμος σε συσκευές που στηρίζονται στη διαφορά του δείκτη διάθλασης μεταξύ των στοιχείων [122,123].



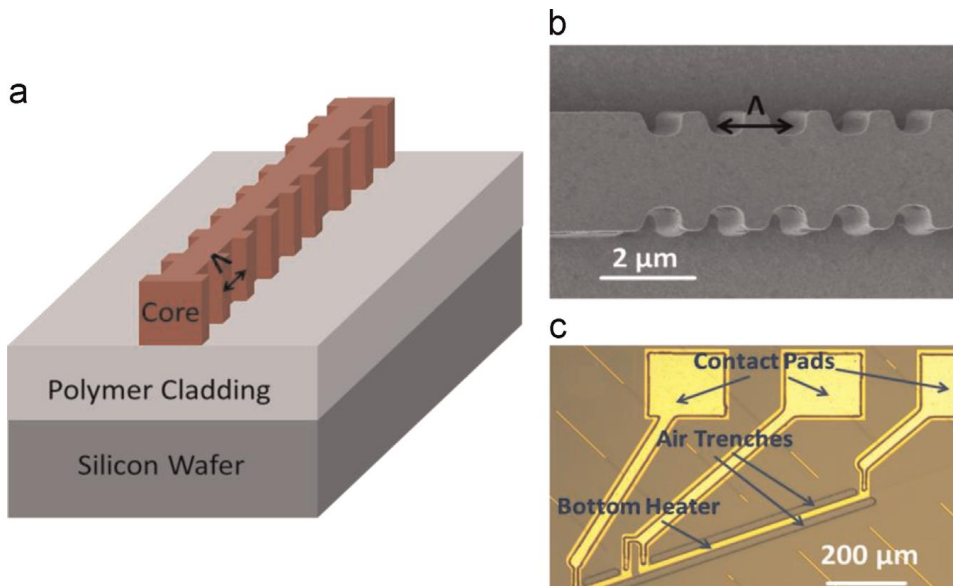
Εικόνα 1.30: Συγκρίσεις κατανομής θερμοκρασίας για τις τρεις διατάξεις θερμαντήρα: (a) κατά μήκος του κεντρικού επιπέδου X και (b) κατά μήκος του κεντρικού επιπέδου Y.

Για μια επιλεγμένη διάταξη θερμαντήρων, οι δομικές παράμετροι όπως το μέγεθος της κορυφογραμμής του πολυμερούς, το πάχος του υποστρώματος και οι διαστάσεις του αεραγωγού μπορούν να ποικίλουν για να επιβραδύνουν τη θερμική μεταφορά και να βελτιώσουν την απόδοση θέρμανσης. Ο γενικός κανόνας είναι να τοποθετηθεί ο θερμαντήρας μακριά από τον απορροφητή θερμότητας (heat sink) και να αυξηθεί η ποσότητα των περιβαλλόντων θερμικών απομονωτών, δηλ. υλικά με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα [124-125]. Ωστόσο, η χρονική απόκριση μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά [126], προκαλώντας επίδραση λυγισμού και υστέρησης κατά τη διάρκεια της θερμικής ρύθμισης. Ένας συμβιβασμός μεταξύ της απόδοσης συντονισμού και της απόκρισης χρόνου πρέπει συχνά να λαμβάνεται υπόψη ανάλογα με τις εφαρμογές.

1.6.2 Οπτικά Ρυθμιζόμενα Φίλτρα στην Παθητική Πολυμερική Πλατφόρμα

Τα οπτικά φίλτρα είναι ένα από τις θεμελιώδεις φωτονικές διατάξεις. Ρυθμιζόμενα φίλτρα που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μήκους κύματος είναι ιδιαίτερα επιθυμητά στα οπτικά δίκτυα WDM, την οπτική φασματοσκοπία και τις εφαρμογές οπτικής ανίχνευσης. Ένα σημαντικό φίλτρο είναι το φράγμα περίθλασης Bragg σε πολυμερικό κυματοδηγό, το οποίο χρησιμοποιείται συχνά ως εμπρόσθιος ανακλαστήρας σε ένα λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας [127,128]. Το μήκος κύματος Bragg μπορεί να συντονιστεί γραμμικά με την ισχύ του θερμαντήρα. Τα δείγματα φίλτρων πλέγματος (gratings filters) έχουν πραγματοποιηθεί στη δομή κυματοδηγού νιτριδίου πυριτίου/πολυμερούς, που εμφανίζει ένα ομοιόμορφο φάσμα κορυφής ανάκλασης σε ένα παράθυρο μεγάλου μήκους κύματος [129].

Λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη μελέτη σχετικά με την καταλληλότερη και αποδοτικότερη θέση του θερμαντήρα στους πολυμερικούς κυματοδηγούς, υιοθετούνται για τα Bragg grating/δείγματα φίλτρων πλέγματος οι θερμαντήρες πυθμένα με στόχο την παροχή της περιοχής λειτουργίας με ομοιόμορφα υψηλή θερμοκρασία. Ένας άλλος τύπος φίλτρου βασίζεται στη δομή συζεύκτη με υποβοηθούμενο πλέγμα (grating-assisted coupler structure) και η ρύθμιση του μήκους κύματος πραγματοποιείται διαφορικά, δηλαδή εισάγοντας μία βαθμιαία μεταβολή θερμοκρασίας κατά μήκος των κυματοδηγών και δεν εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία στα κυκλώματα [123]. Με αυτόν τον τρόπο, τόσο η κόκκινη όσο και η μπλε μετατόπιση του μήκους κύματος μπορούν να πραγματοποιηθούν σε δυνητικά πολύ μειωμένη ισχύ θερμαντήρα. Για αυτόν τον τύπο φίλτρου, οι πλευρικοί θερμαντήρες λαμβάνονται για την αποδοτική δημιουργία κλιμακωτής θερμοκρασίας στο οριζόντιο επίπεδο κατά μήκος των κυματοδηγών.



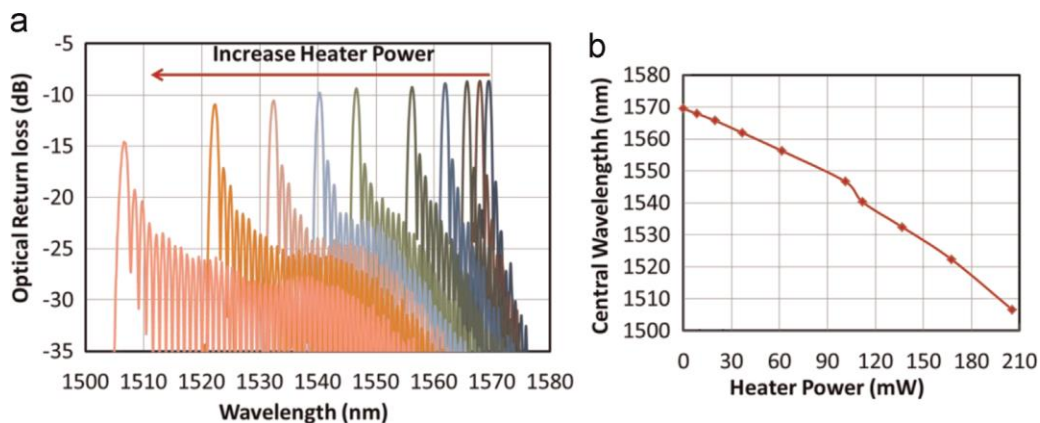
Εικόνα 1.31: (a) Σχηματική διάταξη του πλέγματος Bragg του πολυμερικού κυματοδηγού (χωρίς cladding στην κορυφή). (b) Φωτογραφία SEM του εγχάρακτου πυρήνα κυματοδηγού. (c) Εικόνα μικροσκοπίου της κατασκευασμένης συσκευής με θερμαντήρα πυθμένα, αυλακώσεις αέρα και επιφάνειες επαφής (contact pads).

1.6.3 Οπτικά Ρυθμιζόμενα Φίλτρα-Ανακλαστήρες Πλέγματος Bragg

Η διάταξη του διχαλωτού κυματοειδούς πολυμερικού κυματοδηγού του πλέγματος Bragg σκιαγραφείται στην εικόνα 1.31 (a). Η περίοδος πλέγματος Λ αυξάνεται συχνά στην τρίτη τάξη για να χαλαρώσει η διαδικασία κατασκευής και να επιτρέψει την τυπική λιθογραφία επαφής να χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση του μοτίβου. Η εικόνα ηλεκτρονικής μικροσκοπικής σάρωσης (scanning electron microscopic, SEM) του χαραγμένου πυρήνα κυματοδηγού φαίνεται στην εικόνα 1.31 (b). Η τελική συσκευή αποκαλύπτεται στην εικόνα 1.31 (c), που δείχνει την τοποθέτηση του θερμαντήρα πυθμένα, των αυλακώσεων του αέρα (air trench) και των επενδυμένων μεταλλικών επιφανειών για τις ηλεκτρικές επαφές. Το σταθερό κεντρικό μήκος κύματος ενός θερμικώς συντονιζόμενου ανακλαστήρα πλέγματος Bragg καθορίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = \lambda_0 + 2\Lambda\Gamma\Delta T/M \quad (1.21)$$

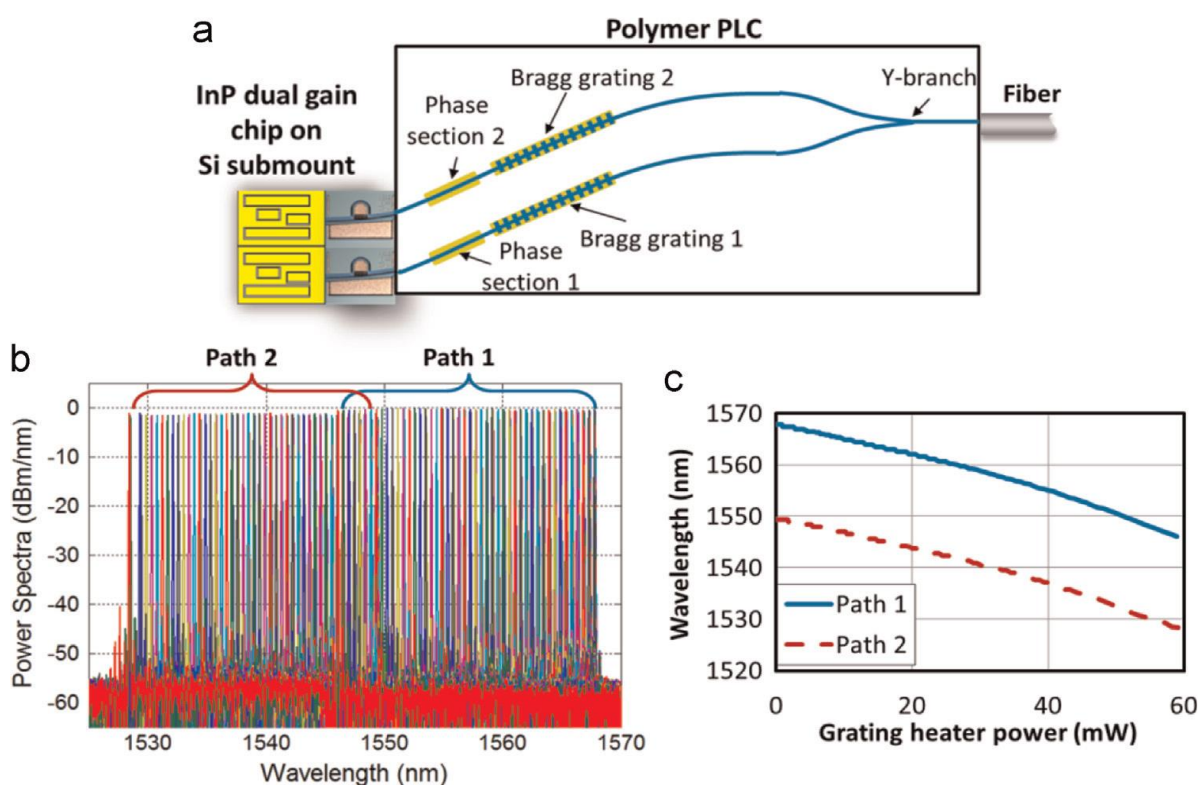
, όπου λ_0 είναι το μη συντονισμένο μήκος κύματος Bragg, λ είναι η περίοδος πλέγματος ($1.6 \mu\text{m}$), το M είναι η τάξη του πλέγματος (3), και Γ είναι ο θερμο-οπτικός συντελεστής (thermo-optic coefficient, TOC) του επιλεγμένου πολυμερικού υλικού. ΔT είναι η μεταβολή θερμοκρασίας στην περιοχή του πλέγματος και αποδεικνύεται ότι είναι ανάλογη με την εφαρμοζόμενη ισχύ του θερμαντήρα [126]. Δεδομένου ότι το Γ είναι αρνητικό, αποδίδοντας το κυρίαρχο φαινόμενο θερμικής διαστολής στο πολυμερικό υλικό πάνω από την εντονότερη πόλωση των ηλεκτρονίων κατά τη θέρμανση, το μήκος κύματος είναι γραμμικά μετατοπισμένο προς μπλε (blue-shifted) σε σχέση με την ισχύ του θερμαντήρα. Ο χαρακτηρισμός ρύθμισης της τρίτης τάξης πολυμερικού πλέγματος Bragg στην πόλωση TE παρουσιάζεται στην εικόνα 1.32 (a). Η μετατόπιση του κεντρικού μήκους κύματος σε σχέση με την ισχύ του θερμαντήρα πυθμένα απεικονίζεται στην εικόνα 1.32 (b).



Εικόνα 1.32: (a) Φάσματα ανάκλασης ενός πολυμερικού πλέγματος Bragg κατά τη διάρκεια της θερμικής ρύθμισης. (b) Μετατόπιση μήκους κύματος Bragg σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ηλεκτρική ισχύ στο θερμαντήρα πυθμένα.

Όταν η ισχύς του θερμαντήρα αυξάνεται από 0 σε 207 mW, έχει επιτευχθεί συνεχής και γραμμική ρύθμιση του μήκους κύματος Bragg από 1569.5 nm σε 1506 nm. Η ανακλαστικότητα κορυφής μειώνεται σταδιακά λόγω της αυξημένης θερμικής διαστολής που παραμορφώνει τη σχεδιαζόμενη γεωμετρία πλέγματος και επίσης τη γραμμικότητα του προφίλ συντονισμού στην εικόνα 1.32 (b). Ο TOC του πολυμερούς υλικού μετριέται από ένα ρυθμισμένο σε θερμοκρασία ρύθμιση της γραμμής M να είναι $-1.14 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$. Επαναπροσδιορισμός της μεταβολής της θερμοκρασίας στην περιοχή πλέγματος χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1.21) έχει ως αποτέλεσμα τιμή ΔT 522° C. Η συσκευή έχει χαρακτηριστεί πολλές φορές και έχουν επιτευχθεί επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα σε εργαστηριακές συνθήκες στις εγκαταστάσεις του HHI στη Γερμανία, παρά τις εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες που συνήθως λαμβάνονται υπόψη για τα πολυμερή υλικά.

Ο περαιτέρω συντονισμός του μήκους κύματος παρεμποδίστηκε από την αστοχία του θερμαντήρα. Σε αυτή την περίπτωση ο οπτικός κυματοδηγός φαίνεται να παραμένει άθικτος. Έχουν διεξαχθεί επιταχυνόμενες δοκιμές ζωής και το εύρος συντονισμού πρέπει κατά προτίμηση να διατηρείται κάτω από ~20 nm με αυτόν τον συγκεκριμένο τύπο πολυμερούς, έτσι ώστε η τοπική θερμοκρασία να παραμένει πολύ κάτω από τη θερμοκρασία αποδόμησης υλικού των 300°C. Έχει αποδειχθεί αξιόπιστη απόδοση μετά από δοκιμαστική λειτουργία άνω των 6000 ωρών [20]. Το πολυμερικό πλέγμα Bragg μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ο εμπρόσθιος ανακλαστήρας σε ένα συντονισμένο λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας. Για την εξασφάλιση μακροπρόθεσμης σταθερής λειτουργίας καθώς και για την επέκταση του εύρους συντονισμού για την κάλυψη της πλήρους μπάντας C (~ 1530 nm έως ~ 1565 nm), εισάγεται μια διπλή δομή πλέγματος Bragg [120,128]. Η φωτογραφία επίδειξης ενός τέτοιου πολυμερικού συντονισμένου λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας φαίνεται στην εικόνα 1.33 (a).



Εικόνα 1.33: (a) Σχηματική διάταξη ενός λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας με εύρος συντονισμού μήκους κύματος που χωρίζεται σε δύο διαδρομές. (b) Επικαλυμμένα φάσματα λέιζερ κατά τη διάρκεια της ρύθμισης. (c) Μετατόπιση του μήκους κύματος λέιζερ σε σχέση με την ισχύ του θερμαντήρα.

Η θαμμένη ετεροδομή chip κέρδους που βασίζεται σε InP έχει αναπτυχθεί μέσω ανάπτυξης επιταξίας μετάλλου οργανικής ατμόσφαιρας (Metalorganic vapour phase epitaxy, MOVPE) περιλαμβάνοντας InGaAsP πολλαπλής-κβαντικής ενεργής περιοχής με κέρδος κορυφής γύρω στα 1560 nm και επίπεδο φάσμα κέρδους από 1530 nm έως 1565 nm. Ο σχεδιασμός της καμπύλης λωρίδας (curved stripe) συμβάλλει στη μείωση της ευαισθησίας του λέιζερ σε σχέση με τις οπτικές αναδράσεις και βελτιώνει την απόδοση ενός μονορυθμικού τρόπου λειτουργίας [130]. Η αριστερή όψη του chip κέρδους είναι υψηλής αντανάκλασης (high-reflection, HR) επικαλυμμένη ενάντια στον αέρα και η δεξιά όψη είναι αντανάκλαστική (anti-reflection, AR) επικαλυμμένη ενάντια του πολυμερούς. Το chip κέρδους χρησιμοποιεί end-fire σύζευξη με το πολυμερικό πλέγμα Bragg του κυματοδηγού σε κεκλιμένη γωνία 9°.

Το τμήμα συμπληρωματικής φάσης χρησιμοποιείται για να αποφευχθεί η διαμήκης μετατόπιση ρυθμού λειτουργίας και για τη μικρο-ρύθμιση του λόγου καταστολής πλευρικής κατάστασης (side-mode suppression ratio, SMSR). Τα υπερθετιμένα φάσματα λέιζερ κατά τη διάρκεια της θερμικής ρύθμισης απεικονίζονται στην εικόνα 1.33 (b). Η κατώτερη διαδρομή (Path1) παρέχει εύρος συντονισμού για μήκος κύματος από 1529 nm έως 1550 nm και την ανώτερη διαδρομή (Path 2) από 1546 nm έως 1568 nm.

Και οι δύο διαδρομές παρουσιάζουν μια γραμμική συμπεριφορά ρύθμισης ισχύος με απόδοση 0,36 nm/mW. Περαιτέρω πειράματα δείχνουν ότι αυτά τα λέιζερ έχουν ένα στενό εύρος γραμμής <200 kHz και συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγές φωτός CW για εξωτερικούς διαμορφωτές και τοπικούς ταλαντωτές για σύμφωνους δέκτες. Μπορούν επίσης να διαμορφώνονται απευθείας σε 10 Gb/s και τα οπτικά σήματα μπορούν να μεταδίδουν μέσω μονορυθμικών ινών μήκους 10 χλμ. ένα σαφές ανοιχτό διάγραμμα οφθαλμού [120].

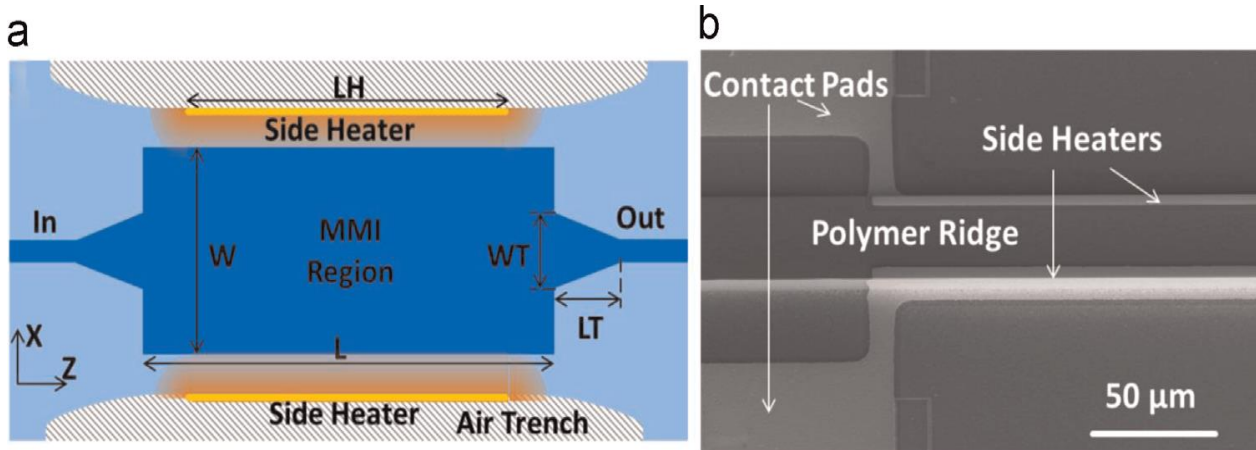
1.6.4 Μεταβλητές Οπτικοί Εξασθενητές

Οι μεταβλητές οπτικοί εξασθενητές (variable optical attenuators, VOAs) χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα πολυπλεξίας διαίρεσης κύματος (WDM) για να αντισταθμίσουν τις διακυμάνσεις ισχύος μεταξύ των διαφορετικών καναλιών μήκους κύματος και να εξασφαλίσουν μια διαφανή λειτουργία [131]. Ολοκληρωμένοι VOA σε σύμφωνα συστήματα ανίχνευσης είναι επιθυμητοί προκειμένου να ρυθμίζουν δυναμικά το λόγο ισχύος μεταξύ του σήματος και του τοπικού ταλαντωτή [132]. Κατά τη διάρκεια των ετών, έχουν δειχθεί διάφοροι VOAs με βάση το πολυμερές, βασισμένα στην εξέλιξη της αδιαβατικής λειτουργίας σε έναν κλάδο Y [133], την ολική εσωτερική ανάκλαση σε ένα πολυρυθμικό κυματοδηγό [134], την αναστροφή σημείου απεικόνισης σε δομή MMI [135], και το συντονισμό φάσης σε συμβολόμετρα Mach-Zehnder (MZ interferometer, MZI) [136]. Παρακάτω, παρουσιάζεται μια διεξοδική θερμική μελέτη σε συνδυασμό με οπτικές προσομοιώσεις συσκευών, προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η ενεργειακή απόδοση και ταυτόχρονα να μειωθεί το αποτύπωμα της συσκευής.

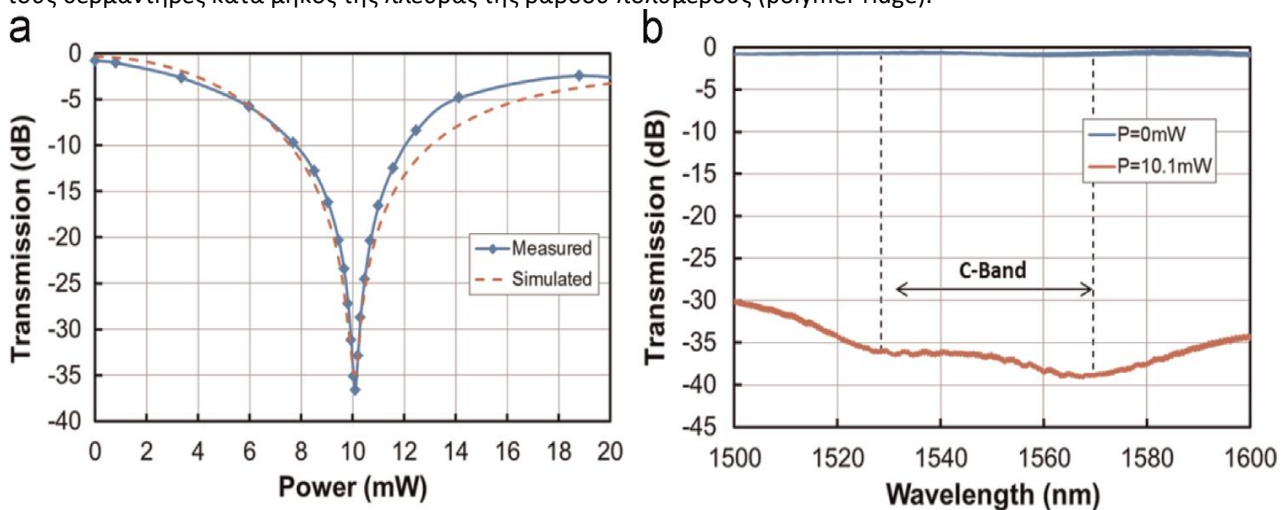
1.6.5 Μεταβλητές Οπτικοί Εξασθενητές Βασισμένοι σε 1x1 MMI

Πρόσφατα, έχει καταδειχθεί ένα συμπαγές VOA που βασίζεται σε 1x1 MMI [137]. Η σχηματική διάταξη της δομής παρουσιάζεται στην εικόνα 1.34 (a). Η συσκευή έχει πλάτος μόνο 18 μm (περιοχή multimode MMI) και μήκος 480 μm (συμπεριλαμβανομένης της εισόδου/εξόδου). Η οπτική εξασθένηση επιτυγχάνεται με θέρμανση σε κάθε πλευρά του MMI. Τα πλευρικά ηλεκτρόδια κατά μήκος της κορυφής του πολυμερούς αποκαλύπτονται στη φωτογραφία SEM στην εικόνα 1.34 (b). Η κατανομημένη διαβάθμιση του δείκτη διάθλασης που παράγεται από τον πλευρικό θερμαντήρα περιορίζει την πολυρυθμική περιοχή, παραμορφώνει τα σημεία αυτό-απεικόνισης του MMI και προκαλεί την απομάκρυνση των συμμετρικών ρυθμών από το κέντρο του κυματοδηγού εξόδου. Η μειωμένη επικάλυψη των ρυθμών έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη απώλεια συζεύξεως στον κυματοδηγό εξόδου και επομένως εξασθενημένη οπτική ισχύ. Η μέτρηση της εξασθένησης της οπτικής ισχύος στα 1550 nm απεικονίζεται στην εικόνα 1.35 (a).

Τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν με τις προβλέψεις από τις θερμοοπτικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τα προγράμματα COMSOL και RSoft. Στη μη συντονισμένη κατάσταση (ON), ο MMI φαίνεται να έχει απώλεια εισαγωγής ~0.5 dB, που αναφέρεται σε ευθύγραμμο κυματοδηγό του ίδιου μήκους. Η εξασθένηση φτάνει τη μέγιστη τιμή 37 dB (OFF) όταν η ισχύς του θερμαντήρα φτάσει τα 10,1 mW. Πέρα από την κατάσταση OFF, η οπτική ισχύς εξόδου ανακάμπτει επειδή η ισχυρή διαβάθμιση θερμοκρασίας στον MMI σχηματίζει μια ψευδο-μονορυθμική περιοχή λειτουργίας, η οποία στρέφει (bends) την ακτίνα πίσω στον κυματοδηγό. Τα φάσματα του MMI για την κατάσταση ON και OFF εμφανίζονται στο σχήμα 1.35 (b). Στην κατάσταση ON, ο MMI παρουσιάζει χαμηλή απώλεια (<0.7 dB) από 1500 nm έως 1600 nm. Στην κατάσταση OFF, ο MMI παρέχει ένα επίπεδο εξασθένησης > 35 dB σε όλη τη ζώνη C. Ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη σταθερής κατάστασης για τη μέγιστη εξασθένηση χρησιμοποιώντας τη δομή MMI υπολογίζεται ότι είναι ~20 ms για αυτή τη συγκεκριμένη δομή. Περαιτέρω έρευνες αποκαλύπτουν ότι η συσκευή είναι ευαίσθητη στην πόλωση: ρυθμίζοντας τον ελεγκτή πόλωσης στη διαδρομή εισόδου, παρατηρείται μια απώλεια που εξαρτάται από την πόλωση κάτω από 0.2 dB στην κατάσταση ON και μια διακύμανση ισχύος μικρότερη από 2 dB καταγράφεται στην κατάσταση OFF όταν εφαρμόζεται ισχύς θέρμανσης 10.1 mW.



Εικόνα 1.34: (α) Σχηματική διάταξη του VOA με βάση το 1x1 MMI. Οι πλευρικοί θερμαντήρες παράγουν μια κατανομημένη διαβάθμιση (a distributed index gradient) προς το κέντρο του MMI. (β) Φωτογραφία SEM που δείχνει τους θερμαντήρες κατά μήκος της πλευράς της ράβδου πολυμερούς (polymer ridge).



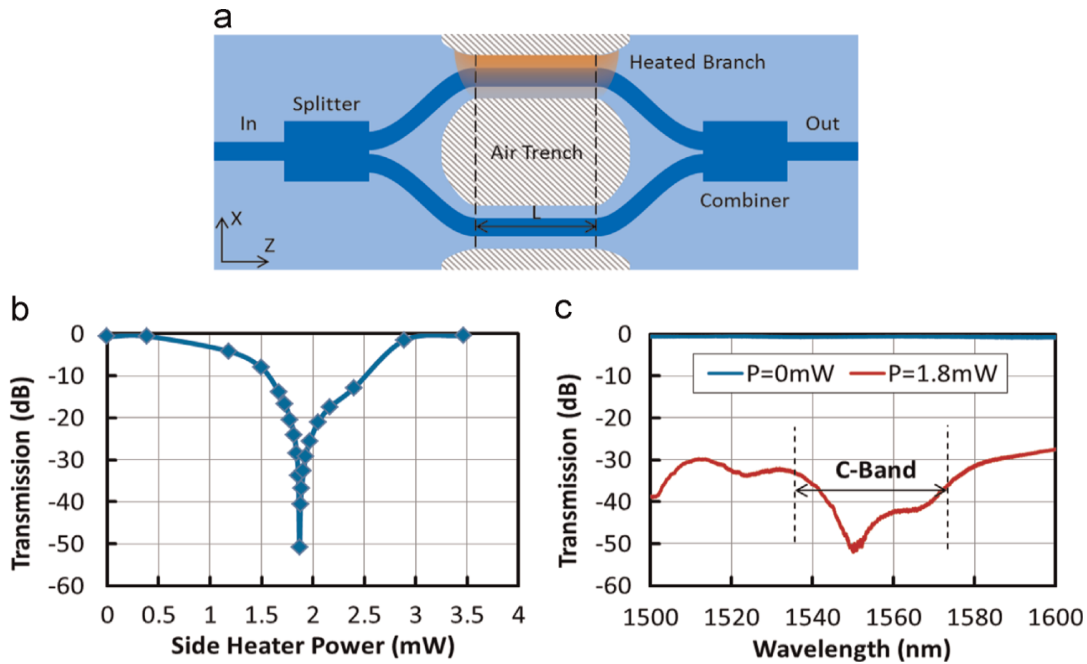
Εικόνα 1.35: (α) Σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της μέτρησης (συνεχόμενη μπλε γραμμή) και της προσομοίωσης (διακεκομμένη κόκκινη γραμμή) του VOA με βάση το MMI. (β) Απόκριση μήκους κύματος για $P = 0$ mW (κατάσταση ON) και $P = 10.1$ mW (κατάσταση OFF).

1.6.6 Μεταβλητές Οπτικοί Εξασθενητές Βασισμένοι σε MZI

Το VOA μπορεί επίσης να υλοποιηθεί σε μια δομή MZI, στον οποίο ένας βραχίονας είναι θερμικός ρυθμιζόμενος για να εισαγάγει μια μετατόπιση φάσης έτσι ώστε να διαταραχθεί η κατάσταση της ενισχυτικής συμβολής (constructive interference) στην έξοδο. Η σχηματική διάταξη παρουσιάζεται στην εικόνα 1.36 (α). Η συσκευή έχει μήκος 1 mm και πλάτος 80 μm. Αποτελείται από δύο 1x2 και 2x1 MMIs που συνδέονται από ένα παράλληλο τμήμα κυματοδηγού ($L = 400$ μm). Ο πλευρικός θερμαντήρας συντονίζει τη φάση του ενός βραχίονα του κυματοδηγού, ενώ η αυλάκωση του αέρα καταστέλλει τη θερμική αλληλοπαρεμβολή προς τον δεύτερο κυματοδηγό. Στην κατάσταση ON, οι διαδρομές φωτός είναι συμμετρικές και προσθετικά ανασυνδυασμένες στην έξοδο με ελάχιστη απώλεια. Στην κατάσταση OFF, μια μετατόπιση φάσης π εισάγεται σε έναν από τους βραχίονες, προκαλώντας καταστρεπτική συμβολή στην έξοδο, και επομένως εισάγεται μεγάλη εξασθένηση. Η θερμικά επαγόμενη αλλαγή φάσης ($\Delta\phi$) μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$\Delta\phi = 2\pi L \Gamma \Delta T / \lambda_0 \quad (1.22)$$

, όπου λ_0 (1550 nm) είναι το κεντρικό μήκος κύματος, Γ είναι ο TOC του πολυμερικού υλικού και ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο βραχιόνων κυματοδηγού. Για μια μετατόπιση φάσης π (κατάσταση OFF), η απαιτούμενη ΔT υπολογίζεται ότι είναι 17°C. Περαιτέρω προσομοιώσεις δείχνουν ότι η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για μια τέτοια αλλαγή θερμοκρασίας είναι μόλις 1.4 mW. Τα αποτελέσματα μετρήσεων εξασθένησης φαίνονται στην εικόνα 1.36 (β).



Εικόνα 1.36: (a) Σχηματική διάταξη του VOA με βάση το MZI που αποτελείται από δύο 1×2 MMIs και ένα παράλληλο τμήμα κυματοδηγού. (b) Μετρηθείσα εξασθένηση της οπτικής ισχύος σε σχέση με την ισχύ του πλευρικού θερμαντήρα. (c) Απόκριση μήκους κύματος μέτρησης σε $P=0$ mW (κατάσταση ON) και $P=1.8$ mW (κατάσταση OFF).

Στη μη ρυθμιζόμενη κατάσταση (ON), το MZI έχει απώλεια εισαγωγής ~ 0.7 dB. Η εξασθένηση φτάνει τη μέγιστη τιμή 51 dB (OFF) σε μόνο 1.8 mW θερμικής ισχύος. Το MZI έχει ένα μικρότερο εύρος ζώνης σε κατάσταση OFF σε σύγκριση με τη δομή MMI. Παρόλα αυτά, μια περιοχή εξασθένησης μεγαλύτερη από 30 dB είναι εφικτή σε όλη την ζώνη C, όπως υποδεικνύεται στην εικόνα 1.36 (c). Ο VOA με βάση το MZI είναι ογκώδης, αλλά προσφέρει μεγαλύτερο εύρος εξασθένησης με ελάχιστη κατανάλωση θερμικής ενέργειας. Ωστόσο, στην κατάσταση OFF, η οπτική ισχύς είναι πολύ ευαίσθητη στη διακύμανση της θερμικής ισχύος. Στην εικόνα 1.36 (b), η μεταβολή ± 0.01 mW θερμικής ισχύος στο ελάχιστο σημείο οδηγεί σε αύξηση οπτικής ισχύος κατά 10 dB. Στις θερμικές προσομοιώσεις, η μεταβολή ισχύος ± 0.01 mW μεταφράζεται σε $\sim \pm 0.012^\circ\text{C}$ στην αλλαγή θερμοκρασίας ΔT . Αυτό θέτει μια κρίσιμη απαίτηση για τη θερμική σταθεροποίηση μόλις τοποθετηθεί η συσκευή VOA σε μια συσκευασία. Για μια τέτοια ευαίσθητη στη θερμοκρασία συσκευή, είναι πρακτικά δύσκολο να φτάσεις το μέγιστο σημείο εξασθένησης. Το εύρος εξασθένησης συχνά πρέπει να συμβιβάζεται με στόχο την επίτευξη αξιόπιστης λειτουργίας.

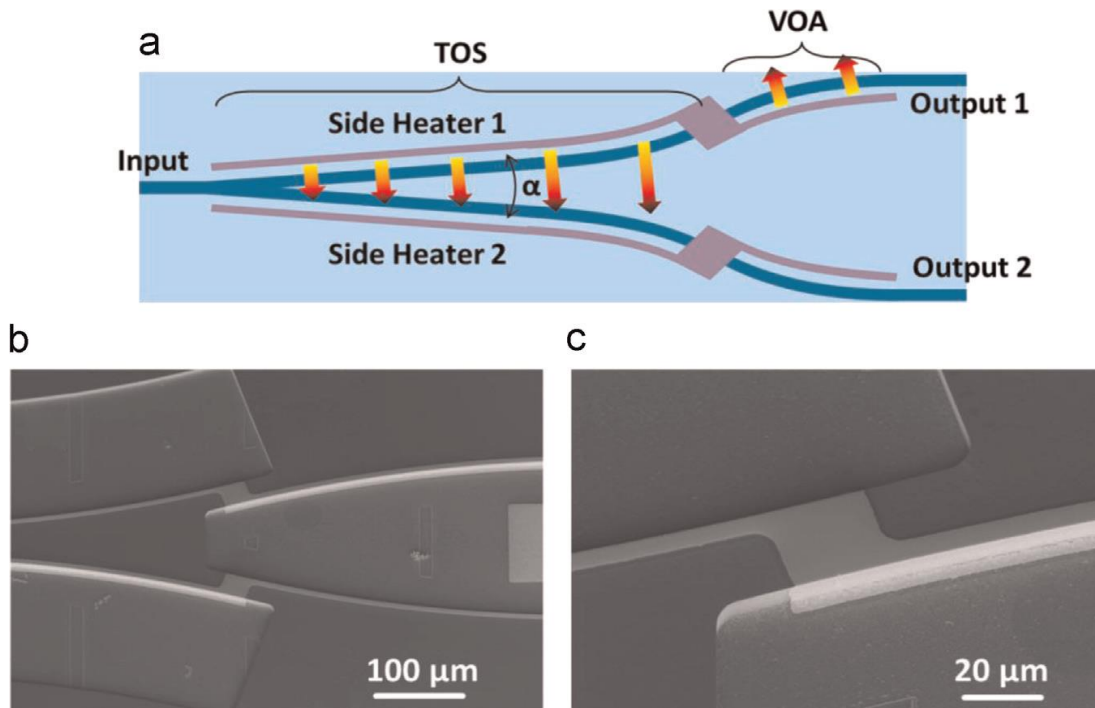
Επιπλέον, το VOA που βασίζεται σε MZI είναι ευαίσθητο στην πόλωση, καθώς η μικρή διπλοδιαθλαστικότητα του κυματοδηγού προκαλεί διαφορετική συμπεριφορά συντονισμού της φάσης ανάλογα με την πόλωση του φωτός. Από την άλλη πλευρά, ο VOA που βασίζεται σε 1×1 MMI δεν είναι ευαίσθητος στην πόλωση, αποδεδειγμένο τόσο από προσομοιώσεις όσο και από πειράματα, επειδή το θερμο-οπτικό αποτέλεσμα δεν εξαρτάται από την πόλωση. Όταν το πλευρικό ηλεκτρόδιο θερμαίνεται, ο μειωμένος δείκτης στην άκρη του MMI στρέφει το φως και διαταράσσει την κατάσταση αυτο-εστίασης και για τις δύο πόλωσεις σχεδόν πανομοιότυπα. Συνεπώς, η δομή 1×1 MMI προτιμάται ως ένα συμπαγές και αξιόπιστο στοιχείο που πρέπει να ενσωματωθεί σε μεγαλύτερα φωτονικά κυκλώματα.

1.6.7 Θερμο-οπτικοί Μεταγωγείς Φωτός

Πολυμερή με ξεχωριστό ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο για την κατασκευή υπερ-γρήγορων οπτικών διακοπών όσο και διαμορφωτών για ρυθμούς μετάδοσης 100 Gb/s και άνω [138,139], όπως αναλύθηκε και στην υποενότητα 1.5.2. Ωστόσο, περιοριζόμενη από τον ΕΟ συντελεστή και το όριο τάσης οδήγησης, η αλλαγή του δείκτη διάθλασης που προκαλείται από το ηλεκτρικό πεδίο στον πολυμερικό κυματοδηγό είναι συνήθως μικρή σε σύγκριση με τη μεταβολή του δείκτη διάθλασης που επιτυγχάνεται από τις αλλαγές της θερμοκρασίας. Ο χρόνος απόκρισης ενός θερμο-οπτικού διακόπτη (thermo-optic switch, TOS) κυμαίνεται συνήθως από μερικές εκατοντάδες μικροδευτερόλεπτα έως δεκάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου, ανάλογα με τις πραγματικές ιδιότητες του υλικού, τις θερμικές δομές, τη σύνθεση του θερμαντήρα και την τοποθέτηση του απορροφητή θερμότητας (heat sink) [126]. Η βραδεία χρονική απόκριση του θερμο-οπτικού φαινομένου στο πολυμερές αποδίδεται ουσιαστικά στη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και επομένως σε περιορισμένη θερμική διάχυση. Ωστόσο, δεδομένου ότι τα

περισσότερα πολυμερή είναι καλά θερμοηλεκτρικά υλικά, η διαδικασία σύνθεσης μπορεί να επικεντρωθεί στην αύξηση της διαφάνειας του υλικού και στην αύξηση της θερμικής σταθερότητας. Η κρίσιμη διαδικασία πόλωσης μπορεί να αποφευχθεί για να κάνει τη διαδικασία κατασκευής πιο χαλαρή. Για εφαρμογές στις οποίες ο χρόνος μεταγωγής σε ms είναι επαρκής, όπως η δρομολόγηση σε WDM-PON και ο έλεγχος πολλαπλών ροών στα οπτικά κυκλώματα, ο πολυμερικός TOS είναι η ιδανική επιλογή όσον αφορά το χαμηλό κόστος κατασκευής, την υψηλή απόδοση ενέργειας, την καλή συμβατότητα και την εύκολη κλιμάκωση σε μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωση.

Έχουν υπάρξει πολλές αναφορές για τα TOS με βάση το πολυμερές. Οι αρχές λειτουργίας είναι παρόμοιες με τα σχέδια των VOA. Μπορούν να βασιστούν στη μετατόπιση φάσης σε MZIs [26], τη μετάβαση μέσω αδιαβατικού τρόπου σε δομή τύπου Y [140], στην ολική εσωτερική ανάκλαση σε πολυρυθμικούς κυματοδηγούς [141] και άλλα. Έχουν αποδειχθεί επίσης ψηφιακές μεταγωγικές μήτρες υψηλής απόδοσης και μεγάλων διαστάσεων [141].



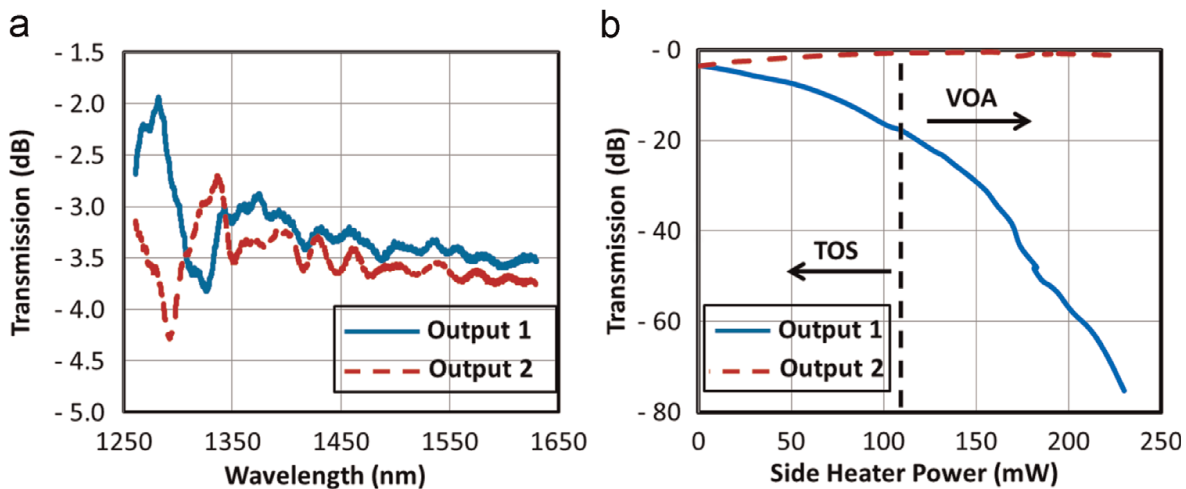
Εικόνα 1.37: (a) Σχηματική απεικόνιση του TOS που βασίζεται σε δομή τύπου Y με πρόσθετους VOAs. (b) και (c) φωτογραφίες SEM που δείχνουν τους διασταυρούμενους πλευρικούς θερμαντήρες στην τομή TOS και VOA.

Για ένα βασικό 1x2 TOS, μπορεί να υιοθετηθεί μια απλή δομή τύπου Y με ένα ζεύγος θερμαντήρων εκτός κυματοδηγών. Με τη θέρμανση της δισδιάστατης περιοχής στον κλάδο Y από τη μια πλευρά, ο ζυγός ρυθμός μπορεί να κατασταλεί και ο περιττός συζευγνύεται αδιαβατικά στον κυματοδηγό της άλλης πλευράς. Για την περαιτέρω καταπίεση του εναπομένου φωτός στον εναπομείναντα κυματοδηγό και για τη βελτίωση της λόγου σβέσης on-off, μπορεί να συνδεθεί ένα VOA. Για τη διασφάλιση της ζεύξης αδιαβατικής λειτουργίας, δύο τιμές πρέπει να διατηρούνται μικρές: (1) η γωνία διακλάδωσης Y (Y-branch) (a) και (2) διαφορά του δείκτη διάθλασης του κυματοδηγού πυρήνα/περιβλήματος. Στις περισσότερες αναφορές, το α είναι συνήθως $\ll 1^\circ$ και η διαφορά του δείκτη διάθλασης είναι μικρότερη από 1%.

Υπό αυτές τις συνθήκες, η συσκευή γίνεται μάλλον ογκώδης, προσεγγίζει ή υπερβαίνει τις κλίμακες του εκατοστού και η απώλεια λόγω διάδοσης καθίσταται εμφανής. Προκειμένου να συρρικνωθεί το μέγεθος της συσκευής, πρέπει να βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ της απώλειας που προκαλείται από τη διάδοση λόγω της δομής του μακριού κυματοδηγού (μικρή α , μικρή διαφοράς δείκτη διάθλασης) και της απώλειας λόγω σκέδασης (scattering) που προκαλείται από την απότομη σύζευξη του ρυθμού στην περιοχή της θερμαινόμενης διακλάδωσης Y (αυξημένη α , αυξημένη αντίθεση δείκτη διάθλασης). Έχει δοκιμαστεί ένα TOS που φαίνεται στην εικόνα 1.37 (a), στο οποίο η γωνία α έχει αυξηθεί σε 1.2° και η τιμή αντίθεσης του δείκτη διάθλασης κυματοδηγού έχει αυξηθεί σε 1.45:1.48 (2%). Οι δύο κυματοδηγοί εξόδου απέχουν απόσταση 250 μm και το μήκος της συσκευής είναι 1.5 mm. Οι πλευρικοί θερμαντήρες τοποθετούνται κατά μήκος του ραβδωμένου πολυμερικού κυματοδηγού, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.37 (b) και (c), προκειμένου να παρέχεται αποτελεσματική βαθμιαία μεταβολή θερμοκρασίας στις εγκάρσιες τομές

κυματοδηγού. Οι αυλακώσεις του αέρα είναι χαραγμένες για να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα της ρύθμισης και να καταργήσουν τη θερμική αλληλοεπίδραση.

Ο VOA πραγματοποιείται σε ένα τμήμα του καμπυλωμένου κυματοδηγού με ακτίνα 1 mm και γωνία κάμψης 15°. Ο πλευρικός θερμαντήρας ενεργοποιεί ταυτόχρονα το TOS και το VOA, προκαλώντας την πλειοψηφία του φωτός να συζευχθεί με τον δεύτερο κυματοδηγό και το υπόλοιπο φως να διαρρεύσει στον καμπυλωμένο κυματοδηγό με χαμηλής διαφοράς δείκτη διάθλασης. Χωρίς ενεργοποίηση των θερμαντήρων, ο διακόπτης λειτουργεί ως διαχωριστής 3 dB. Τα φάσματα οπτικής μετάδοσης και για τις δύο εξόδους απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 1.38 (a), κανονικοποιημένα ως προς τα φάσματα ενός μονορυθμικού κυματοδηγού αναφοράς στο ίδιο chip. Ο διαχωριστής έχει απόκριση ευρείας ζώνης από 1350 nm έως 1620 nm. Στα 1550 nm, η απώλεια εισαγωγής είναι 0.45 dB για την ανώτερη διαδρομή (Εξοδος 1) και 0.65 dB για την κατώτερη διαδρομή (Εξοδος 2). Τα χαρακτηριστικά μεταγωγής παρουσιάζονται στην εικόνα 1.38 (b). Καθώς η ηλεκτρική ισχύς στον πλευρικό θερμαντήρα 1 αυξάνεται από 0 σε 112 mW, η οπτική απώλεια από την έξοδο 1 αυξάνεται από 3.65 dB σε 18.0 dB, ενώ η οπτική απώλεια από την έξοδο 2 μειώνεται από 3.45 dB σε 0.5 dB.

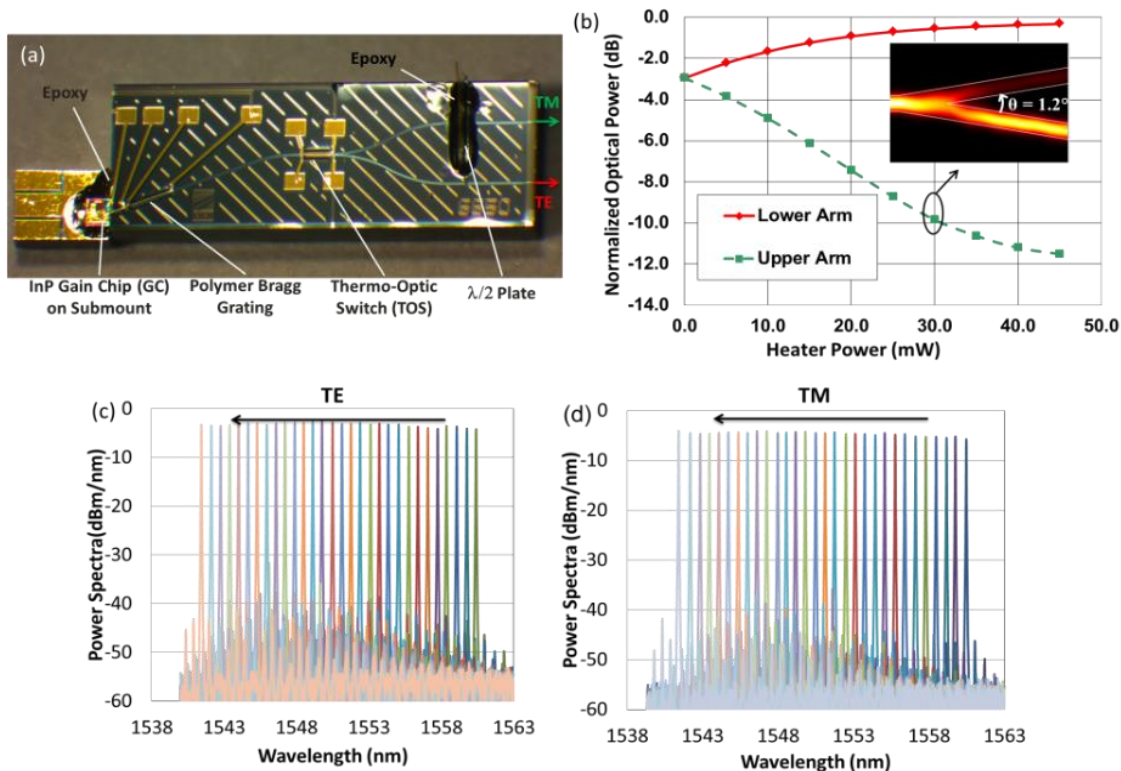


Εικόνα 1.38: (a) Τα φάσματα εκπομπής του TOS σε κατάσταση χωρίς ρύθμιση. (b) Χαρακτηριστικά μεταγωγής όταν ο πλευρικός θερμαντήρας 1 είναι ρυθμισμένος.

Σε αυτό το σημείο η πλειοψηφία του φωτός (με λόγο σβέσης 17.5 dB) έχει μεταφερθεί στην έξοδο 2. Με την περαιτέρω αύξηση της ισχύος του θερμαντήρα, η επίδραση από το VOA καθίσταται κυρίαρχη, καθώς το φως συνεχίζει να εξασθενεί στην έξοδο 1 αλλά παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστο στην έξοδο 2. Σε ~ 223 mW, η οπτική απώλεια στην έξοδο 1 φτάνει τα 75.3 dB, αλλά η οπτική απώλεια στην έξοδο 2 επίσης ελαφρά αυξάνει σε 1.1 dB λόγω της αυξημένης απώλειας σκέδασης στην υπερβολικά θερμαινόμενη περιοχή της διακλάδωσης Y. Λαμβάνεται ένας λόγος σβέσης on-off 74.2 dB. Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας σχετίζεται με το μεγάλο μήκος του θερμαντήρα και τον σχετικά υψηλό δείκτη διάθλασης (index contrast) του κυματοδηγού που απαιτεί μεγάλη βαθμιαία μεταβολή θερμοκρασίας για την καταπίεση του ζυγού ρυθμού στη διακλάδωση Y. Ο καμπυλωμένος κυματοδηγός μπορεί να αντικατασταθεί από το VOA που βασίζεται σε 1x1 MMI για αποτελεσματικότερη απόσβεση. Ο θερμαντήρας του TOS και οι θερμαντήρες του VOA μπορούν να διαχωριστούν και να πολωθούν ανεξάρτητα για να αποφευχθεί η περιττή θέρμανση στην περιοχή διασταύρωσης καθώς και στο τμήμα του TOS μετά την επίτευξη του κύριου σημείου μεταγωγής. Για να μειωθεί περαιτέρω το μήκος της συσκευής, η διακλάδωση Y μπορεί να κατασκευαστεί από δύο ή περισσότερους υπο-τομείς με αυξανόμενες γωνίες α για να ενταθεί η αδιαβατική σύζευξη με κόστος μιας ελαφρώς αυξημένης απώλειας σκέδασης.

Έχοντας αναλύσει παραπάνω τα δομικά κυκλώματα στο polyboard, η ικανότητα ολοκλήρωσής του εκδηλώνεται σαφώς σε μια μικροσκοπική συσκευή που φαίνεται στην εικόνα 1.39 (a), δηλ. ένα συντονισμένο λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας με μεταδιδόμενη εκπομπή διπλής πόλωσης. Παραδοσιακά αποδεικνύεται ότι είναι δύσκολο να κατασκευαστούν τα LDs με πολωμένη έξοδο σε ρυθμό TM. Πρέπει να εισαχθεί επιταξιακή ένταση (epitaxial strain) για την υποβάθμιση του προτιμώμενου τρόπου TE σε λέιζερ κατανεμημένης ανάδρασης (DFB). Στο polyboard, τέτοια λέιζερ μπορούν να συναρμολογηθούν αρκετά απλά. Στην εικόνα 1.39 (b), η επιφάνεια ενός GC με πολυ-κβαντικό φρεάτιο (multi-quantum-well) που εκπέμπει ρυθμούς TE είναι συζευγμένη με την επιφάνεια εισόδου του polyboard chip. Η αριστερή όψη του GC έχει επικάλυψη υψηλής αντανάκλασης σε σχέση με τον αέρα, ενώ η δεξιά όψη έχει αντιανακλαστική

επικάλυψη σε σχέση με το πολυμερές. Το θερμικά ρυθμιζόμενο πολυμερικό Bragg λειτουργεί ως ο εμπρόσθιος ανακλαστήρας. Το GC και το πολυμερικό Bragg αποτελούν την περιοχή ταλαντωτή λέιζερ. Ένας κυματοδηγός μήκους 1 mm χρησιμοποιείται για να αποτρέψει οποιαδήποτε οπτική ανάδραση από το TOS πίσω στον ταλαντωτή, ώστε να διασφαλιστεί μια σταθερή λειτουργία μονορυθμικής λειτουργίας. Η εκπομπή λέιζερ στη συνέχεια χωρίζεται σε δύο εξόδους: η κάτω διαδρομή παραμένει στην πόλωση TE, ενώ η άνω διαδρομή περνάει από πλακίδιο ημίσεος κύματος ($\lambda/2$) και στρέφει την κατάσταση της πόλωσης σε TM εκπομπή. Το TOS μπορεί να κατευθύνει το οπτικό κύμα είτε σε δύο εξισορροπημένες εξόδους είτε σε μία προτιμώμενη έξοδο σε μία πόλωση.



Εικόνα 1.39: (α) Φωτογραφία του λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας που μπορεί να αλλάξει πόλωση. Το InP GC και το πλακίδιο $\lambda/2$ είναι ασφαλισμένα με εποξικά μέσα στο παθητικό polyboard. (β) Προσομοιωμένα χαρακτηριστικά TOS. Χαρακτηριστικά ρύθμισης μήκους κύματος λέιζερ για τις διαδρομές με ρυθμό: (c) TE και (d) TM.

Το TOS όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι ουσιαστικά ένας πολυμερικός κυματοδηγός διάταξης Y με θερμαντήρες τοποθετημένους από το κέντρο του Y που παράγουν θερμοκρασία για να οδηγήσουν βαθμιαία τον αδιαβατικό μετασχηματισμό της ιδιομορφίας στην διαδρομή μεταγωγής [138]. Η απόδοση του TOS αξιολογείται με αριθμητικές προσομοιώσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.39 (b), και αποδεικνύεται ότι συμφωνεί καλά με τα πειραματικά αποτελέσματα [142].

Η συμπεριφορά μεταγωγής είναι ίδια για τις διαδρομές TE και TM, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.39 (c)-(d). Όταν η θερμική ισχύς του ηλεκτροδίου αυξάνεται στα 20 mW, το μήκος κύματος μετατοπίζεται συνεχόμενα από 1561 nm σε 1541 nm, δηλ. επιτυγχάνεται εύρος συντονισμού μήκους κύματος 20 nm, που αντιστοιχεί σε απόδοση συντονισμού 1 nm/mW. Ο λόγος καταστολής πλευρικής λειτουργίας (side mode suppression ratio, SMSR) είναι μεγαλύτερος από 35 dB σε όλα τα ληφθέντα μήκη κύματος και μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω σε πάνω από 40 dB, ρυθμίζοντας τον θερμαντήρα φάσης για να αποφευχθούν οι θέσεις πτώσης λειτουργίας (mode hopping positions). Η παρουσία του πλακιδίου $\lambda/2$ εισάγει μια πτώση ισχύος εξόδου 1.4 dB στη διαδρομή TM. Αυτή η απώλεια μπορεί να ελαχιστοποιηθεί κάτω από το 1 dB, εφαρμόζοντας σωστές κυματοειδείς στενώσεις (waveguide tapers) για να μειωθεί η σκέδαση φωτός στην περιοχή των μη κατευθυνόμενων αυλακώσεων (στένωση-tapering).

Τέτοια λέιζερ μπορούν να υιοθετηθούν ως τοπικοί ταλαντωτές χαμηλού κόστους και διπλής πόλωσης, καθώς και για άχρωμους σύμφωνους δέκτες. Σε αυτή τη διατριβή τέτοιες σχεδιάσεις θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή πρωτοποριακών λέιζερ πολλαπλών ροών διπλής πόλωσης για διάφορες εφαρμογές τηλεπικοινωνιών και δεδομένων και θα αναλυθούν εκτενώς στο κεφάλαιο 5.

Σύνοψη και Συμπεράσματα Κεφαλαίου 1

Σε αυτό το πρώτο κεφάλαιο, πέραν του εισαγωγικού τμήματος που αφορούσε το κομμάτι των οπτικών επικοινωνιών καθώς και τα κίνητρα της διατριβής παρουσιάστηκαν αναλυτικά δυο νέες τηλεπικοινωνιακές πλατφόρμες ολοκλήρωσης, οι οποίες στηρίζονται στα οπτικά πολυμέρη και βρίσκουν διαφορετικό πεδίο εφαρμογής αλληλοσυμπληρώνοντας η μια την άλλη. Συνεπώς, σε αυτό το κεφάλαιο έγινε μια εκτεταμένη περιγραφή της δομής και των κύριων οπτικών ιδιοτήτων μιας τηλεπικοινωνιακής πλατφόρμας ηλεκτρο-οπτικών πολυμερών που είναι κατάλληλη για την ανάπτυξη MZM με εύρος ζώνης άνω των 65 GHz. Περιγράφηκε επίσης η εξέλιξη της σχετικής ΕΟ πολυμερικής πλατφόρμας σε μια πλατφόρμα ολοκλήρωσης πολλαπλών χρήσεων μέσω της μονολιθικής ολοκλήρωσης βασικών παθητικών δομών όπως οι συζεύκτες MMI και Bragg gratings καθώς και μέσω της υβριδικής ολοκλήρωσης InP LDs και GCs με χρήση της τεχνικής butt-end-coupling με απώλεια σύζευξης < 2 dB. Παράλληλα, παρουσιάστηκε η περαιτέρω χρήση αυτής της ενισχυμένης πλατφόρμας φωτονικής ολοκλήρωσης σε συνδυασμό με την εξαιρετικά γρήγορη ηλεκτρονική συσκευή InP-DHBT για την ανάπτυξη σειριακών πομπών 100 Gb/s με βάση το σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK για οπτικές διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της παθητικής πολυμερικής πλατφόρμας ολοκλήρωσης, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των οπτικών πομπών πολλαπλών ροών, εκθέτοντας τα πλεονεκτήματά της, που σχετίζονται με την χαμηλή απώλεια διάδοσης κατά τη διάρκεια της κυματοδότησης (~0.5 dB/cm) καθώς και τη δυνατότητά της να μπορεί να ολοκληρωθεί υβριδικά τόσο με ενεργές δομές όπως InP GCs, PDs και οπτικούς διαμορφωτές όσο και με παθητικές όπως οπτικές ίνες και TFEs, τα οποία μπορούν να εισαχθούν παθητικά στο chip, ή επίσης με οπτικές δομές σε άλλες πλατφόρμες, μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο το κόστος συναρμολόγησης. Παράλληλα, η συγκεκριμένη πολυμερική πλατφόρμα παρουσιάζει θερμο-οπτικές ιδιότητες, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή υψηλής απόδοσης οπτικών φίλτρων, συντονιζόμενων λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας, για VOAs και TOSs.

Ο σχεδιασμός των δομών αυτών έγινε με την επιλογή κατάλληλης θέρμανσης και θερμικής απομόνωσης χρησιμοποιώντας θερμικές προσομοιώσεις. Στη συνέχεια, η κατανομή της θερμοκρασίας μετατράπηκε σε μεταβολές του δείκτη διαθλάσης μέσω του θερμο-οπτικού συντελεστή στατικής θερμοκρασίας. Τα θερμο-οπτικά στοιχεία μπορούν να συνδυαστούν με άλλα στοιχεία που έχουν αναπτυχθεί για την πολυμερή πλατφόρμα και μπορούν να υλοποιηθούν μεγάλης κλίμακας φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν μοναδικές συσκευές στην παθητική πολυμερική πλατφόρμα συμπεριλαμβανομένου ενός διπλής πόλωσης, ρυθμιζόμενου λέιζερ ως προς το μήκος κύματος με εύρος 20 nm, καθώς και TOS που είναι ουσιαστικά ένας πολυμερικός κυματοδηγός Y-κλάδου με θερμαντήρες τοποθετημένους από το κέντρο του Y που παράγουν βαθμιαία θερμοκρασία για να οδηγήσουν τον αδιαβατικό μετασχηματισμό του ίδιου ρυθμού στην διαδρομή μεταγωγής. Αυτές οι συσκευές απέδειξαν τις δυνατότητες των οπτικών πολυμερών με την κατασκευή μεγάλης κλίμακας, πολύ-λειτουργικών, φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των οπτικών πομπών πολλαπλών ροών για ευέλικτες οπτικές διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων.

Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 1

- [1] A. Jones, Historical sketch of the electric telegraph: including its rise and progress in the United States, 1852.
- [2] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 3rd ed., 2002.
- [3] K. Chang, RF and Microwave Wireless Systems. John Wiley & Sons Inc., 2000
- [4] Viasat-1. [Online]. Available: <https://www.viasat.com/>
- [5] T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby," Nature, vol. 187, pp. 493-494, 1960.
- [6] K. C. Kao and G. A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies," Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 113, no. 7, pp. 1151-1158, July 1966.
- [7] D. Keck. (2000) Optical fiber spans 30 years. [Online]. Available: <https://www.lightwaveonline.com/articles/print/volume-17/issue-8/special-report/optical-fiber-spans-30-years-53463122.html>
- [8] H. Murata and N. Inagaki, "Low-loss single-mode fiber development and splicing research in Japan," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 17, no. 6, pp. 835-849, Jun 1981.
- [9] Cable Signalling Speed and Traffic Capacity. [Online]. Available: <http://atlantic-cable.com/Cables/speed.html>
- [10] T. Okoshi, "Recent advances in coherent optical fiber communication systems," J. Lightw. Technol., vol. 5, no. 1, pp. 44-52, Jan 1987.
- [11] L. G. Kazovsky, "Phase- and polarization-diversity coherent optical techniques," J. Lightw. Technol., vol. 7, no. 2, pp. 279-292, Feb 1989.
- [12] R. Dettmer, "Spinning the Web [World Wide Web standardisation]," IEE Review, vol. 42, no. 1, pp. 28-29, Jan 1996.
- [13] P. J. Winzer, "Optical Transport is Going MIMO," in IEEE International Conference on Communication, 2013.
- [14] M. G. Taylor, "Coherent detection method using dsp for demodulation of signal and subsequent equalization of propagation impairments," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, no. 2, pp. 674-676, Feb 2004.
- [15] N. Kikuchi, K. Sekine, and S. Sasaki, "Multilevel Signalling for High-Speed Optical Transmission," in 2006 European Conference on Optical Communications, Sept 2006, pp. 1-4.
- [16] K. Kikuchi, "Coherent optical communications - History, state-of-the-art technologies, and challenges for the future -," in Opto-Electronics and Communications Conference, 2008 and the 2008 Australian Conference on Optical Fibre Technology. OECC/ACOFT 2008. Joint conference of the, July 2008, pp. 1-4.
- [17] (2007, Nov.) Verizon completes 100-Gbit/sec field trial. [Online]. Available: <http://www.lightwaveonline.com/articles/2007/11/verizon-completes-100-gbitsec-field-trial-53442597.html>
- [18] (2008, Sept.) Verizon and Nokia Siemens Networks Set New Record for 100 Gbps Optical Transmission. [Online]. Available: <http://news.verizonenterprise.com/2008/09/verizon-and-nokia-siemens-networks-set-new-record-for-100-gbps-optical-transmission/>
- [19] (2009, Dec.) Verizon Deploys Commercial 100G Ultra-Long-Haul Optical System on Portion of Its Core European Network.
- [20] http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360_ns827_Networking_Solutions_White_Paper.html
- [21] Cisco public, white paper, "The Zettabyte Era: Trends and Analysis", June 2017, [Online]: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/hyperconnectivity-wp.pdf>
- [22] THE CONSUMABLE NETWORK: Preparing business networks for the cloud with software defined networking, Strategic white paper, Alcatel-Lucent
- [23] <http://www.intel.com/content/www/us/en/communications/internet-minute-infographic.html>
- [24] M. Glick, "Optical interconnects in next generation data centers; an end to end view" IEEE Hot Interconnects 2008
- [25] <http://fplreflib.findlay.co.uk/articles/14353/Seeing%20The%20Light.pdf>
- [26] <http://www.cir-inc.com/>
- [27] <http://www.gazettabyte.com/home/2009/11/16/active-optical-cable-market-drivers.html>
- [28] <http://www.finisar.com/>
- [29] www.mellanox.com
- [30] E. Tolosa, et al., "Quad 14Gbps L-Band VCSEL-based System for WDM Migration of 4-lanes 56 Gbps Optical Data Links," ECOC 2012, Th.2.B.3
- [31] <https://www.finisar.com/active-optical-cables>
- [32] <http://www.luxtera.com/>
- [33] <http://www.intel.com/pressroom/kits/research/4Gmodulator.htm>
- [34] H. Yang, S.C.J. Lee, E. Tangdiongga, F. Breyer, S. Randel, A.M.J. Koonen, "40-Gb/s transmission over 100m graded-index plastic optical fiber based on discrete multitone modulation," OFC 2009, San Diego, CA, 22-26 March 2009.
- [35] Zeng, J., Boom, H.P.A. van den, Koonen, A.M.J., "Five-subcarrier multiplexed 64-QAM transmission over a 50-um core diameter graded index perfluorinated polymer optical fiber.," OFC 2009, San Diego, CA , 24 - 28 February 2008.

- [36] J. Beals IV, et al, "Terabit Capacity Passive Polymer Optical Backplane," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies," OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2008), paper CMG4.
- [37] L. Shares, "Terabus: Terabit/Second-Class Card-Level Optical Interconnect Technologies," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 12, Issue 5, Sept.-Oct. 2006.
- [38] F. E. Doany, "Terabus: A 160-Gb/s Bidirectional Board-Level Optical Data Bus," Lasers and Electro-Optics Society, 2007. LEOS 2007. The 20th Annual Meeting of the IEEE, Volume, Issue 21-25 Oct. 2007 Page(s):545 – 546.
- [39] C. L. Schow, F. E. Doany, C. W. Baks, Y. H. Kwark, D. M. Kuchta, and J. A. Kash, "A Single-Chip CMOS-Based Parallel Optical Transceiver Capable of 240-Gb/s Bidirectional Data Rates," J. Lightw. Technol., vol. 27, pp. 915-929, Apr. 2009.
- [40] G. Raybon, P. J. Winzer, and C. R. Doerr, "1-Tb/s (10×107 Gb/s) Electronically Multiplexed Optical Signal Generation and WDM Transmission," J. Lightwave Technol. 25, 233-238 (2007)
- [41] http://www.hhi.fraunhofer.de/fileadmin/hhi/downloads/PC/pc40_Gbits_InP_150dpi_1.7.08.pdf
- [42] A. Liu, L. Liao, D. Rubin, et al., "High-speed silicon modulator for future VLSI interconnect," in OSA Topical Meeting on Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications (IPNRA '07), Salt Lake City, Utah, USA, July 2007, paper IMD3.
- [43] <http://resources.alcatel-lucent.com/?cid=158011>
- [44] H. Takara, K. Yonenaga, and m. Jinno, "Spectrally-efficient Elastic Optical Path Networks Toward 1 Tbps Era, in Proc. OFC 2012, paper OTh3B.3, Mar 2012, USA.
- [45] www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/customer-case-studies/csgooglesdn.pdf
- [46] Jack Boychuk, Director-Business Development, "Alcatel Lucent and ORION 100G and Beyond", presentation available From Alcatel-Lucent from April 19, 2011.
- [47] Ori Gerstel, Cisco, Masahiko Jinno, Andrew Lord, S. J. Ben Yoo, "Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?," IEEE Communications Magazine, p. S12, Feb 2012.
- [48] Towards a Converged Backbone: Optimizing transport efficiency in a high leverage network with integrated IP and Optics," White paper, Alcatel-Lucent.
- [49] <http://www.infinera.com/technology/files/infinera-IEEE-OTN-Overview.pdf>
- [50] H. Yamazaki et al., "Integrated 100-Gb/s PDM-QPSK modulator using a hybrid assembly technique with silica-based PLCs and LiNbO₃ phase modulators," in Proc. ECOC 2008, paper Mo3.C.1, Sep 2008, Belgium.
- [51] <http://jp.fujitsu.com/group/foc/en/services/optical-devices/40gln/>
- [52] Po Dong, Long Chen, and Young-kai Chen, "High-speed low-voltage single-drive push-pull silicon Mach-Zehnder modulators," Opt. Express 20 (6), p. 6163, Mar 2012.
- [53] Po Dong, Long Chen, Chongjin Xie, Lawrence L. Buhl, and Young-Kai Chen, "50-Gb/s silicon quadrature phase-shift keying modulator," Opt. Express 20 (19), p. 21181, Sep 2012.
- [54] Po Dong, Chongjin Xie, Long Chen, Lawrence L. Buhl, and Young-Kai Chen, "112-Gb/s monolithic PDM-QPSK modulator in silicon," Opt. Express 20 (26), p. B624, Dec 2012.
- [55] Qiaoyin Lu, Weihua Guo, Diarmuid Byrne and John F. Donegan, "Design of Low V_π High-Speed GaAs Travelling-Wave Electrooptic Phase Modulators Using an n-i-p-n Structure", IEEE Photon. Technol. Lett. 20 (21), p. 1805, Nov 2008.
- [56] <http://u2t.de/news/u%C2%B2t-photonics-samples-low-drive-voltage-40-gbits-gaas-based-modulators>
- [57] R. A. Griffin and A. C. Carter, "Advances in InP Optical Modulators," in Proc. Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronic Exposition and Conference, OSA Technical Digest (CD), paper SuF6 2008.
- [58] H. N. Klein, H. Chen, D. Hoffmann, S. Staroske, A. G. Steffan, K.-O. Velthaus: "1.55μm Mach-Zehnder Modulators on InP for optical 40/80 Gbit/s transmission networks," in Proc. IPRM 2006, pp. 171-173, May 2006.
- [59] Kelvin Prosyk et al, "Tunable InP-based Optical IQ Modulator for 160 Gb/s," in Proc. ECOC 2011, paper Th.13.A.5, Sep 2011, Switzerland.
- [60] R. Kaiser et al, "Monolithic Flip-Chip Compatible Twin-IQ Mach-Zehnder Modulators for Hybrid Assembly onto High Capacity Optical Transmitter Boards," in Proc. IPRM 2011, May 2011, Germany.
- [61] V. Katopodis, et al., "Integrated Transmitter for 100 Gb/s OOK Connectivity Based on Polymer Photonics and InP-DHBT Electronics," presented as PDP at ECOC 2012, Amsterdam The Netherlands, 16-20 September 2012, paper Th.3.B.4.
- [62] V. Katopodis, et al., "Serial 100 Gb/s connectivity based on polymer photonics and InP-DHBT electronics," Optics Express, vol. 20 (27), pp. 28538-28543, Dec 2012.
- [63] <http://www.gigoptix.com/products/17-tfps-mach-zehnder-modulators>
- [64] S. Corzine et al, "10-Channel x 40Gb/s per channel DQPSK monolithically integrated InP-based transmitter PIC," in Proc. OFC 2008, paper PDP18, Feb 2008, USA.
- [65] P. Evans et al, "Multi-Channel Coherent PM-QPSK InP Transmitter Photonic Integrated Circuit (PIC) Operating At 112 Gb/s Per Wavelength," in Proc. OFC 2011, paper PDPC7, Mar 2011, USA.
- [66] H. Takara, T. Goh, K. Shibahara, K. Yonenaga, S. Kawai and M. Jinno, "Experimental Demonstration of 400 Gb/s Multi-flow, Multirate, Multi-reach Optical Transmitter for Efficient Elastic Spectral Routing," in Proc. ECOC 2011, paper Tu.5.A.4, Sep 2011, Switzerland.

- [67] Eiichi Yamada et al, "112-Gb/s InP DP-QPSK Modulator Integrated with a Silica-PLC Polarization Multiplexing Circuit," in Proc. OFC 2012, paper PDP5A.9, Mar 2012, USA.
- [68] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Optical Networks, A Practical Perspective", Morgan Kaufmann, 1998.
- [69] http://www.ieee802.org/3/av/public/2007_03/3av_0703_anslow_1.pdf
- [70] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fibre Optics", 2nd ed., Academic Press, San Diego, 1995
- [71] IST OPTIMIST consortium: "Technology Trend Documents", January 2004 (www.ist-optimist.org)
- [72] M. Seimetz, High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission. Springer, 2009.
- [73] M. Fleming and A. Mooradian, "Spectral characteristics of external-cavity controlled semiconductor lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 17, no. 1, pp. 44-59, Jan 1981
- [74] W. Liang, V. S. Ilchenko, D. Eliyahu, A. A. Savchenkov, A. B. Matsko, D. Seidel, and L. Maleki, "Ultralow noise miniature external cavity semiconductor laser," Nature Communications, vol. 6, 2015.
- [75] J. C. Cartledge and G. S. Burley, "The effect of laser chirping on lightwave system performance," J. Lightw. Technol., vol. 7, no. 3, pp. 568-573, March 1989
- [76] A. Villafranca, J. Lasobras, and I. Garces, "Precise characterization of the frequency chirp in directly modulated DFB lasers," in Spanish Conference on Electron Devices, Jan 2007, pp. 173-176.
- [77] W. Kobayashi et al., "50-Gb/s Direct Modulation of a 1.3- μm InGaAlAs-Based DFB Laser With a Ridge Waveguide Structure," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 19, no. 4, pp. 1500908-1500908, July-Aug. 2013.
- [78] K. Nakahara, T. Tsuchiya, T. Kitatani, K. Shinoda, T. Taniguchi, T. Kikawa, M. Aoki, and M. Mukaikubo, "40-Gb/s Direct Modulation With High Extinction Ratio Operation of 1.3 μm InGaAlAs Multi-quantum Well Ridge Waveguide Distributed Feedback Lasers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 19, no. 19, pp. 1436-1438, Oct 2007.
- [79] G. L. Li and P. K. L. Yu, "Optical intensity modulators for digital and analog applications," J. Lightw. Technol., vol. 21, no. 9, pp. 2010-2030, Sept 2003.
- [80] M. Doi, M. Sugiyama, K. Tanaka, and M. Kawai, "Advanced LiNbO₃ optical modulators for broadband optical communications," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 12, no. 4, pp. 745-750, July 2006.
- [81] <https://www.neophotonics.com/coherent-ig-modulator-performance/>
- [82] https://www.oclaro.com/wp-content/uploads/2014/10/ECOC_2014_Oclaro_23Sept20142.pdf
- [83] P. M. Krummrich and K. Kotten, "Extremely fast (microsecond timescale) polarization changes in high speed long haul WDM transmission systems," in OFC/NFOEC, vol. 2, Feb 2004.
- [84] P. M. Krummrich, E. D. Schmidt, W. Weiershausen, and A. Mattheus, "Field trial results on statistics of fast polarization changes in long haul WDM transmission systems," in OFC/NFOEC, vol. 4, March 2005.
- [85] B. Koch, A. Hidayat, H. Zhang, V. Mirvoda, M. Lichtinger, D. Sandel, and R. Noe, "Optical Endless Polarization Stabilization at 9 krad/s With FPGA-Based Controller," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, no. 12, pp. 961-963, June 2008
- [86] D. H. Sim, H. Kim, and Y. C. Chung, "Direct-Detection Receiver for Polarization-Division-Multiplexed OOK Signals," J. Lightw. Technol., vol. 27, no. 21, pp. 2238-2241, Nov 2015.
- [87] K. Roberts, A. Borowiec, and C. Laperle, "Technologies for optical systems beyond 100G," Optical Fiber Technology, vol. 17, no. 5, pp. 387-394, 2011, 100G and Beyond.
- [88] S. J. Savory, "Compensation of fibre impairments in digital coherent systems," in ECOC, Sept 2008.
- [89] N. Kikuchi, E. Yamada, Y. Shibata, and H. Ishii, "High Speed InP-Based Mach Zehnder Modulator for Advanced Modulation Formats," in IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), Oct 2012.
- [90] K. Prosyk, A. Ait-Ouali, C. Bornholdt, T. Brast, M. Gruner, M. Hamacher, D. Hoffmann, R. Kaiser, R. Millett, K. O. Velthaus, and I. Woods, "High performance 40GHz InP Mach Zehnder modulator," in OFC/NFOEC, March 2012.
- [91] D. van den Borne, S. L. Jansen, E. Gottwald, P. M. Krummrich, G. D. Khoe, and H. de Waardt, "1.6-b/s/Hz Spectrally Efficient 40x85.6-Gb/s Transmission Over 1,700 km of SSMF Using POLMUX-RZ-DQPSK," in OFC/NFOEC, March 2006.
- [92] J. R. Barry and E. A. Lee, "Performance of coherent optical receivers," Proceedings of the IEEE, vol. 78, no. 8, pp. 1369-1394, Aug 1990.
- [93] M. Seimetz and C. M. Weinert, "Options, feasibility, and availability of 2 /spl times/ 4 90/spl deg/ hybrids for coherent optical systems," J. Lightw. Technol., vol. 24, no. 3, pp. 1317-1322, March 2006.
- [94] K. Kikuchi, T. Okoshi, M. Nagamatsu, and N. Henmi, "Degradation of bit-error rate in coherent optical communications due to spectral spread of the transmitter and the local oscillator," J. Lightw. Technol., vol. 2, no. 6, pp. 1024-1033, Dec 1984.
- [95] A. Davis, M. Pettitt, J. King, and S. Wright, "Phase diversity techniques for coherent optical receivers," J. Lightw. Technol., vol. 5, no. 4, pp. 561-572, Apr 1987.
- [96] Z. Zhang, et al., "M. Hybrid Photonic Integration on a Polymer Platform," Photonics 2015, 2, 1005-1026, mdpi
- [97] <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/2475919.PDF>
- [98] <https://www.infinera.com/technology/photonic-integrated-circuit-pic/>
- [99] <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780857095268>
- [100] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/polb.23432>

- [101] R. Dinu, et al., High-speed Polymer Optical Modulators, in: Ivan Kaminow, Tingye Li, Alan Willner (Eds.), Optical Fiber Telecommunications Volume VIA Components and Subsystems, 6th ed., Academic Press, Oxford, UK, 2013, pp. 175–204.
- [102] A. Yeniay, R. Gao, K. Takayama, R. Gao, and A. Garito, "Ultra low loss polymer waveguides," in Optical Fiber Communication Conference, Technical Digest (Optical Society of America, 2003), paper PD34.
- [103] Jae-Wook Kang; Jang-Joo Kim; Jinkyu Kim; Xiangdan Li; Myong-Hoon Lee, "Low-loss and thermally stable TE-mode selective polymer waveguide using photosensitive fluorinated polyimide," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 14, 9, Sep 2002.
- [104] L. Eldada and L. W. Shacklette, "Advances in Polymer Integrated Optics," J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 6, no. 1, 2000.
- [105] Liu Yang et al, "Compact 2x2 tapered multimode interference couplers based on SU-8 polymer rectangular waveguides," Appl. Phys. Lett. 93, 203304 (2008).
- [106] Min-Cheol Oh, Hyung-Jong Lee, Myung-Hyun Lee, Joo-Heon Ahn, Seon Gyu Han, and Hae-Guen Kim, "Tunable wavelength filters with Bragg gratings in polymer waveguides," Appl. Phys. Lett. 73, 2543 (1998)
- [107] H. Zou, K. W. Beeson, and L. W. Shacklette, "Tunable Planar Polymer Bragg Gratings Having Exceptionally Low Polarization Sensitivity," IEEE/OSA J. Lightw. Technol., vol. 21, no. 4, April 2003.
- [108] P. Rabiei, W. H. Steier, C. Zhang, and L. R. Dalton, "Polymer Micro-Ring Filters and Modulators," IEEE/OSA J. Lightw. Technol., vol. 20, no. 11, Nov. 2002.
- [109] J. Park, T. Lee, D. Lee, S. Kim, W. Hwang, Y. Chung, "Widely-tunable Coupled-Ring-Reflector Filter Based on Planar Polymer waveguide," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, 12, Jun 2008.
- [110] S.R. Nuccio et al., "Modulation and chirp characterization of 100 GHz EO polymer Mach-Zehnder modulator," in: Proceedings of the OFC/NFOEC'11, Los Angeles CA, March, 2011, JThA30.
- [111] N. G. Weimann et al., "InP DHBT circuits for 100 Gb/s Ethernet applications," 2008 20th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Versailles, 2008, pp. 1-4.
- [112] <https://www.businesswire.com/news/home/20090702005112/en/GigOptix-Announces-Sales-Polymer-Based-Optical-Modulators>
- [113] P. Groumas, et al., "Complex monolithic and InP hybrid integration on high bandwidth electro-optic polymer platform," Opt. Lett. 37, 3465-3467 (2012)
- [114] R. G. Hunsperger, A. Yariv, and A. Lee, "Parallel end-butt coupling for optical integrated circuits," Appl. Opt. 16, 1026-1032 (1977)
- [115] H. Avramopoulos et al., Passive and electro-optic polymer photonics and InP electronics integration for multi-flow Terabit transceivers at edge SDN switches and data-center gateways, in: Proceedings of the ICTON 2014, Graz, Austria, July, 2014, Article number 6876540.
- [116] Z. Zhang et al., Passive and electro-optic polymer photonics and InP electronics integration, in: Proceedings of the SPIE 9516, Integrated Optics: Physics and Simulations II, May 1, 951603, 2015.
- [117] N. Grote, N. Keil, C. Zawadzki, W. Brinker, D. de Felipe and Z. Zhang, "Polymer photonic integration platform: Technology and components," 2012 17th Opto-Electronics and Communications Conference, Busan, 2012, pp. 285-286.
- [118] H. G. Bach, R. Kunkel, G. G. Mekonnen, R. Zhang and D. Schmidt, "100 Gb/s photoreceivers for short- and long-haul optical communications," 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, 2012, pp. 1-2.
- [119] Felipe, Z. Zhang, W. Brinker, M. Kleinert, A. Maese-Novo, C. Zawadzki, M. Moehrle, N. Keil, Polymer-based external cavity lasers: tuning efficiency, reliability, and polarization diversity, IEEE Photon. Technol. Lett 26 (14) (2014) 1391–1394
- [120] Z. Zhang, D. Felipe, W. Brinker, M. Kleinert, A. Maese-Novo, C. Zawadzki, M. Moehrle, N. Keil, Bi-directional, crosstalk-suppressed, 40 nm wavelength tuneable colourless ONU on polymer platform, in: Proceedings of the 2014 European Conference on Optical Communication (ECOC 2014), paper Mo4.4.4, 21–25 Sept. 2014
- [121] Z. Zhang, D. Felipe, W. Brinker, M. Kleinert, A. Maese-Novo, C. Zawadzki, M. Moehrle, N. Keil, C/L-band colorless ONU based on polymer bidirectional optical subassembly, J. Lightw. Technol. 33 (2015) 1230–1234.
- [122] A. Maese-Novo, Z. Zhang, G. Irscher, A. Polatynski, T. Mueller, D. Felipe, M. Kleinert, W. Brinker, C. Zawadzki, N. Keil, Thermally optimized variable optical attenuators on a polymer platform, Appl. Opt. 54 (2015) 569–575
- [123] Z. Zhang, A. Maese Novo, E. Schwartz, C. Zawadzki, N. Keil, 301-nm wavelength tunable differentially driven all-polymer optical filter, Opt. Lett. 39 (17) (2014), 5170–5172.
- [124] Z. Zhang, D. Liu, D. Felipe, A. Liu, N. Keil, N. Grote, Polymer embedded silicon nitride thermally tunable Bragg grating filters, Appl. Phys. Lett. 102 (18) (2013), 181105.
- [125] A. Liu, Z. Zhang, D. Felipe, N. Keil, N. Grote, Power-efficient thermo-optic tunable filters based on polymeric waveguide Bragg gratings, IEEE Photon. Technol. Lett. 26 (3) (2014) 313–315
- [126] G. Coppola, L. Sirleto, I. Rendina, M. Iodice, Advance in thermo-optical switches: principles, materials, design, and device structure, Opt. Eng, 50 (7) (2011) 071112
- [127] Felipe, Z. Zhang, P. Groumas, F. Soares, W. Rehbein, N. Keil, N. Grote, "Widely tunable polymer waveguide grating laser," in: Proceedings of the 16th European Conference on Integrated Optics (ECIO 2012), paper TuPWGL

- [128] D. Felipe, C. Zawadzki, Z. Zhang, W. Brinker, H. Klein, M. Mohrle, N. Keil, N. Grote, M. Schell, "40 nm tuneable source for colourless ONUs based on dual hybridly integrated polymer waveguide grating lasers," in: Proceedings of the 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 2013, pp. 189–191.
- [129] D. Liu, Z. Zhang, N. Keil, N. Grote, "Thermally tunable silicon nitride sampled gratings in polymer," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 25 (17) (2013), 1734–1736
- [130] M. Moehrle, W. Brinker, C. Wagner, G. Przyrembel, A. Sigmund, W. Molzow, "First complex coupled 1490 nm csdfb lasers: high yield, low feedback sensitivity, and uncooled 10 gb/s modulation," in: Proceedings of the 35th European Conference on Optical Communications (ECOC), Paper 8.1.2, 2009.
- [131] Q. Fang, J. Song, Z. Gang, M. Yu, Y. Liu, G.-Q. Lo, D.-L. Kwong, "Monolithic integration of a multiplexer/demultiplexer with a thermo-optic VOA array on an SOI platform," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 21 (5) (2009) 319–321
- [132] P. Runge, S. Schubert, A. Seeger, K. Janiak, J. Stephan, D. Trommer, M.L. Nielsen, "Monolithic InP receiver chip with a variable optical attenuator for colorless WDM detection," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 26 (4) (2014) 349–351
- [133] S.S. Lee, Y.S. Jin, Y.S. Son, T.K. Yoo, "Polymeric tunable optical attenuator with an optical monitoring tap for WDM transmission network," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 11 (5) (1999) 590–592
- [134] L. Eldada, R. Norwood, R. Blomquist, L. W. Shacklette and M. J. McFarland, "Thermo-optically active polymeric photonic components," *Optical Fiber Communication Conference. Technical Digest Postconference Edition. Trends in Optics and Photonics Vol.37* (IEEE Cat. No. 00CH37079), Baltimore, MD, USA, 2000, pp. 124-126 vol.2.
- [135] X. Jiang, X. Li, H. Zhou, J. Yang, M. Wang, Y. Wu, S. Ishikawa, "Compact variable optical attenuator based on multimode interference coupler," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 17 (11) (2005) 2361–2363.
- [136] J. Sun, X. Wang, J. Sun, X. Sun, C. Chen, F. Wang, D. Zhang, "Fabrication of polymer variable optical attenuator with ultra-low power consumption," *Mod. Phys. Lett. B* 28 (14) (2014) 1450113–1450120
- [137] A. Maese-Novo, Z. Zhang, G. Irmscher, A. Polatynski, T. Mueller, D. Felipe, M. Kleinert, W. Brinker, C. Zawadzki, N. Keil, "Thermally optimized variable optical attenuators on a polymer platform," *Appl. Opt.* 54 (2015) 569–575.
- [138] H. Huang, S.R. Nuccio, Y. Yue, J.-Y. Yang, Y. Ren, C. Wei, G. Yu, R. Dinu, D. Parekh, C.J. Chang-Hasnain, A.E. Willner, "Broadband modulation performance of 100 GHz EO Polymer MZMs," *IEEE J. Lightw. Technol.* 30 (2012) 3647.
- [139] P. Groumas, et al., "Multi-100 GbE and 400 GbE interfaces for intra-data center networks based on arrayed transceivers with serial 100 Gb/s operation," *IEEE J. Lightw. Technol.* 33 (2015) 943–954
- [140] U. Siebel, R. Hauffe, J. Bruns, K. Petermann, "Polymer digital optical switch with an integrated attenuator," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 13 (9) (2001) 957–959.
- [141] Y.T. Han, J.U. Shin, S.H. Park, H.J. Lee, W.Y. Hwang, H.H. Park, Y. Baek, "NxN polymer matrix switches using thermo-optic total-internal-reflection switch," *Opt. Express* 20 (2012) 13284–13295.
- [142] D. Sukanuma, T. Ishigure, "Fan-in/out polymer optical waveguide for a multicore fiber fabricated using the Mosquito method," in: Proceedings of SPIE 9366, Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XVII, 2015, 93660J

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Απαιτήσεις Οπτικών Πομποδεκτών για Υποστήριξη Υπερ-Υψηλών Οπτικών Διασυνδέσεων Εντός και Μεταξύ Υπολογιστικών Κέντρων

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση των οπτικών πομποδεκτών που απαιτούνται από τις σύγχρονες υποδομές των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων καθώς το ζητούμενο λόγω των υψηλών και συνάμα απαιτητικών συνδέσεων έγκειται στον τρόπο και στο είδος των διασυνδέσεων των υπολογιστικών συστημάτων τόσο εντός όσο και μεταξύ των υπολογιστικών κέντρων. Παράλληλα, η συνεχόμενη αυξανόμενη ζήτηση κυκλοφορίας τόσο από τους χρήστες όσο και τις επιχειρήσεις σε συνδυασμό με τον αριθμό των εφαρμογών που εξαπλώνονται ραγδαία ακολουθώντας μη γραμμική τάση οδηγούν υποχρεωτικά στην χρήση υψίρρυθμων οπτικών πομποδεκτών καθώς μόνο μέσω των οπτικών συνδέσεων δίνεται η δυνατότητα να καλυφθούν όλες οι προαναφερθείσες ανάγκες. Κατά συνέπεια, η ραγδαία εξάπλωση και η αύξηση των υπολογιστικών κέντρων παγκοσμίως ανάδειξε και ανέπτυξε τάχιστα τις οπτικές επικοινωνίες δικτύωσης χωρίζοντάς τες σε δύο διαφορετικές κατηγορίες καταμεμημένες ως προς την απόσταση των διασυνδέσεων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στην αρχή του κεφαλαίου γίνεται μια παρουσίαση της έννοιας και της δομής των υπολογιστικών κέντρων, δίνοντας έμφαση τόσο στα παραδοσιακά υπολογιστικά κέντρα όσο και στα υπολογιστικά κέντρα «σύννεφου» (Cloud), τα οποία στηρίζονται στις υπηρεσίες «εικονοποίησης» (virtualization) μηχανής και επιτραπέζιων συστημάτων. Έχοντας αναλύσει αυτές τις έννοιες βάση των οποίων καθορίζεται η κίνηση των δεδομένων, περιγράφεται στη συνέχεια το διάγραμμα του παγκόσμιου δικτύου τηλεπικοινωνιών, εστιάζοντας στην ποικιλομορφία των τμημάτων του δικτύου. Κάθε τμήμα υιοθετεί την τεχνολογική λύση που ταιριάζει καλύτερα στις απαιτήσεις μοναδικού εύρους ζώνης ανά απόσταση. Για να μπορέσει να εξυπηρετηθεί τόσο η κίνηση μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων του τηλεπικοινωνιακού δικτύου όσο και η ίδια η κίνηση απαιτούνται οπτικές διασυνδέσεις, οι οποίες υποστηρίζουν υψηλές χωρητικότητες. Αυτές οι οπτικές διασυνδέσεις διαχωρίζονται συνεπώς σε αυτές εντός των υπολογιστικών κέντρων με μέγιστη απόσταση μετάδοσης έως 4 km [143] και στις διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων όπου η απόσταση ποικίλει ανάλογα με τα τμήματα του δικτύου, καθώς γίνεται εφικτή η δυνατότητα μέχρι και της διασύνδεσης υπολογιστικών κέντρων που εντοπίζονται σε διαφορετικές ηπείρους της υφηγίου (απόσταση > 5000 km) [143].

Όπως είναι λογικό, αυτές οι οπτικές διασυνδέσεις διαφέρουν άρδην λόγω του γεγονότος ότι σε κάθε μια από τις δύο κύριες κατηγορίες εντοπίζονται διαφορετικές απαιτήσεις που σχετίζονται με τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, το μέγεθος, την κατανάλωση, τον αριθμό των μηκών κύματος και φυσικά με το είδος της αρχιτεκτονικής όπου πρέπει να ενταχθούν. Παράλληλα, αναλύονται οι τάσεις των αναγκών σε εύρος ζώνης και η προβλεπόμενη εξέλιξη του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις ιδιότητες που αφορούν ελαστικές λειτουργίες όσο και την τρέχουσα κατάσταση καταλήγοντας σε ένα μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο σενάριο κυκλοφορίας των δεδομένων. Επίσης, αναλύονται οι αρχιτεκτονικές δικτύωσης για τις υψίρρυθμες οπτικές διασυνδέσεις εντός καθώς και μεταξύ ομόσπονδων όσο και παγκόσμιων υπολογιστικών κέντρων, πράγμα που συνεπάγεται την ανάλυση των ειδών των υπαρχόντων οπτικών πομποδεκτών. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζονται οι τρεις κυριότερες διαφορετικές τεχνικές μεταγωγής που συναντώνται για την διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων των υπολογιστικών κέντρων και σχετίζονται με την οπτική μεταγωγή κυκλώματος (optical circuit switching, OCS), την ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων (electronic packet switching, EPS) και την οπτική μεταγωγή πακέτων (optical packet switching, OPS).

2.2 Τάσεις στην Εξέλιξη των Υπολογιστικών Κέντρων

Σήμερα, η δομή ενός υπολογιστικού κέντρου [144] εμπεριέχει δεκάδες χιλιάδες πανομοιότυπους εξυπηρετητές (servers) διατεταγμένους σε μία ή περισσότερες συστάδες όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1. Ένα σύμπλεγμα αποτελείται από πολλαπλά ράφια (racks), καθένα με 20-40 servers που συνδέονται με ένα rack μεταγωγής (rack switch). Οι συστάδες δικτυώνονται περαιτέρω μέσω των στρωμάτων των συμπλεγμένων μεταγωγέων συσσωμάτωσης (cluster aggregation switches), οι οποίοι στη συνέχεια συνδέονται με τους δρομολογητές (routers) των υπολογιστικών κέντρων. Οι δρομολογητές αυτοί κατ' επέκταση επικοινωνούν με το υπόλοιπο Διαδίκτυο μέσω διαδικτυακών σημείων παρουσίας (points of

presence, POPs), όπου η κυκλοφορία μεταφέρεται από τα δίκτυα των υπολογιστικών κέντρων προς τους τελικούς χρήστες και αντίστροφα. Επομένως, τα σύμφωνα WDM συστήματα μεγάλων αποστάσεων παρέχουν τη συνδεσιμότητα μεταξύ των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων και των πληθυσμιακών κέντρων σε διάφορες μητροπολιτικές περιοχές, ενώ οι οπτικές διασυνδέσεις των υπολογιστικών συστημάτων στηρίζονται κυρίως σε απλά σχήματα διαμόρφωσης κατά πλάτος με χρήση από ένα μόνο μήκος κύματος μέχρι μερικά ανάλογα με το πρότυπο που χρησιμοποιείται. Οι μητροπολιτικές WDM συνδέσεις οπτικής μεταφοράς χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων και των διαδικτυακών σημείων παρουσίας που βρίσκονται εντός της ίδιας μητροπολιτικής περιοχής. Ένα κέντρο δεδομένων (ονομάζεται ακόμα φάρμα από servers) είναι ένας κεντρικός χώρος εναπόθεσης για την αποθήκευση, διαχείριση και διάδοση δεδομένων και πληροφοριών. Τυπικά, ένα υπολογιστικό κέντρο δεδομένων είναι μια εγκατάσταση που χρησιμοποιείται για να στεγάσει συστήματα υπολογιστών και τα σχετικά εξαρτήματα, όπως τηλεπικοινωνίες και τα συστήματα αποθήκευσης. Συχνά υπάρχουν περίσσια ή εφεδρική τροφοδοσία, περίσσιες συνδέσεις επικοινωνίας δεδομένων, περιβαλλοντικοί έλεγχοι, καθώς και συσκευές ασφαλείας.

Ένα βασικό πλεονέκτημα σε ένα υπολογιστικό κέντρο δεδομένων είναι ότι οι φυσικές μονάδες των σκληρών δίσκων αποθήκευσης οργανώνονται σε δεξαμενές αποθήκευσης, από τις οποίες δημιουργείται μια "λογική αποθήκη". Η ετερογένεια των περισσότερων συστημάτων αποθήκευσης επιτρέπει την αποθήκευση του υλικού πολλών διαφορετικών προμηθευτών που πρέπει να προστεθεί στο σύστημα με ελάχιστη ή ασήμαντη επίδραση (εκτός από το πρόσθετο χώρο αποθήκευσης). Ένα από τα μεγαλύτερα οφέλη της αποθήκευσης-εικονικοποίησης (virtualization) - εκτός από τα προφανή, όπως η κεντρική δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας και η ανάγκη για λιγότερους σκληρούς δίσκους συνολικά - είναι το γεγονός ότι τα δεδομένα μπορούν να αναπαραχθούν ή να μετεγκατασταθούν σε άλλη θέση με διαφάνεια στο server χρησιμοποιώντας το λογικό σημείο αποθήκευσης (logical storage point). Ένα άλλο βασικό σημείο, όχι τόσο λαμπερό ή "hi-tech", είναι η ενοποίηση όλων των πόρων της εγκατάστασης, όπως HVAC, ηλεκτρικές καλωδιώσεις, συνδέσεις δικτύου, hardware, software, και προσωπικό (personal).

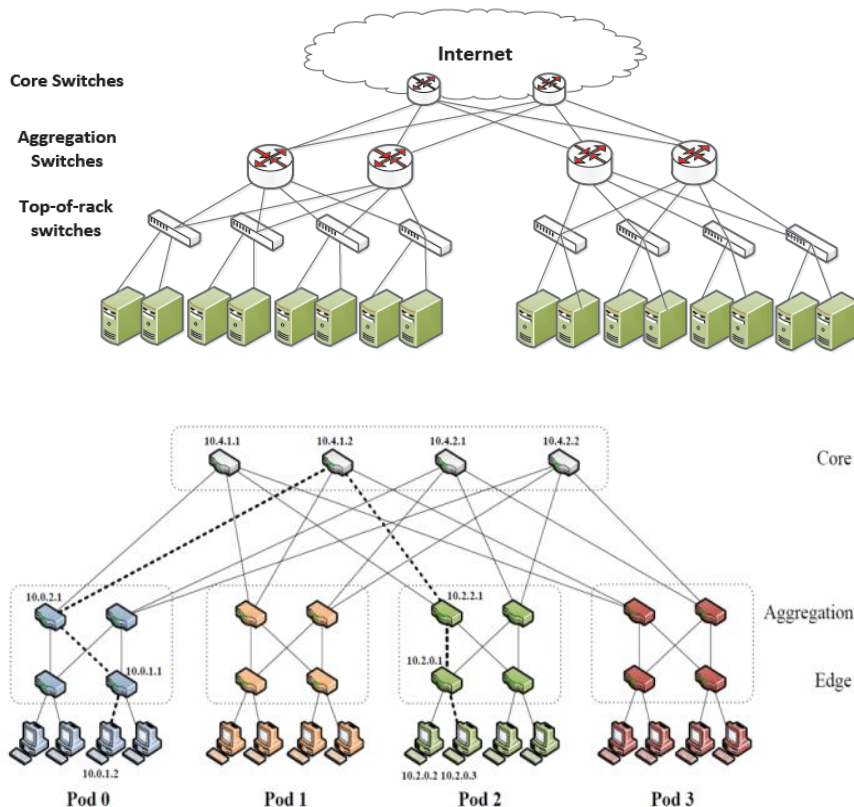
Τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα παραδοσιακά κέντρα δεδομένων, που είναι αποθετήριο των δεδομένων των πελατών ή των περιεχομένων έτοιμα να παραδοθούν στους χρήστες, και το κέντρο δεδομένων «σύννεφου» (Cloud) που περιλαμβάνει επίσης υπηρεσίες virtualization μηχανής/επιτραπέζιων συστημάτων (δηλαδή υπηρεσίες για την εφαρμογή της έννοιας του λογισμικού «σαν υπηρεσία» (As a Service)). Αξιοποιώντας την υπολογιστική ικανότητα για λογαριασμό τρίτων μέσω του δικτύου είναι ένας καλός τρόπος για να μειωθεί το κόστος, να αυξηθεί η κλίμακα, και να βελτιωθεί η ευελιξία. Η έννοια του cloud computing περιλαμβάνει ένα κέντρο δεδομένων κάπου στον κόσμο, ή ακόμα και πολλαπλά κέντρα δεδομένων διάσπαρτα σε όλο τον κόσμο [145], αποτελώντας ένα παράδειγμα στροφής από την ιστορική αρχιτεκτονική client-server, όπου οι χρήστες του δικτύου ανήκουν, συντηρούν και χρησιμοποιούν τη δική τους υποδομή δικτύου, τα δωμάτια των servers, τους διακομιστές δεδομένων και των εφαρμογών.

Η τεράστια κατανάλωση ενέργειας των κέντρων δεδομένων που παρέχουν υπηρεσίες cloud μέσω του διαδικτύου έχει υποκινήσει διάφορες μελέτες σχετικά με την εξοικονόμηση κόστους σε κέντρα δεδομένων. Ομοσπονδιακά κέντρα δεδομένων μπορούν να επωφεληθούν από τη γεωγραφικά κατανομημένη υποδομή τους μέσω της κατάλληλης διαχείρισης των πόρων της πράσινης ενέργειας διαθέσιμοι σε κάθε υπολογιστικό κέντρο σε μια δεδομένη στιγμή, σε συνδυασμό με την ενοποίηση του φόρτου εργασίας και με τις πολιτικές δημιουργίας εικονικών μηχανών. Η έλευση του virtualization των μεγάλων, διαμοιρασμένων συμπλεγμάτων των υπολογιστικών και αποθηκευτικών υποδομών έχει αυξήσει σε μεγάλο βαθμό τη σημασία των ροών κυκλοφορίας με κατεύθυνση «ανατολικά-δυτικά» μέσα σε ένα κέντρο δεδομένων, οδηγώντας σε σημαντική αλλαγή των μοτίβων κυκλοφορίας και των αντίστοιχων αρχιτεκτονικών δικτύωσης μεταξύ υπολογιστικών κέντρων. Παράλληλα, η επέκταση της διαθεσιμότητας γρηγορότερης, αξιόπιστης συνδεσιμότητας ευρυζωνικού δικτύου έχει επιφέρει ένα ισχυρό πολλαπλασιασμό των εφαρμογών που βασίζονται στα κέντρα δεδομένων μέσω ενός μοντέλου παροχής διαδικτυακών υπηρεσιών, που συλλογικά αναφέρονται ως υπηρεσίες "σύννεφου" (cloud). Οι αρχιτεκτονικές δικτύωσης μεταξύ υπολογιστικών κέντρων έχουν επίσης εξελιχθεί για να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις παροχής υπηρεσιών cloud. Εκτιμάται ότι περίπου το 70% της κυκλοφορίας σε ένα υπολογιστικό κέντρο δεδομένων cloud αφορά την κυκλοφορία κατεύθυνσης ανατολικά-δυτικά, ενώ περίπου το 80% της κυκλοφορίας σε ένα παραδοσιακό κέντρο δεδομένων αφορά τη διασύνδεση βορρά-νότου.

Τι προκαλεί όμως αυτές τις αλλαγές στο μοντέλο της κυκλοφορίας; Παραδοσιακά κέντρα δεδομένων παρέχουν κυρίως πρόσβαση σε εξωτερικούς χρήστες, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο ποσοστό της κυκλοφορίας να κινείται στην κατεύθυνση «Βορρά-Νότου». Με βάση τον τρόπο που παρέχονται οι υπηρεσίες και τα συνολικά όρια του εύρους ζώνης εξόδου, το εύρος ζώνης κατανέμεται σε κάθε στρώμα-επίπεδο με αναλογία σύγκλισης μεταξύ των στρωμάτων. Το εύρος ζώνης επί του στρώματος πρόσβασης είναι συνήθως αρκετές φορές μεγαλύτερο από το στρώμα συσσωμάτωσης ή το στρώμα του πυρήνα. Η κοινή αναλογία σύγκλισης εύρος ζώνης κυμαίνεται από 1:3 έως 1:20.

Για τη βελτιστοποίηση γύρω από τις αυξημένες ροές κυκλοφορίας «Ανατολής-Δύσης» μέσα σε ένα κέντρο δεδομένων που προκύπτουν από την κινητικότητα του φόρτου εργασίας της εικονικής μηχανής, η αρχιτεκτονική του υπολογιστικού κέντρου δεδομένων έχει εξελιχθεί μέσω της χρήσης περισσότερων πυκνών διασυνδεδεμένων μεταγωγέων, που συνήθως αναφέρεται ως σχεδίαση "φύλλου σπονδυλικής στήλης" (spine leaf), και "χονδρού δένδρου" (fat tree) (βλέπε εικόνα 2.1 πάνω). Αυτή είναι μια σημαντική μετατόπιση της αρχιτεκτονικής σε σχέση με τις παραδοσιακές, πολύ περισσότερο ιεραρχικές, σχεδιάσεις δικτύωσης εντός υπολογιστικών κέντρων, που συνήθως απασχολούν ένα στρώμα πρόσβασης, ένα συνάθροισης, και ένα στρώμα πυρήνα, τα οποία θεωρούνται κατάλληλα για τη σύνδεση «Βορρά-Νότου» απευθείας μεταξύ των υπολογιστικών πόρων και των τελικών χρηστών [146].

Πιο συγκεκριμένα, στο δίκτυο τύπου fat-tree, το εύρος ζώνης ανερχόμενης ζεύξης (uplink) και το εύρος ζώνης κατερχόμενης ζεύξης (downlink) σε όλους τους κόμβους εκτός της βάσης είναι το ίδιο. Κάθε κόμβος στο δέντρο έχει μια ικανότητα προώθησης της ταχύτητας γραμμής. Τα χαμηλότερα στρώματα - συνάθροισης (aggregation) και άκρων (edge)- μαζί με τους servers οργανώνονται σε έναν αριθμό M συστάδων. Σε κάθε μία από αυτές τις συστάδες, οι μεταγωγείς έχουν M διασυνδέσεις που δραστηριοποιούνται στον ίδιο ρυθμό μετάδοσης. Κατ' επέκταση, κάθε συστάδα έχει M/2 διακόπτες άκρων και M/2 διακόπτες συνάθροισης, όλες με M θύρες. Αυτό αποτελεί ένα διμερές γράφημα συνδέοντας κάθε μεταγωγέα άκρων σε κάθε μεταγωγέα συνάθροισης. Αντίθετα, σε κάθε μεταγωγέα άκρων, οι M/2 θύρες συνδέονται άμεσα με τους servers και οι άλλες θύρες M/2 συνδέονται με τις M/2 θύρες των μεταγωγέων συνάθροισης. Έτσι, κάθε συστάδα έχει M/4 servers και υπάρχουν M³/4 servers συνολικά στο υπολογιστικό κέντρο. Επίσης, υπάρχουν μεταγωγείς πυρήνα με (M/2)² M-θύρες, όπου καθένας από αυτούς έχει μια θύρα που συνδέεται με κάθε συστάδα, ενώ κάθε συστάδα αντίστοιχα είναι συνδεδεμένη με κάθε μεταγωγέα πυρήνα. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται μια αναπαράσταση μιας αρχιτεκτονικής fat



Εικόνα 2.1: Παραδοσιακές (πάνω) και cloud (κάτω) αρχιτεκτονικές υπολογιστικών συστημάτων.

tree με $M=4$, όπου υπάρχουν 4 συστάδες με τέσσερις servers, δύο μεταγωγείς άκρων και δύο μεταγωγείς συνάθροισης καθένας, με 16 servers, 8 μεταγωγείς άκρων, 8 μεταγωγείς συνάθροισης και 4 μεταγωγείς πυρήνα συνολικά.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το cloud computing έχει επιφέρει αύξηση της ζήτησης σε ποικίλες υπηρεσίες καθώς και ένα υψηλό όγκο κυκλοφορίας των υπηρεσιών. Αυτή η αύξηση της ζήτησης έχει μεγάλη επίδραση στο μοντέλο κυκλοφορίας του data center. Εφαρμογές όπως η αναζήτηση και η παράλληλη υπολογιστική ικανότητα απαιτούν πολλαπλούς servers για να συνεργαστούν και αυτό αυξάνει την κυκλοφορία μεταξύ των servers. Χαρακτηριστικότερα, στον πίνακα 2 και στον πίνακα 3, παρουσιάζονται ο αριθμός των στοιχείων του δικτύου και οι διεπαφές για διαφορετική τιμή της παραμέτρου M . Ο πίνακα 2 αναφέρει δεδομένα καθορισμένα ανά server, ενώ ο πίνακας 3 εκθέτει δεδομένα για το σύνολο του data center. Στους πίνακες η αποθηκευτική ικανότητα του κάθε server υπολογίζεται σε 10 Tb.

Πίνακας 2: Αριθμός των servers, μεταγωγέων και διασυνδέσεων σε κάθε cluster του υπολογιστικού κέντρου τύπου fat-three.

M	per cluster				per core switch
M=num. clusters	edge/aggr. switch Itf.	servers	Storage cap. [Tbyte]	edge/aggreg. switches	core Itf.
2	4	4	40.0	2	2
4	8	16	160.0	8	4
6	12	36	360.0	18	6
8	16	64	640.0	32	8
10	20	100	1,000.0	50	10
20	40	400	4,000.0	200	20
40	80	1,600	16,000.0	800	40
60	120	3,600	36,000.0	1,800	60
80	160	6,400	64,000.0	3,200	80
100	200	10,000	100,000.0	5,000	100

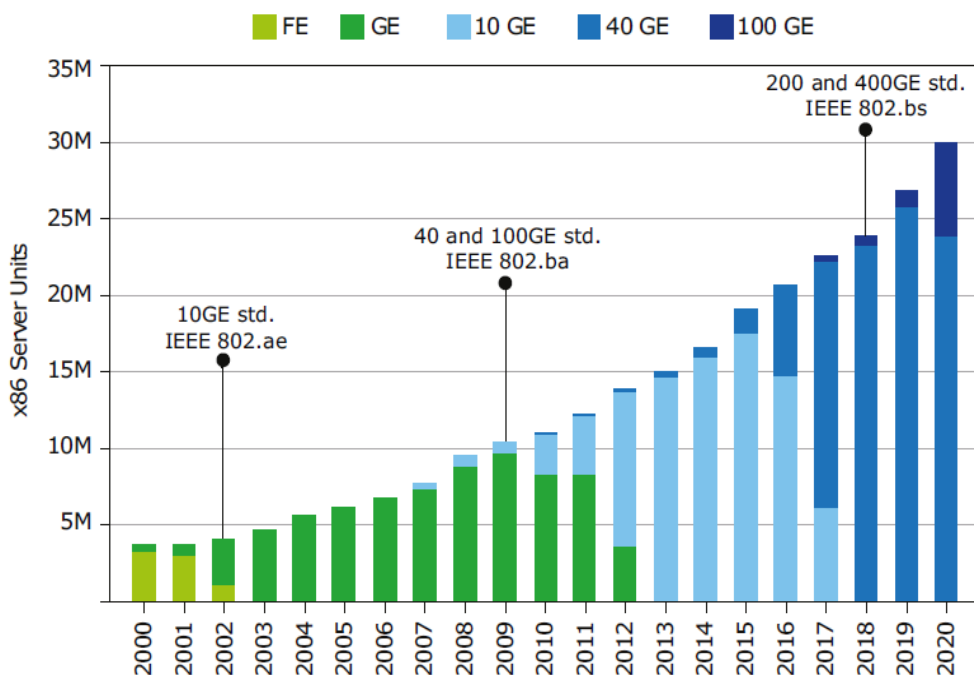
Πίνακας 3: Συνολικός Αριθμός των servers, μεταγωγέων και διασυνδέσεων σε ένα υπολογιστικό κέντρο.

M	Total						
M=num. clusters	edge/aggr. Itf.	core itf	servers	Storage cap. [Pbyte]	edge switches	aggreg. switches	core switch
2	8	4	8	0.1	4	4	2
4	32	16	64	0.6	32	32	4
6	72	36	216	2.2	108	108	6
8	128	64	512	5.1	256	256	8
10	200	100	1000	10.0	500	500	10
20	800	400	8000	80.0	4000	4000	20
40	3200	1600	64000	640.0	32000	32000	40
60	7200	3600	216000	2,160.0	108000	108000	60
80	12800	6400	512000	5,120.0	256000	256000	80
100	20000	10000	1000000	10,000.0	500000	500000	100

Ως εκ τούτου όμως, οι πολύπλοκες και συνεχώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις υπηρεσιών καθιστούν δύσκολη την πρόβλεψη της κυκλοφορίας στους servers ή τον σχεδιασμό του εύρους ζώνης του δικτύου. Διαδικασίες, όπως η δυναμική εικονική μετακίνηση της εικονικής μηχανής επιφέρει πολυπλοκότητα και μεγαλύτερο όγκο της κυκλοφορίας «Ανατολής-Δύσης», με αποτέλεσμα τα παραδοσιακά δίκτυα υπολογιστικών κέντρων δεδομένων να μην είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις αυτού του νέου μοντέλου κυκλοφορίας. Ένα cloud υπολογιστικό κέντρο δεδομένων χρειάζεται ένα μη φραγμένο δίκτυο για μετάδοση γραμμής της κυκλοφορίας μεταξύ των servers εντός του κέντρου δεδομένων. Γι αυτό το λόγο, προτιμάται η επίπεδη μεταγωγή ενοποιημένων ιστών Clos των σχεδιάσεων "fat tree", η οποία επιτρέπει στη χωρητικότητα να προσαρμοστεί γρήγορα, με μεγαλύτερη διαχειριστικότητα, χρησιμοποιώντας τις αρχές των ευφυή προγραμματιζόμενων δικτύων (software-defined networking, SDN) [147], μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο το λειτουργικό κόστος (OpEx), και επιτυγχάνοντας επίσης πιο βέλτιστη απόδοση, ειδικά σε σχέση με την καθυστέρηση μετάδοσης (latency).

Την ίδια στιγμή, οι απαιτήσεις εύρους ζώνης των διεπαφών του server έχει επίσης αυξηθεί από 1 GE σε 10 GE, και πλέον αγγίζει 40 GE, με αποτέλεσμα η εξέλιξη αυτής της αρχιτεκτονικής διασύνδεσης μεταξύ υπολογιστικών κέντρων να συνδυαστεί με τις νέες απαιτήσεις για συστήματα δικτύωσης εντός υπολογιστικών κέντρων με μεγαλύτερη χωρητικότητα και υψηλότερη πυκνότητα θυρών. Επιπλέον, οι υψηλότερες δικτυωτές τοπολογίες της νέας αρχιτεκτονικής εντός υπολογιστικών κέντρων που βασίζεται σε Clos/Fat tree απαιτούν επίσης ένα πολύ μεγαλύτερο αριθμό συνδέσεων με μεγαλύτερη διακύμανση στην απόσταση διασύνδεσης. Οι οπτικές διασυνδέσεις προσφέρουν την πιο αποδοτική και συνάμα χαμηλότερης ισχύς (εξού και υψηλότερη πυκνότητα) λύση για τέτοιες συνδέσεις [148], με την παράλληλη οπτική να έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην επικοινωνία των συστημάτων εντός υπολογιστικών κέντρων. Η συγκεκριμένη τεχνική-σχεδίαση εκμεταλλεύεται το χαμηλό κόστος και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας των οπτικών πομποδεκτών, μαζί με το φυσικό παραλληλισμό των γραμμών δεδομένων στην αρχιτεκτονική υπολογιστών και με την αποθήκευση κλιμακωτού αριθμού υπολογιστικών συστημάτων (κλιμακωτή αποθήκευση υπολογιστών). Επιπλέον, ο ρυθμός μετάδοσης του ηλεκτρικού σήματος ευθυγραμμίζει απόλυτα με το ρυθμό μετάδοσης του οπτικού σήματος, γιατί δεν απαιτούνται ακριβοί και ενεργειακά ασύμφοροι SerDes ή Gear-boxes για τη μετατροπή του ρυθμού δεδομένων.

Ως αποτέλεσμα, η φωτονική-οπτική έχει καταστεί σταδιακά η κύρια τεχνολογία διασύνδεσης υψηλής χωρητικότητας, για συνδέσεις μεγαλύτερων αποστάσεων (>10 km) και έτσι είναι ένας κρίσιμος παράγοντας όσον αφορά το κόστος της ενοποίησης των υπολογιστικών κέντρων. Ακόμα κι έτσι, όμως, η λειτουργία σε ρυθμούς 40/100 GE παραμένει πρόκληση ώστε να ανταποκριθεί στη δυνατή απόσταση των ήδη υλοποιημένων εγκαταστάσεων 10 GE, ιδίως μέσω πολύτροπων οπτικών ινών (multimode fiber, MMF) [ref]. Η χρήση των μονότροπων ινών (single-mode fiber, SMF) [149] στις οπτικές διασυνδέσεις εξετάζεται όλο και περισσότερο, έχοντας βέβαια ως αντίκτυπο το απαγορευτικά υψηλό κόστος πομπού με χρήση μονότροπης ίνας. Για την αναβάθμιση περαιτέρω της πυκνότητας και της επίτευξης υψηλότερου ρυθμού δεδομένων, ένα κύκλωμα φωτονικής ολοκλήρωσης (PIC) που χρησιμοποιεί είτε πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM) ή ενσωματωμένα φωτονικά κυκλώματα είναι αναπόφευκτο [150]. Οι πρόσφατες εξελίξεις στη φωτονική τεχνολογία πυριτίου έχουν προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη νέα εναλλακτική λύση για την οπτική διασύνδεση με χαμηλότερη ισχύ, υψηλότερη πυκνότητα, και χαμηλότερο κόστος σε υψηλή κλίμακα. Βραχυπρόθεσμα, 40 και 100 GE αναμένεται να ηγηθούν στην αγορά Ethernet, ενώ οι πάροχοι εξοπλισμού και υπηρεσιών ετοιμάζονται για το άλμα σε 100 GE, το οποίο έχει ήδη αρχίσει να συμβαίνει. Η αλλαγή σε 100 GE προκαλεί μια αιφνίδια διακοπή σε αυτό που αφορά τον βασικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, αφού ο πιο δημοφιλής τρόπος εφαρμογής του 100 GE βασίζεται στη μεταφορά 4 γραμμών 25 Gb/s.

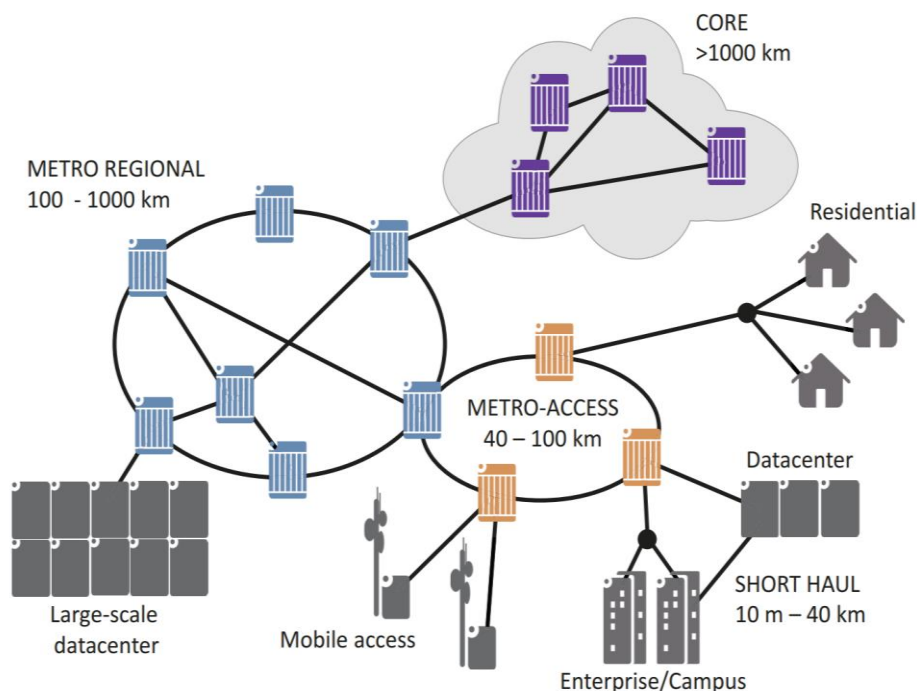


Εικόνα 2.2: Η εξέλιξη του ρυθμού δεδομένων εισόδου/εξόδου (Input/Output) και η έγκριση των προτύπων Ethernet [151].

Παρ' όλα αυτά, όταν το 100 GE τυποποιήθηκε το 2009, δεν υπήρχαν τυποποιημένα πρότυπα συνδέσεων μονής γραμμής 25 Gb/s. Έτσι, το 2014 μια ομάδα αποτελούμενη από τους ισχυρότερους προμηθευτές εξοπλισμού και παρόχους υπηρεσιών (π.χ. Google, Microsoft, Broadcom, Arista και Mellanox) δημιούργησαν μια κοινοπραξία για την προώθηση της τυποποίησης των 25 GE [152], το πρότυπο το οποίο εγκρίθηκε πολύ γρήγορα τον Ιούνιο 2016 [153]. 25 Gb/s αναμένεται να αντικαταστήσει τους ρυθμούς μετάδοσης 10 Gb/s σε όλα τα επίπεδα των κέντρων δεδομένων: ξεκινώντας από ανώτερα επίπεδα, χρησιμοποιώντας 100 GE (4×25 Gb/s) αντί 40 GE (4×10 Gb/s) και προς τα κάτω στους διακομιστές, υποστηρίζοντας 25 GE αντί 10 GE [154]. Παρακινούμενη από την ασταμάτητη αύξηση της κυκλοφορίας, η IEEE ήδη καθορίζει νέα πρότυπα για την υποστήριξη 50 Gb/s σε μία γραμμή και σε πολλαπλές γραμμές 200 και 400 GE, οι οποίες αναμένονται να εγκριθούν το 2018 [155,156].

Από την άλλη πλευρά όμως, για να διατηρηθεί η κλιμάκωση της ταχύτητας μετάδοσης ×4 και ×10, νέες τεχνολογίες απαιτούνται στις μονάδες των πομποδεκτών. Παραδείγματα αυτών των τεχνολογιών περιλαμβάνουν ηλεκτρονική αντιστάθμιση της διασποράς, ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα χαμηλής ισχύος, και νέα σχήματα διαμόρφωσης του οπτικού σήματος. Μια εξίσου σημαντική, ακόμα λιγότερο ευρέως εξετασμένη, καινοτομία έχει ήδη λάβει χώρα στις τεχνολογίες δικτύωσης και αρχιτεκτονικές για επικοινωνίες μεταξύ υπολογιστικών κέντρων. Αρχικά, η συνδεσιμότητα μεταξύ υπολογιστικών κέντρων έχει ως επί το πλείστον απασχολήσει το πρωτόκολλο SONET/SDH, και στη συνέχεια τις μητροπολιτικές ζεύξεις DWDM. Η πρόσφατη ισχυρή εμφάνιση των cloud υπηρεσιών, όμως, έχει οδηγήσει σε σημαντικά πιο εξελιγμένες απαιτήσεις διασύνδεσης μεταξύ υπολογιστικών κέντρων. Η πρώτη σημαντική αλλαγή είναι ότι η συνδεσιμότητα των υπολογιστικών κέντρων με «τελικούς χρήστες», είτε από καταναλωτές ή επιχειρήσεις, πρέπει τώρα να αναβαθμιστεί σημαντικά ως προς τη χωρητικότητα, και ακόμα περισσότερο ως προς την ευελιξία. Αυτό έχει οδηγήσει περισσότερο τη συνδεσιμότητα μεταξύ υπολογιστικών κέντρων να βασίζεται στο IP/MPLS.

Παράλληλα, θα πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο, ότι οι σύμφωνοι πομποδέκτες είναι ικανοί να μεταδίδουν 100 έως 500 Gb/s ανά κανάλι μήκους κύματος σε χιλιάδες/εκατοντάδες χιλιόμετρα. Λόγω της μεγάλης χωρητικότητάς τους και της μεγάλης εμβέλειας χρήσης τους, τα οπτικά συστήματα οπτικών ινών έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την υποστήριξη παγκόσμιων βασικών δικτύων (που ονομάζονται επίσης δίκτυα ραχοκοκαλιάς (backbone) ή μεγάλης απόστασης). Παρόλα αυτά, λόγω της αυξανόμενης ζήτησης της κίνησης στο Internet και με τη μείωση του κόστους των οπτικών συστημάτων, τα περισσότερα τηλεπικοινωνιακά τμήματα υιοθετούν σήμερα την οπτική επικοινωνία των οπτικών ινών. Η εικόνα 2.3 δείχνει ένα διάγραμμα ενός παγκόσμιου δικτύου τηλεπικοινωνιών, που περιγράφει την ποικιλομορφία των τμημάτων του δικτύου. Προφανώς, κάθε τμήμα υιοθετεί την τεχνολογική λύση που ταιριάζει καλύτερα στις απαιτήσεις μοναδικού εύρους ζώνης/απόσταση και στους τεχνικοοικονομικούς περιορισμούς.



Εικόνα 2.3: Τμήματα δικτύου σε παγκόσμιο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που εξυπηρετούνται από τις οπτικές διασυνδέσεις.

Τα δίκτυα πυρήνα (core) απαιτούν τεράστιους και μακρούς σωλήνες δεδομένων ικανών να μεταφέρουν σε παγκόσμια κλίμακα όλη την κίνηση δεδομένων που συγκεντρώνεται από τα υποκείμενα τμήματα. Όντας το δίκτυο με τους λιγότερους κόμβους, αλλά απαιτώντας την υψηλότερη χωρητικότητα, τα δίκτυα πυρήνα βασίζονται σε σύμφωνους πομποδέκτες τελευταίας γενιάς για να επιτυγχάνουν μεγάλη φασματική απόδοση και συνεπώς να μεγιστοποιήσουν την χωρητικότητα των ινών. Τέτοιες ίνες φέρουν τυπικά δεκάδες Terabits ανά δευτερόλεπτο μέσω πολλών καναλιών μήκους κύματος που λειτουργούν κάθε ένα στα 100-200 Gb/s. Το αντίθετο συμβαίνει στα χαμηλότερα τμήματα του δικτύου (δηλαδή πρόσβασης, ασύρματου, κέντρων δεδομένων κ.λπ.), τα οποία δεν απαιτούν μεγάλη απόσταση (συνολικά κάτω των 40 χιλιομέτρων), αλλά είναι πολύ ευαίσθητα στο κόστος λόγω της εγγύτητάς τους τον τελικό χρήστη. Ως εκ τούτου, αυτά τα τμήματα συνήθως χρησιμοποιούν χαμηλότερου κόστους πομποδέκτες βασισμένους σε IM-DD.

Τα διαφορετικά τμήματα σε ένα τέτοιο στρώμα παρουσιάζουν μεγάλη τεχνολογική ποικιλομορφία λόγω των ετερογενών αναγκών τους: Mb/s-Gb/s για παθητικό οπτικό δίκτυο (passive optical network, PON) που παρέχει συνδεσιμότητα σε κατοικημένες περιοχές, συνδέσεις 1-10 Gb/s για ασύρματο δίκτυο οπισθόζευξης (backhauling) ή για Enterprise/Campus κέντρα δεδομένων και 10-100 Gb/s για κέντρα δεδομένων μεγάλης κλίμακας. Το ενδιάμεσο μητροπολιτικό τμήμα συγκεντρώνει την κίνηση από αυτό το ετερογενές οικοσύστημα, με αποτέλεσμα οι ροές κυκλοφορίας που διέρχονται από μητροπολιτικά δίκτυα να είναι πολύ διαφορετικές, γεγονός που καθιστά το σχεδιασμό τους δύσκολο.

Την ίδια στιγμή, οι εφαρμογές υπολογιστικών υψηλών επιδόσεων τύπου «big-data», όπως για παράδειγμα συναλλαγές υψηλής συχνότητας, θα παράγουν επίσης μεγάλες ροές κυκλοφορίας, οι οποίες συχνά αντιμετωπίζονται χωριστά από την κυκλοφορία του διαδικτυακού τελικού χρήστη, λόγω των διαφορετικών αναγκών τους. Για παράδειγμα, αυτές οι ροές μπορούν να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες ως προς την καθυστέρηση (latency). Σε μια τέτοια περίπτωση, η κυκλοφορία μεταξύ υπολογιστικών κέντρων θα πρέπει επίσης να εξυπηρετείται περιστασιακά μέσω ενός ειδικού δικτύου μεταφοράς, ιδίως για μεγαλύτερες επιχειρήσεις ή για το φορέα παροχής περιεχομένου δικτύου με σημαντικές ανάγκες χωρητικότητας. Τέτοιες διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων θα επωφεληθούν από εξεζητημένες αρχιτεκτονικές με την αποδοτική και ευέλικτη μεταφορά DWDM που μπορεί να κλιμακώνεται σε αποστάσεις πέρα από τα παραδοσιακά μητροπολιτικά δίκτυα, καθώς επίσης και σε ρυθμούς μετάδοσης 100 Gb/s και πέρα.

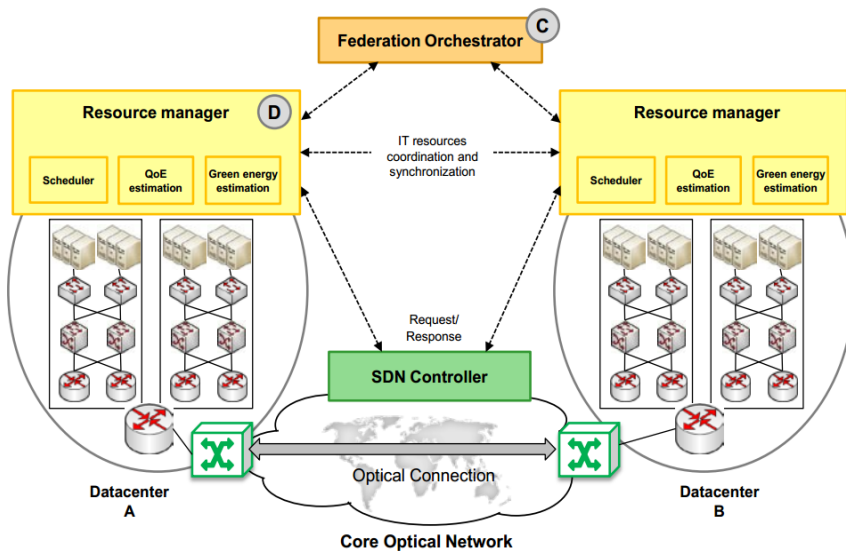
2.3 Έννοια του ομοσπονδιακού Data Center (Federated Data Center)

Πιο συγκεκριμένα όμως, το μέλλον του cloud είναι ομόσπονδο, ειδικά από την άποψη των ευρέων κατηγοριών των εφαρμογών που διακινούνται στο cloud. Gaming, κοινωνικά μέσα μαζικής ενημέρωσης, Web, το ηλεκτρονικό εμπόριο, οι εκδόσεις, τα συστήματα διαχείρισης πελατειακών σχέσεων (Customer relationship management, CRM) - αυτές οι εφαρμογές απαιτούν πραγματικά παγκόσμια κάλυψη, έτσι ώστε η εμπειρία του χρήστη να είναι πάντα θετική, τοπικά και στιγμιαία, με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση. Αυτό είναι εξάλλου το cloud, όπως είχε πάντα υποσχεθεί να είναι.

Αυτό ισχύει αντίστοιχα και για τα δίκτυα του κέντρου δεδομένων. Ομόσπονδα κέντρα δεδομένων μπορούν να παρέχουν τη βέλτιστη τοποθέτηση VMs έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το λειτουργικό κόστος. Δύο προσεγγίσεις έχουν επικρατήσει ώστε να ενορχηστρωθούν ομόσπονδα κέντρα δεδομένων (εικόνα 2.4):

- i) διανεμημένα (D στην εικόνα 2.4), όπου αλγόριθμοι προγραμματισμού τρέχουν στο εσωτερικό των διαχειριστικών πόρων των υπολογιστικών κέντρων υπολογίζουν προς το παρόν περιοδικά τη βέλτιστη τοποθέτηση για τα VMs που τοποθετούνται στο τοπικό κέντρο δεδομένων.
- ii) κεντρικά (C στην εικόνα 2.4), όπου ένας ομοσπονδιακός ενορχηστρωτής υπολογίζει περιοδικά την παγκόσμια βέλτιστη τοποθέτηση για όλα τα VMs στα ομόσπονδα υπολογιστικά κέντρα και επικοινωνεί για τους υπολογισμούς με τον κάθε διαχειριστή πόρων του κέντρου δεδομένων.

Και στις δύο προσεγγίσεις, οι τοπικοί διαχειριστές πόρων διασυνδέουν τα υπόλοιπα υπολογιστικά κέντρα ώστε να συντονίσουν την κατανομή του VM και το (transport) SDN ελέγχει το διασυνδεδεμένο δίκτυο ώστε να αιτείται τη δημιουργία ή τον τερματισμό των οπτικών συνδέσεων μεταξύ υπολογιστικών κέντρων ανάλογα με τις απαιτήσεις της κυκλοφορίας και ζήτησης.



Εικόνα 2.4: Κατανεμημένη και συγκεντρωτική ενορχήστρωση ενοποιημένων κέντρων δεδομένων.

Μια πρώτη βελτιστοποίηση είναι να εκτελεσθεί η ενοποίηση, τοποθετώντας VMs έτσι ώστε να φορτώνονται οι servers όσο το δυνατόν περισσότερο και να απενεργοποιούνται αυτοί που είναι αχρησιμοποίητοι. Η ενοποίηση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη τη δομή σε συστάδες, και την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση αυτών των clusters ως μεμονωμένες μονάδες. Αυτοί οι servers σε ενεργοποιημένα συμπλέγματα χωρίς να αποδίδεται το φορτίο, παραμένουν ενεργοί και έτοιμοι να φιλοξενήσουν αιχμές ζήτησης. Επιπλέον, όπως αναφέρεται στην εισαγωγή, ομόσπονδα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων μπορούν να εκτελέσουν ελαστικές λειτουργίες, να μετακινούν VMs μεταξύ των κέντρων δεδομένων με σκοπό την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους με την αξιοποίηση της διαθέσιμης πράσινης ενέργειας σε ορισμένα κέντρα δεδομένων και την εκτός αιχμής φτηνή καφέ ενέργεια σε άλλα κέντρα δεδομένων, διασφαλίζοντας παράλληλα το επιθυμητό επίπεδο της ποιότητας της εμπειρίας (Quality of Experience, QoE).

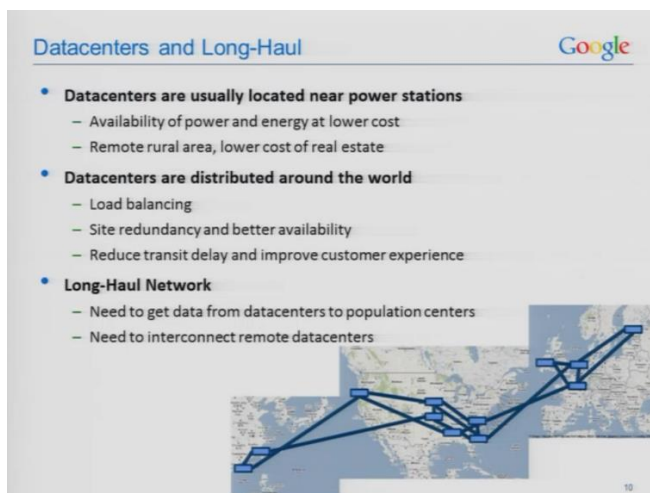
Κατ' επέκταση, δύο κύριες συνιστώσες της εξερχόμενης κυκλοφορίας των υπολογιστικών κέντρων μπορούν να διακριθούν: κυκλοφορίας μεταξύ υπολογιστικών κέντρων (DC-2-DC) και η κυκλοφορία μεταξύ υπολογιστικών κέντρων και τελικών χρηστών (DC-2-U). Η πρώτη περιλαμβάνει το συγχρονισμό της βάσης δεδομένων (database, DB) μεταξύ αναπαραχθέντων υπηρεσιών και τη μετακίνηση της εικονικής μηχανής (virtual machine, VM) για την ελαστική διαχείριση του cloud, ενώ η δεύτερη σχετίζεται με τις εφαρμογές, όπως web, email, video-on-demand, κλπ. Οι εργασίες των υπολογιστικών κέντρων είναι κοινώς αυτοματοποιημένες χρησιμοποιώντας κάποιο ενδιάμεσο λογισμικό cloud που εφαρμόζει αλγορίθμους βάση προγράμματος για τη βελτιστοποίηση κάποιας ωφέλιμης συνάρτησης διασφαλίζοντας τη ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών, τη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας και τα λειτουργικά έξοδα (π.χ. κατανάλωση ενέργειας). Το αποτέλεσμα αυτών των αλγορίθμων είναι το σύνολο των VMs να ενεργοποιηθεί ή να τερματιστεί σε κάθε υπολογιστικό κέντρο, ή να μετακινηθεί από ένα υπολογιστικό κέντρο σε ένα απομακρυσμένο, καθώς και το σύνολο των DBs που θα συγχρονιστούν. Ως αποτέλεσμα, η συνδεσιμότητα που απαιτείται ανάμεσα σε δύο υπολογιστικά κέντρα μεταβάλλεται εξαιρετικά κατά μήκος της ημέρας, παρουσιάζοντας δραματικές διαφορές σε ωριαία κλίμακα χρόνου ως συνέπεια του τεράστιου όγκου των ανεπεξέργαστων δεδομένων που μεταφέρονται.

Τα οπτικά δίκτυα ευέλικτου πλέγματος θέτουν υποψηφιότητα για τη διασύνδεση των υπολογιστικών κέντρων, δεδομένου ότι η τεχνολογία αυτή παρέχει λεπτότερη και πολλαπλή διακριτότητα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά οπτικά δίκτυα μεταγωγής μήκους κύματος (wavelength switched optical networks, WSON), με βάση την τεχνολογία πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM). Οι οπτικές συνδέσεις μπορούν να κατανεμηθούν σε ένα μεταβλητό αριθμό αυτών των φασματικών διαστημάτων (slices), ο οποίος είναι συνάρτηση της αιτούμενης χωρητικότητας, του εφαρμοζόμενου σχήματος διαμόρφωσης, και του πλάτους του φασματικού διαστήματος. Επιπλέον, η ικανότητα των οπτικών συνδέσεων μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί δυναμικά για να φιλοξενήσει αιχμές κατανέμοντας ή απελευθερώνοντας τα φασματικά διαστήματα με την προϋπόθεση ότι όλα τα φάσματα που χορηγούνται σε μια οπτική σύνδεση παραμένουν συνεχόμενα.

2.4 Παγκόσμια Υπολογιστικά Κέντρα βασισμένα σε Αρχιτεκτονική WAN

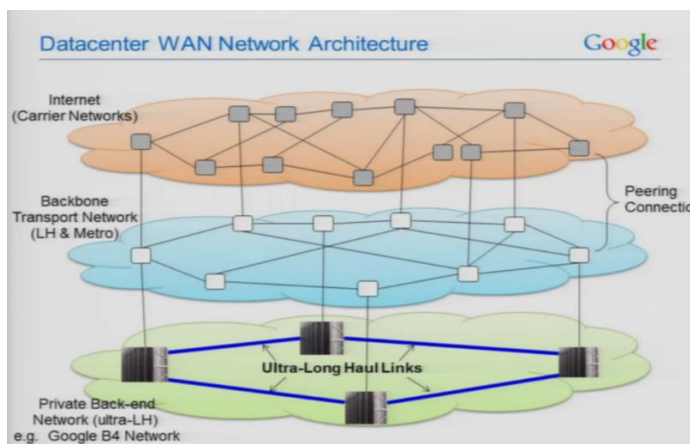
Από την άλλη πλευρά, τα μέγα κέντρα δεδομένων, όπως αυτά της Google και των δικτύων διασύνδεσής τους, έχουν επικεντρώσει μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας δημόσιας υιοθέτησης των υπηρεσιών που βασίζονται στο cloud [157]. Η αποστολή της Google είναι να οργανώνει τις παγκόσμιες πληροφορίες και να τις καταστήσει προσβάσιμες και χρήσιμες. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η Google επεξεργάζεται περισσότερα από 3 δισεκατομμύρια ερωτήματα αναζήτησης κάθε μέρα, εκ των οποίων 15% είναι νέα. Η Google έχει βρει πάνω από 30 τρισεκατομμύρια μοναδικές διευθύνσεις στο διαδίκτυο, και πάνω από 230 εκατομμύρια δικτυακά πεδία (web domains). Για να εξασφαλιστούν τα αποτελέσματα που επιστρέφονται στα ερωτήματα των χρηστών πρέπει, όσο το δυνατόν, η Google να ανιχνεύει πάνω από 20 δισεκατομμύρια ιστοσελίδες κάθε μέρα για να ανανεώνει το ευρετήριο της. Όλες αυτές οι υπολογιστικές εντατικές εργασίες γίνονται σε υπολογιστές κλίμακας αποθήκης (warehouse scale computers, WSCs), οι οποίοι είναι κοινώς γνωστοί ως μέγα κέντρα δεδομένων. Η Google προσφέρει υπηρεσίες σε 55 χώρες σε όλο τον κόσμο σε 146 γλώσσες, οδηγώντας έτσι την ανάγκη για παγκόσμια κατανεμημένους πόρους υπολογιστικής ισχύος και σε ένα παγκόσμιο δίκτυο (εικόνα 2.5).

Για να διασφαλιστεί ότι η εμπειρία του χρήστη διατηρείται στο μέτρο του δυνατού, κατά τη διάρκεια απρογραμματίστων βλαβών ή προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης, πολλές από τις σχεδιάσεις πίσω από τις υπηρεσίες της Google διατηρούν εφεδρείες, κρατώντας αντίγραφα σε πολλαπλά κέντρα δεδομένων. Αυτός ο συνδυασμός της παγκόσμιας εμβέλειας, μεγάλης κλίμακας, και εγγενούς εφεδρείας καθορίζει τις βασικές απαιτήσεις για το οπτικό δίκτυο μεταξύ υπολογιστικών κέντρων της Google.



Εικόνα 2.5: Παγκόσμιο δίκτυο υπολογιστικών κέντρων της Google.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5, τα κέντρα δεδομένων είναι κατανεμημένα γεωγραφικά. Αυτά συνήθως βρίσκονται κοντά σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε αγροτικές περιοχές όπου η γη είναι φθηνή, και η ισχύς είναι άφθονη και άμεσα διαθέσιμη σε χαμηλό κόστος. Κατανεμημένα υπολογιστικά κέντρα δεν παρέχουν μόνο εφεδρεία, αλλά είναι επίσης απαραίτητα για την εξισορρόπηση του φορτίου στις ανάγκες υπολογισμού και τη βελτίωση της εμπειρίας του πελάτη με τη μείωση της καθυστέρησης κατά την κατάσταση διέλευσης [158].



Εικόνα 2.6: Αρχιτεκτονική υπολογιστικών κέντρων της Google.

Όπως είναι κατανοητό, τα οπτικά δίκτυα μεγάλων αποστάσεων απαιτούνται για να μεταφέρουν την κυκλοφορία από τα κέντρα δεδομένων στα αστικά κέντρα, όπου βρίσκονται οι χρήστες. Τα δίκτυα αυτά έχουν κατασκευαστεί για να μειώσουν το κόστος του εύρους ζώνης διασύνδεσης, τη μετακίνηση δεδομένων μεταξύ απομακρυσμένων τοποθεσιών υπολογιστικών κέντρων και να εξασφαλιστεί κλιμακούμενη χωρητικότητα για τις διεργασίες του υπολογιστικού κέντρου. Η αυξανόμενη ανάπτυξη νέων δικτυακών υποδομών ευρυζωνικής πρόσβασης, όπως το FTTH [159], θα επιδεινώσει μόνο τις απαιτήσεις του εύρους ζώνης των μητροπολιτικών δικτύων και των δικτύων μεταξύ υπολογιστικών κέντρων μεγάλων αποστάσεων. Σε αντίθεση με το περιβάλλον εντός υπολογιστικών κέντρων όπου η οπτική ίνα είναι άμεσα διαθέσιμη, δίκτυα οπτικών ινών μεγάλων αποστάσεων είναι πολύ σπάνια μεταξύ των τοποθεσιών των υπολογιστικών κέντρων (εν μέρει λόγω των απομακρυσμένων περιοχών όπου βρίσκονται). Οι ίνες μετάδοσης μεγάλων αποστάσεων είναι πολύ δαπανηρές και χρονοβόρες για την κατασκευή ή την απόκτησή τους.

Η κυκλοφορία μεταξύ των κέντρων δεδομένων είναι ως επί το πλείστον μηχανής παραγόμενη από τις υπολογιστικές εφαρμογές cloud, με αποτέλεσμα τεράστιο όγκο δεδομένων. Ως εκ τούτου, η χωρητικότητα και η φασματική απόδοση είναι πολύ σημαντικές για τις ζεύξεις επικοινωνίας μεταξύ των κέντρων δεδομένων. Κατά δεύτερον, τα υπολογιστικά κέντρα βρίσκονται συνήθως σε απομακρυσμένες περιοχές, σε εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης, από 500 έως 6000 km απαιτώντας ελάχιστη χρήση οπτικής αναγέννησης. Οι αναγεννητές κοστίζουν χρήματα και αυξάνουν τις λειτουργικές δαπάνες του δικτύου. Μερικές φορές, απλά δεν υπάρχει χώρος και ισχύς για τους σκοπούς της αναγέννησης μεταξύ απομακρυσμένων κέντρων δεδομένων. Τρίτον, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που απαιτούν πολλά ενδιάμεσα σημεία πρόσθεσης/αφαίρεσης μηκών κύματος (add/drops), τα οπτικά δίκτυα υπολογιστικών κέντρων αφορούν κυρίως συνδέσεις από σημείο σε σημείο με λίγα ενδιάμεσα σημεία add/drops. Η χωρητικότητα και η εμβέλεια είναι πολύ πιο σημαντικές από την ευελιξία του οπτικού στρώματος [160].

2.5 Εξέλιξη Κυκλοφορίας Δεδομένων

Κατά την τελευταία δεκαετία, παρουσιάστηκε μια εκτεταμένη και συνεχής αξιοποίηση των διαδικτυακών εφαρμογών όπως η ζωντανή μετάδοση (streaming) και το κατέβασμα περιεχομένου πολυμέσων [161]. Επιπλέον, οι διαδικτυακές πλατφόρμες για cloud computing και η αποθήκευση δεδομένων πιέζουν σημαντικά τα αναπτυγμένα συστήματα ωθώντας τα να λειτουργούν, μερικές φορές, κάτω από ακραίες συνθήκες. Η ανάπτυξη της μελλοντικής παγκόσμιας ζήτησης κυκλοφορίας θα τονωθεί από πολλούς παράγοντες. Η διαδικτυακή κυκλοφορία εξακολουθεί να αυξάνεται με γεωμετρική πρόοδο, παρόλη τη μείωση του ρυθμού ανάπτυξης. Για παράδειγμα, σε όλο τον κόσμο η παγκόσμια διακίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας αυξήθηκε κατά 81% το 2013. Η ιταλική ρυθμιστική αρχή AGCOM ανέφερε ότι η κυκλοφορία δεδομένων κινητής τηλεφωνίας στην Ιταλία το 2013 αυξήθηκε 34% από έτος σε έτος. Παράλληλα, η παγκόσμια διακίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας έφθασε 1,5 exabytes τον μήνα στο τέλος του 2013, από 820 petabytes τον μήνα στο τέλος του 2012 και η κυκλοφορία δεδομένων κινητής τηλεφωνίας του περασμένου έτους ήταν σχεδόν 18 φορές το μέγεθος του συνόλου της ζήτησης του παγκόσμιου διαδικτύου το 2000.

Υπάρχει λόγος λοιπόν, να αναμένετε αυτή η συνεχιζόμενη ανάπτυξη, τροφοδοτούμενη κυρίως από ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών εκ των οποίων το βίντεο εξακολουθεί να κυριαρχεί από την άποψη του εύρους ζώνης. Οι νέες τεχνολογίες θα συνεχίσουν να οδηγούν τις απαιτήσεις του εύρους ζώνης του βίντεο, συμπεριλαμβανομένων για παράδειγμα, της ζήτησης για 3D RV, 4k/Ultra-High Definition, των αυξημένων ποσοστών επανάληψης των καρτέ, του αυξημένου δυναμικού εύρους βάθους και χρώματος. Άλλοι λόγοι αύξησης για το παγκόσμιο εύρος ζώνης περιλαμβάνουν την αυξανόμενη χρήση των υπηρεσιών cloud, μια συνειδητοποίηση των δυνατοτήτων του Ίντερνετ των πραγμάτων (Internet of Things) [162], και τον πολλαπλασιασμό των τεχνολογιών αισθητήρων. Όλα αυτοί οι λόγοι είναι πιθανό να αυξήσουν το μέγεθος των επικοινωνιών από μηχανή σε μηχανή, η οποία θα μπορούσε να αναλάβει άμεση ανθρώπινη επικοινωνία. Επιπλέον, η τρέχουσα δυναμική φύση της κυκλοφορίας στο Διαδίκτυο θέτει περαιτέρω απαιτήσεις για τα συστήματα επόμενης γενιάς οπτικών επικοινωνιών [163].

Απλή εγκατάσταση περισσότερο από τον ίδιο εξοπλισμό, όπου το κόστος κλιμακώνεται γραμμικά σε σχέση με το εύρος ζώνης, θα έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη αυτών των νέων τάσεων της ανάπτυξης, καθώς η τιμή του εύρους ζώνης θα είναι πάρα πολύ υψηλή για να στηρίξει τις νέες υπηρεσίες. Ως αποτέλεσμα, είναι κρίσιμο να μειωθεί το κόστος ανά bit έτσι ώστε η εκθετική αύξηση της κυκλοφορίας να

μην οδηγεί σε μη βιώσιμο κόστος, το οποίο περιορίζει τελικά την ικανότητα να παρέχεται το απαραίτητο εύρος ζώνης ώστε να ικανοποιηθούν οι διάφορες εφαρμογές [164]. Αυτή τη στιγμή, εντοπίζονται οι ακόλουθες τρεις στρατηγικές ώστε να αναβληθεί η επικείμενη σύνθλιψη της χωρητικότητας:

1. Ανάπτυξη εξαιρετικά χαμηλών απωλειών και χαμηλών μη γραμμικών οπτικών ινών, σε συνδυασμό με υβριδικά συστήματα ενίσχυσης,
2. Αξιοποίηση της μετάδοσης χωρικής πολυπλεξίας [165],
3. υλοποίηση ελαστικών οπτικών δικτύων (elastic optical networks, EONs) [166].

Κατ' αρχήν, θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι δυνατός ένας συνδυασμός και των τριών επιλογών. Ωστόσο, οι επιλογές 1) και 2) απαιτούν μαζική ανάπτυξη των υποδομών, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση των γενικών εξόδων του κόστους του δικτύου. Η υλοποίηση των EONs θεωρείται μια ρεαλιστική προοπτική, διότι: (I) μπορεί απρόσκοπτα να αναπτυχθεί, (II) να βελτιστοποιεί τη χρήση του οπτικού φάσματος και (III) να δημιουργεί την ελάχιστη δυνατή αναστάτωση στις υπάρχουσες υποδομές, δεδομένου ότι μπορεί να υποστηρίξει τις καινοτόμες ιδέες του μεταβλητού εύρους ζώνης αναμεταδότη με δυνατότητα διαμοιρασμού του φάσματος (Sliceable Bandwidth Variable Transponder, S-BVT) [167] μέσα σε ευέλικτες οπτικές διασυνδέσεις (Flexible Optical Cross Connect, Flex-OXC) [168] για τον πυρήνα του δικτύου και σε υπηρεσίες ευέλικτης εξυπηρέτησης εντός του κόμβου άκρων (Flexible Service Edge Node, Flex-SEN) για το μητροπολιτικό δίκτυο, σε ανταγωνιστικές τιμές κόστους κάνοντας ελκυστική την από κοινού παραγωγή και τον χειρισμό της μικρομετρικής (λεπτής) διακριτότητας και των σούπερ-καναλιών, εξίσου.

Για τους λόγους αυτούς, η εξέλιξη του δικτύου μεταφοράς από τα τρέχοντα συστήματα DWDM προς τη μετάδοση ευέλικτου πλέγματος (αξιοποίηση μεταβλητών αναμεταδοτών που τεμαχίζουν σε φέτες το εύρος ζώνης- S-BVTs) θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά την επεκτασιμότητα και την ευελιξία του δικτύου μεταφοράς, με την κατάλληλη βελτιστοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Αν η καινοτομία δεν εισαχθεί γρήγορα, η τρέχουσα αύξηση της κυκλοφορίας σύντομα θα επηρεάσει σοβαρά τόσο το κόστος του δικτύου (δηλαδή τα CAPEX και OPEX) όσο και την κατανάλωση ενέργειας. Ο οπτικός και ηλεκτρικός κόμβος μεταγωγής καθώς και ο αναμεταδότης θα πρέπει να χρησιμοποιούν, όσο το δυνατόν περισσότερο, οπτική μεταγωγή, προηγμένους αλγόριθμους DSP και την ευελιξία.

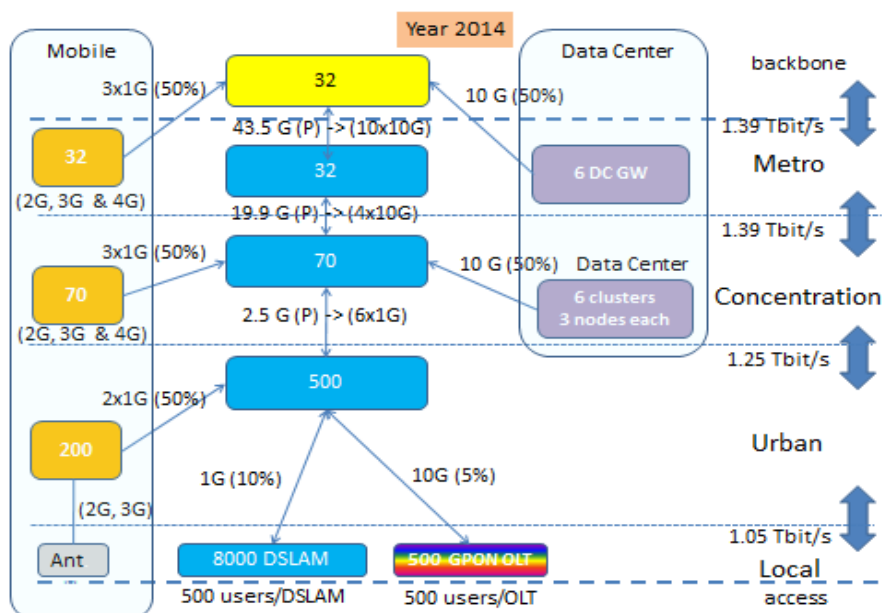
Η ιδέα της ευελιξίας πηγάζει από τις κινητές επικοινωνίες και πρόσφατα έχει προταθεί για τις οπτικές ώστε να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά το διαθέσιμο φάσμα, αυξάνοντας έτσι την φασματική απόδοση (Spectral efficiency, SE) [169]. Μέσα σε οπτικά δίκτυα, η ευελιξία επιτυγχάνεται με τον επανασχεδιασμό και την προσθήκη χαρακτηριστικών των προαναφερθέντων μπλοκ. Οι S-BVTs, για παράδειγμα, πρέπει να χαρακτηρίζονται από διαφανή μετάδοση σημάτων με δυνατότητα επιλογής των σχημάτων διαμόρφωσης σε προσαρμοσμένους ρυθμούς μετάδοσης, την κατανομή της χωρητικότητας σε μία ή περισσότερες ανεξάρτητες οπτικές ροές που μεταδίδονται προς έναν ή πολλαπλούς προορισμούς [167]. Αυτές οι καινοτομίες θα πρέπει να παραδοθούν με ταυτόχρονη μείωση του κόστους μετάδοσης και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή σε θέματα λειτουργικής οργάνωσης και συντήρησης (Operational Administrative and Maintenance, OAM) και στη διαδικασία μετάβασης [166].

2.6 Τάσεις των Αναγκών σε Εύρος Ζώνης και Προβλεπόμενη Εξέλιξη του Δικτύου

Η εικόνα 2.7 δείχνει τις ροές της κυκλοφορίας και τις διεπαφές που συμμετέχουν στο μητροπολιτικό δίκτυο [170]. Το τμήμα πρόσβασης του μητροπολιτικού δικτύου αποτελείται σήμερα από περίπου 8000 τοπικά γραφεία, το καθένα με διεπαφές 1 Gb/s (ωστόσο, το κυκλοφοριακό φορτίο είναι περίπου 10% κατά μέσο όρο, έτσι ώστε κάθε χρήστης που αναφέρεται σε ένα πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη των ψηφιακών συνδρομητικών γραμμών DSL (Digital Subscriber Line Access Multiplexer, DSLAM) συμβάλλει με ρυθμό κυκλοφορίας 200 kb/s, κατά μέσο όρο). Ορισμένοι χρήστες που είναι συνδεδεμένοι σε ένα τερματικό οπτικής γραμμής (optical line termination, OLT) μέσω GPON, του οποίου η διεπαφή εξόδου 10 Gb/s είναι στο 5% κατά μέσο όρο. Κάθε ένα από τα περίπου 500 αστικά γραφεία στην περιοχή συνάθροισης του μητροπολιτικού δικτύου (Metro-Aggregation domain) πρέπει επομένως να αντιμετωπίσει μέσο όρο κυκλοφορίας 2.5 Gb/s προς τα γραφεία συγκέντρωσης. Οι κόμβοι συγκέντρωσης (Aggregation) ανταλλάσσουν περίπου 20 Gb/s με τους κόμβους του μητροπολιτικού δικτύου. Η ανταλλαγή κίνησης από τους μητροπολιτικούς κόμβους προς τον πυρήνα είναι 43 Gb/s για κάθε ένα από τα 32 σημεία παρουσίας (PoPs) του μητροπολιτικού δικτύου με τον πυρήνα. Τελικά, η συνολική κυκλοφορία στο τμήμα του πυρήνα ανέρχεται σήμερα σε περίπου 1.4 Tb/s.

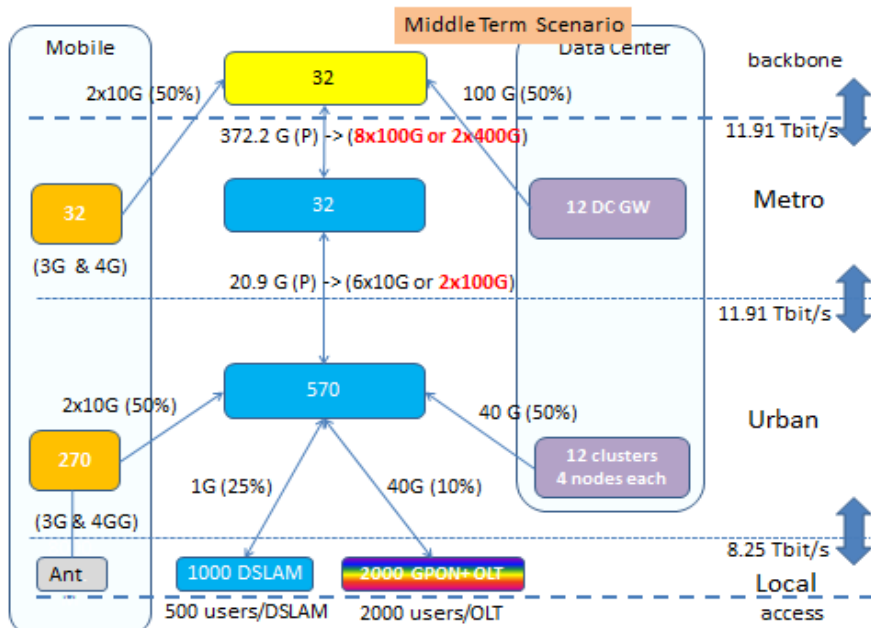
Καθώς η κίνηση εντός της ζεύξης μεταξύ δύο μεταγωγέων με δυνατότητα παρακολούθησης οπτικής ισχύος (optical power monitoring, OPM) χωρίζεται συνήθως σε δύο διαφορετικές διαδρομές για να

παρέχονται επαρκείς πόροι για την αποκατάσταση, για τους μεταγωγείς των αστικών γραφείων, η κυκλοφορία 2.5 Gb/s απαιτεί τουλάχιστον 6 διεπαφές 1 Gb/s. Οι 70 μεταγωγείς του συγκεντρωτικού στρώματος που ανταλλάσσουν κατά μέσο όρο κυκλοφορία 20 Gb/s με τους μεταγωγείς του μητροπολιτικού τμήματος, χρειάζονται τουλάχιστον 4 διασυνδέσεις 10 Gb/s. Τα 32 σημεία παρουσίας του μητροπολιτικού χρειάζονται 10 διεπαφές το καθένα, στα 10 Gb/s, για να διαχειριστούν κυκλοφορία 43.5 Gb/s προς το τμήμα του πυρήνα. Συνεπώς, όσο η κυκλοφορία μεγαλώνει, η ικανότητα των διεπαφών πρέπει να αυξηθεί σε όλα τα τμήματα του δικτύου. Όπως απεικονίζει η εικόνα 2.8, η οποία αναφέρεται σε ένα μεσοπρόθεσμο σενάριο, περισσότεροι χρήστες θα συνδέονται σε ένα OLT, και όχι σε ένα DSLAM. Οι κινητές διασυνδέσεις θα έχουν επίσης μεγαλύτερη χωρητικότητα, καθώς αναμένεται τα κέντρα δεδομένων να αυξηθούν σε μέγεθος (περισσότερες συστάδες υπολογιστικών κέντρων και περισσότεροι κόμβοι ανά συστάδα) και σε ανταλλαγή κίνησης.



Εικόνα 2.7: Τρέχουσες ροές κυκλοφορίας σε διεπαφές κόμβων στο μητροπολιτικό δίκτυο.

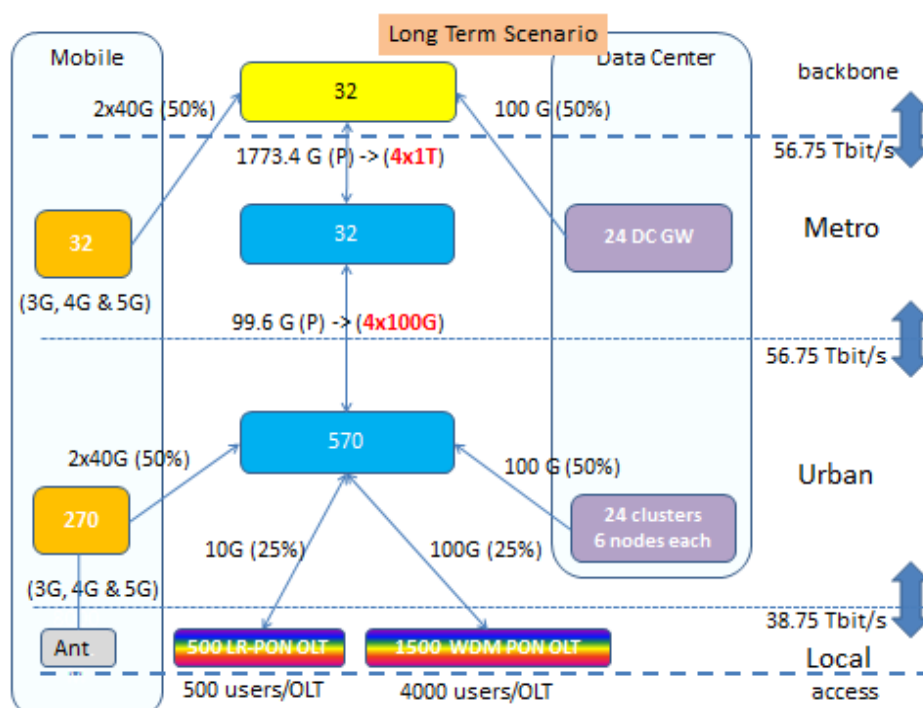
Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω η απλούστευση της δομής του δικτύου OPM έχει ήδη προγραμματιστεί: το στρώμα συγκέντρωσης θα εξαφανιστεί (ή εκλείψει). Για να αντιμετωπιστεί μια κυκλοφορία 20.9 Gb/s από τα αστικά γραφεία προς τα σημεία παρουσίας του μητροπολιτικού τμήματος, 2 διεπαφές με χωρητικότητα 100 Gb/s σε κάθε κόμβο είναι πιθανό να αναπτυχθούν, ενώ για τις ζεύξεις μεταξύ των κόμβων του μητροπολιτικού δικτύου και του κορμού, 372.2 Gb/s μπορούν να εξυπηρετηθούν με 8 διεπαφές 100 Gb/s ή δύο διεπαφές 400 Gb/s.



Εικόνα 2.8: Μεσοπρόθεσμες ροές στις διεπαφές κόμβων στο μητροπολιτικό δίκτυο.

Από την άλλη πλευρά, η εικόνα 2.9 αναφέρεται σε ένα μακροπρόθεσμο σενάριο κυκλοφορίας εντός του μητροπολιτικού δικτύου. Όλοι οι οικιακοί χρήστες υποτίθεται ότι πρέπει να συνδέονται σε ένα OLT (δύο διαφορετικοί τύποι, ο ένας θα φιλοξενεί PON μεγάλης εμβέλειας για λιγότερο πυκνοκατοικημένες περιοχές, και ο άλλος ένα WDM-PON μελλοντικής γενιάς με μεγαλύτερη ταχύτητα πρόσβασης) [171]. Όσον αφορά τις κινητές διασυνδέσεις και τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων θα έχουν επίσης περαιτέρω ανάπτυξη καθώς και υψηλότερες απαιτήσεις κυκλοφορίας. Σε αυτό το πλαίσιο, αν υποθεθεί ότι η δομή του δικτύου δεν θα αλλάξει, για τη διαχείριση περίπου 100 G κυκλοφορίας από το αστικά γραφεία στα σημεία παρουσίας του μητροπολιτικού τμήματος, θα απαιτούνται τέσσερις διασυνδέσεις με χωρητικότητα 100G σε κάθε κόμβο. Για τις ζεύξεις μεταξύ των κόμβων του μητροπολιτικού δικτύου και του κορμού, 1800 G κυκλοφορίας θα οργανώνονται σε 4 διασυνδέσεις 1 Tb/s.

Σαν συμπέρασμα, από την ανάλυση των εικόνων 2.7, 2.8 και 2.9 πρέπει να σημειωθεί ότι η χρησιμοποίηση των διεπαφών είναι, κατά μέσο όρο, σχετικά χαμηλή. Τα DSLAMs, όσον αφορά την χωρητικότητα ανά θύρα, χρησιμοποιούνται στο 50% της ονομαστικής τους χωρητικότητας (κατά μέσο όρο, 500 θύρες πάνω από 1000 στην εικόνα 2.7). Επιπλέον, κάθε διασύνδεση φορτώνεται μόνο στο 10%, επειδή η ζεύξη είναι υπερ-διαστασιολογημένη σε σχέση με το μέσο όρο της απαιτούμενης κίνησης ανά γραμμή σε ώρα αιχμής.



Εικόνα 2.9: Μακροπρόθεσμες ροές κυκλοφορίας σε διεπαφές κόμβων στο μητροπολιτικό δίκτυο.

2.7 Ανάπτυξη Δικτυακού οπτικού Εξοπλισμού Για την Ικανοποίηση Μελλοντικών Αναγκών των Οπτικών Δικτύων

Συνεπώς, οι προμηθευτές των συστημάτων μετάδοσης WDM όπως η Nokia πρέπει να φέρει σε λογικό κόστος τις απαιτήσεις των πελατών τους, δηλαδή των παρόχων εκμετάλλευσης, ώστε να μπορέσουν τα δίκτυα να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις των δικτύων με βάση τα προηγούμενα σενάρια. Για να είναι εμπορικά ελκυστικοί οι προμηθευτές συστημάτων πρέπει να βελτιώνουν συνεχώς το χαρτοφυλάκιό τους με μερικές από τις νέες διαθέσιμες τεχνολογίες για την αναβάθμιση των υποδομών του δικτύου WDM, που αποτελούνται κυρίως από τα εξής πέντε στοιχεία:

1. Τη μετάδοση των οπτικών ινών που βασίζονται κυρίως στους τύπους G652, G653, και G655.
2. Τους οπτικούς ενισχυτές WDM για να αντισταθμίζουν την οπτική απώλεια των μεγάλων σε μήκος ινών και των διαφανών κόμβων.
3. Τη δρομολόγηση μήκους κύματος οπτικών διασυνδέσεων (OXC) που μπορούν να κατευθύνουν χωριστά κάθε μήκος κύματος προς τον ζητούμενο προορισμό και να μπορούν δυναμικά να εισάγονται/εξάγονται οπτικά κανάλια [172].

4. Τους οπτικούς αναμεταδότες που μετατρέπουν τις απαιτήσεις της υπηρεσίας από την πλευρά του πελάτη (που δεν είναι συμβατή με τη μετάδοση WDM είτε επειδή αφορούν ηλεκτρικές ή επειδή δεν ευθυγραμμίζονται με το πλέγμα μεταφοράς WDM) σε οπτικό κανάλι WDM συμβατό με OXC και μετάδοση WDM, όπου ταξιδεύει παράλληλα με άλλα κανάλια WDM.

5. Το ηλεκτρικό στρώμα που παρέχει το σήμα που πρόκειται να μεταδοθεί και πιθανώς να μεταφέρει επιπλέον λειτουργίες όπως της προετοιμασίας της κυκλοφορίας ή της πολυπλεξίας (για παράδειγμα εντός των μεταγωγών του οπτικού δικτύου μεταφοράς (optical transport network, OTN)) για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του WDM στρώματος.

Η κύρια ανησυχία των παρόχων εκμετάλλευσης δικτύων είναι η αναβάθμιση των υποδομών του δικτύου τους για να εξυπηρετήσει περισσότερους πελάτες με ελάχιστο κόστος. Για να γίνει αυτό, διατηρώντας παράλληλα ικανοποιητική απόδοση των επενδύσεων, προτιμούν να αναβαθμίζουν τις συσκευές από τα στοιχεία 2 έως 5 της προαναφερθείσας λίστας, προτού χρειαστεί να τοποθετηθούν πρόσθετες ζεύξεις (δηλαδή επιπλέον ίνες WDM και ενισχυτές), επειδή η τοποθέτηση επιπρόσθετης ζεύξης μετάδοσης είναι η πιο ακριβή λειτουργία ενός δικτύου WDM. Επί του παρόντος, οι περισσότερες από τις επίγειες αναπτύξεις των τελευταίων 10 ετών συνίσταται μόνο στην αλλαγή των αναμεταδοτών σχετικά χαμηλό ρυθμό μετάδοσης από νέους που λειτουργούν σε υψηλότερους ρυθμούς και εξακολουθούν να είναι ευθυγραμμισμένοι με το ίδιο πλέγμα οπτικών συχνοτήτων. Με αυτόν τον τρόπο, η πρότυπη φασματική απόδοση (SE) έχει εξελιχθεί από 0,2 bit/s/Hz (με 10 Gb/s κανάλια και 50 GHz απόσταση μεταξύ τους) σε 2 bit/s/Hz (με 100 Gb/s κανάλια και 50 GHz σε απόσταση μεταξύ τους). Είναι αξιοσημείωτο ότι η εξέλιξη αυτή σημειώθηκε χωρίς σημαντική ανάγκη ενισχυτών νέας γενιάς ή της OXC και με εμβέλεια μετάδοσης καναλιού να διατηρείται πάνω από 2500 km και για τα δύο, 10 και 100 Gb/s.

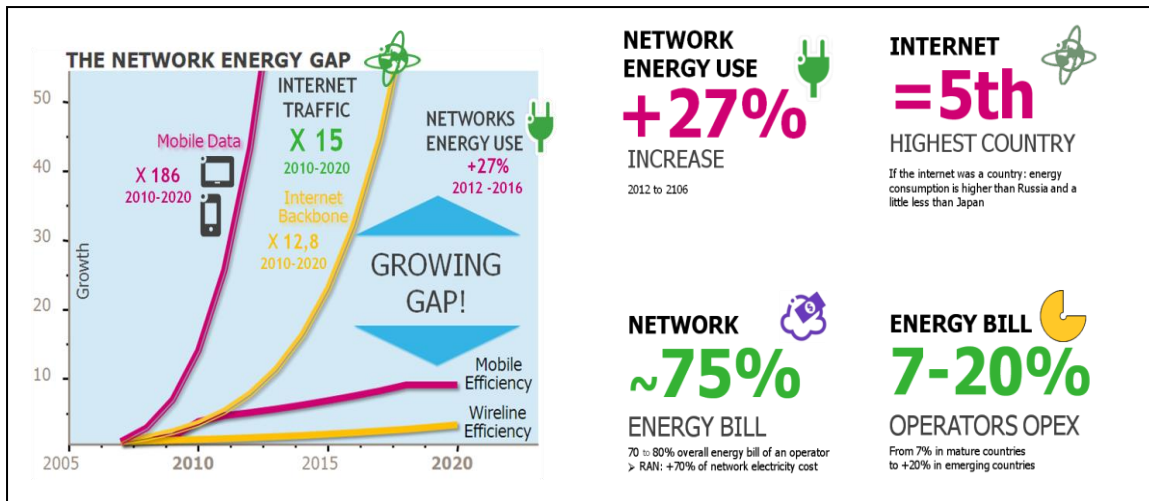
Η διατήρηση μεγάλων αποστάσεων μετάδοσης για 100 Gb/s οφείλεται στην υιοθέτηση πιο αποδοτικών κωδίκων της «προς τα εμπρός διόρθωσης σφαλμάτων» (FEC), καθώς και της σύμφωνης ανίχνευσης που επιτρέπει την πολυπλεξία πόλωσης και την αντιστάθμιση της χρωματικής και πολωτικής διασποράς. Η εξέλιξη αυτή ήρθε επίσης σε συνδυασμό με την υιοθέτηση του στρώματος OTN για τη βελτιστοποίηση της αναλογίας πλήρωσης μεγαλύτερης χωρητικότητας καναλιού ώστε να κάνει την προετοιμασία της κυκλοφορίας πιο ευέλικτη από ό,τι με τους συνήθεις muxponders. Ωστόσο, η ανάγκη για μεγαλύτερη μεταφερόμενη απόδοση εξακολουθεί να υπάρχει (όπως εξηγείται στις προηγούμενες παραγράφους). Για την κάλυψη αυτής της απαίτησης με την ελάχιστη δυνατή ανάπτυξη νέων ινών, είναι απαραίτητη υψηλότερη φασματική απόδοση (spectral efficiency, SE) από 2 bit/s/Hz. Η εξέλιξη αυτής της φασματικής απόδοσης έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο από τις προηγούμενες, επειδή δεν είναι δυνατόν να διατηρηθεί 2500 km απόσταση μετάδοσης με μεμονωμένο οπτικό κανάλι που χαρακτηρίζεται από SE 3 ή 4 bit/s/Hz λόγω των περιορισμών όσον αφορά την ευαισθησία στο OSNR ή στις μη γραμμικές επιδράσεις της μετάδοσης WDM [173].

Η παρατήρηση αυτή εξηγεί και σχετίζεται με τα πραγματικά ανεπτυγμένα συστήματα μετάδοσης λαμβάνοντας υπόψη τα επιπλέον περιθώρια ανίχνευσης για να αντισταθμιστεί η παλαιώση και η αβέβαιη γνώση σχετικά με τις ιδιότητες του δικτύου και όχι με τα εργαστηριακά πειράματα χρησιμοποιώντας τις πιο πρόσφατες ίνες και συστήματα ενίσχυσης, όπου οποιαδήποτε παράμετρο μετάδοσης μπορεί να ρυθμιστεί/βελτιστοποιηθεί. Αυτός ο περιορισμός της απόστασης μετάδοσης μπορεί να είναι πολύ αρνητικός για την εφαρμογή των δικτύων κορμού WDM, δεδομένου ότι οι αποστάσεις μεταξύ των συνδεδεμένων κόμβων δεν μπορούν να μειωθούν. Έτσι, μόνο η αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού δεν αποτελεί λύση, επειδή αυτή θα αυξήσει την αναλογία των απορριφθέντων συνδέσεων οφειλόμενες σε φυσικές χειροτερεύσεις ή την αναλογία που απαιτεί επιπλέον οπτο-ηλεκτρονικούς αναγεννητές, και ως εκ τούτου, αύξηση του κόστους ανά μεταδιδόμενο Gb/s. Όμως, δεδομένου ότι όλες οι αποστάσεις όλων των συνδέσεων που φιλοξενούνται μέσα σε ένα δίκτυο κορμού WDM είναι κατανεμημένες σε ένα ευρύ διάστημα, καθίσταται πιο ελκυστική η προσαρμογή της φασματικής απόδοσης κάθε σύνδεσης σε σχέση με την καλυπτόμενη απόσταση. Αυτή είναι η αρχή της ελαστικής φασματικής απόδοσης (Elastic Spectral Efficiency, ESE) και αυτή είναι μια από τους κύριους σκοπούς της εφαρμογής των superchannels [174].

Ένα superchannel αποτελείται από την εισαγωγή, τη μεταφορά και την εξαγωγή μιας ομάδας γειτονικών οπτικών υποφερόντων κατά μήκος του ίδιου οπτικού μονοπατιού, τα οποία έχουν δρομολογηθεί ως μια ενιαία οντότητα περνώντας από τους OXCs. Όλες τα υποφέροντα του κάθε superchannel έχουν ένα συγκεκριμένο ρυθμό διαμόρφωσης και αστερισμού προσαρμοσμένο στις φυσικές υποβαθμίσεις του κοινού οπτικού μονοπατιού. Ο αριθμός των υποφερόντων που απαρτίζουν κάθε superchannel εξαρτάται από τη χωρητικότητα της σύνδεσης και των διαθέσιμων φασματικών πόρων κατά μήκος του επιλεγμένου οπτικού μονοπατιού. Superchannel βασισμένα στην ελαστική φασματική απόδοση

(ESE) μπορούν να υποστηριχθούν και από στατικό OXC αλλά τις περισσότερες των περιπτώσεων τα superchannels αυτά προβλέπονται με χρήση ευέλικτου OXC έτσι ώστε οι ιδιότητες τους να μπορούν πραγματικά να αλλάζουν «κατά απαίτηση». Στην πράξη, τα δίκτυα WDM που εμφανίζουν ESE (που συχνά αποκαλούνται «ελαστικά δίκτυα») συνδέονται επίσης με το ευέλικτο OXC που θα πρέπει να έχει διάφορες σχετικές ιδιότητες, όπως: εύλογο αρχικό κόστος, αρθρωτή σχεδίαση, επεκτασιμότητα σε σχετικά υψηλή συνδεσιμότητα, μεγάλη χωρητικότητα add/drop, καμία φυσική επίπτωση στα οπτικά κανάλια επιτρέποντας προηγμένα σχήματα διαμόρφωσης των καναλιών και υψηλή φασματική απόδοση, ταχύτερη αυτόματη ρύθμιση οπτικού μονοπατιού, ανθεκτικότητα στην αποτυχία, πολλαπλές κατευθύνσεις, άχρωμο, συμβατό με ευέλικτη κατανομή μήκους κύματος, συμπαγές, και την ιδιότητα του contentionless. Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά πρέπει να υπάρχουν υποχρεωτικά, ενώ κάποια άλλα από αυτά είναι καλό να υπάρχουν. Η παρακάτω λίστα περιγράφει με περισσότερες λεπτομέρειες το καθένα από αυτά τα χαρακτηριστικά.

- **Εύλογο αρχικό κόστος και αρθρωτή σχεδίαση:** η ιδιότητα αυτή είναι ζωτικής σημασίας για τις επιχειρήσεις που θέλουν μια προσέγγιση "pay as you grow" συμβατή με την αποτελεσματική και προοδευτική απόδοση της επένδυσης.
- **Επεκτασιμότητα:** το OXC θα πρέπει να είναι σε θέση να ξεκινά με χαμηλό βαθμό συνδεσιμότητας (περίπου 2 ή 3) και να αυξάνει αυτή τη συνδεσιμότητα έως 8 με αδιατάρακτο τρόπο (χωρίς διακοπή της υπηρεσίας από τις άλλες συνδέσεις που είχαν καθοριστεί προηγουμένως). Είναι αξιοσημείωτο ότι η μέγιστη συνδεσιμότητα 8 βαθμών αντιστοιχεί στο τρέχων δίκτυο κορμού WDM, όπου OXCs με περισσότερους από 6 βαθμούς είναι πολύ σπάνια. Ωστόσο, στο μέλλον, λόγω της ατέρμονης ανάγκης για μεγαλύτερη χωρητικότητα, επιπλέον ίνες θα μπορούσαν να αναπτυχθούν κατά μήκος της οπτικής μεταδιδόμενης ζεύξης που είναι ήδη σε ισχύ. Σύμφωνα με αυτή την υπόθεση η συνδεσιμότητα του κόμβου θα μπορούσε να υπερβαίνει τους 15 βαθμούς μέσα σε λίγα χρόνια.
- **Μεγάλη Add/Drop (A/D) χωρητικότητα:** Οι πάροχοι ζητούν την ικανότητα A/D έως 100% για τα OXC που χαρακτηρίζονται με λιγότερο από πέντε βαθμούς συνδεσιμότητας και έως 50% χωρητικότητα A/D για τα OXC με μεγαλύτερη συνδεσιμότητα. Για άλλη μια φορά, η χωρητικότητα θα πρέπει να είναι επεκτάσιμη με συνεχή τρόπο.
- **Ιδιότητες Colorless/Directionless/Contentionless (CDC):** Η σύνδεση των τριών αυτών ιδιοτήτων έχει συχνά αναφερθεί στα [175-177]. Οι ιδιότητες directionless και colorless είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική στήριξη από τα πιο προηγμένα χαρακτηριστικά του GMPLS όπως η οπτική αποκατάσταση. Επιπλέον, μπορούν να μειώσουν σημαντικά το μέγεθος της ηλεκτρικής διασταυρούμενης σύνδεσης (electrical cross-connect) που σχετίζεται με το OXC, μεταφέροντας την απαιτούμενη ευελιξία από το ηλεκτρικό προς το οπτικό πεδίο, όπου η τεράστια απόδοση μπορεί να αντιμετωπιστεί με πολύ μικρότερη κατανάλωση ρεύματος. Η αποφυγή της συστηματικής μετατόπισης στο ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται οπτική παράκαμψη. Τα πλεονεκτήματά της έχουν διερευνηθεί σε μεγάλο βαθμό στο [178]. Η σημασία της ιδιότητας contentionless εξακολουθεί να συζητείται. Όλοι οι πάροχοι δεν είναι έτοιμοι να πληρώσουν ένα επιπλέον κόστος για αυτή την ιδιότητα, υποστηρίζοντας ότι το περιεχόμενο εντός των OXC παραμένει αμελητέο σε σύγκριση με το περιεχόμενο του μήκους κύματος μέσω του δικτύου που παρέχεται από το επίπεδο ελέγχου γνωρίζοντας το περιεχόμενο μεταξύ των OXC και υπό τον όρο ότι το τελευταίο αυτό περιεχόμενο διατηρείται αρκετά μικρό (έτσι ώστε το επίπεδο ελέγχου GMPLS να το παρακάμψει). Αυτή η θέση είναι λογική με την τρέχουσα κυκλοφορία WDM που δεν είναι τόσο δυναμική και αυτός είναι ο λόγος που η ιδιότητα contentionless θεωρείται ως "καλό να υπάρχει". Απλά μελλοντικά πιο δυναμικές μήτρες κυκλοφορίας λόγω της νέας γενιάς υπηρεσιών και των συνδέσεων των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, θα καθιστούν την ιδιότητα contentionless υποχρεωτική και αναγκαία.
- **Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας:** Για την αντιμετώπιση της αύξησης της κυκλοφορίας (x15 φορές μεγαλύτερη μεταξύ 2010 και 2020) ο αναπτυσσόμενος εξοπλισμός υψηλής χωρητικότητας είναι όλο και περισσότερο ενεργειακά ασύμφορος, με αποτέλεσμα οι πάροχοι να βιώνουν μια ανεξέλεγκτη και μη βιώσιμη αύξηση της ενεργειακής τους κατανάλωσης. Ανεξάρτητα από αυτό, το κόστος της ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί περίπου 60% με 100% από το 2020, και ως εκ τούτου, οι πάροχοι των δικτύων θα βιώσουν μια δραματική αύξηση του κόστους που σχετίζεται με την ενεργειακή τους κατανάλωση (~ 75%). Καθώς αυτή η κατανάλωση αντιστοιχεί στο 7-20% των λειτουργικών δαπανών (OPEX) του παρόχου, είναι σημαντικό να βρεθούν περισσότερο ενεργειακά αποδοτικές λύσεις που μπορεί να εκτείνονται από εξοπλισμό λιγότερης ενεργειακής κατανάλωσης σε νέα λειτουργία δικτύωσης.



Εικόνα 2.10: Απεικόνιση της αναμενόμενης ενέργειας και της αύξησης του κόστους σε ένα δίκτυο.

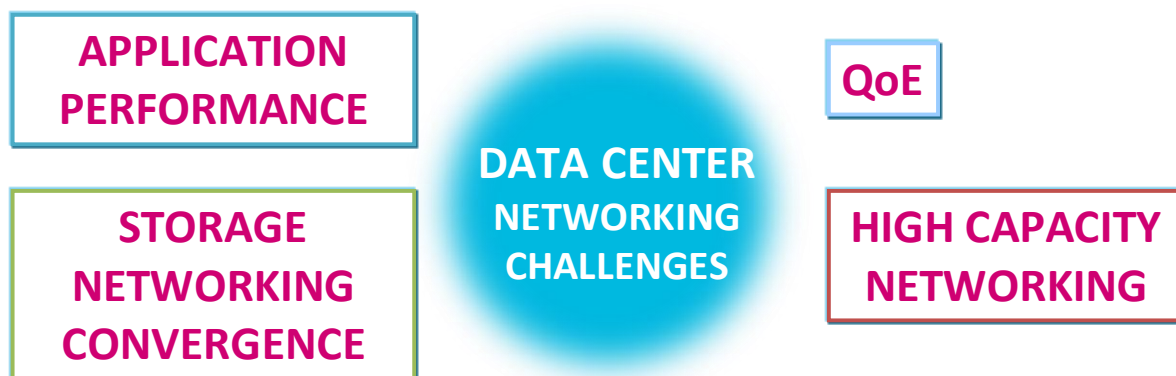
- Ευέλικτο πλέγμα:** τα κίνητρα για αυτό το χαρακτηριστικό έχουν περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα σχετικά με την SE. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή των ικανών διατάξεων δρομολόγησης ευέλικτου πλέγματος (όπως το WSS) δεν αρκεί για να καταστήσει το δίκτυο συμβατό με την ιδιότητα του ευέλικτου πλέγματος. Οι οπτικές συσκευές παρακολούθησης (monitoring) και το επίπεδο ελέγχου πρέπει επίσης να είναι συμβατά με την κατανομή ευέλικτου πλέγματος και με τον έλεγχο των οπτικών καναλιών. Αυτό είναι απαραίτητο για τη σωστή μέτρηση και ρύθμιση της ισχύος του καναλιού κατά μήκος των ζεύξεων μετάδοσης, ανεξάρτητα από το φασματικό εύρος ζώνης και τη θέση αυτών των καναλιών. Αυτό είναι, επίσης, απαιτούμενο ώστε να ξεπεραστεί ο φασματικός κατακερματισμός που μπορεί να προκύψει κατά τη διάρκεια της ζωής του δικτύου, ιδιαίτερα στην περίπτωση της δυναμικής κίνησης με διαδοχικές ενάρξεις και τερματισμούς των οπτικών συνδέσεων.
- Ανθεκτικότητα σε βλάβη και χαμηλή αντίκτυπο στα οπτικά σήματα:** Αυτές οι δύο παράμετροι είναι ουσιαστικής σημασίας και αυτό δεν είναι νέο [30]. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι διατάξεις του κόμβου γίνονται όλο και πιο περίπλοκες για να ανταποκριθούν στην απαίτηση της ευελιξίας, αυτή η ανθεκτικότητα και αυτό το χαμηλό αντίκτυπο γίνονται ακόμη πιο σημαντικά από ότι πριν από την έλευση της ιδιότητας ευέλικτου πλέγματος και των συναφών BVTs. Πράγματι, τα στάδια εισαγωγής/εξαγωγής του OXC γίνονται πιο ευέλικτα με πιο ενεργές συσκευές που θα μπορούσαν να παρουσιάσουν βλάβη σε κάποια χρονική στιγμή, με αποτέλεσμα την παρουσία αρμόδιων συσκευών εντός του OXC που μπορούν να ανιχνεύσουν αυτές τις επίδοξες αποτυχίες, παρόλο που δεν ήταν αναγκαίες, όταν τα κανάλια πολυπλέκονταν μόνο μέσω των σταθερών πολυπλεκτών μήκους κύματος. Ομοίως, όπως ο ρυθμός συμβόλων του σήματος αυξάνεται, η συσσώρευση του οπτικού φιλτραρίσματος και η διαφωνία (crosstalk) μεταξύ των καναλιών που υπεισέρχονται στο σήμα σε κάθε OXC το υποβαθμίζουν ακόμα περισσότερο. Επιπλέον, πιο εξελιγμένοι αστερισμοί των διαμορφώσεων είναι επίσης λιγότερο ανεκτικοί στον οπτικό θόρυβο και στις παραμορφώσεις του σήματος [179]. Ως εκ τούτου, ακόμη και αν κάποιος μπορεί να σκεφτεί ότι οπτικοί συζεύκτες και διαχωριστές μπορούν πλέον επωφελώς να αντικατασταθούν, τουλάχιστον εν μέρει, με τους πιο ακριβούς πολυπλεκτές/αποπολυπλεκτές μήκους κύματος χάρη στη σύμφωνη ανίχνευση, αυτό θα οδηγούσε σε μεγαλύτερη ποινή ισχύος κατά την ανίχνευση λόγω του οπτικού θορύβου, ο οποίος ανασυνδυάζεται σε αυτούς τους συζεύκτες. Έτσι, πολλή προσοχή πρέπει να δοθεί στο ισοζύγιο μεταξύ της εξοικονόμησης κόστους που επιφέρει αυτή η τοπική αντικατάσταση και του επιπλέον κόστους λόγω επιπρόσθετης αναγέννησης μέσω του δικτύου λόγω των λιγότερο αποδοτικών μέσων οπτικής πολυπλεξίας.

Εκτός από την ανάπτυξη για υψηλότερες φασματικές αποδόσεις, άλλες συμπληρωματικές ιδιότητες είναι πιθανόν να προστεθούν. Για παράδειγμα, το άνοιγμα της μπάντας L ως ένα νέο παράθυρο μετάδοσης με σκοπό το διπλασιασμό της ικανότητας των συστημάτων (αυτό απαιτεί τη βιομηχανική ανάπτυξη νέων ενισχυτών και νέων WSSs κατάλληλων για την μπάντα L). Η λειτουργία χωρικής διαίρεσης με πολυπλεξία (spatial mode division multiplexing) είναι μια άλλη δυνατότητα που έχει ερευνηθεί εκτενώς από το 2010 από την ερευνητική κοινότητα [180]. Αλλά μέχρι τώρα φαίνεται ότι δεν είναι ακόμη αρκετά ώριμη για εμπορική ανάπτυξη κατά τα προσεχή έτη. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να προστεθεί ότι στα πλαίσια αυτής της διατριβής καλύπτονται οι ανάγκες που παρουσιάστηκαν σε αυτήν την παράγραφο μέσω της χρήσης

των οπτικών πομπών πολλαπλών ροών, οι οποίοι δίνουν την δυνατότητα να εναλλάσσουν τόσο το είδος όσο και την χωρητικότητα των ροών. Η ανάλυση ενός τέτοιου οπτικού πομπού θα λάβει χώρα στο κεφάλαιο 5.

2.8 Πύλη Υπολογιστικού Κέντρου

Μέχρι τώρα, πολλοί πάροχοι εξοπλισμού επικεντρώθηκαν κυρίως στα ζητήματα που σχετίζονται με το εσωτερικό του κέντρου δεδομένων. Ωστόσο, η ανάγκη αποτελεσματικής επικοινωνίας μέσω του WAN θα γίνει ακόμη πιο κρίσιμος παράγοντας [181]. Η εικόνα 2.11 δείχνει τις κύριες προκλήσεις που σχετίζονται με τις διασυνδέσεις των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων.



Εικόνα 2.11: Κύριες προκλήσεις που σχετίζονται με τις διασυνδέσεις των κέντρων δεδομένων.

Οι εφαρμογές υπολογιστικών κέντρων δεδομένων έχουν ήδη μεταφερθεί μέσω των σύνηθων υποδομών μετάδοσης WDM πάνω από όλα τα διαφορετικά τμήματα του δικτύου WDM (μητροπολιτικό, κορμού, και διηπειρωτικό τμήμα). Η τάση αυτή αναμένεται να συνεχιστεί. Ως εκ τούτου, από την προοπτική του εξοπλισμού δικτύου, δεν υπάρχει λόγος να υπάρχει συγκεκριμένη προσαρμογή των ινών μετάδοσης, των ενισχυτών ή των διαφανών ως προς το μήκος κύματος κόμβων δρομολόγησης στις διασυνδέσεις των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων. Φυσικά, κάθε γενική εξέλιξη του δικτύου, όπως η ολοκλήρωση των συσκευών ευέλικτου πλέγματος ή πολλαπλών ροών, θα χρησιμοποιηθούν επίσης και για τις διασυνδέσεις των υπολογιστικών κέντρων. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτής της εφαρμογής έγκειται στις τεράστιες διαχωριστικές των ανταλλασσόμενων δεδομένων ανά σύνδεση και στην επιθυμία να αναμορφώσουν δυναμικά τις διασυνδέσεις σε τακτική βάση, που μπορεί να κατακτηθεί από τους παρόχους των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων παρά από μέρους των παρόχων των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

Είναι σημαντικό να καθοριστεί το τεράστιο ποσό των δυναμικών δεδομένων που δημιουργείται μεταξύ των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων: για ένα gigabyte του αποθηκευμένου περιεχομένου μπορεί να δημιουργηθεί ένα petabyte μεταβατικών δεδομένων. Εκτός από αυτό το τεράστιο ποσό των δεδομένων που ανταλλάσσονται, ο ιδιοκτήτης του υπολογιστικού κέντρου δεδομένων μπορεί να απαιτεί ειδικούς περιορισμούς στην κυκλοφορία που πρέπει να ληφθούν υπόψη από τους παρόχους του δικτύου, όπως: υψηλή χωρητικότητα, χαμηλή καθυστέρηση (latency) και ασφαλή δίκτυα καθώς αρκετά κέντρα δεδομένων διασυνδέουν τράπεζες, αναφέροντας μόνο ένα τμήμα μεταξύ άλλων. Ως εκ τούτου, οι ιδιοκτήτες του υπολογιστικού κέντρου δεδομένων θα μπορούσαν να είναι μεταξύ των πρώτων που θα υιοθετήσουν τις τεχνολογίες μετάδοσης επόμενης γενιάς, όπως το super-channel BVT και οι οπτικοί πομποί πολλαπλών ροών που μερικές φορές συνδέονται με το ευέλικτο οπτικό cross-connect.

2.9 Αρχιτεκτονικές και Απαιτήσεις Οπτικών Συστημάτων για Διασυνδέσεις Υπολογιστικών Κέντρων

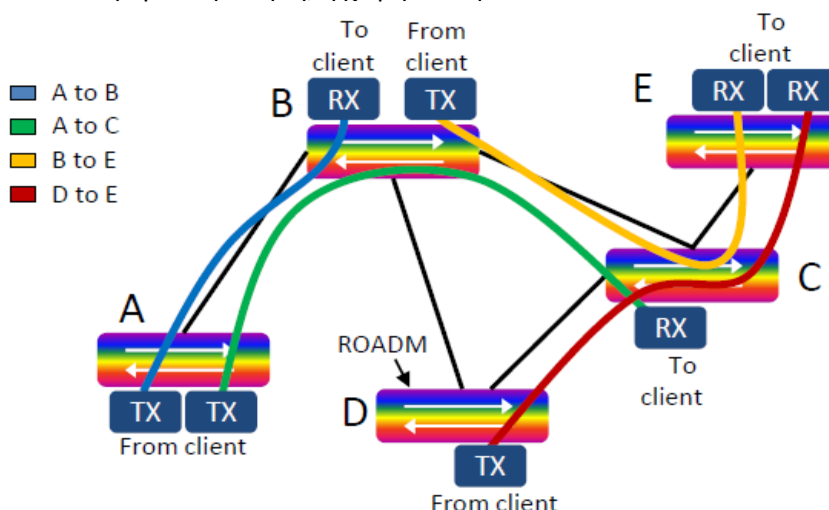
Από την άλλη πλευρά, μέσα σε ένα υπολογιστικό κέντρο δεδομένων, οι οπτικές τεχνολογίες χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση τεράστιου αριθμού πανομοιότυπων servers και μεταγωγών, οδηγώντας στο cloud computing, το οποίο παρουσιάζει το πλεονέκτημα της κατανεμημένης δύναμης υπολογισμού από τους μαζικούς παράλληλους κεντρικούς επεξεργαστές (CPUs) μέσα σε μια αποθήκη κλίμακας μεγέθους υπολογιστικού κέντρου δεδομένων. Για να γίνει αποτελεσματική χρήση των

κατανεμημένων CPU της υπολογιστικής φάρμας, είναι σημαντικό να υπάρχει ένα ευρύ δίκτυο με πλούσια συνδεσιμότητα μεταξύ όλων των servers έτσι ώστε το λογισμικό του επιπέδου εφαρμογών να μπορεί εύκολα να εκχωρήσει παράλληλες εργασίες σε αυθαίρετους servers χωρίς να απασχολεί η θέση του server και η επιβάρυνση λόγω επικοινωνίας. Επίσης, η υψηλότερη συνδεσιμότητα οδηγεί σε μεγαλύτερη ανοχή σε σφάλματα σε επιμέρους αστοχίες στα κανάλια ζεύξεων. Στην ιδανική περίπτωση, πλήρως δικτυωτοί, εντελώς μη-μπλοκαρισμένοι πυρήνες μεταγωγής (switch fabric) με πολύ χαμηλή καθυστέρηση μεταξύ δύο servers είναι επιθυμητή. Στην πραγματικότητα όμως, οι servers διασυνδέονται μέσω στρωμάτων των μεταγωγών συμπλέγματος αποτελούμενοι από μαζικό πανομοιότυπο εξοπλισμό μεταγωγής. Κατ' επέκταση, διαφορετικές αρχιτεκτονικές επικοινωνίας/μεταγωγής χρησιμοποιούνται σήμερα μεταξύ δύο κόμβων ή περισσότερων σε ένα οπτικό δίκτυο εντός υπολογιστικών κέντρων, ανάλογα με το είδος της κυκλοφορίας που διέρχεται μέσω αυτού. Παρακάτω αναλύονται οι τρεις κυριότερες διαφορετικές τεχνικές μεταγωγής που συναντώνται για την διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων εντός υπολογιστικών κέντρων σχετίζονται με: την οπτική μεταγωγή κυκλώματος (optical circuit switching, OCS), την ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων (electronic packet switching, EPS) και την οπτική μεταγωγή πακέτων (optical packet switching, OPS).

2.9.1 Αρχιτεκτονική Μεταγωγής Οπτικού Κυκλώματος (optical circuit switching)

Η αρχιτεκτονική οπτική μεταγωγή κυκλώματος είναι η τυπική τεχνική επικοινωνίας που χρησιμοποιείται σήμερα τόσο στα δίκτυα του πυρήνα όσο και στα δίκτυα εντός υπολογιστικών κέντρων για την διασύνδεση ψηφιακών μεταγωγών. Σε μια τέτοια προσέγγιση, δημιουργείται μια σταθερή οπτική σύνδεση μεταξύ των κόμβων προέλευσης και προορισμού: τυπικά, εκχωρώντας μια διαδρομή από άκρο σε άκρο μέσω ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.12, όπου οι χρωματιστές καμπύλες υποδηλώνουν συνδέσεις που δημιουργούνται μεταξύ δύο κόμβων. Με αυτόν τον τρόπο, τα δεδομένα μπορούν να διασχίζουν πολλούς κόμβους διαφανώς (δηλ. χωρίς την ανάγκη οπτικο-ηλεκτρο-οπτικών μετατροπών), ενώ κατευθύνονται οπτικά στον επαναπροσδιοριζόμενο οπτικό πολυπλέκτη πρόσθεσης ή αφαίρεσης οπτικών καναλιών (reconfigurable optical add-drop multiplexer, ROADM) που έχει τοποθετηθεί στους κόμβους. Κάθε ROADM έχει συνήθως τόσους επιλεκτικούς μεταγωγείς μήκους κύματος (WSSs) όσες είναι και οι ίνες εισόδου/εξόδου, πράγμα που επιτρέπει την ανακατανομή οποιουδήποτε μήκους κύματος από οποιαδήποτε ίνα εισόδου σε οποιαδήποτε ίνα εξόδου (ή στους δέκτες).

Τα WSSs έχουν αργό χρόνο αναδιαμόρφωσης (της τάξεως των χιλιοστών του δευτερολέπτου), ο οποίος είναι επαρκής για τα δίκτυα OCS, που προορίζονται να είναι στατικά ή να επαναδιαμορφώνονται 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. Αυτό συμβαίνει συνήθως στα δίκτυα του πυρήνα, τα οποία συγκεντρώνουν ένα τεράστιο όγκο κίνησης που προέρχεται από τα υποκείμενα δίκτυα, οδηγώντας σε μέσες ανάγκες σταθερής χωρητικότητας. Το OCS είναι αποτελεσματικό όσον αφορά την κατανάλωση ρεύματος και την καθυστέρηση, καθώς το φως ταξιδεύει διαφανώς από την πηγή μέχρι τον προορισμό. Παρόλα αυτά, εάν η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται σε περιβάλλοντα με πολύ διαφορετική κίνηση, η χωρητικότητα σπαταλάται.

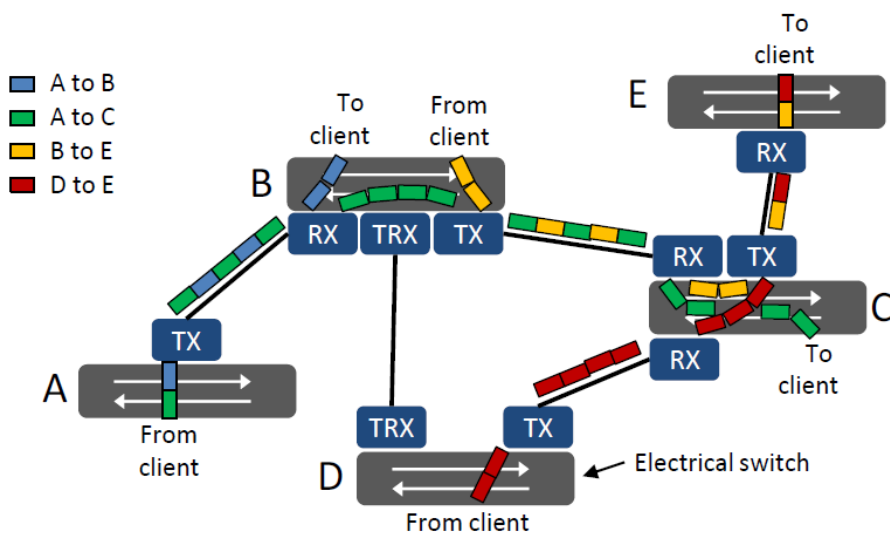


Εικόνα 2.12: Δίκτυο οπτική μεταγωγή κυκλώματος.

2.9.2 Αρχιτεκτονική Μεταγωγής Ηλεκτρονικών Πακέτων (electronic packet switching)

Στα τμήματα των δικτύων υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, η κυκλοφορία μεταξύ τελικών κόμβων (αποτελούν ουσιαστικά τους διακομιστές σε αυτήν την περίπτωση) είναι εκρηκτική και μεταβάλλεται γρήγορα, παρουσιάζοντας συνδέσεις που απαιτούν τυπικά μικρότερη από την χωρητικότητα του καναλιού/μήκους κύματος. Ως εκ τούτου, η χρήση OCS έχει ως αποτέλεσμα τη σπατάλη της μεγάλης χωρητικότητας. Επιπλέον, η πλήρης διασύνδεση εκατοντάδων χιλιάδων (N) εξυπηρετητών θα απαιτούσε τη δημιουργία συνδέσεων κυκλώματος N2 και συνεπώς τη χρήση πομποδεκτών N2, η οποία είναι αδύνατον να εφαρμοστεί δεδομένου ότι ο αριθμός των μηκών κύματος εκτείνεται σε 80-96 όταν χρησιμοποιείται η μπάντα C. Σε τέτοια δυναμικά περιβάλλοντα κυκλοφορίας, το EPS (π.χ. Ethernet) χρησιμοποιείται για την ευέλικτη προσαρμογή στις διακυμάνσεις της κυκλοφορίας, ενώ βελτιστοποιεί τη χρήση του εξοπλισμού.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.13, όπου κάθε χρώμα υποδεικνύει πακέτα με τους ίδιους κόμβους προέλευσης και προορισμού, σε δεδομένα EPS που πηγαίνουν σε διαφορετικούς προορισμούς (έτσι ανήκουν σε διαφορετικές συνδέσεις) μπορούν να αποστέλλονται μέσω του ίδιου συνδέσμου πολυπλεγμένα σε σύντομα ηλεκτρικά πακέτα (συνήθως σε κλίμακα της τάξεως του νανο- ή μικρο-δευτερολέπτου). Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι με τη χρήση αυτής της προσέγγισης η έννοια της διαφάνειας (transparency) εξαφανίζεται. Στην εικόνα 2.13, τα πακέτα που παράγονται ηλεκτρικά, μεταδίδονται μέσω οπτικών ζεύξεων από σημείο σε σημείο, τα οποία απαιτούν πομποδέκτες σε κάθε τερματισμό της σύνδεσης των ινών. Κατά αυτό τον τρόπο, όταν το σήμα μετακινείται προς ένα ενδιαμέσο κόμβο, το οπτικό σήμα μετατρέπεται αρχικά στο ηλεκτρικό πεδίο (μέσω ενός οπτικού δέκτη), όπου κάθε ηλεκτρικό πακέτο κατευθύνεται προς μια θύρα εξόδου στο ηλεκτρικό πεδίο (μέσω ηλεκτρικού μεταγωγέα) και τελικά το ηλεκτρικό σήμα μετασχηματίζεται ξανά στο οπτικό πεδίο (με χρήση οπτικού πομπού).



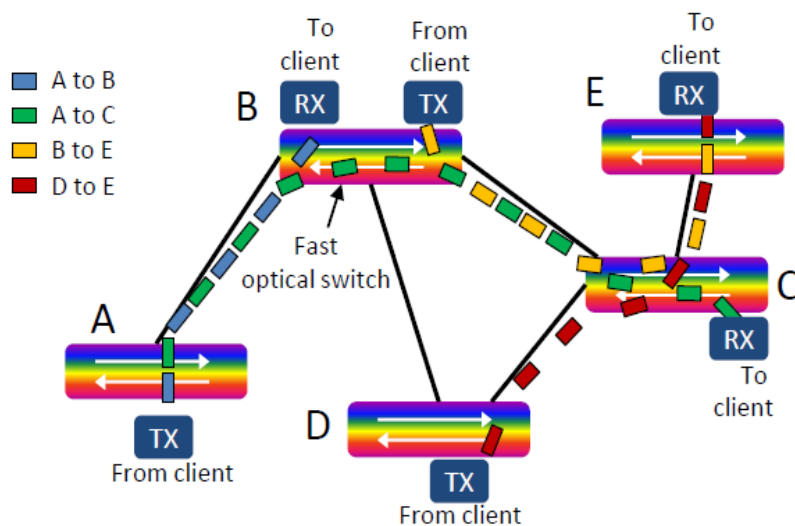
Εικόνα 2.13: Δίκτυο ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων.

2.9.3 Αρχιτεκτονική Μεταγωγής Οπτικών 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 της OPS σε ιδιαίτερα δυναμικά δίκτυα, όπως σε μητροπολιτικά τμήματα και τμήματα υπολογιστικών κέντρων δεδομένων. Συγκριτικά με το EPS, όπου τα ηλεκτρικά πακέτα εισάγονται σε οπτικές συνδέσεις τύπου κυκλώματος από σημείο σε σημείο, οι οπτικές συνδέσεις στο OPS μεταφέρουν οντότητες οπτικών πακέτων. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.14 ομοίως όπως στο OCS, τα οπτικά πακέτα δρομολογούνται τώρα στον οπτικό τομέα. Εντούτοις, στο OPS, απαιτούνται γρήγοροι οπτικοί μεταγωγείς, οι οποίοι μπορούν να ανακατευθύνουν το φως σε χρονική κλίμακα πακέτων (μεταγωγή σε νανοδευτερόλεπτα). Τέτοιοι οπτικοί διακόπτες μπορούν π.χ. να υλοποιηθούν σε μια αρχιτεκτονική αναμετάδοσης και επιλογής, χρησιμοποιώντας οπτικούς ημιαγωγικούς ενισχυτές (SOAs), διαμορφωτές ηλεκτρό-απορρόφησης (EAM) ή μεταβλητούς οπτικούς εξασθενητές (VOAs) μεταξύ άλλων ως οπτικές πύλες.

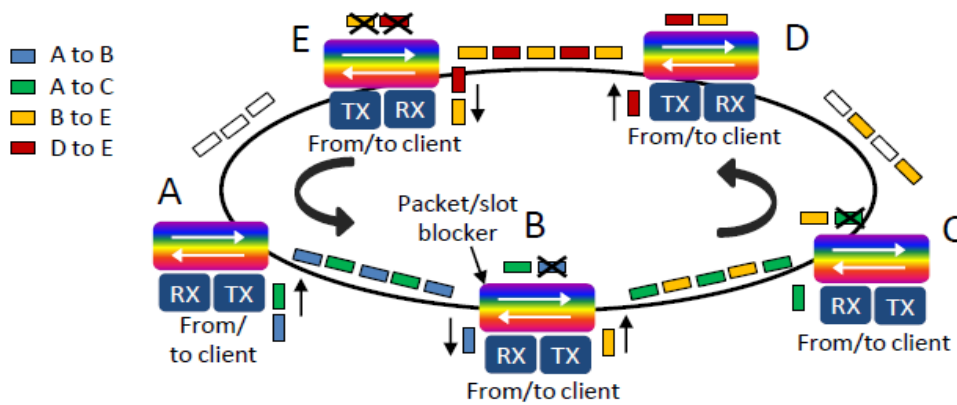
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η OPS έχει τα πλεονεκτήματα και των δύο τελευταίων προσεγγίσεων: στατιστική πολυπλεξία με διακριτότητα στο μήκος κύματος, η οποία επιτρέπει την προσαρμογή της κυκλοφορίας και τη βελτιστοποίηση των πόρων και της διαφάνειας, γεγονός που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, την καθυστέρηση και διευκολύνει την αναβάθμιση της χωρητικότητας (μόνο οι πομποδέκτες του τελικού κόμβου θα πρέπει να αλλάξουν). Παρόλα αυτά, το κύριο σημείο υστέρησης της OPS είναι η διαχείριση της σύγκρουσης πακέτων. Σε μια τοπολογία πλέγματος, η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 2.14, κάθε κόμβος έχει πολλαπλές συνδέσεις εισόδου/εξόδου. Ως εκ τούτου, είναι πιθανό δύο πακέτα, που φθάνουν ταυτόχρονα από διαφορετικές εισόδους, να απαιτούν να κατευθυνθούν στην ίδια έξοδο, βλέπε κίτρινα και κόκκινα πακέτα στον κόμβο C της εικόνας 2.14.

Στην περίπτωση αυτή, εάν τα πακέτα που προέρχονται από διαφορετικές εισόδους δεν είναι συγχρονισμένα ή αποθηκευμένα (buffered), μπορεί να λάβει χώρα σύγκρουση πακέτων, πράγμα που απαιτεί επαναμεταβίβαση των πακέτων, οδηγώντας έτσι σε σπατάλη της χωρητικότητας και αυξημένη καθυστέρηση. Στα συστήματα EPS, τα γεγονότα αυτά διαχειρίζονται μέσω ηλεκτρονικού buffering. Τα οπτικά buffers μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας γραμμές καθυστέρησης ινών. Ωστόσο, είναι πολύ περιορισμένες και κουραστικές στη διαχείρισή τους. Μια άλλη προσέγγιση για την αποφυγή συγκρούσεων θα ήταν ο συγχρονισμός όλων των πακέτων από την προέλευσή τους. Παρ'όλα αυτά, σε μια τοπολογία τύπου πλέγματος ο συγχρονισμός ενός μεγάλου αριθμού κόμβων δεν είναι πρακτικός λόγω του μεγάλου αριθμού συνδέσεων με διαφορετικά μήκη κύματος. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες προτάσεις βασισμένες σε πλέγμα OPS συνήθως εκτελούνται υπό σχετικά χαμηλά φορτία χωρητικότητας του δικτύου (λιγότερο από 50% [182,183]) προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα συγκρούσεων. Εντούτοις, στην περίπτωση αυτή, οι πόροι του δικτύου πρέπει να είναι ιδιαίτερα μεγάλοι.



Εικόνα 2.14: Οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων με χρήση τοπολογίας που μοιάζει με πλέγμα (mesh-like topology).

Ένα τέτοιο ζήτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση μιας τοπολογίας δακτυλίου, όπως περιγράφεται στην εικόνα 2.15. Σε ένα δίκτυο δακτυλίων, πολλοί κόμβοι συνδέονται μέσω ενός δακτυλίου απλής ίνας και τα δεδομένα ανταλλάσσονται χρησιμοποιώντας πολυπλεγμένες χρονικές θυρίδες. Κάθε πακέτο συγκεκριμένου χρώματος που απεικονίζεται στην εικόνα 2.15 αναφέρεται σε έναν μοναδικό κόμβο προέλευσης και προορισμού. Η απόρριψη και η προσθήκη πακέτων από/μέσα στον δακτύλιο μπορεί να γίνει απλά χρησιμοποιώντας οπτικούς συζεύκτες. Σε αυτή την περίπτωση, κάθε δέκτης θα επιλέγει το ζητούμενο πακέτο. Στους οπτικούς δακτυλίους, κάθε κόμβος έχει μόνο ένα ζεύγος ινών εισόδου/εξόδου, επομένως δεν πραγματοποιείται πραγματική μεταγωγή πακέτων. Ωστόσο, καθώς τα δεδομένα περνούν διαφανώς μέσα από τους κόμβους, απαιτείται ένας οπτικός πακετομετρητής/διακλαδωτής θυρίδας (packet/slot blocker) για τη διαγραφή των λαμβανόμενων πακέτων, επιτρέποντας έτσι την επαναχρησιμοποίηση του χρονικού διαστήματος (βλέπε λευκές μπλοκαρισμένες σχισμές στην εικόνα 2.15). Η χωρητικότητα σε ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση του WDM ως επιπλέον διάσταση κοινής χρήσης. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί είτε ταχείς πομπούς με δυνατότητα επιλεξιμότητας ως προς το μήκος κύματος ή δέκτες (ή και τους δύο) για την διευθέτηση του ζητούμενου μήκους κύματος.



Εικόνα 2.15: Οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων με χρήση τοπολογίας δακτυλίου.

Στα δίκτυα δακτυλίων, ο συγχρονισμός των πακέτων μπορεί εύκολα να επιτευχθεί, καθώς όλα τα πακέτα ταξιδεύουν μέσω των ίδιων μέσων (ένα μονό δακτύλιο ινών). Ως εκ τούτου, 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. Παρόλα αυτά, ανεξάρτητα από το τι αρχιτεκτονική θα επιλεγεί, τελικά, η πυκνότητα των θυρών των μεταγωγών συμπλέγματος θα περιορίσει τον αριθμό των servers που μπορεί να συνδεθεί σε ένα σύμπλεγμα. Κατ' επέκταση, όταν γίνεται προσπάθεια διασύνδεσης των υψηλότερων επιπέδων των πυρήνων μεταγωγής (switching fabric), ο χαλκός οδηγεί σε αυστηρούς περιορισμούς κατά το σχεδιασμό της φυσικής διάταξης του κέντρου δεδομένων. Για να ξεπεραστούν τέτοιοι περιορισμοί, τα κέντρα δεδομένων επωφελούνται από την εκτεταμένη εμβέλεια των συστημάτων οπτικών ινών, τα οποία μπορούν να μεταδίδουν περισσότερα από 10, 40 ή 100 Gb/s σε εκατοντάδες μέτρα ή δεκάδες χιλιόμετρα ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται⁶. Επιπλέον, τα καλώδια ινών είναι πολύ λεπτότερα και ελαφρύτερα από τα χάλκινα και μπορούν να λυγίσουν περαιτέρω. Τέτοιες ιδιότητες είναι ευεργετικές κατά το σχεδιασμό των διασυνδέσεων εντός και μεταξύ των racks, στις οποίες συνήθως συσσωρεύεται ένας μεγάλος αριθμός καλωδίων. Οι καλωδιώσεις των οπτικών ινών όχι μόνο μειώνουν τον απαιτούμενο χώρο στις σχάρες καλωδίων αλλά και μειώνουν την έμφραξη της ροής αέρα στα racks, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση ψύξης [184].

Αυτά τα πλεονεκτήματα, μαζί με το μειωμένο κόστος των οπτικών συστημάτων, οδηγούν σε προοδευτική αντικατάσταση των χάλκινων συνδέσμων σε οπτικών, οι οποίοι αναμένεται να αντιπροσωπεύουν το 60% των συνδέσεων των κέντρων δεδομένων μέχρι το 2017 [185]. Για εφαρμογές υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, οι οπτικοί πομποδέκτες υλοποιούνται σε βυσματούμενες (pluggable) μονάδες, οι οποίες μπορούν εύκολα να συνδεθούν σε μεταγωγείς και περιγράφουν την τεχνολογία και τις προδιαγραφές για διάφορες συχνά χρησιμοποιούμενες οπτικές βυσματούμενες μονάδες που διατίθενται στο εμπόριο σήμερα⁷.

⁵Τα μοντέλα 10GBASE-T (10 GE) και 40GBASE-T (40 GE) μπορούν να επεκτείνουν την εμβέλεια των χάλκινων συνδέσμων στα 100 και 30 μέτρα αντίστοιχα, εις βάρος του υψηλότερου κόστους, κατανάλωσης και της καθυστέρησης.

⁶Απολογισμός της μη σύμφωνης τεχνολογίας. Η πιο δαπανηρή σύμφωνη τεχνολογία επιτρέπει τη μετάδοση χιλιάδων χιλιομέτρων.

Πίνακας 4: Τεχνολογία εφαρμογής, αριθμός ινών, απόσταση μετάδοσης και κατανάλωση ισχύος των συνηθέστερων χρησιμοποιούμενων βυσματούμενων μονάδων [186, 187, 188, 189, 190, 191].

	Type	Pluggable	Technology	Fibers	Reach	Consumption
10 G	SR	SFP+	1 x 10-Gb/s VCSEL	2 x MMF	400 m	<1 W
	LR	SFP+	1 x 10-Gb/s DFB	2 x SMF	10 km	<1 W
40 G	SR4	QSFP+	4 x 10-Gb/s VCSEL	8 x MMF	150 m	<1.5 W
	LR4	QSFP+	4 x 10-Gb/s DFB (WDM)	2 x SMF	10 km	<3.5 W
100 G	SR10	CFP/CFP2	10 x 10-Gb/s VCSEL	20 x MMF	150 m	CFP: <24 W CFP2: <12 W CFP4: <6 W QSFP28: <3.5 W
	SR4	CFP/CFP2/ CFP4/QSFP28	4 x 25-Gb/s VCSEL	8 x MMF	100 m	
	LR4	CFP/CFP2/ CFP4/QSFP28	4 x 25-Gb/s DFB (WDM)	2 x SMF	10 km	

⁷Οι πληροφορίες εφαρμογής, απόστασης και κατανάλωσης ενέργειας έχουν εξαχθεί από τα πρότυπα IEEE Ethernet [186-188] και από τον κατάλογο διαφόρων προμηθευτών εξοπλισμού (π.χ. Finisar [188, 189], Arista [190] και Cisco [191]).

⁸Ο αριθμός μετά το SR/LR υποδεικνύει τον αριθμό των γραμμών δεδομένων διπλής όψης που υποστηρίζονται από την κάθε μονάδα.

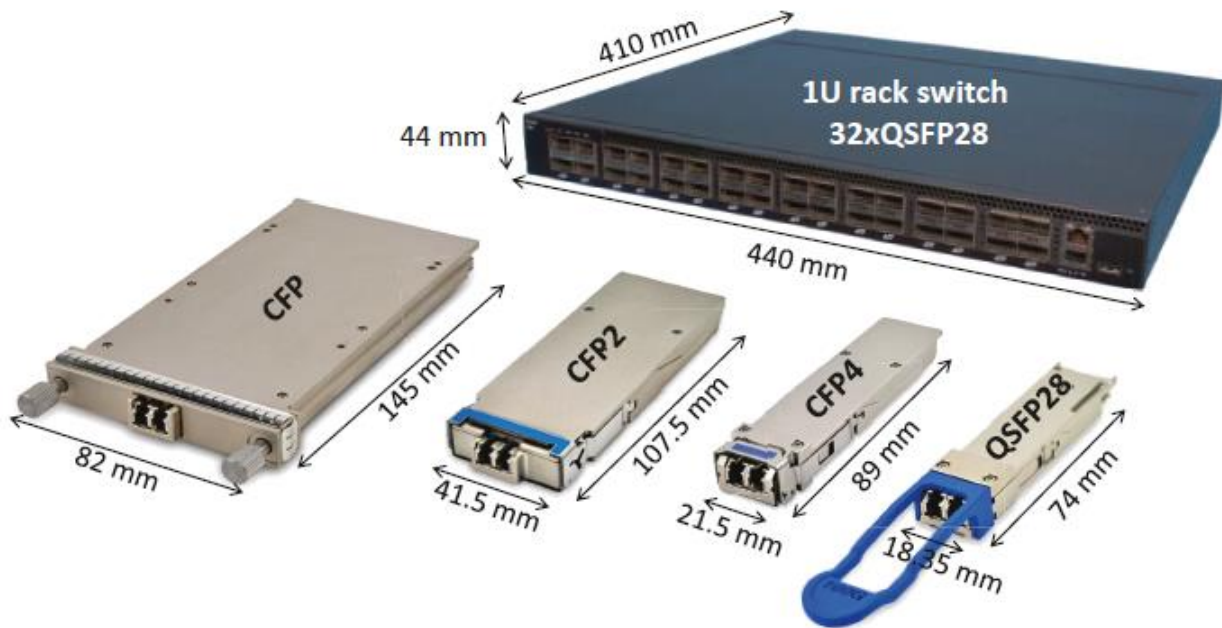
Όπως φαίνεται στον πίνακα 4, όλα τα πρότυπα Ethernet (10, 40 και 100 GE) περιλαμβάνουν τουλάχιστον δύο τύπους μονάδων: σύντομης (short reach, SR) και μεγάλης εμβέλειας (long reach, LR)⁸ [186, 187]. Οι μονάδες SR υλοποιούνται με τη χρήση λέιζερ κάθετης κοιλότητας επιφανειακής εκπομπής (vertical cavity surface emitting lasers, VCSELs), τα οποία είναι τα πλέον χρησιμοποιούμενα στα σημερινά κέντρα δεδομένων λόγω του εξαιρετικά χαμηλού κόστους τους [192]. Παρόλα αυτά, τα VCSELs πρέπει να συζευχθούν με πολύτροπες οπτικές ίνες (multi-mode fibers, MMFs) των οποίων η εμβέλεια περιορίζεται σε λίγες εκατοντάδες μέτρα (100-400 μέτρα όταν χρησιμοποιείται το τελευταίο OM4 MMF) [187].

Ωστόσο, πολύ μεγάλα κέντρα δεδομένων απαιτούν επίσης καλώδια λίγων χιλιομέτρων για να συνδέσουν τους διακόπτες συσσωμάτωσης/πυρήνα που τοποθετούνται σε διαφορετικούς ορόφους ή κτίρια. Τέτοιες μακρινές συνδέσεις υλοποιούνται συνήθως με μονότροπη ίνα (SMF) που συνδέει δύο βυσματούμενες μονάδες LR, οι οποίες πραγματοποιούν απευθείας διαμόρφωση με λέιζερ κατανεμημένης ανάδρασης (DFB). Αυτές οι μονάδες είναι σήμερα ακριβότερες, αλλά μπορούν να επιτύχουν απόσταση μετάδοσης έως και 10 χιλιομέτρων. Οι δημοφιλείς πάροχοι υπηρεσιών όπως το Facebook και η Google έχουν αποκαλύψει την προτίμησή τους για την ανάπτυξη της SMF για διάφορους λόγους: 1) έχει μεγαλύτερη εμβέλεια, η οποία παρέχει ευελιξία στη διάταξη του κέντρου δεδομένων, 2) μπορεί να υποστηρίξει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με αμελητέα ποινή, πράγμα που επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση της ίδιας εγκατάστασης ινών μετά την αναβάθμιση της τεχνολογίας, και 3) είναι φθηνότερη από την MMF (για την ίδια ίνα) [193].

Οι περισσότεροι κατασκευαστές παράγουν τις δομικές μονάδες τους σύμφωνα με το σχεδιασμό που θεσπίστηκε στις συμφωνίες πολλαπλών πηγών (multi-source agreements, MSAs), οι οποίες ορίζουν τις ηλεκτρικές, μηχανικές και θερμικές προδιαγραφές για να εξασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα, αλλά αφήνουν ανοιχτή την εφαρμογή τους στους παρόχους [194]. Ο πίνακας 4 περιγράφει ορισμένους από τους συνήθεις συντελεστές μορφής στα κέντρα δεδομένων: ο μικρός συντελεστής μορφής (small form factor, SFP), ο τετραπλός συντελεστής μορφής (quad small form factor, QSFP) και ο συντελεστής μορφής C (C form factor, CFP). Ο πρώτος, ο SFP, υποστήριζε αρχικά 1 GE (δεν παρουσιάζεται στον πίνακα). Βάσει αυτού του σχεδιασμού εμφανίστηκε το SFP+, το οποίο έχει τον ίδιο συντελεστή μορφής αλλά επιτρέπει την πλήρη αμφίδρομη μετάδοση 10 Gb/s μέσω ενός ζεύγους συνδεδεμένων ινών. Το SFP+ έχει πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος (μικρότερη από 1 W) και μικρό αποτύπωμα (8.5×13.4×56.5 mm), γεγονός που επιτρέπει την τοποθέτηση μέχρι και 56 μονάδων σε ένα ενιαίο 1U-rack (1U είναι το ύψος μιας μονάδας rack (44,45 mm)).

Η κλιμάκωση προς 40 Gb/s επιτυγχάνεται αυξάνοντας τον αριθμό των γραμμών 10 Gb/s, το οποίο μπορεί να υλοποιηθεί-κατασκευαστεί σε έναν ελαφρώς μεγαλύτερο συντελεστή μορφής QSFP+, όπου Quad (Q) αντιπροσωπεύει τέσσερις γραμμές (4×10 Gb/s σε αυτή την περίπτωση). Οι μονάδες SR QSFP+ απαιτούν τέσσερα ζεύγη ινών εισόδου/εξόδου, τα οποία είναι διατεταγμένα σε καλωδιοταινίες ινών και συνδέονται με τις μονάδες μέσω των συνδέσμων πολλαπλών ινών ώθησης (multi-fiber push on, MPO). Από την άλλη πλευρά, στο LR QSFP+, τα τέσσερα κανάλια πολυπλέκονται στην ίδια ίνα διαμέσου διαφορετικών μηκών κύματος χρησιμοποιώντας την τεχνική πολυπλεξίας μήκους κύματος σε μεγάλα διαστήματα μεταξύ τους (coarse wavelength-division multiplexing, CWDM). Ως εκ τούτου, οι μονάδες LR χρειάζονται μόνο ένα ζεύγος ινών εισόδου/εξόδου.

Παρά το γεγονός ότι το συνολικό μέγεθος (13.5×18.4×72.4 mm) και η κατανάλωση ενέργειας (λιγότερο από 3,5 W) είναι υψηλότερα από το SFP+, η διάσταση και η κατανάλωση ανά δυαδικό ψηφίο μειώνονται όταν χρησιμοποιείται το QSFP+. Με τη χρήση του τελευταίου, μπορούν να τοποθετηθούν μέχρι και 36 βύσματα, σε 1U-rack μεταγωγέα, ο οποίος υποστηρίζει μια συνολική χωρητικότητα 1.44 Tb/s, 2.6 φορές υψηλότερη από τη χωρητικότητα που υποστηρίζεται όταν χρησιμοποιείται το SFP+ (560 Gb/s). Επιπλέον, η αναβάθμιση σε QSFP+ έχει ως αποτέλεσμα μια μειωμένη κατανάλωση ενέργειας ανά δυαδικό ψηφίο, η οποία είναι μικρότερη από 0.1 W/Gb/s.



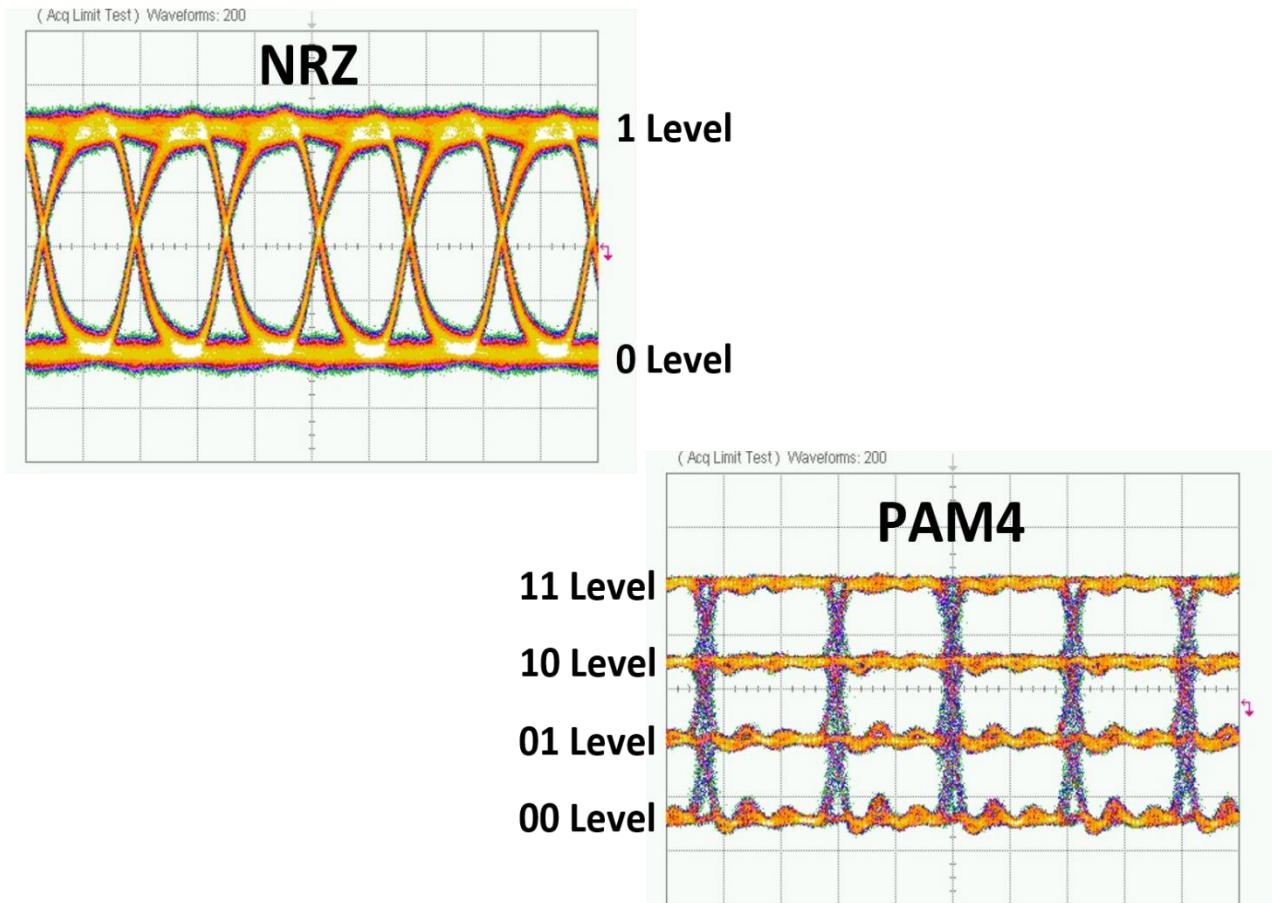
Εικόνα 2.16: 100-GE βυσματούμενοι συντελεστές μορφής (Από τον κατάλογο προϊόντων της Finisar [189]) και υπόδειγμα συσκευής υποστήριξης μεταγωγής με θύρες 32×100 GE (Από την εταιρία Netberg [195]).

Το άλμα στα 100 Gb/s ήταν αρχικά πρόκληση αν διατηρούσαν τέτοιους μικρούς συντελεστές μορφής. Κατά συνέπεια, αρχικά προτάθηκαν μεγαλύτερα δομοστοιχεία με βάση το CFP MSA, όπου το C αντιπροσωπεύει το νούμερο εκατό (σε λατινικό αλφάβητο). Όπως παρατηρήθηκε στον πίνακα 4, προτάθηκαν δύο κύριες προσεγγίσεις για το 100 GE: διατήρηση της ίδιας βασικής ταχύτητας αυξάνοντας ταυτόχρονα τον αριθμό των γραμμών (10×10 Gb/s) ή αύξηση του ρυθμού δεδομένων διατηρώντας τον συντελεστή κλίμακας επί 4 (4×25 Gb/s). Παρόλο που οι μονάδες SR υλοποιούνται με τη χρήση και των δύο προσεγγίσεων, τα βύσματα LR βασίζονται στη δεύτερη προσέγγιση, η οποία υλοποιείται χρησιμοποιώντας CWDM.

Η εικόνα 2.16 παρουσιάζει διαφορετικές γενιές βυσματούμενων μονάδων 100 GE και ένα υπόδειγμα 1U-rack μεταγωγέα. Είναι σαφές ότι το μέγεθος των βυσμάτων 100 GE έχει μειωθεί κατά τη διάρκεια των ετών, καθώς και η κατανάλωση ενέργειας (βλέπε πίνακα 4). Η τελευταία γενιά υλοποιείται στο QSFP28, το οποίο έχει τις ίδιες διαστάσεις και κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με το QSFP+ 40 Gb/s, ενώ παράγει πάνω από το διπλάσιο της χωρητικότητας του QSFP+ (100 Gb/s). Θα πρέπει να επισημανθεί ότι το επίθημα 28 αντιπροσωπεύει 28 Gb/s, δεδομένου ότι είναι ο μέγιστος ρυθμός ακαθάριστων δεδομένων που υποστηρίζεται από την μονάδα για να υπολογίζει τα πιθανά διορθωτικά σφάλματα επιβάρυνσης (FEC).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ομάδα Ethernet Alliance εργάζεται για νέα πρότυπα που θα υποστηρίζουν ρυθμούς δεδομένων 200 και 400 Gb/s. Συνεπώς, οι κύριοι κατασκευαστές ερευνούν ήδη την εφαρμογή τέτοιων διεπαφών υψηλής ταχύτητας δεδομένων διατηρώντας παράλληλα χαμηλό επίπεδο αποτύπωσης και κατανάλωση ενέργειας. Προκειμένου να επιτευχθούν τέτοιες ταχύτητες, προβλέπονται πιο προηγμένα και φασματικά αποδοτικά σχήματα διαμόρφωσης (δηλ. διαμόρφωση πλάτους τεσσάρων επιπέδων (4-level pulse amplitude modulation, PAM-4)) για να μειωθεί ο αριθμός των γραμμών ενώ επαναχρησιμοποιούνται τα σημερινά περιορισμένα δομικά στοιχεία εύρους ζώνης [196, 197].

Τα τρέχοντα βύσματα χρησιμοποιούν την πιο βασική διαμόρφωση παλμών κατά πλάτος δύο επιπέδων (2-level pulse amplitude modulation, PAM-2), η οποία μεταδίδει μόνο 1 bit/σύμβολο χρησιμοποιώντας δύο επίπεδα έντασης του μεταδιδόμενου φωτός. Διαφορετικά, το PAM-4 χρησιμοποιεί τέσσερα επίπεδα έντασης, τα οποία μπορούν να κωδικοποιήσουν 2 bits σε κάθε σύμβολο, διπλασιάζοντας έτσι την χωρητικότητα σε σύγκριση με το PAM-2 ενώ διατηρούν τον ίδιο ρυθμό συμβόλων και επομένως το ίδιο απαιτούμενο εύρος ζώνης.



Εικόνα 2.17: (Πάνω) Ηλεκτρικό σήμα δύο επιπέδων και (κάτω) τεσσάρων επιπέδων. Με την αύξηση των δύο σταθμών στο πολύ-επίπεδο σήμα τεσσάρων επιπέδων επιτυγχάνεται διπλασιασμός του ρυθμού μετάδοσης, απαιτώντας όμως υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο.

Η συνέπεια για αυτή τη μετακίνηση σε πρόσθετα επίπεδα ανά σύμβολο είναι μια απαίτηση για υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο (signal-to-noise ratio, SNR). Για να επιτευχθούν υψηλότερα SNR, τα δομικά στοιχεία PAM-4 απαιτούν μεγαλύτερη γραμμικότητα στη διαμορφωμένη πηγή λέιζερ και στον δέκτη, υψηλότερη ER, χαμηλό θόρυβο σχετικής έντασης (relative intensity noise, RIN), μεγαλύτερη ισχύ εξόδου και υψηλότερη απόκριση. Αυτά τα χαρακτηριστικά θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη και την επιλογή των εξαρτημάτων για την παροχή των απαιτούμενων επιδόσεων ενώ ταυτόχρονα θα επιτυγχάνεται το απαιτούμενο κόστος και πυκνότητα, ακόμη και όταν οι υπερμεγέθη εφαρμογές απαιτούν βελτιωμένους χαμηλούς προϋπολογισμούς που υπερβαίνουν τα πρότυπα 3-5 dB. Μέχρι στιγμής, μία από τις πιο ελπιδοφόρες υλοποιήσεις για μονάδες 200 Gb/s βασίζεται σε 4x50 Gb/s σε έναν τύπο QSFP56, ο οποίος θα έχει τις διαστάσεις του QSFP αλλά αυξημένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων γραμμής (μέχρι 56 Gb/s για να συμπεριλάβει πιθανόν και η επιβάρυνση λόγω FEC και πρωτοκόλλου). Οι μονές γραμμές 50-56 Gb/s θα εφαρμοστούν πιθανώς χρησιμοποιώντας σήματα PAM-4 με 25-28 GBaud. Από την άλλη πλευρά, ο σχεδιασμός 400 GE είναι πιο αμφιλεγόμενος λόγω της αρκετά ιδιαίτερης εφαρμογής του.

Επίσης, προτείνονται διάφορες προσεγγίσεις, οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικό αριθμό γραμμών για να επιτευχθεί συνολική ταχύτητα δεδομένων 400 Gb/s: 16x25 Gb/s (PAM-2), 8x50 Gb/s (PAM-4 με 25-28 GBaud) και 4x100 Gb/s (PAM-4 με 50-56 GBaud). Η ερευνητική κοινότητα καταβάλλει σήμερα μεγάλη προσπάθεια για την επίδειξη διασυνδέσεων μονής γραμμής 100 Gb/s (single carrier), η οποία θα επέτρεπε τη συνέχιση της κλιμάκωσης επί 4 της γραμμής που χρησιμοποιείται σήμερα. Το 100 GE σε μια μεμονωμένη γραμμή που εφαρμόζεται σε ένα συντελεστή μορφής SFP+ θεωρείται σήμερα το Άγιο Δισκοπότηρο των βυσματούμενων μονάδων του υπολογιστικού κέντρου δεδομένων λόγω της ανάπτυξης του που θεωρείται ιδιαίτερη πρόκληση [187, 198]. Στο παρακάτω κεφάλαιο 3 γίνεται εκτενή αναφορά στην υλοποίηση και αξιολόγησης μιας τέτοιας μονάδας για πρώτη φορά!

Σύνοψη και Συμπεράσματα Κεφαλαίου 2

Σε αυτό το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχιτεκτονικές των υπολογιστικών κέντρων μαζί με τις θεμελιώδεις μονάδες τους καθώς και η έννοια του cloud computing μέσω της χρήσης πολλαπλών υπολογιστικών κέντρων, όπου οι οπτικές διασυνδέσεις χρησιμοποιούνται κατά κόρον ώστε να γίνει εφικτή η εξυπηρέτηση των αναγκών της κυκλοφορίας των δεδομένων. Συνεπώς, έγινε κατανοητό ότι οι οπτικές διασυνδέσεις ανάλογα με την απόσταση μετάδοσης διαφοροποιούνται και μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά τις διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων με απόσταση μετάδοσης μέχρι 2 km, ενώ η δεύτερη σχετίζεται με τις διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων για αποστάσεις που μπορούν να αγγίζουν τα 5000 km ή ακόμα περισσότερο. Κατ' αυτό τον τρόπο γίνεται σαφές ότι αυτές οι δύο κατηγορίες είναι λογικό να διαφέρουν τόσο στην τεχνολογία όσο και στο είδος της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται για την επίτευξη των στόχων που αφορούν την κάλυψη της ζήτησης. Έχοντας λάβει υπόψη αυτό το σαφή διαχωρισμό, αναλύθηκαν εκτενώς οι κατηγορίες των υπολογιστικών κέντρων, δίνοντας έμφαση στις έννοιες του ομοσπονδιακού data center καθώς και των υπολογιστικών κέντρων βασισμένων σε αρχιτεκτονικές WAN.

Πιο συγκεκριμένα, ορισμένες αρχιτεκτονικές δικτύων περιγράφηκαν με βάση την τρέχουσα κατάσταση και την εξέλιξή τους σε ένα δεκαετές χρονοδιάγραμμα όσον αφορά την εξέλιξη της κυκλοφορίας των δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τα δίκτυα μεταφοράς και υπολογιστικών κέντρων της Telecom Italia ως παράδειγμα τυπικών ευρωπαϊκών αρχιτεκτονικών δικτύων. Σκοπός ήταν να περιγραφεί η πιθανή εξέλιξη των δικτύων όσον αφορά τον εξοπλισμό και τον χειρισμό των κυκλοφοριακών ροών. Επιπλέον, παρουσιάστηκε ο δικτυακός εξοπλισμός οπτικών διασυνδέσεων που χρησιμοποιείται στα υπολογιστικά κέντρα για την κάλυψη των αναγκών τους, όπως και τις τωρινές δυνατότητές τους, θέτοντας ωστόσο τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχουν ώστε να καλύψουν τις μελλοντικές ανάγκες.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν οι διαφορετικές τεχνικές επικοινωνίας/μεταγωγής που χρησιμοποιούνται σήμερα στα διάφορα τμήματα ενός δικτύου, ανάλογα με το είδος της κυκλοφορίας που διέρχεται μέσω αυτού, όπου αναλύθηκαν τρεις διαφορετικές τεχνικές μεταγωγής: οπτική μεταγωγή κυκλώματος (OCS), ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων (EPS) και οπτική μεταγωγή πακέτων (OPS). Τέλος, έλαβε χώρα μια ανάλυση στις λύσεις που υπάρχουν αυτή τη στιγμή στην αγορά για τις οπτικές διασυνδέσεις εντός και μεταξύ υπολογιστικών κέντρων, καθώς και τα πλεονεκτήματα αυτών των συσκευών λαμβάνοντας υπόψη το σχήμα διαμόρφωσης και τη συνολική χωρητικότητα. Όσον αφορά τις διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων πέραν του σχήματος διαμόρφωσης NRZ-OOK παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα του PAM-4 με βάση το οποίο επιτυγχάνεται διπλασιασμός της τελικής χωρητικότητας. Βέβαια, για την υλοποίηση του συγκεκριμένου σχήματος διαμόρφωσης απαιτούνται πολυπλοκότερα ηλεκτρονικά με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους καθώς και των διαστάσεων των τελικών συσκευών. Από την άλλη πλευρά, για τις διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων, τα σχήματα διαμόρφωσης ανώτερης τάξης αποτελούν μονόδρομο, καθώς μόνο με χρήση αυτών μπορούν να επιτευχθεί μετάδοση χιλιάδων χιλιομέτρων. Βέβαια, σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να τονισθεί ότι η χρήση πομποδεκτών πολλαπλών οπτικών ροών θα μπορούσε να αναβαθμίσει συνολικά την τελική χωρητικότητα προσδίδοντας παράλληλα ευελιξία, χωρίς μεγάλη αύξηση στο κόστος, καθώς χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση η ηλεκτρονικά ίδιου τύπου σε σχέση με τις εμπορικά διαθέσιμες οπτικές συσκευές.

Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 2

- [143] C. F. Lam, "Optical network technologies for datacenter networks (invited paper)," 2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), San Diego, CA, 2010, pp. 1-3.
- [144] Data Center Architecture Overview, [Online]: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Data_Center/DC_Infra2_5/DCInfra_1.html
- [145] IBM, "What is cloud computing?," [Online]: <https://www.ibm.com/cloud/learn/what-is-cloud-computing>
- [146] Loukas Paraschis "Fat tree Advancements in Data-Center Networking, and the importance of Optical Interconnections", OFC 2014, Th.2.F.3
- [147] Bin Dai, Guan Xu, Bengxiong Huang, Peng Qin, Yang Xu, "Enabling network innovation in data center networks with software defined networking: A survey, Journal of Network and Computer Applications," Volume 94, 2017, Pages 33-49
- [148] B. Spiers, "The role of optical interconnections in future data centers of large enterprises", OFC 2014 W1F.7
- [149] Xin Chen, et al., "Multimode and single-mode transmission over universal fiber for data center applications," Optical Fiber Technology, 2017
- [150] B. Koley, "The innovations and future needs of WDM transport for inter-data-center interconnections", OFC2014, M2E.1
- [151] Cisco, "The Future Is 40 Gigabit Ethernet," 2016. [Online]. Available: <http://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/switches/catalyst-6500-series-switches/white-paper-c11-737238.pdf>
- [152] "25G Ethernet consortium," 2014. [Online]. Available: [ww.25gethernet.org](http://www.25gethernet.org)
- [153] IEEE, "IEEE P802.3by 25 Gb/s Ethernet Task Force," 2016. [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/3/by/index.html>
- [154] B. Smith, D. Chalupsky, and M. Nowell, "The 2016 Ethernet Roadmap," in Open Server Summit (OSS), 2016, p. B103.
- [155] IEEE, "IEEE 802.3cd 50 Gb/s, 100 Gb/s, and 200 Gb/s Ethernet Task Force." [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/3/cd/index.html>
- [156] "IEEE P802.3bs 400 Gb/s Ethernet Task Force." [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/3/bs/index.html>
- [157] C.F. Lam, H. Liu, R. Urata, "What devices do data centers need?," OFC 2014, M2K.5
- [158] Cedric F. Lam, Hong Liu, Bikash Koley, Xiaoxue Zhao, Valey Kamalov, and Vijay Gill "Fiber Optic Communication Technologies: what's Needed for Datacenter Network Operations", Google Inc., IEEE Communications Magazine, July 2010
- [159] http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/FTTH-Handbook_2014-V6.0.pdf
- [160] Xiaoxue Zhao, Vijay Vusirikala, Bikash Koley, Valey Kamalov, and Tad Hofmeister "The Prospect of Inter-Data-Center Optical Networks", Google Inc., IEEE Communications Magazine, September 2013
- [161] G. Kramer, M. De Andrade, R. Roy, and P. Chowdhury "Evolution of Optical Access Networks: Architectures and Capacity Upgrades", By Vol. 100, No. 5, May 2012, Proceedings of the IEEE
- [162] Cisco White paper, The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/loT_IBSG_0411FINAL.pdf
- [163] C. F. Lam and W. I. Way, "A System's View of Metro and Regional Optical Networks," Photonics West, San Jose, CA, Jan. 29, 2009.
- [164] A. Drakos, T. G. Orphanoudakis, and A. Stavdas, "Performance benchmarking of core optical networking paradigms", Optics Express, Vol. 20, Issue 16, pp. 17421-17439, 2012.
- [165] P. J. Winzer, "Spatial Multiplexing in Fiber Optics: The 10X Scaling of Metro/Core Capacities," in Bell Labs Technical Journal, vol. 19, pp. 22-30, 2014.
- [166] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord and S. J. B. Yoo, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?," in IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 2, pp. s12-s20, February 2012.
- [167] N. Sambo et al., "Next generation sliceable bandwidth variable transponders," in IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 2, pp. 163-171, Feb. 2015.
- [168] Georgios S. Zervas, et al., "Multi-Granular Optical Cross-Connect: Design, Analysis, and Demonstration," J. Opt. Commun. Netw. 1, 69-84 (2009)
- [169] P. J. Winzer, "High-Spectral-Efficiency Optical Modulation Formats," in Journal of Lightwave Technology, vol. 30, no. 24, pp. 3824-3835, Dec.15, 2012.
- [170] G. Kramer, M. De Andrade, R. Roy, and P. Chowdhury "Evolution of Optical Access Networks: Architectures and Capacity Upgrades", Proceedings of the IEEE, Vol. 100, No. 5, May 2012
- [171] W. Liu, "Metro Transport Architectures for the Future", OFC 2014, M3B.3
- [172] Jackman, N. A., Patel, S. H., Mikkelsen, B. P. and Korotky, S. K. (1999), Optical cross connects for optical networking. Bell Labs Tech. J., 4: 262-281
- [173] S. Gringeri et al., "Flexible Architectures for Optical Transport Nodes and Networks", IEEE Comm. Magazine, July 2010

- [174] X. Liu, S. Chandrasekhar "Superchannel for Next-Generation Optical Networks" OFC 2014 W1H.5
- [175] S. L. Woodward, "Benefits and Requirements of Flexible-Grid ROADMs and Networks," JOCN VOL. 5, NO. 10/OCTOBER 2013
- [176] S. Gringeri, B. Basch, V. Shukla, R. Egorov, and T. J. Xia, "Flexible architectures for optical transport nodes and networks," IEEE Commun. Mag., vol. 48, no. 7, pp. 40 – 50, July 2010
- [177] Finisar white paper "Balancing Performance, Flexibility, and Scalability in Optical Networks".
- [178] Rizzelli, "Reach-Related Energy Consumption in IP-Over-WDM 100G Translucent Networks," JLT VOL. 31, NO. 11, 2013
- [179] T. Zami et al., "Suitability of 130 Gb/s and 260 Gb/s real time transponders for advanced A/D stages in wavelength cross-connects," OFC 2014, San Francisco, CA, 2014, pp. 1-3.
- [180] N. Riesen and J. D. Love, "Spatial mode-division-multiplexing of few-mode fiber," 2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications, Amsterdam, 2012, pp. 1-3.
- [181] Current Analysis, "Clouds, Networks and the Data Center – How Do They Communicate?"
- [182] K. I. Kitayama, et al., "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
- [183] 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.
- [184] Finisar, "Cabling in the Data Center," 2016. [Online]. Available: <https://www.finisar.com/markets/data-center/cabling-data-center>
- [185] L. Huff, "Data center optics, ECOC market focus," in Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC), 2013
- [186] IEEE, "IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 5: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Paramet," pp. 1–302, 2010.
- [187] J. D. Ambrosia and S. G. Kipp, "The 2015 Ethernet Roadmap," p. 15, 2015.
- [188] IEEE and ANSI, "IEEE Std 802.3ba Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 40 Gb/s and 100 Gb/s Operation," 2010.
- [189] "Optical Transceivers," 2016. [Online]. Available: <https://www.finisar.com/optical-transceivers>
- [190] Arista, "Optical modules and cables," Tech. Rep., 2016.
- [191] Cisco, "Pluggable Optical Modules: Transceivers for the Cisco ONS Family," 2016.
- [192] J. A. Tatum, "The evolution of 850nm VCSELs from 10Gb/s to 25 and 56Gb/s," in Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2014, p. Th3C.1
- [193] A. Weissberger, "Hyper Scale Mega Data Centers: Time is Now for Fiber Optics to the Compute Server," 2016.
- [194] C. DeCusatis, Handbook of Fiber Optic Data Communication. Academic Press, 2013.
- [195] Netberg, "Aurora 720 100G with ONIE," 2016.
- [196] IEEE, "IEEE 802.3cd 50 Gb/s, 100 Gb/s, and 200 Gb/s Ethernet Task Force."
- [197] "IEEE P802.3bs 400 Gb/s Ethernet Task Force"
- [198] S. Kipp, "Ethernet Alliance 100GbE Challenges," 2014.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πειράματα Υπερ-Υψηλών Ρυθμών Οπτικής Μετάδοσης Δεδομένων με Σχήμα Απευθείας Διαμόρφωσης βασισμένα στη Χρήση Ολοκληρωμένων Πολυμερικών Πομπών για Αρχιτεκτονική Οπτικής Διασύνδεσης Υπολογιστικών Συστημάτων εντός Υπολογιστικών Κέντρων

3.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο σχετίζεται με την κατασκευή και την αξιολόγηση ολοκληρωμένων πολυμερικών οπτικών πομπών υπερ-υψηλών ταχυτήτων έως 100 Gb/s βασισμένων σε οπτικό σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK για διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων εντός υπολογιστικών κέντρων. Ο στόχος της συγκεκριμένης διερεύνησης αποσκοπεί τόσο στην αναβάθμιση του συνολικού ρυθμού δεδομένων σε μια οπτική ροή-κανάλι σε αρχιτεκτονικές δικτύων εντός υπολογιστικών κέντρων. Η έως τώρα μελέτη κάλυπτε τη παρουσίαση των περισσότερων παραμέτρων, τεχνικών και αρχιτεκτονικών δικτύων που αφορούσαν τα στάδια της: διαμόρφωσης, μετάδοσης και απευθείας λήψης των οπτικών καναλιών με σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK με χρήση απευθείας ανίχνευσης στο δέκτη. Με βάση την πολυμερική συμβολομετρική διάταξη τύπου Mach-Zehnder και την κόλληση μιας ενεργής δομής λείζερ ανάδρασης ανεστραμμένη κατά 90 μοίρες υλοποιείται ένας ολοκληρωμένος οπτικός πομπός σε συνδυασμό με την χρήση ηλεκτρονικού κυκλώματος πολυπλεξίας και ενίσχυσης δυαδικών σημάτων τελικού παραγόμενου ρυθμού 100 Gb/s κατασκευασμένου στην πλατφόρμα InP-DHBT.

Προς αυτήν την κατεύθυνση και με το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο οπτικό πομπό δημιουργήθηκε και αξιολογήθηκε, ως προς τον επιτεύξιμο ρυθμό λαθών, ένα μόνο οπτικό κανάλι με σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 100 Gb/s. Στις υποενότητες που ακολουθούν γίνεται αναλυτική παρουσίαση της πειραματικής διάταξης τόσο από την πλευρά του πομπού όσο και από το δέκτη καθώς και της αξιολόγησης συνολικά του ολοκληρωμένου οπτικού πομπού 100 Gb/s. Στο πρώτο μέρος το οπτικό σήμα υπό αξιολόγηση ανιχνεύθηκε με τη βοήθεια ενός διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης στην πλευρά του δέκτη, αποπολυπλέκοντας το οπτικό κανάλι από 80 Gb/s σε 2 κανάλια των 40 Gb/s και στη συνέχεια με περαιτέρω αποπολυπλεξία στο ηλεκτρικό κομμάτι τα 2 κανάλια 40 Gb/s γίνονταν οκτώ με ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s το καθένα. Η αξιολόγηση της ποιότητας των καναλιών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός αναλυτή λαθών (Bit Error Rate Tester, BERT). Και για τα οκτώ κανάλια επιδείχθηκε ρυθμός λαθών χαμηλότερος από 10^{-11} .

Αντίθετα, στο δεύτερο μέρος της αξιολόγησης χρησιμοποιήθηκε υψίρρυθμος ολοκληρωμένος οπτικός δέκτης αντί του διαμορφωτή EAM με στόχο την αξιολόγηση του οπτικού σήματος στα 100 Gb/s. Αυτός ο δέκτης, πέραν της οπτικής φωτοδιόδου ικανής για ανίχνευση οπτικών σημάτων της τάξης των 100 Gb/s, ενσωμάτωσε και υψίρρυθμο 1:2 ηλεκτρονικό αποπολυπλέκτη ώστε να αποπολυπλέξει στο πεδίο του χρόνου την ηλεκτρονική δυαδική πληροφορία από τα 100 Gb/s σε δύο κανάλια των 50 Gb/s. Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση με τον πρώτο τρόπο αξιολόγησης με χρήση EAM, τα 2 ηλεκτρικά κανάλια 50 Gb/s αποπολυπλέχθηκαν σε 4 κανάλια των 12.5 Gb/s και αξιολογήθηκαν με τη βοήθεια του BERT. Και τα οκτώ αυτά κανάλια παρουσίασαν αξιόπιστη λειτουργία, επιδεικνύοντας ρυθμό λαθών χαμηλότερο από 10^{-10} . Παράλληλα, παρουσιάζεται το πεδίο εφαρμογής του συγκεκριμένου πομπού 100 Gb/s εντός υπολογιστικών κέντρων με βάση μια αρχιτεκτονική που σχετίζεται με τοπολογία δακτυλίου με οπτικά κυκλώματα μεταγωγής (ring-based optical circuit switching domain) για διασυνδέσεις PODs (point of delivery) μέχρι 2 km.

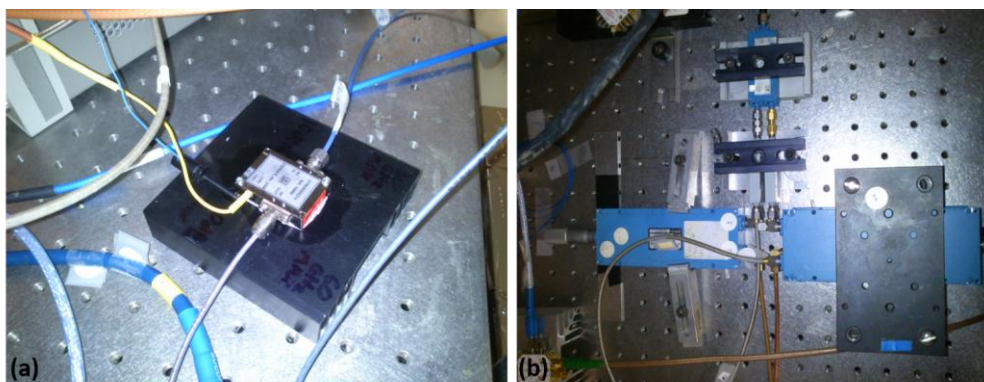
3.2 Πειραματική Διάταξη από την Πλευρά του Πομπού 100 Gb/s

Σε αυτή την υπο-ενότητα παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη από την πλευρά του πομπού καθώς και τα υποστηρικτικά κυκλώματα που απαιτούνται για την παραγωγή των υψίρρυθμων ηλεκτρικών σημάτων εισόδου στα 50 Gb/s. Το απεικονιστικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης για την ορθή λειτουργία και υποστήριξη του ολοκληρωμένου οπτικού πομπού 100 Gb/s παρουσιάζεται γραφικά στην εικόνα 3.1. Αυτή η διάταξη είχε σχεδιαστεί και αναπτυχθεί με γνώμονα να παρέχονται δύο υψηλής ποιότητας ηλεκτρικά σήματα δεδομένων 50 Gb/s στις δύο ηλεκτρικές εισόδους του ολοκληρωμένου οπτικού πομπού και ένα υψηλής ποιότητας ηλεκτρικό ρολόι 50 GHz.

πρακτικό πρόβλημα στην εύρεση καλωδίων τεράστιου μήκους καθώς και η συνολική περίοδος της PRBS θα ήταν 171798691760 ns.

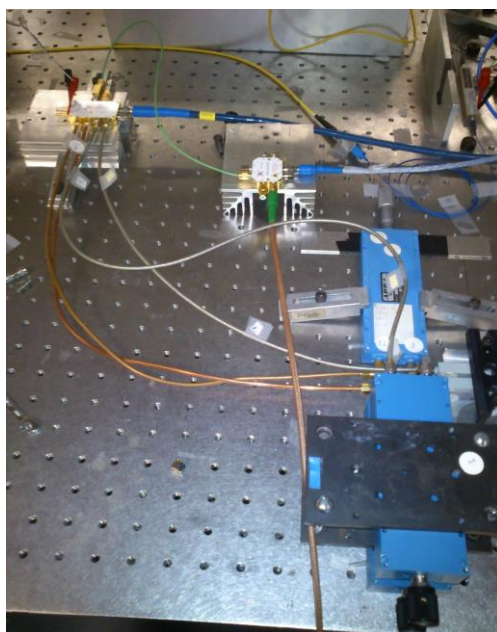
- Η έξοδος του PPG παράγει μια 2^7-1 εκτεταμένη PRBS. Τα διαφορετικά μήκη των καλωδίων στην είσοδο του 4:1 MUX είναι εκείνα που αντιστοιχούν σε $T/4$, $T/2$ και $3T/4$ χρονικής καθυστέρησης μεταξύ της δεύτερης, της τρίτης και της τέταρτης γραμμής μεταφοράς σε σχέση με την πρώτη γραμμή μεταφοράς, όπου T ήταν η περίοδος της 2^7-1 μακρόστενης PRBS 12,5 Gb/s (10.160 ns). Η ίδια προσέγγιση χρησιμοποιείται για το στάδιο της 2:1 πολυπλεξίας από 50 σε 100 Gb/s, καθώς η συνολική χρονική διαφορά μεταξύ των δύο διαδρομών είναι $T'/2$, όπου T' η περίοδος της 2^7-1 μακρόστενης PRBS 50 Gb/s (2,54 ns). Αυτές οι χρονικές διαφορές στο πρώτο και το δεύτερο στάδιο πολυπλεξίας της 2^7-1 PRBS, εξασφαλίζουν ότι το τελικό ηλεκτρικό σήμα 100 Gb/s που οδηγεί το διαμορφωτή να είναι και πάλι η ίδια 2^7-1 μακρόστενη PRBS [199].

Η εικόνα 3.2 απεικονίζει τις βασικές συσκευές της διάταξης, συμπεριλαμβανομένου του (α) διπλασιαστή συχνότητας και (b) το στάδιο του "διαχωρισμού-και-ολίσθησης" στην είσοδο του 4:1 MUX για την παραγωγή των τεσσάρων σημάτων 12.5 Gb/s.



Εικόνα 3.2: Τα βασικά ηλεκτρονικά δομικά στοιχεία του πειραματικού οπτικού συστήματος από την πλευρά του οπτικού πομπού: (α) διπλασιαστής συχνότητας και (b) το στάδιο του "διαχωρισμού-και-ολίσθησης".

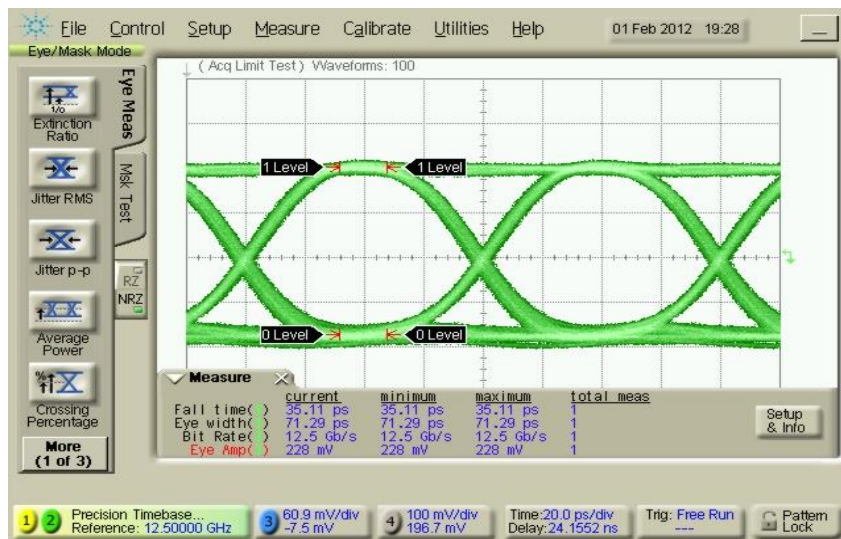
Παρακάτω, στην φωτογραφία της εικόνας 3.3 παρουσιάζεται το τμήμα της διάταξης με τον εμπορικά διαθέσιμο 4:1 πολυπλέκτη, ο οποίος έχει τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικών σημάτων μέχρι 50 Gb/s καθώς και τη μονάδα 1:4 αποπολυπλέκτη, η οποία ήταν ικανή να διαχειρίζεται σήματα στην είσοδό της μέχρι 50 Gb/s. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας αποδίδει στην έξοδο τέσσερα ηλεκτρικά σήματα 12.5 Gb/s μετά από την αποπολυπλέξια που λαμβάνει χώρα εντός της συσκευής.



Εικόνα 3.3: Άποψη της ηλεκτρικής διάταξης του πειραματικού οπτικού συστήματος με τον 4:1 πολυπλέκτη και τον 1:4 αποπολυπλέκτη.

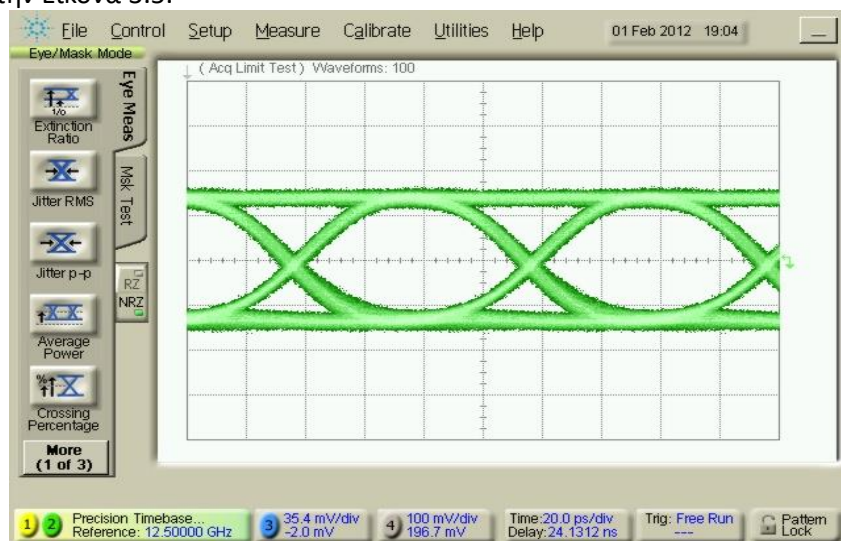
3.3 Προκαταρκτικά Αποτελέσματα από την Πλευρά του Πομπού 100 Gb/s

Αφού πραγματοποιήθηκε η εκτενής παρουσίαση των βασικών μονάδων της πειραματικής διάταξης ακολουθούν παρακάτω τα παραγόμενα σήματα που προκύπτουν από τις προαναφερθέντες ηλεκτρονικές συσκευές. Στην εικόνα 3.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα οφθαλμού της PRBS μήκους 2^7-1 στην έξοδο της γεννήτριας παλμών PPG.



Εικόνα 3.4: Το διάγραμμα οφθαλμού του ηλεκτρικού σήματος των 12.5 Gb/s στην έξοδο του PPG.

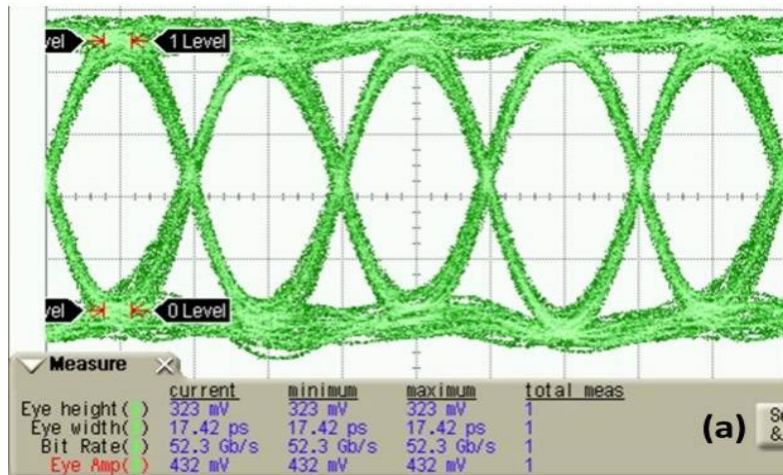
Πρόκειται στην ουσία για το σήμα το οποίο στη συνέχεια εισέρχεται στο στάδιο διαχωρισμού και ολίσθησης («split-and-shift»), από το οποίο προκύπτουν τέσσερα αντίγραφα που οδηγούν τις αντίστοιχες εισόδους του 4:1 πολυπλέκτη. Το διάγραμμα οφθαλμού ενός από αυτά τα τέσσερα σήματα των 12.5 Gb/s παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5: Το διάγραμμα οφθαλμού για μια από τις τέσσερις εισόδους 12.5 Gb/s του 4:1 πολυπλέκτη.

Μια παρατήρηση του παραπάνω διαγράμματος οφθαλμού δείχνει ότι το «μάτι» του ηλεκτρικού σήματος παραμένει ανοιχτό χωρίς ουσιαστική ελάττωση του εύρους ζώνης του σήματος. Όσον αφορά στο πλάτος του σήματος, αυτό στη χειρότερη περίπτωση παραμένει πάνω από 350 mVpp, στάθμη η οποία είναι πάνω από τα 300 mVpp τα οποία αντιστοιχούν στην ελάχιστη απαιτούμενη τάση peak-to-peak στις θύρες εισόδου του πολυπλέκτη.

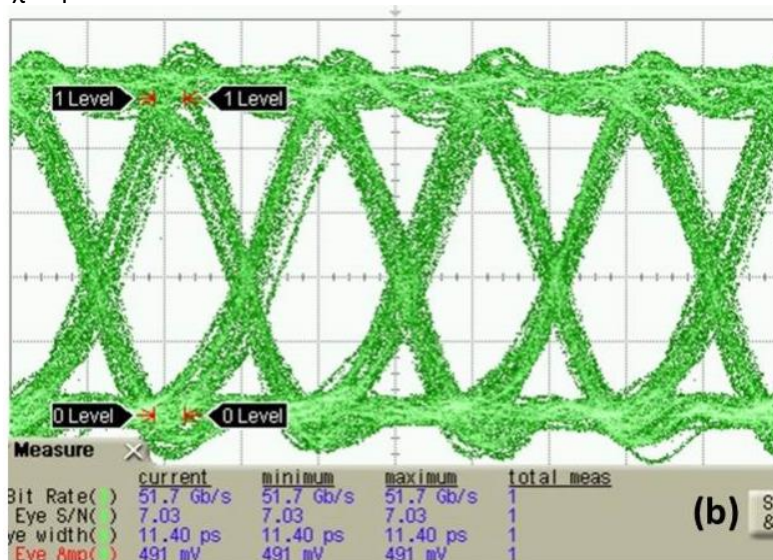
Σημειώνεται ότι ο επιλεγμένος πολυπλέκτης έχει επαρκές εύρος ζώνης το οποίο επιτρέπει ορθή λειτουργία μέχρι 56 Gb/s [200]. Επίσης για τη λειτουργία του πολυπλέκτη, εκτός από τα τέσσερα σήματα εισόδου είναι απαραίτητο ένα ηλεκτρικό ρολόι εισόδου (ημιτονοειδούς μορφής) με την μισή συχνότητα σε σχέση με την τελική (25 GHz στην προκειμένη περίπτωση), ενώ το πολυπλεγμένο σήμα εξόδου έχει πλάτος 548 mVpp. Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα οφθαλμού του πολυπλεγμένου σήματος 50 Gb/s, το οποίο προέκυψε στην έξοδο του πολυπλέκτη.



Εικόνα 3.6: Ηλεκτρικό σήμα εξόδου 50 Gb/s στην έξοδο του 4:1 πολυπλέκτη.

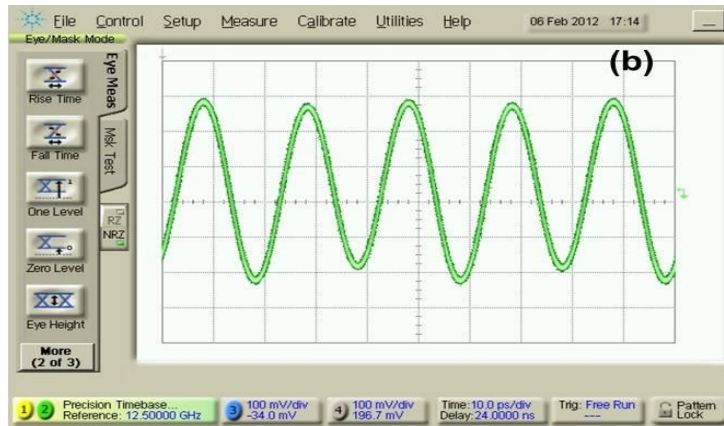
Το παραπάνω ηλεκτρικό σήμα 50 Gb/s που παράγεται στην έξοδο του 4:1 πολυπλέκτη υφίσταται περαιτέρω εξασθένηση μέχρι 200 mVpp, εξαιτίας της διέλευσής του από το διαχωριστή 3-dB και των ολισθητή φάσης. Από τις προδιαγραφές του πρωτότυπου οπτικού πομπού προκύπτει ότι αυτή η εξασθενημένη στάθμη του τελικού σήματος είναι οριακά πάνω από την ευαισθησία του ενσωματωμένου στον οπτικό πομπό 2:1 πολυπλέκτη. Ως εκ τούτου είναι πολύ πιθανό σε διάφορες περιπτώσεις να είναι απαραίτητη η ενίσχυση του σήματος εξόδου του πολυπλέκτη προς την υπό εξέταση διάταξη ώστε να αντισταθμιστούν τυχόν απώλειες προερχόμενες από τις παρεμβαλλόμενες γραμμές μεταφοράς. Αυτή η ανάγκη θα καταστεί ακόμα πιο επιτακτική στην περίπτωση που η end-to-end πλατφόρμα κληθεί να υποστηρίξει ακόμα υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης (άνω των 100 Gb/s).

Στην προκειμένη περίπτωση το σήμα εξόδου του πολυπλέκτη ενισχύεται μέσω ενός RF ενισχυτή, με δυνατότητα λειτουργίας μέχρι 56 Gb/s και πλάτος εξόδου 7.5 Vpp. Το διάγραμμα οφθαλμού του ενισχυμένου σήματος μετά την έξοδο του RF ενισχυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7. Το διάγραμμα αυτό αποκαλύπτει την αναπόφευκτη υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του σήματος, εξαιτίας της παρεμβολής του ενισχυτή.



Εικόνα 3.7: Το ηλεκτρικό σήμα των 50 Gb/s της εξόδου του πολυπλέκτη 4:1 μετά την ενίσχυσή του.

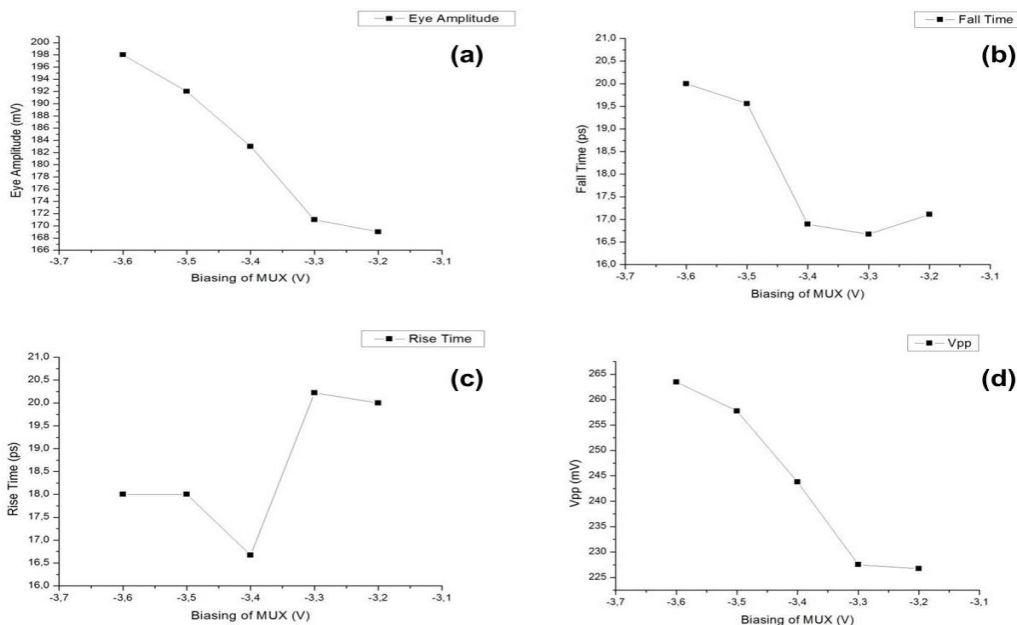
Όπως φαίνεται στην τοπολογία της εικόνας 3.1, στην είσοδο της φωτονικής διάταξης υπό αξιολόγηση, και συγκεκριμένα στον ενσωματωμένο 2:1 πολυπλέκτη, εκτός από τα δύο σήματα των 50 Gb/s εισάγεται και ένα τρίτο ηλεκτρικό σήμα 50 GHz, το οποίο αντιστοιχεί στο απαιτούμενο ρολόι, απαραίτητο για το συγχρονισμό της διαδικασίας πολυπλεξίας που συντελείται στον υπό αξιολόγηση οπτικό πομπό. Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, αυτό το σήμα ρολογιού προέρχεται από μια ηλεκτρική γεννήτρια σήματος συχνότητας 25 GHz, μετά τη διέλευση του τελευταίου μέσα από έναν εξαιρετικά υψίρρυθμο διπλασιαστή συχνότητας. Στην παρακάτω εικόνα 3.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα οφθαλμού του ρολογιού 50 GHz που οδηγεί τον πολυπλέκτη του ολοκληρωμένου οπτικού πομπού.



Εικόνα 3.8: Το διάγραμμα οφθαλμού του ηλεκτρικού ρολογιού 50 GHz που οδηγούσε τον ενσωματωμένο ηλεκτρονικό 2:1 MUX του οπτικού πομπού.

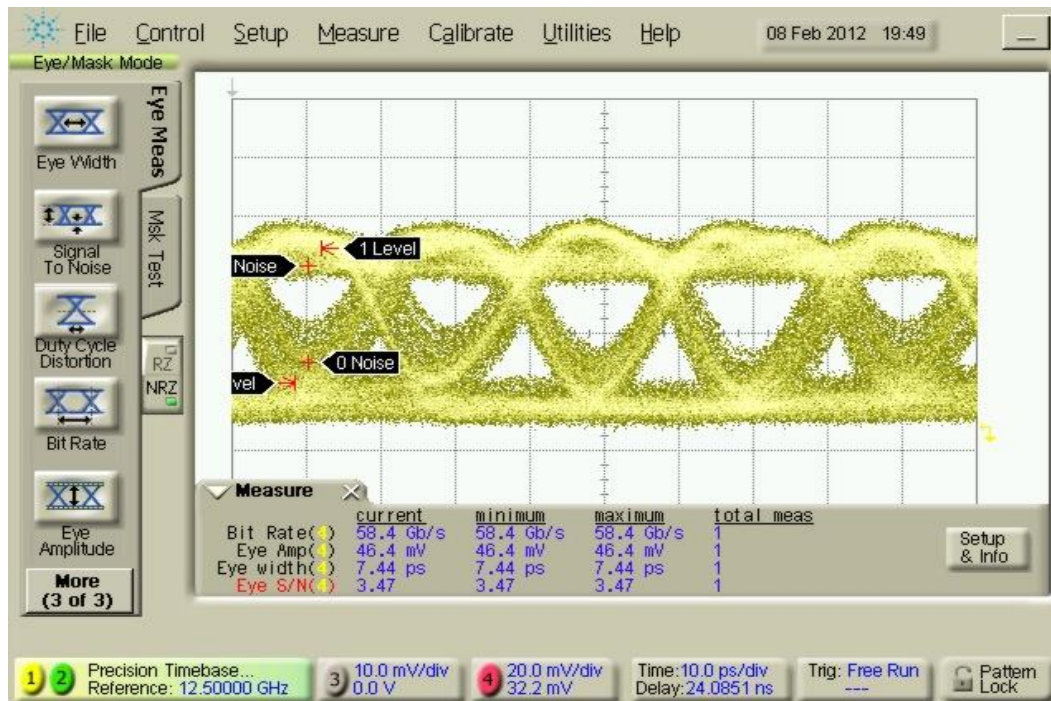
Το πλάτος του σήματος ρολογιού είναι ήδη επάνω από το ελάχιστο απαιτούμενο πλάτος (200 mVpp) που ορίζουν οι προδιαγραφές του εσωτερικού πολυπλέκτη της φωτονικής διάταξης, γεγονός που απαλείφει την ανάγκη για χρήση ενισχυτή RF στενής ζώνης (narrow band).

Βελτιστοποίηση της λειτουργίας του 4:1 πολυπλέκτη: Είναι σαφές από την παραπάνω περιγραφή ότι ο εξωτερικός 4:1 πολυπλέκτης έχει ένα κεντρικό ρόλο στο πεδίο δοκιμών για την παραγωγή 50 Gb/s ηλεκτρικού σήματος ξεκινώντας από τον αρχικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 12.5 Gb/s και χρησιμοποιώντας ηλεκτρονική πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Electronic Time Division Multiplexing, ETDM) ώστε να παράγει το τελικό σήμα 50 Gb/s. Η παρακάτω εικόνα 3.9 παρουσιάζει τη μελέτη για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του MUX σε σχέση με την κύρια παράμετρο λειτουργίας (τάση πόλωσης). Με βάση τα χαρακτηριστικά του όπως προκύπτουν από τον κατασκευαστή, ο πολυπλέκτης χρησιμοποιεί μια αρνητική τάση πόλωσης μεταξύ -3.6 και -3.2V [200]. Δεδομένου ότι ο πολυπλέκτης τροφοδοτείται με σήματα εισόδου υψηλής ποιότητας με Vpp παραπάνω από το κατώτατο όριο ισχύος που απαιτείται στην εισόδου του, η διακύμανση της τάσης πόλωσης έχει σημαντικό αντίκτυπο στις βασικές παραμέτρους της ποιότητας της πολυπλεγμένης εξόδου. Αυτό παρουσιάζεται στην εικόνα 3.9, η οποία απεικονίζει τη σχετική διακύμανση του πλάτους του διαγράμματος οφθαλμού, του χρόνου ανύψωσης και καθόδου, και του πλάτους από κορυφή σε κορυφή στο παραγόμενο 50 Gb/s σήμα. Όπως παρατηρείται, οι τιμές στη μέση της περιοχής λειτουργίας (περίπου -3.4 Vpp) επιτρέπουν τη βέλτιστη λειτουργία, επειδή ελαχιστοποιούνται οι χρόνοι ανύψωσης και καθόδου του σήματος κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων μεταξύ των συμβόλων "0" και "1".



Εικόνα 3.9: (a) Πλάτος οφθαλμού, (b) χρόνος ανόδου, (c) χρόνος καθόδου και (d) μέγιστο πλάτος (Vpp) του πολυπλεγμένου σήματος 50 Gb/s ως συνάρτηση της τάσης πόλωσης του πολυπλέκτη.

Κατά τη διάρκεια των αρχικών πειραματικών δοκιμών του υπό αξιολόγηση συστήματος, και πριν τοποθετηθεί ο τελικός ολοκληρωμένος πομπός το πολυπλεγμένο 50 Gb/s ηλεκτρικό σήμα ενισχύθηκε μέχρι τη στάθμη των 2.9 Vpp, μέσω ενός εμπορικά διαθέσιμου RF ενισχυτή [201], ούτως ώστε να οδηγήσει έναν επίσης εμπορικά διαθέσιμο LiNbO₃ διαμορφωτή [202]. Λόγω του περιορισμένου ηλεκτροπτικού εύρους ζώνης του τελευταίου το διάγραμμα οφθαλμού που προέκυψε ήταν χαμηλής ποιότητας όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.10. Το ίδιο ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για να οδηγήσει τον πολυμερικό πομποδέκτη, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω.

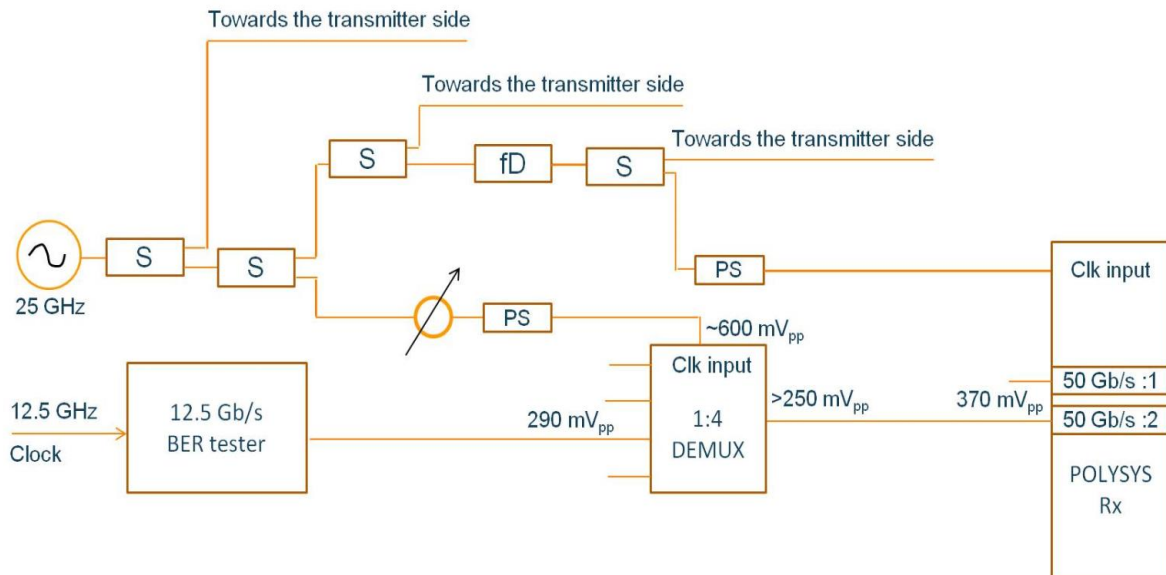


Εικόνα 3.10: (α) Διαμορφωμένο οπτικό σήμα 50 Gb/s με χρήση ενός εμπορικά διαθέσιμου LiNbO₃ διαμορφωτή.

3.4 Πειραματική Διάταξη Οπτικού Δέκτη 100 Gb/s

Η βασική πειραματική διάταξη για την υποστήριξη ορθής λειτουργία του οπτικού δέκτη 100 Gb/s παρουσιάζεται στην εικόνα 3.11. Η κεντρική μονάδα αυτής της διάταξης είναι και πάλι η γεννήτρια συχνοτήτων σήματος που παράγει ένα ημιτονοειδές σήμα 25 GHz. Όπως περιγράφεται ήδη στο τμήμα 1.2.1, το ημιτονοειδές σήμα χωρίζεται σε τρία μέρη, όπου το πρώτο οδηγείται προς την πλευρά του οπτικού πομπού, ένα τμήμα του δεύτερου μέρους περνάει μέσω του διπλασιαστή συχνότητας, ώστε να παραχθεί το ηλεκτρικό ρολόι συχνότητας 50 GHz που τροφοδοτεί τον εσωτερικό 1:2 αποπολυπλέκτη που είναι ενσωματωμένος στο εσωτερικό του ολοκληρωμένου οπτικού δέκτη, ενώ το τρίτο σκέλος τροφοδοτεί τον εξωτερικό 1:4 αποπολυπλέκτη. Σημειώνεται ότι ο αναλυτής ρυθμού λαθών (BERT) που είναι μέρος της διάταξης και απαραίτητος για την αξιολόγηση του διαμορφωμένου οπτικού σήματος, λαμβάνει το ηλεκτρικό ρολόι 12.5 GHz απευθείας από τον PPG που έχει τοποθετηθεί στην πλευρά του πομπού της διάταξης.

Η συσκευή του οπτικού δέκτη λαμβάνει το οπτικό σήμα 100 Gb/s και τροφοδοτεί τον 1:2 αποπολυπλέκτη που είναι ενσωματωμένος στο εσωτερικό της ολοκληρωμένης οπτικής συσκευής. Ο 1:2 αποπολυπλέκτης παρέχει δύο ηλεκτρικά σήματα 50 Gb/s στις δύο θύρες εξόδου της συσκευής. Στη συνέχεια, κάθε ένα από αυτά τα σήματα έχει πλάτος 370 mVpp, το οποίο είναι πάνω από το ελάχιστο απαιτούμενο πλάτος του σήματος εισόδου στον εξωτερικό 1:4 αποπολυπλέκτη της πειραματικής διάταξης (250 mVpp) [200]. Ο 1:4 αποπολυπλέκτης λαμβάνει ένα από τα δύο παραγόμενα σήματα των 50 Gb/s μαζί με έναν συγχρονισμένο ηλεκτρικό ρολόι 25 GHz και παρέχει τα τέσσερα ηλεκτρικά σήματα 12,5 Gb/s τα οποία αντιστοιχούν στα τέσσερα σήματα εισόδου του 4:1 πολυπλέκτη. Κάθε ένα από αυτά τα σήματα στη συνέχεια διαβιβάζεται στον αναλυτή λαθών (BERT) της διάταξης για την καταμέτρηση σφαλμάτων και την αξιολόγηση.

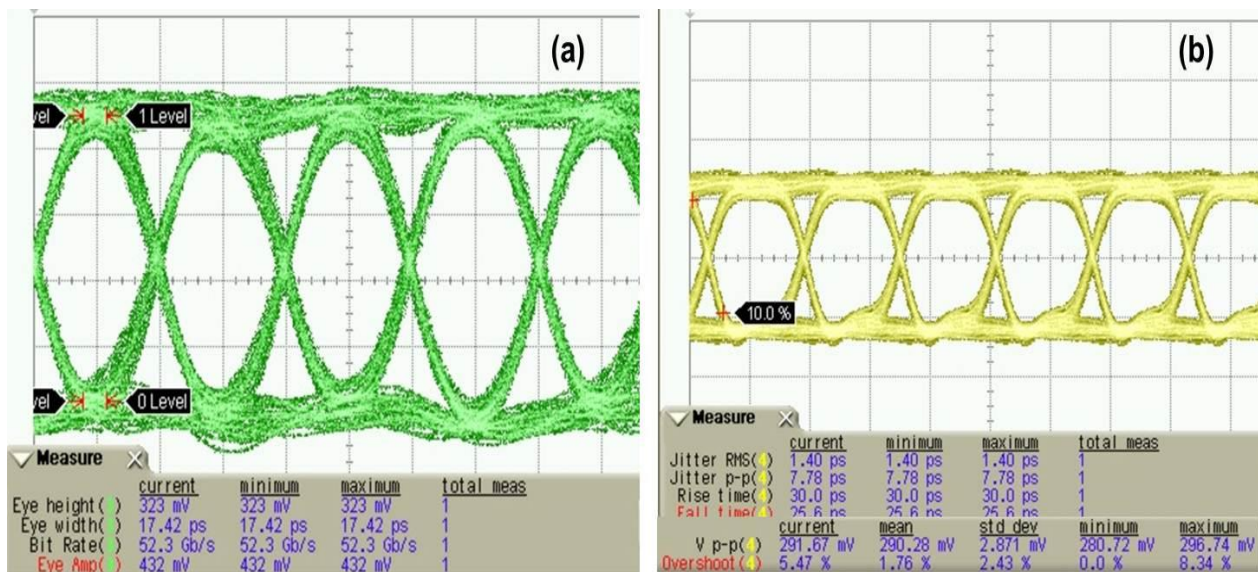


Εικόνα 3.11: Απεικονιστικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης για τη λειτουργία και τον έλεγχο του 100 Gb/s οπτικού πομπού.

3.5 Προκαταρκτικά Αποτελέσματα από την Πλευρά του Δέκτη 100 Gb/s

Η εικόνα 3.12 παρουσιάζει ενδεικτικά αποτελέσματα από τη λειτουργία της προαναφερθείσας πειραματικής διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, η εικόνα 3.12 (α) παρουσιάζει το διάγραμμα οφθαλμού του ηλεκτρικού σήματος 50 Gb/s που λειτουργεί ως είσοδος στον 1:4 αποπολυπλέκτη της διάταξης. Επειδή ο οπτικός δέκτης 100 Gb/s δεν ήταν ακόμη διαθέσιμος, αυτό το σήμα είναι στην πραγματικότητα η έξοδος του 4:1 MUX της διάταξης από την πλευρά του πομπού (βλέπε περιγραφή στο τμήμα 1.2.2). Επιπλέον, η εικόνα 3.12 (β) παρουσιάζει με τη σειρά του ένα από τα τέσσερα 12,5 Gb/s κανάλια στην έξοδο του 1:4 αποπολυπλέκτη. Σημειώνεται ότι με τη μετατόπιση του σήματος ρολογιού κατά 20 ps, το επόμενο (παρακείμενο) χρονικό κανάλι (time tributary) μπορούσε να ληφθεί από την ίδια θύρα εξόδου, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη χρήσης και αξιολόγησης και των τεσσάρων εξόδων του 4:1 αποπολυπλέκτη ταυτόχρονα.

Σε αυτό το πρώιμο στάδιο των πειραματικών δοκιμών, το πλάτος του αποπολυπλεγμένου ηλεκτρικού σήματος 12.5 Gb/s είναι 290 mVpp αρκετά υψηλό ώστε να συνδεθεί απευθείας στον αναλυτή λαθών. Κατά την αξιολόγηση αυτού του ηλεκτρικού σήματος παρατηρήθηκε λειτουργία χωρίς σφάλματα ($BER < 10^{-12}$) και για τα τέσσερα κανάλια. Τα μήκη της PRBS που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την απευθείας διασύνδεση του πολυπλέκτη με τον αποπολυπλέκτη ήταν $2^{31}-1$ καθώς και η τελική υπό αξιολόγηση ακολουθία 2^7-1 .

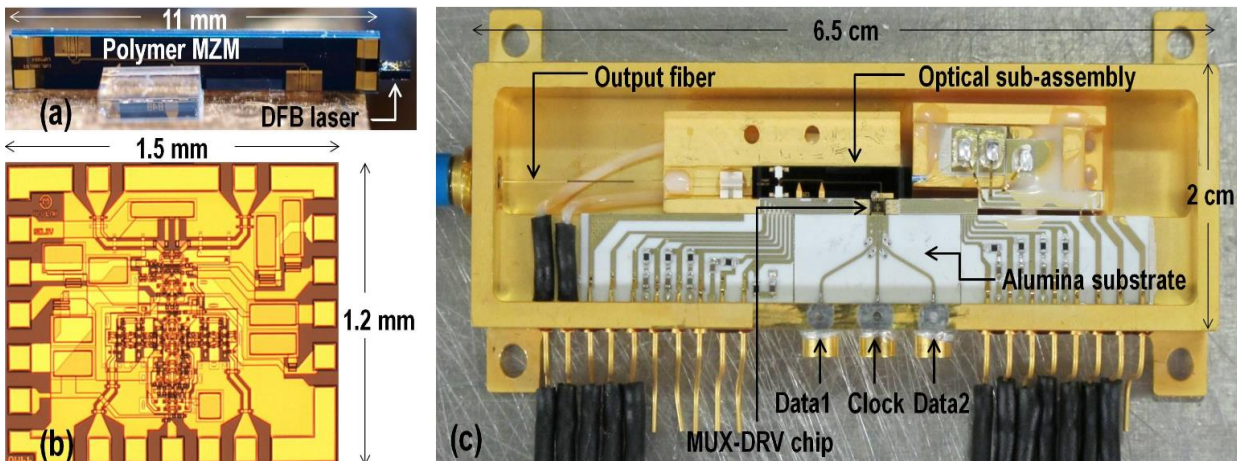


Εικόνα 3.12: (α) ηλεκτρικό σήμα 50Gb/s στην είσοδο του αποπολυπλέκτη και (β) το τελικό 12.5 Gb/s σήμα εξόδου.

3.6 Πειραματική Αξιολόγηση του Ολοκληρωμένου Οπτικού Πομπού βασισμένου σε Πολυμερική Τεχνολογία στα 100 Gb/s

3.6.1 Περιγραφή Ολοκληρωμένης Διάταξης Οπτικού Πολυμερικού Πομπού

Με την ολοκλήρωση της εκτενής παρουσίασης της απαραίτητης διάταξης για την ορθή λειτουργία του οπτικού πομπού και δέκτη 100 Gb/s ακολουθεί στην παρούσα υπο-ενότητα μια λεπτομερής περιγραφή της ολοκληρωμένης οπτικής συσκευής. Ο ολοκληρωμένος οπτικός πομπός υπερ-υψηλών σημάτων βασίζεται στην υβριδική ολοκλήρωση ενός EO πολυμερικού MZ διαμορφωτή με ένα 1550 nm DFB λέιζερ και στην ηλεκτρονική πολυπλεξία δεδομένων μαζί με ένα ενισχυτικό κύκλωμα οδήγησης σε ένα μόνο πλαίσιο όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.13. Η εικόνα 3.13 (a) παρουσιάζει μία κάτοψη της οπτική υποδιάταξης του πομπού που αποτελείται από τον πολυμερικό MZM και το υβριδικά ολοκληρωμένο DFB λέιζερ. Όσον αφορά το υλικό, το πολυμερικό EO chip βασίζεται στη δομή μονορυθμικού κυματοδηγού M3. Πιο συγκεκριμένα, η πολυμερική δομή του M3 έχει πάχος 6 μm και αποτελείται από τρία επιστρώματα. Το υψηλότερο επίστρωμα περιλαμβάνει το άνω περίβλημα (top cladding), στη μέση βρισκόταν το στρώμα του πυρήνα (core layer) και το χαμηλότερο επίστρωμα αποτελεί το κάτω περίβλημα του κυματοδηγού (bottom cladding). Αυτή τη πολυμερική δομή τοποθετείται πάνω από ηλεκτρόδιο πάχους 1 μm το οποίο βρίσκεται ενδιάμεσα της πολυμερικής δομής και του υποστρώματος που αποτελείται από ένα στρώμα πυριτίου. Η κορυφή του RF ηλεκτροδίου είναι πάχους 5 μm και έχει τοποθετηθεί μόνο πάνω από τις ενεργές περιοχές του MZM.



Εικόνα 3.13: Κύριες δομικές μονάδες και η τελική συναρμολόγηση του 100 Gb/s οπτικού πομπού: (a) Οπτική υποδιάταξη, (b) μικροφωτογραφία κυκλώματος MUX-DRV chip, and (c) διάταξη οπτικού πομπού.

Η απώλεια διάδοσης του μονορυθμικού κυματοδηγού αυτού είναι 1.4 dB/cm, το συνολικό μήκος του MZM μονής οδήγησης (Single-Ended) 11 mm και η απαιτούμενη τάση για τη μετατόπιση φάσης κατά π rad (V_{π}) είναι 3.5 V λόγω του περιορισμού του ισχυρού πεδίου και του υψηλού ηλεκτροπτικού (EO) συντελεστή όταν το πολυμερικό υλικό του πυρήνα έχει πολωθεί (65 pm/V στα 1550 nm). Η τεχνική butt-coupling χρησιμοποιήθηκε για την υβριδική ολοκλήρωση του DFB λέιζερ με το EO πολυμερικό chip. Η απώλεια στη διεπιφάνεια πολυμερούς/InP είναι περίπου 3.5 dB λόγω της ατελούς επικάλυψης των προφίλ των δύο ρυθμών λειτουργίας στο εσωτερικό του πολυμερούς και των κυματοδηγών InP. Λόγω των μοριακών ιδιοτήτων του πολυμερικού συστήματος, η ηλεκτροπτική (EO) επίδραση είναι παρούσα μόνο για εγκάρσιους μαγνητικούς (Transverse Magnetic, TM) ρυθμούς, απαιτώντας έτσι την περιστροφή κατά 90° του εγκάρσιου ηλεκτρικού (Transverse Electric, TE) ρυθμού που εκπέμπεται από λέιζερ.

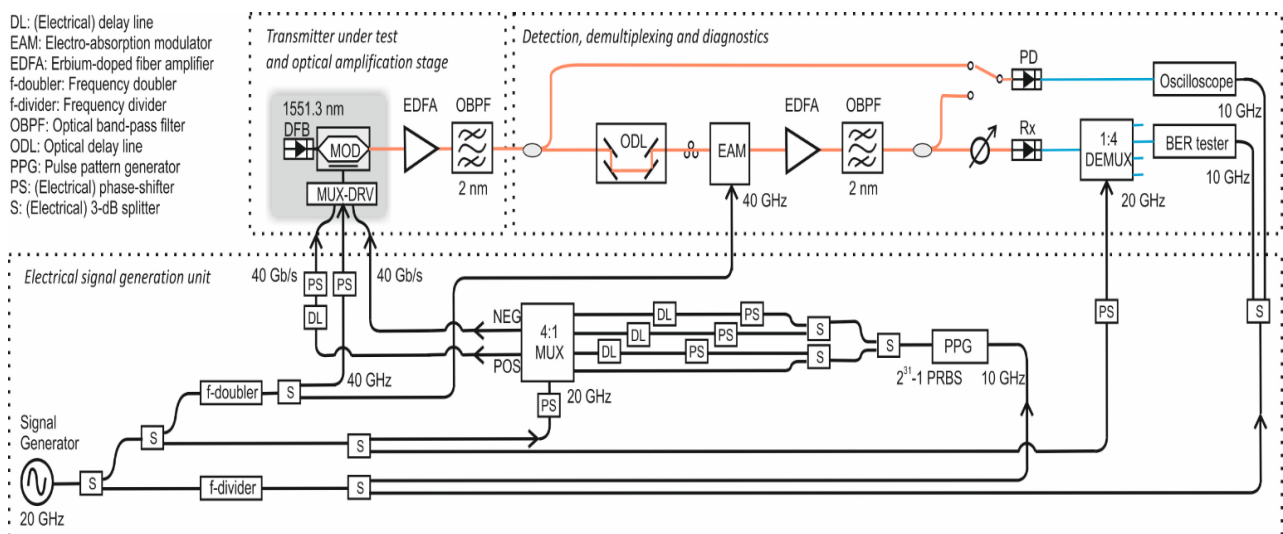
Η εικόνα 3.13 (b) παρουσιάζει με τη σειρά της τη διάταξη του κύριου ηλεκτρονικού κυκλώματος, η οποία έχει κατασκευαστεί με τη χρήση της τεχνολογίας των 0,7 μm InP-DHBT (Double-Heterojunction Bipolar Transistor, DHBT) και ενσωματώνει τις λειτουργίες 2:1 ηλεκτρονικής πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου (MUX) και της ενίσχυσης του πολυπλεγμένου σήματος (driver, DRV), με σκοπό να περιορίσει στο ελάχιστο τις ηλεκτρικές διεπαφές των 100 Gb/s. Αυτό το κύκλωμα λειτουργεί με δύο ηλεκτρικά σήματα εισόδου δεδομένων σε ταχύτητες έως και 56 Gb/s και με ένα σήμα ρολογιού στο μισό του τελικού ρυθμού, παρέχοντας δύο ηλεκτρικά συμπληρωματικά σήματα συνολικού πλάτους $2 \times 2 V_{pp}$ στην έξοδό του. Δεδομένου ότι ο πολυμερικός MZM είναι μονής οδήγησης, μόνο μια από τις δύο συμπληρωματικές εξόδους χρησιμοποιείται ενώ η άλλη τερματίζεται χρησιμοποιώντας έναν εξασθενητή 10 dB.

Τέλος, η εικόνα 3.13 (c) δείχνει την τελική συναρμολόγηση του πομπού στο εσωτερικό της συσκευασίας που έχει κατασκευαστεί από υλικό FeNiCo. Γραμμές μεταφοράς κατασκευασμένες σε υπόστρωμα οξειδίου του αλουμινίου (Alumina, Al₂O₃) με αντίσταση 50 Ohm διασυνδέουν τις θύρες υποδοχής GPPO με το κύκλωμα MUX-DRV, ενώ ενσύρματες συνδέσεις (wire-bonds) με μήκος κάτω από 150 μm ενώνουν την επιλεγμένη έξοδο του MUX-DRV με τη γραμμή μεταφοράς του RF ηλεκτροδίου του MZM. Εκτός από το κύκλωμα MUX-DRV, οι DC συνδέσεις που φαίνονται στην εικόνα 3.13 (c) χρησιμεύουν για την ενεργοποίηση και τη σωστή λειτουργία του DFB λέιζερ, τη θερμική μετατόπισης φάσης που είναι υπεύθυνη για την επιλογή του σημείου πόλωσης του διαμορφωτή, και για το θερμο-ηλεκτρικό κύκλωμα σταθεροποίησης της θερμοκρασίας (TEC) της συσκευής. Τέλος, μια οπτική ίνα εστιασμού (lensed fiber) χρησιμοποιείται για τη σύζευξη του διαμορφωμένου φωτός με τον πολυμερικό κυματοδηγό με απώλεια λόγω της διεπαφής 1,5 dB. Η συνολική οπτική απώλεια στο εσωτερικό της συσκευής όπως μετρήθηκε κατά το χαρακτηρισμό της είναι περίπου 8.5 dB, συμπεριλαμβανομένης της απώλειας που εισάγει ο MZM. Η μέγιστη οπτική ισχύ στην έξοδο του οπτικού πομπού ανέρχεται σε 0 dBm του συνεχούς κύματος (CW) στο μέγιστο σημείο μετάδοσης του διαμορφωτή, όταν το DFB λέιζερ λειτουργεί με 120 mA εφαρμοζόμενο ρεύμα.

3.6.2 Πειραματική Αξιολόγηση 80-100 Gb/s του Οπτικού Πομπού σε Back-to-Back Λειτουργία: Πρώτη Οπτική Διάταξη Αξιολόγησης μέχρι 80 Gb/s

Πρώτη πειραματική διάταξη: Η εικόνα 3.14 απεικονίζει την πρώτη πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο ΕΦΕ για την αξιολόγηση του πομπού σε ρυθμούς μετάδοσης 80-100 Gb/s. Η συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη φάση του χαρακτηρισμού λόγω της μη διαθεσιμότητας μίας φωτοδιόδου με δυνατότητα λειτουργίας έως 100 Gb/s καθώς και ενός ηλεκτρικού αποπολυπλέκτη υπερ-υψηλής ταχύτητας, ο οποίος να μπορεί να αποπολυπλέκει ηλεκτρικά το ανιχνευόμενο ηλεκτρικό σήμα όπως παράγεται από τη φωτοδίοδο από τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων των 100 Gb/s σε αυτούς των 50 Gb/s.

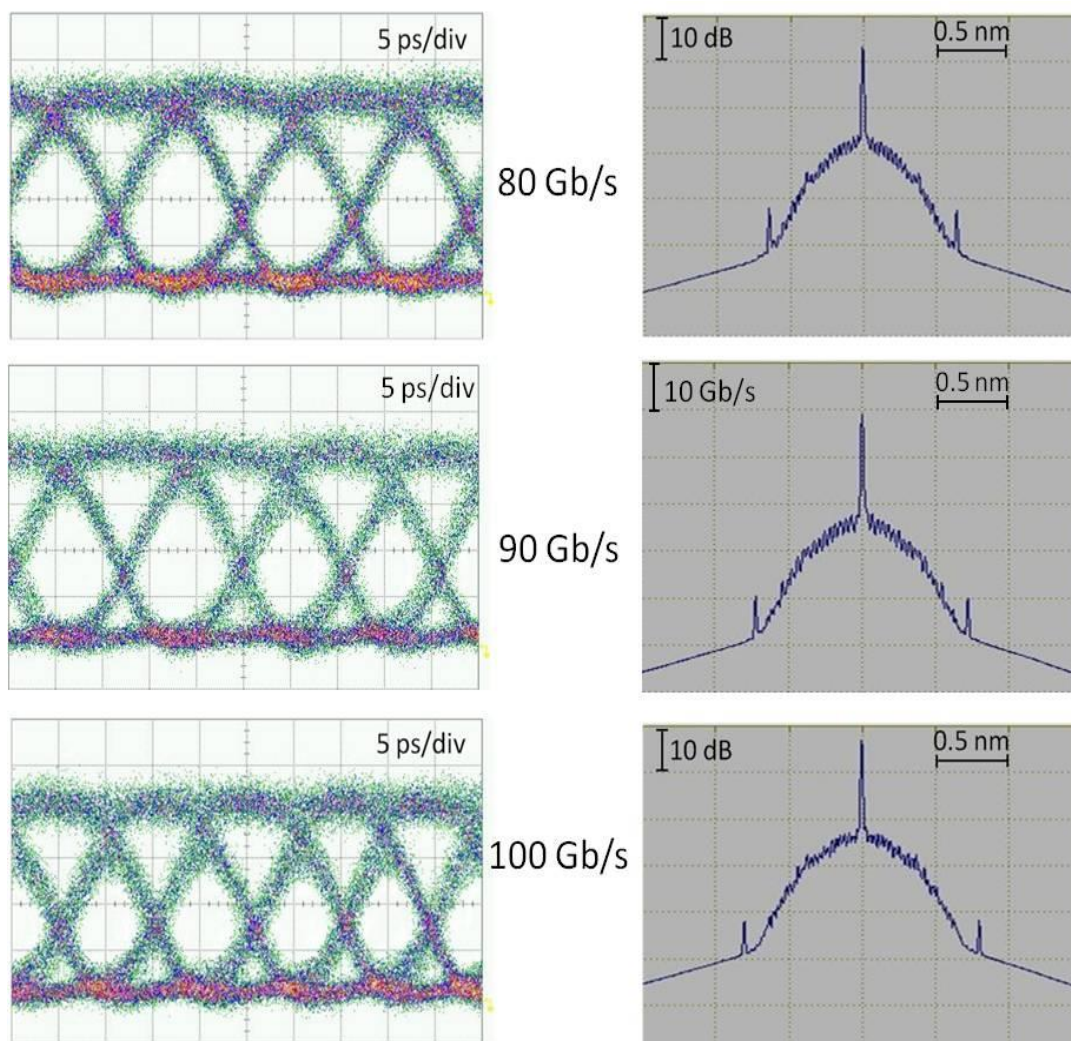
Με βάση τη διάταξη της εικόνας 16, οι συχνότητες των ημιτονοειδών σημάτων και οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων αντιστοιχούν σε λειτουργία 80 Gb/s και κλιμακώνονται αναλόγως για ρυθμούς 90 και 100 Gb/s. Η γεννήτρια σημάτων οδηγεί τον PPG, τον παλμογράφο, τον αναλυτή λαθών, τον 4:1 MUX, τον 1:4 αποπολυπλέκτη και το MUX-DRV του υπό αξιολόγηση οπτικού πομπού με τη χρήση ενός διαιρέτη συχνότητας, διπλασιαστή συχνότητας και διαιρετών ισχύος. Ο PPG δημιουργεί τη μήκους 2⁷-1 (και 2³¹-1) PRBS στα 10 Gb/s (11.25 και 12.5 Gb/s για 90 και 100 Gb/s λειτουργίας του ολοκληρωμένου πομπού αντίστοιχα), και τροφοδοτεί τον 4:1 MUX μέσω ολισθητών φάσης (PS) και γραμμών καθυστέρησης (DL) που επιτρέπουν τον συγχρονισμό των ηλεκτρικών καναλιών σε επίπεδο bit και την αποσυσχέτιση των περιοδικών σημάτων (pattern), αντίστοιχα. Στη συνέχεια, τα 40 Gb/s σήματα που δημιουργούνται από την κύρια (POS) και συμπληρωματική (NEG) έξοδο του 4:1 MUX χρησιμοποιούνται ως τα δύο ηλεκτρικά σήματα



Εικόνα 3.14: 1^η Πειραματική διάταξη με χρήση του EAM στο δέκτη. Οι αναγραφόμενες συχνότητες και οι ρυθμοί των δεδομένων αντιστοιχούν σε λειτουργία 80 Gb/s και κλιμακώνονται ανάλογα σε 90 και 100 Gb/s.

εισόδου 40 Gb/s για τον πομπό μετά από περαιτέρω αποσυσχέτιση και συγχρονισμό τους σε επίπεδο bit. Το παραγόμενο διαμορφωμένο οπτικό σήμα 80 Gb/s με μήκος κύματος 1.551,3 nm ενισχύεται και φιλτράρεται καθώς το οπτικό διαμορφωμένο σήμα στην έξοδο του οπτικού πομπού είναι χαμηλότερη των -10 dBm. Μέρος του σήματος αυτού, προσπίπτει πάνω σε φωτοδίοδο 70 GHz για μελέτες με βάση το διάγραμμα οφθαλμού, ενώ το υπόλοιπο από αυτό διαβιβάζεται για μετρήσεις BER. Το πρώτο μέρος των δοκιμών 80 Gb/s επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας στην πλευρά του δέκτη ένα διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης (EAM) για την 1:2 οπτική αποπολυπλεξία λόγω της μη διαθεσιμότητας ενός ηλεκτρικού αποπολυπλέκτη και φωτοδίοδου υπερ-υψηλής ταχύτητας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στην έξοδο του EAM, τα 2x40 Gb/s κανάλια ενισχύθηκαν, φιλτραρίστηκαν και ανιχνεύθηκαν από έναν φωτοδέκτη με εύρος ζώνης 40 GHz. Το ηλεκτρικό σήμα αποπολυπλέκθηκε περαιτέρω από ένα ηλεκτρικό 1:4 αποπολυπλέκτη, και τα τελικά 8x10 Gb/s κανάλια αξιολογήθηκαν από τον αναλυτή λαθών (BERT) μέσω απευθείας ανίχνευσης.

Πειραματικά αποτελέσματα: Τα διαμορφωμένα οπτικά σήματα στην έξοδο του πομπού συνοψίζονται στην εικόνα 3.15 μέσω των διαγραμμάτων οφθαλμού σε ρυθμούς μετάδοσης 80, 90 και 100 Gb/s αντίστοιχα και μέσω των αντίστοιχων φασμάτων NRZ-OOK με ανάλυση 0,01 nm. Σαφώς ανοιχτά διαγράμματα οφθαλμού καταγράφηκαν ακόμη και στα 100 Gb/s αποκαλύπτοντας το υψηλό εύρος ζώνης λειτουργίας τόσο των μεμονωμένων κυκλωμάτων όσο και του πομπού στο σύνολό του. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέση τετραγωνική ρίζα (rms) του χρονικού jitter είναι χαμηλότερη από 0.9 ps και το μέγιστο πλάτος του οπτικού διαμορφωμένου σήματος (ER) είναι υψηλότερο από 13.5 dB, ενώ η μειωμένη οπτική ισχύς στην έξοδο της συσκευής (χαμηλότερη από -10 dBm) οφείλεται στη σημαντικά χαμηλότερη εφαρμοζόμενη τάση του ηλεκτρικού σήματος οδήγησης σε σχέση με την προ-απαιτούμενη τάση οδήγησης του MZM. Οι μετρήσεις των διαγραμμάτων οφθαλμού βασίζονται στους ρυθμούς μετάδοσης 80, 90 και 100 Gb/s και συνοψίζονται στον πίνακα 5.

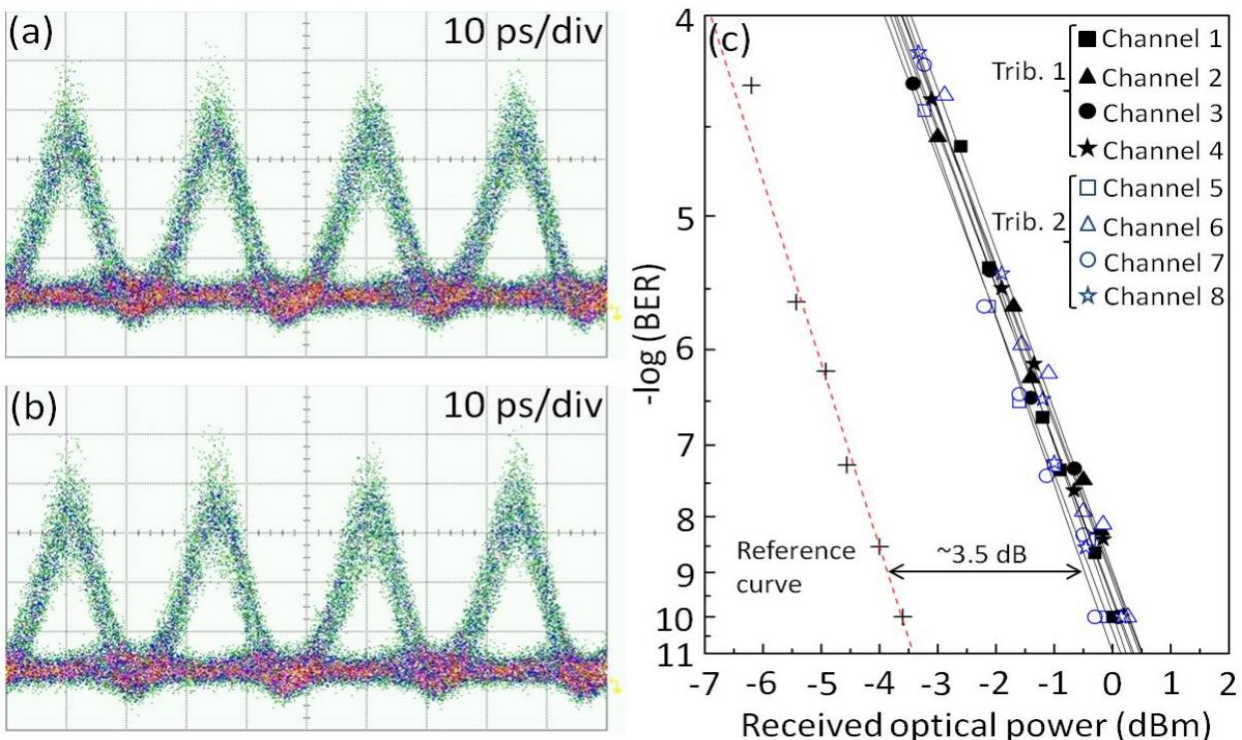


Εικόνα 3.15: Διαγράμματα οφθαλμού στην έξοδο του πομπού για ρυθμούς μετάδοσης 80, 90 and 100 Gb/s. Τα αντίστοιχα φάσματα είναι κεντραρισμένα στα 1551.3 nm με 0.01 nm ανάλυση.

Πίνακας 5: Αξιολόγηση διαγραμμάτων οφθαλμού των παραγόμενων οπτικών σημάτων στα 80, 90 and 100 Gb/s.

Bit rate (Gb/s)	Rise Time (ps)	Fall Time (ps)	Timing Jitter rms (fs)	Extinction ratio (ER) (dB)
80	9.22	8.33	672	14.14
90	9.89	4.11	689	13.6
100	7.44	6.44	861	13.5

Παρά την ένδειξη για λειτουργία χωρίς σφάλματα στο συνολικό εύρος των 80-100 Gb/s, η επιβεβαίωση μέσω πραγματικών μετρήσεων BER ήταν εφικτή μόνο για ρυθμούς μετάδοσης έως 80 Gb/s και οφείλεται στη χρήση του οπτικού αποπολυπλέκτη στην πειραματική διάταξη, και πιο συγκεκριμένα λόγω της επιδείνωσης της απόδοσης του EAM με ηλεκτρικά σήματα οδήγησης υψηλότερα από 40 GHz καθώς ο EAM περιορίζεται λόγω χαμηλού εύρους ζώνης ($BW < 24$ GHz). Η Εικόνα 3.16 (a)-(b) παρουσιάζει τα διαγράμματα οφθαλμού των δύο 40 Gb/s καναλιών του αρχικού οπτικού διαμορφωμένου σήματος 80 Gb/s NRZ-OOK στην έξοδο του EAM, ενώ το Σχήμα 18 (c) απεικονίζει τις καμπύλες BER των οκτώ 10 Gb/s καναλιών μετά από περαιτέρω αποπολυπλέξη στο ηλεκτρικό κομμάτι. Τα διαγράμματα οφθαλμού παραμένουν ευρέως ανοικτά, χωρίς καμία σημαντική μείωση στο εύρος ζώνης του σήματος. Η απουσία error-floor είναι εμφανής για BER κάτω από 10^{-10} . Η καμπύλη αναφοράς αντιστοιχεί στη δημιουργία οπτικού σήματος 40 Gb/s RZ-OOK, το οποίο χρησιμοποιούσε 40 GHz οπτικό ρολόι που παραγόταν από το EAM ως είσοδο σε ένα διαμορφωτή $LiNbO_3$. Σημειώνεται εδώ ότι η ποινή ισχύος 3.5 dB σε σύγκριση με την καμπύλη αναφοράς αναμένεται να μειωθεί με στενότερα αποπολυπλεκτικά χρονικά παράθυρα που μπορούν να παραχθούν από τον EAM (τώρα ~ 7 ps στο FWHM).

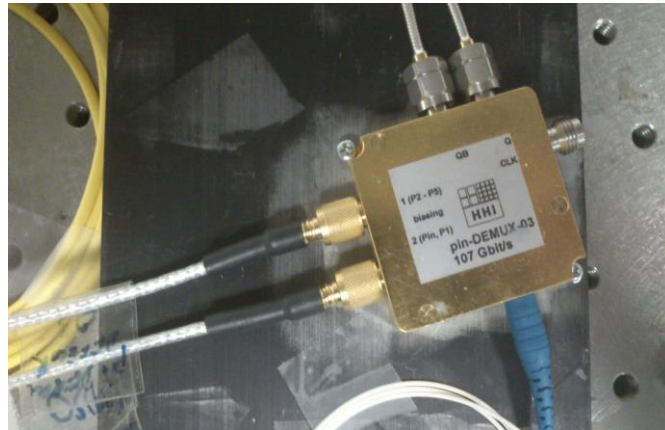


Εικόνα 3.16: Αξιολόγηση ρυθμού λαθών του οπτικού σήματος 80 Gb/s: Διαγράμματα οφθαλμού (a) $1^{ου}$ και (b) $2^{ου}$ 40 Gb/s καναλιού στην έξοδο του EAM, και (c) καμπύλες BER.

3.6.3 Πειραματική Αξιολόγηση 80-100 Gb/s σε Back-to-Back λειτουργία: Δεύτερη Οπτική Διάταξη Αξιολόγησης μέχρι 100 Gb/s

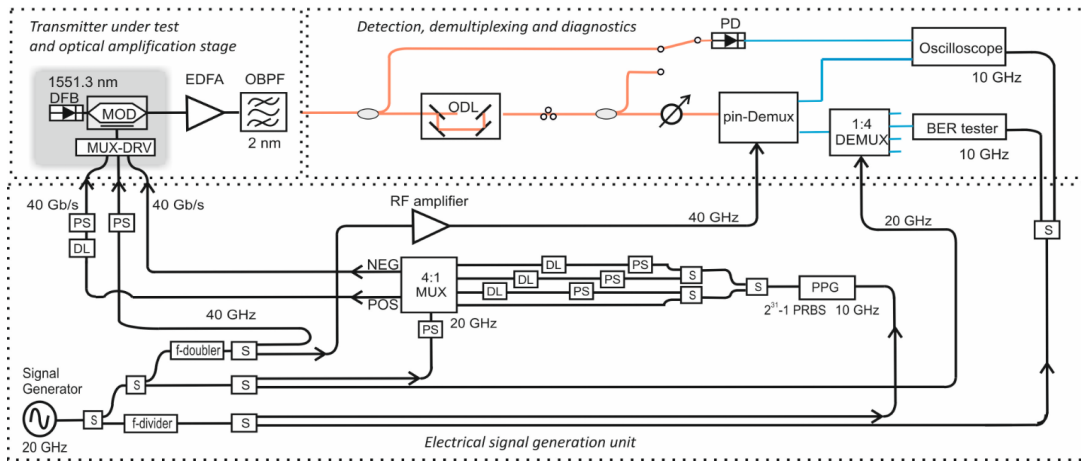
Δεύτερη πειραματική διάταξη: Για να ολοκληρωθεί ο χαρακτηρισμός του πομπού μέχρι ρυθμούς μετάδοσης 100 Gb/s, η φωτοδιόδος και το στάδιο της οπτικής αποπολύπλεξης της προηγούμενης διάταξης αξιολόγησης αντικαταστάθηκαν από ένα pin-δέκτη ενσωματωμένο με ηλεκτρικό 1:2 αποπολυπλέκτη που

έχει αναπτυχθεί από το HHI και το III-V Lab στο πλαίσιο προηγούμενων ερευνητικών προγραμμάτων [203,204]. Ο δέκτης αποτελείται από μια pin-φωτοδίοδο με εύρος ζώνης άνω των 100 GHz με responsivity άνω των 0.5 A/W και από ένα ηλεκτρονικό 1:2 αποπολυπλέκτικο κύκλωμα το οποίο βασίζεται στην τεχνολογία InP-DHBT. Απαιτείται ένα υψηλής ισχύος (8 dBm) ηλεκτρικό ρολόι εισόδου στη μισή συχνότητα σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της οπτικής εισόδου και παρέχει τα ηλεκτρικά αποσυνδυασμένα κανάλια με κατάλληλη ισχύ ώστε να χρησιμεύουν ως είσοδο στην μετέπειτα 1:4 αποπολυπλεκτική μονάδα της διάταξης. Στην εικόνα 3.17 παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα του προαναφερθέντος δέκτη 100 Gb/s που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του οπτικού πομπού 100 Gb/s. Στην πάνω πλευρά της εικόνας εμφανίζονται οι δύο υψίρρυθμες ηλεκτρικές έξοδοι του δέκτη που τροφοδοτούσαν τον μετέπειτα εξωτερικό 1:4 αποπολυπλέκτη, ενώ αριστερά απεικονίζεται η είσοδος του ηλεκτρικού ρολογιού που χρειάζεται τη μισή συχνότητα από ότι έχει το οπτικό διαμορφωμένο σήμα στην οπτική είσοδο του δέκτη, η οποία εντοπίζεται στην κάτω πλευρά της εικόνας.



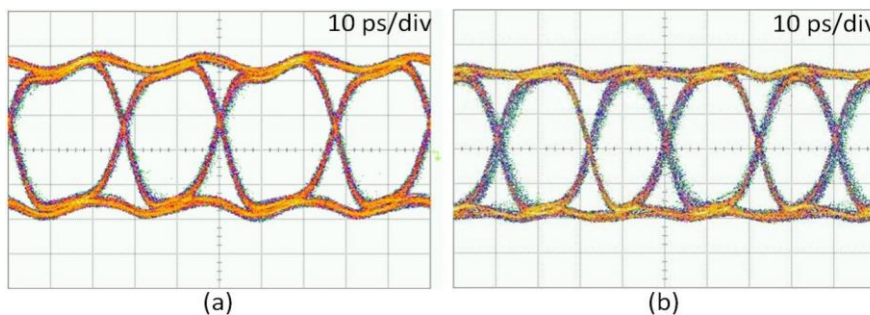
Εικόνα 3.17: Ο δέκτης 100 Gb/s που αποτελείται από pin-αποπολυπλέκτη και χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του 100G πομπού.

Η τροποποιημένη πειραματική διάταξη για το χαρακτηρισμό του οπτικού πομπού 100 Gb/s απεικονίζεται στην εικόνα 3.18. Η κεντρική μονάδα αυτής της διάταξης είναι πάλι η γεννήτρια συχνοτήτων που λειτουργεί σε συχνότητα 20 GHz για ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 80 Gb/s και σε συχνότητα 25 GHz για 100 Gb/s. Η γεννήτρια συχνοτήτων οδηγεί σε αυτή την περίπτωση τον PPG, τον παλμογράφο, τον αναλυτή σφαλμάτων, τον εξωτερικό 4:1 MUX, τον εξωτερικό 1:4 αποπολυπλέκτη, τον ολοκληρωμένο οπτικό πομπό υπό δοκιμή και τον ολοκληρωμένο δέκτη της διάταξης με τη βοήθεια ενός διαιρέτη και ενός διπλασιαστή συχνοτήτων καθώς και με ένα αριθμό RF διαιρετών ισχύος. Ο PPG δημιουργεί τη ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία (PRBS) μήκους 2^7-1 ($2^{31}-1$) στα 10 (ή 12.5) Gb/s, και τροφοδοτεί τον 4:1 MUX μέσω παράλληλων ολισθητών φάσης (PS) και γραμμές καθυστέρησης (DL) που επιτρέπουν τον συγχρονισμό σε επίπεδο bit και την αποσυσχέτιση των περιοδικών σημάτων (pattern), αντίστοιχα. Στη συνέχεια, τα 40 (ή 50) Gb/s σήματα προερχόμενα από την κύρια (POS) και συμπληρωματική (NEG) έξοδο του 4:1 MUX χρησιμοποιούνται ως οι δύο είσοδοι για τα κανάλια των δεδομένων με ρυθμούς μετάδοσης 40 (ή 50) Gb/s του πομπού μετά από περαιτέρω αποσυσχέτιση και συγχρονισμό σε επίπεδο bit. Στην έξοδο του πομπού, το οπτικό σήμα 80 (ή 100) Gb/s με οπτικό φέρον στα 1551,3 nm ενισχύεται μέσω οπτικού ενισχυτή και φιλτράρεται. Με τη βοήθεια ενός οπτικού συζεύκτη, το διαμορφωμένο οπτικό σήμα εξόδου 80 (ή 100) Gb/s NRZ-OOK ανιχνεύεται από μία φωτοδίοδο 70 GHz για μελέτες βασισμένες στα διαγράμματα οφθαλμού, ενώ η άλλη θύρα του οπτικού συζεύκτη μεταβιβάζεται για μετρήσεις BER χρησιμοποιώντας τον ενσωματωμένο 100 Gb/s pin φωτοδίοδο-αποπολυπλέκτη. Το κύκλωμα του αποπολυπλέκτη λαμβάνει το ηλεκτρικό σήμα από την pin-φωτοδίοδο, και παραδίδει ηλεκτρικό κανάλι με ρυθμό μετάδοσης 40 (ή 50) Gb/s, το οποίο είναι χρονικά ευθυγραμμισμένο με ηλεκτρικό ρολόι εισόδου συχνότητας 40 (ή 50) GHz (μισή συχνότητα σε σχέση με την απαιτούμενη του DEMUX κυκλώματος). Αυτό το κανάλι αποπολυπλέκεται περαιτέρω από τον εξωτερικό 1:4 αποπολυπλέκτη της πειραματικής διάταξης και παρέχει τα τέσσερα 10 (ή 12.5) Gb/s ηλεκτρικά κανάλια της εισόδου. Κάθε ένα από αυτά τα κανάλια στη συνέχεια διαβιβάζεται στον αναλυτή σφαλμάτων (BERT) της διάταξης για την καταμέτρηση σφαλμάτων και την αξιολόγηση. Σημειώνεται ότι το δεύτερο 40 (ή 50) Gb/s κανάλι μπορεί επίσης να ληφθεί με κατάλληλη προσαρμογή της γραμμής οπτικής καθυστέρησης (Optical Delay Line, ODL) κατά μήκος της διαδρομής του οπτικού σήματος εισόδου.

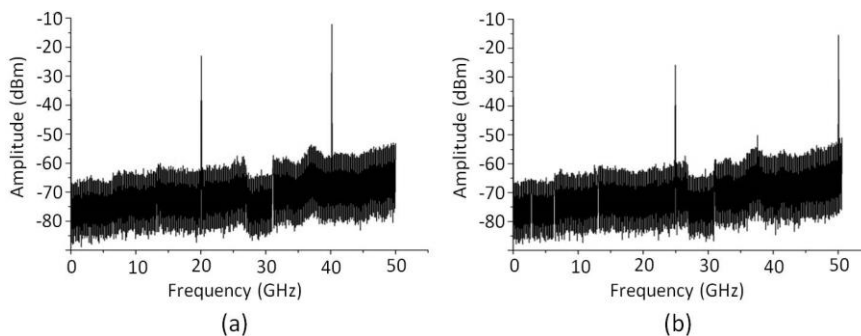


Εικόνα 3.18: Πειραματική διάταξη βασισμένη στη χρήση του 100 Gb/s pin δέκτη-αποπολυπλέκτη. Οι αναγραφόμενες συχνότητες και οι ρυθμοί των δεδομένων αντιστοιχούν σε λειτουργία 80 Gb/s και κλιμακώνονται ανάλογα σε 90 και 100 Gb/s.

Τα διαγράμματα οφθαλμού και οι μετρήσεις αυτών σε αυτή την περίπτωση είναι ακριβώς τα ίδια όπως στην περίπτωση της πρώτης πειραματικής αξιολόγησης με χρήση της πρώτης διάταξης (βλέπε Εικόνα 3.15 και πίνακα 5). Στην εικόνα 3.19 (a) και (b), ωστόσο, παρουσιάζονται ενδεικτικά διαγράμματα οφθαλμού των ηλεκτρικών αποπολυπλεγμένων καναλιών 40 και 50 Gb/s στην έξοδο του δέκτη κατά τη λειτουργία σε ρυθμούς μετάδοσης 80 και 100 Gb/s, αντίστοιχα. Στις αμφότερες περιπτώσεις, μια ασυμμετρία στον πλάτος και στο χρονικό εύρος των γειτονικών παλμών μπορεί να παρατηρηθεί και να αποδοθεί στην μη ορθή λειτουργία του κυκλώματος του αποπολυπλέκτη του δέκτη λόγω της ισχυρής παρουσίας της θεμελιώδους αρμονικής στο RF-φάσμα του ηλεκτρικού ρολογιού εισόδου. Αυτό το RF-φάσμα παρουσιάζεται στην εικόνα 3.20 για τις δύο περιπτώσεις (λειτουργία σε ρυθμούς μετάδοσης 80 και 100 Gb/s). Σημειώνεται εδώ ότι το δεύτερο κανάλι του σήματος εισόδου έχει παρόμοια χαρακτηριστικά όσον αφορά τα διαγράμματα οφθαλμού και στις δύο υπό αξιολόγηση περιπτώσεις.

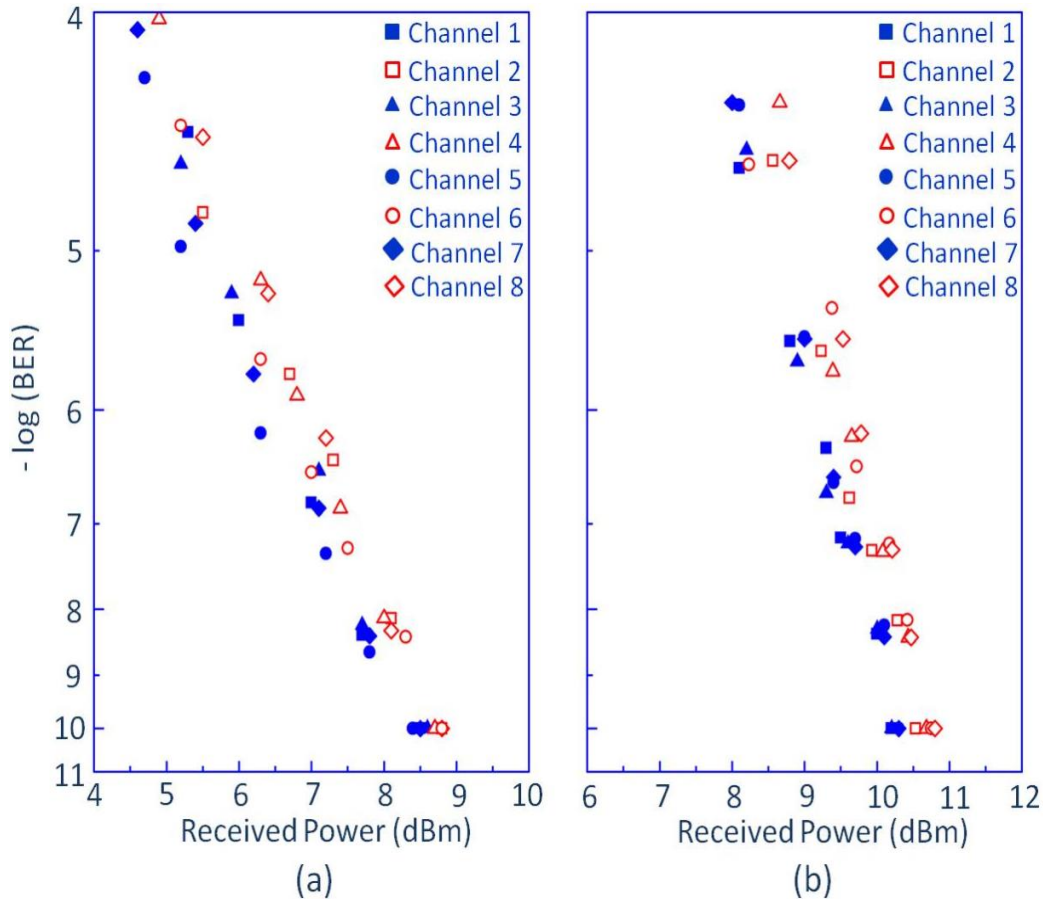


Εικόνα 3.19: Διαγράμματα οφθαλμού των ηλεκτρικών σημάτων στην έξοδο του ολοκληρωμένου δέκτη μετά την ανίχνευση και την 1:2 ηλεκτρονική αποπολυπλέξη: (a) 40 Gb/s ηλεκτρικό κανάλι που αντιστοιχεί σε 80 Gb/s οπτικό σήμα, και (b) 50 Gb/s ηλεκτρικό κανάλι που αντιστοιχεί σε 100 Gb/s οπτικό σήμα.



Εικόνα 3.20: RF-φάσματα των σημάτων ηλεκτρικού ρολογιού στην έξοδο του διπλασιαστή συχνότητας (a) 40 GHz, και (b) 50 GHz. Αυτά τα σήματα ρολογιού τροφοδοτούσαν το κύκλωμα MUX-DRV του πομπού και το κύκλωμα αποπολυπλέκτη του ολοκληρωμένου δέκτη όταν λειτουργούσε σε 80 ή 100 Gb/s, αντίστοιχα. Η διαφορά μεταξύ της δεύτερης και της θεμελιώδους αρμονικής είναι μικρότερη από 12.5 dB και στις δύο περιπτώσεις.

Τέλος, τα σχήματα της εικόνα 3.21 (a) και (b) απεικονίζουν τις καμπύλες BER των οκτώ καναλιών 10 ή 12.5 Gb/s μετά από τα διαδοχικά στάδια αποπολυπλεξίας, τα οποία αντιστοιχούν σε οπτικό σήμα 80 ή 100 Gb/s, αντίστοιχα. Κανένα error-floor δεν καταγράφηκε στα δύο σύνολα των καμπυλών για BER κάτω από 10^{-10} επιβεβαιώνοντας την ορθή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος που είναι απαλλαγμένο από λάθη τόσο στα 80 όσο και στα 100 Gb/s. Η απαιτούμενη οπτική ισχύ στην είσοδο του δέκτη για BER 10^{-9} είναι περίπου 8 dBm στα 80 Gb/s και 10.3 dBm στα 100 Gb/s, και κυρίως εξαρτιέται από το responsivity της pin-φωτοδιόδου και από την ευαισθησία του ηλεκτρονικού αποπολυπλέκτη.

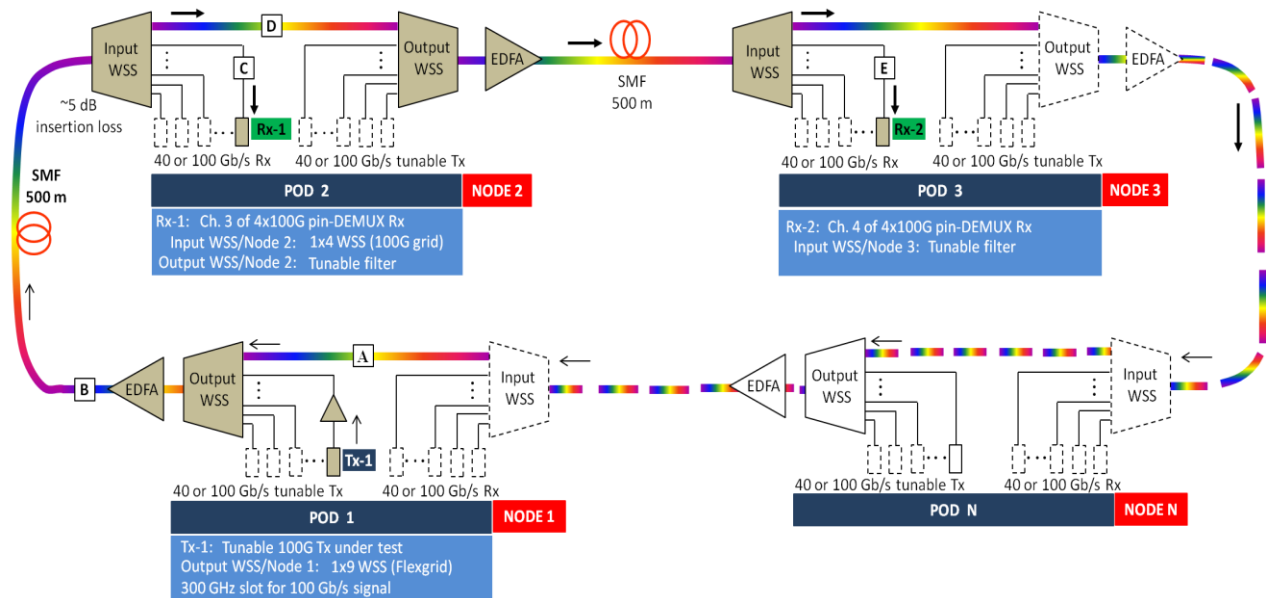


Εικόνα 3.21: Αξιολόγηση BER του οπτικού πομπού 100 Gb/s σε: (a) 80 Gb/s, και (b) 100 Gb/s οπτικού σήματος. Και στις δύο περιπτώσεις, τα κανάλια 1-4 αντιστοιχούν στο πρώτο 40 ή 50 Gb/s κανάλι και τα κανάλια 5-8 στο δεύτερο αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα από τη δοκιμή και την αξιολόγηση του οπτικού πομπού 100 Gb/s, όπως αναλύθηκαν σε αυτή την υπο-ενότητα 3.6.3, παρουσιάστηκαν ως post-deadline paper στο συνέδριο ECOC 2012 [205] και ως επιστημονική δημοσίευση στο περιοδικό Optics Express [206].

3.7 Εφαρμογή Οπτικών Πομπών 100 Gb/s σε Αρχιτεκτονική Οπτικής Μεταγωγής Κυκλώματος για Οπτικές Διασυνδέσεις εντός Υπολογιστικών Κέντρων

Σε αυτή την υπο-ενότητα γίνεται μια παρουσίαση της καταλληλότερης αρχιτεκτονικής για διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων με χρήση των οπτικών πομπών 100 Gb/s αυτού του κεφαλαίου μέσω μιας τοπολογίας δακτυλίου με οπτικά κυκλώματα μεταγωγής. Λαμβάνοντας υπόψη ότι όταν τα υπολογιστικά κέντρα βασίζονται σε συμβατικές αρχιτεκτονικές τύπου fat-tree με ένα μόνο τομέα μεταγωγής ηλεκτρικών πακέτων (electrical packet switched, EPS), ο χώρος των διασυνδέσεων υψηλής ταχύτητας θα είναι φυσικά στα υψηλότερα επίπεδα της ιεραρχίας των fat-tree. Από την άλλη πλευρά όμως, όταν τα υπολογιστικά κέντρα βασίζονται σε υβριδικές αρχιτεκτονικές με έναν πρόσθετο επίπεδο μεταγωγής οπτικού κυκλώματος (OCS), αυτές οι διασυνδέσεις θα αναπτυχθούν επίσης στους διακόπτες άκρων αυτού του τομέα που συνδέουν racks. Σε αυτή τη δεύτερη περίπτωση εντοπίζεται η χρήση των προτεινόμενων πομπών 100 Gb/s.



Εικόνα 3.22: Σενάριο δικτύωσης και προτεινόμενη πειραματική διάταξη για τη χρήση του υπό εξέταση οπτικού πομπού 100 Gb/s μέσα σε ένα δίκτυο εντός υπολογιστικού κέντρου βασισμένο σε ένα δακτύλιο τύπου μεταγωγής οπτικού κυκλώματος. Ο δακτύλιος διασυνδέει τους ψηφιακούς διακόπτες που βρίσκονται στην κορυφή των μεμονωμένων σημείων DC PODs χρησιμοποιώντας συνδυασμό πομποδεκτών 40 και 100 Gb/s.

Συνεπώς, με βάση την εικόνα 3.22 σκιαγραφείται ένα εφικτό σενάριο δικτύωσης και παρουσιάζεται η διάταξη για τη χρήση του προτεινόμενου πομπού 100 Gb/s μέσα σε ένα δακτύλιο τύπου OCS που επιτρέπει τη διασύνδεση ανεξάρτητων DC PODs. Κάθε DC POD αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο σύνολο πόρων του DC με τη μορφή διακομιστών, μονάδων αποθήκευσης και ψηφιακών μεταγωγών που οργανώνονται χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη τοπολογία (π.χ. τοπολογία fat-tree ή leaf-spine) και μια αντίστοιχη ιεραρχία μεταγωγής. Στην κορυφή αυτής της ιεραρχίας βρίσκονται μεγάλοι ψηφιακοί διακόπτες οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με οπτικές διεπαφές 40 και 100 Gb/s και βρίσκονται μέσα στους κόμβους του τομέα OCS. Αυτοί οι κόμβοι στηρίζονται στη χρήση στοιχείων WSS που επιτρέπουν την προσθήκη και την αφαίρεση οπτικών καναλιών από το σήμα πολυπλεξίας διαίρεσης κύματος (WDM) που διαδίδεται μέσα στο δακτύλιο και μεταφέρει τις οπτικές ροές που ανταλλάσσονται μεταξύ των ψηφιακών διακοπών. Ο αριθμός των κόμβων και η απόσταση μεταξύ παρακείμενων κόμβων είναι παράμετροι σχεδιασμού που εξαρτώνται τόσο από τις φυσικές παραμέτρους του DC όσο και από τα χαρακτηριστικά κυκλοφορίας του δικτύου DC. Για το σκοπό μιας τέτοιας επίδειξης, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι κάθε κόμβος συνδέεται με γειτονικούς κόμβους σε απόσταση άνω των 500 m SSMF, περιορίζοντας την διασύνδεση σε ένα τμήμα του τομέα OCS με 3 κόμβους. Κατ' επέκταση, θα μπορούσε να υλοποιηθεί πειραματικά ένα σενάριο με 3 χρονικά στιγμιότυπα και συνολικής μετάδοσης μέχρι 1.5 km. Θα πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι μια τέτοια πειραματική τοπολογία υλοποιήθηκε πειραματικά με τη χρήση ενός οπτικού πομπού 100 Gb/s με πολυμερικό διαμορφωτή MZ που φέρει ένα ρυθμιζόμενο λέιζερ όσον αφορά το μήκος κύματος και παρουσίασε λειτουργία χωρίς λάθη [207].

Σύνοψη & Συμπεράσματα Κεφαλαίου 3

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα πειραματικά αποτελέσματα που σχετίζονται με την αξιολόγηση ενός οπτικού καναλιού παραγόμενο από τον ολοκληρωμένο οπτικό πομπό με σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK σε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 100 Gb/s σε εργαστηριακές συνθήκες και αποτελούσε τμήμα των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Ε.Φ.Ε για την ευρωπαϊκή συνεργασία POLYSYS. Αναλυτικότερα, στην υπο-ενότητα 3.2 παρουσιάστηκαν τόσο η πειραματική τοπολογία υποστήριξης για την ορθή λειτουργία του πομπού 100 Gb/s όσο και οι ηλεκτρονικές συσκευές πολυπλεξίας και διπλασιασμού συχνότητας που ήταν απαραίτητες για την υποστήριξη και την δημιουργία των δύο ηλεκτρονικών σημάτων εισόδου 50 Gb/s καθώς και του ηλεκτρικού ρολογιού 50 GHz αντίστοιχα, για το συγχρονισμό των δύο καναλιών μέσω της ηλεκτρονικής πολυπλεξίας του εσωτερικού ηλεκτρονικού πολυπλέκτη της ολοκληρωμένης οπτικής συσκευής με στόχο τη δημιουργία του ηλεκτρικού σήματος οδήγησης 100 Gb/s στην γραμμή μεταφοράς του ηλεκτροδίου του ηλεκτρο-οπτικού MZM. Παράλληλα, κρίσιμες παράμετροι αυτών των ηλεκτρονικών συσκευών παρουσιάστηκαν και επιλέχθηκαν οι βέλτιστες τιμές ώστε να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή λειτουργία κατά την αξιολόγηση της ολοκληρωμένης οπτικής συσκευής.

Στη συνέχεια έγινε παρουσίαση της πειραματικής διάταξης υποστήριξης για την ορθή λειτουργία του δέκτη 100 Gb/s συμπεριλαμβανομένου και των απαραίτητων ηλεκτρικών συσκευών για την υποστήριξη και αξιολόγηση της υψίρρυθμης λειτουργίας. Οι εμπορικά διαθέσιμες ηλεκτρονικές συσκευές πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας αξιολογήθηκαν ως προς τα ηλεκτρικά σήματα μέσω των διαγραμμάτων οφθαλμού καθώς και ως προς τον ρυθμό λάθων τους σε μεταξύ τους απευθείας διασύνδεση επιδεικνύοντας λειτουργία χωρίς λάθη μέσω της αξιολόγησης με χρήση του BERT.

Η επόμενη υποενότητα 3.6.1 ήταν αφιερωμένη στην περιγραφή του υπό αξιολόγηση ολοκληρωμένου οπτικού πομπού 100 Gb/s με χρήση του σχήματος διαμόρφωσης NRZ-OOK, όπου παρουσιάστηκαν οι δομικές μονάδες της ολοκληρωμένης συσκευής, οι οποίες σχετίζονταν με τον υψίρρυθμο ηλεκτρονικό πολυπλέκτη 2:1 που παρήγαγε το ηλεκτρικό σήμα 100 Gb/s και με την οπτική υποδιάταξη, η οποία αποτελούνταν από τον ηλεκτρο-οπτικό πολυμερικό MZ διαμορφωτή μαζί με ένα 1550 nm DFB λέιζερ σχηματίζοντας ένα υβριδικό οπτικό chip μέσω της τεχνικής ολοκλήρωσης butt-coupling. Επίσης, εκτενής αναφορά πραγματοποιήθηκε στα επιμέρους απαραίτητα βοηθητικά δομικά στοιχεία της συσκευής και αφορούσαν τις υψίρρυθμες RF γραμμές μεταφοράς εισόδου των δύο ηλεκτρικών σημάτων 50 Gb/s και του ηλεκτρικού ημιτόνου 50 GHz, την οπτική ίνα εξόδου του διαμορφωμένου οπτικού σήματος, τις DC γραμμές μεταφοράς για την τροφοδοσία με τα απαραίτητα ρεύματα των προαναφερθέντων δομικών κυκλωμάτων της ολοκληρωμένης οπτικής συσκευής καθώς και του θερμο-ηλεκτρικού κυκλώματος σταθεροποίησης της θερμοκρασίας. Με την κατασκευή της ολοκληρωμένης συσκευής μετρήθηκε η συνολική οπτική απώλεια, η οποία καταγράφηκε 8,5 dB καθώς και η μέγιστη οπτική ισχύς σε λειτουργία συνεχούς κύματος στην έξοδο του οπτικού πομπού μετρήθηκε 0 dBm όταν η συνάρτηση μεταφοράς του διαμορφωτή βρισκόταν στο μέγιστό της σημείο.

Για την αξιολόγηση της ολοκληρωμένης οπτικής συσκευής υλοποιήθηκαν δύο πειραματικές διατάξεις όπως απεικονίζονται στις υπο-ενότητες 3.6.2 και 3.6.3, όπου χρησιμοποιήθηκαν τόσο εμπορικά διαθέσιμοι όσο και πρωτότυποι δέκτες τελευταίας τεχνολογίας που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια προηγούμενων ερευνητικών έργων [35] με δυνατότητα ανίχνευσης οπτικών σημάτων μέχρι 100 Gb/s μέσω της απευθείας ανίχνευσης. Η πρώτη πειραματική τοπολογία αφορούσε την αξιολόγηση του οπτικά διαμορφωμένου σήματος προερχόμενου από τον υπό αξιολόγηση οπτικό πομπό με ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 80 Gb/s μέσω της χρήσης ενός οπτικού EAM στην πλευρά του δέκτη ικανού να αποπολυπλέκει οπτικά το οπτικό διαμορφωμένο κανάλι 80 Gb/s σε δύο 40 Gb/s, τα οποία με τη σειρά τους αφού υφίσταντο περαιτέρω αποπολυπλεξία στο ηλεκτρικό κομμάτι απέδιδαν 8 κανάλια των 10 Gb/s αναπαριστώντας το αρχικό οπτικό κανάλι 80 Gb/s. Και στα οκτώ κανάλια καταγράφηκε λειτουργία χωρίς λάθη με BER κάτω από 10^{-10} σε κάθε περίπτωση. Ο περιορισμός σε ρυθμούς δεδομένων μεγαλύτερους από 80 Gb/s με τη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη οφειλόταν στις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά του οπτικού αποπολυπλέκτη, και πιο συγκεκριμένα λόγω της επιδείνωσης της απόδοσης του EAM με ηλεκτρικά σήματα οδήγησης υψηλότερα από 40 GHz καθώς ο EAM περιοριζόταν λόγω χαμηλού εύρους ζώνης ($BW < 24$ GHz).

Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη πειραματική διάταξη, η οποία αντικατέστησε τον EAM ως οπτικό πολυπλέκτη με τη χρήση ενός ολοκληρωμένου pin-δέκτη ενσωματωμένο με ηλεκτρικό 1:2 αποπολυπλέκτη ικανό για ανίχνευση οπτικών σημάτων με σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK μέχρι 100 Gb/s. Στην προκειμένη περίπτωση το οπτικό διαμορφωμένο σήμα 100 Gb/s προσέπιπτε στον ολοκληρωμένο οπτικό δέκτη, όπου το υψίρρυθμο ηλεκτρικό σήμα προερχόμενο από τον οπτικό δέκτη αποπολυπτεκόταν μέσω του 1:2 ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού κυκλώματος σε δύο ηλεκτρικά σήματα 50 Gb/s. Αυτά με τη σειρά τους μέσω επιπρόσθετης ηλεκτρονικής αποπολυπλεξίας με χρήση του εμπορικού ηλεκτρονικού 1:4 αποπολυπλέκτη από την πλευρά του δέκτη κατέληγαν σε οκτώ ηλεκτρικά κανάλια 10 και 12.5 Gb/s για ρυθμούς μετάδοσης 80 και 100 Gb/s αντίστοιχα. Κάθε ένα από αυτά τα οκτώ κανάλια και για τους δύο ρυθμούς μετάδοσης παρουσίασε συμπεριφορά ορθής και αξιόπιστης λειτουργίας συστήματος απαλλαγμένο από λάθη τόσο στα 80 όσο και στα 100 Gb/s (ρυθμός λαθών χαμηλότερος από 10^{-10}), αναδεικνύοντας την συγκεκριμένη υλοποίηση ικανή να υποστηρίξει τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για οπτικές διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων δεδομένων με 100 Gb/s χωρητικότητα ανά οπτικό φέρον. Παράλληλα, με τη χρήση και των δύο οπτικών διατάξεων καταγράφηκαν ανοιχτά διαγράμματα οφθαλμού στα 80, 90 ακόμα και στα 100 Gb/s αποκαλύπτοντας το υψηλό εύρος ζώνης λειτουργίας του πομπού βασισμένου σε πολυμερική πλατφόρμα ολοκλήρωσης, συμφωνώντας απόλυτα με τις καμπύλες BER για λειτουργία χωρίς λάθη. Τέλος, έγινε μια παρουσίαση της καταλληλότερης αρχιτεκτονικής βασιζόμενη σε τοπολογία δακτυλίου με οπτικά κυκλώματα μεταγωγής για διασυνδέσεις PODs μέχρι 2 km, όπου οι ολοκληρωμένοι οπτικοί πομποί 100 Gb/s αυτού του κεφαλαίου μπορούν να βρουν πεδίο εφαρμογής εντός υπολογιστικών κέντρων.

Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 3

- [199] Ch. Kouloumentas et al, "Repetition Rate Multiplication of Pseudorandom Bit Sequences," IEEE Photon. Technol. Lett. vol. 21 (7), Apr. 2009, pp. 456-458.
- [200] http://www.centellax.com/sites/centellax.com/assets/products/telecom/pdf/CRU_MUX_DMUX.pdf
- [201] http://www.testmart.com/webdata/mfr_pdfs/CENLAX/products_telecom_pdf_OA5MVM.pdf
- [202] <http://www.fujitsu.com/downloads/OPTCMP/lineup/40gln/40Glnnrz-catalog.pdf>
- [203] G. G. Mekonnen, "Hybrid Co-Packaged Receiver Module with pin-Photodiode Chip and DEMUX-IC for 107 Gb/s Data Rates", ECOC 2009, paper 9.2.6.
- [204] <http://www.hhi.fraunhofer.de/fields-of-competence/photonic-components/project-archive/hecto.html>
- [205] V. Katopodis, et al., "Integrated Transmitter for 100 Gb/s OOK Connectivity Based on Polymer Photonics and InP-DHBT Electronics," presented as PDP at ECOC 2012, Amsterdam The Netherlands, 16-20 September 2012, paper Th.3.B.4.
- [206] V. Katopodis, et al., "Serial 100 Gb/s connectivity based on polymer photonics and InP-DHBT electronics," Optics Express, vol. 20 (27), pp. 28538-28543, Dec 2012
- [207] P. Groumas et al., "Tunable 100 Gbaud Transmitter Based on Hybrid Polymer-to-Polymer Integration for Flexible Optical Interconnects," in Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 2, pp. 407-418, Jan.15, 15 2016.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχεδίαση και Ανάπτυξη Οπτικού Κόμβου Για Ευέλικτες Οπτικές Διασυνδέσεις Μεταξύ Υπολογιστικών Κέντρων Δεδομένων με Χρήση Πομποδεκτών Πολλαπλών Ροών

4.1 Εισαγωγή

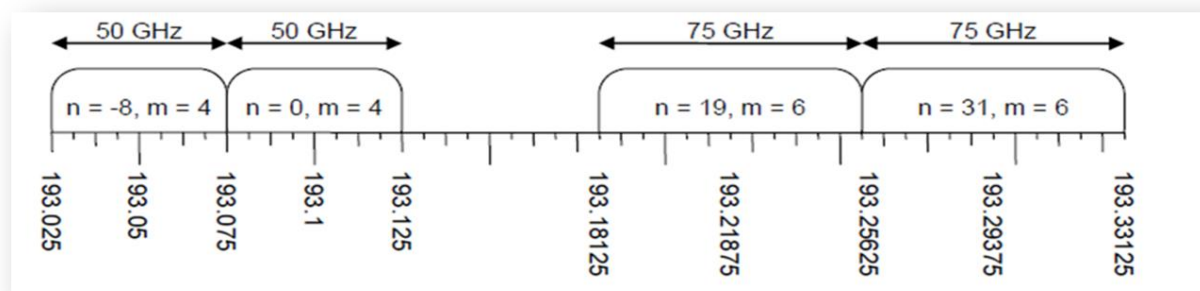
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του ορισμού της έννοιας του ευέλικτου οπτικού δικτύου, καθώς και των ευέλικτων πομποδεκτών, όπου μέσω αυτών προσδίδονται χαρακτηριστικά και δυνατότητες στο δίκτυο όπως η ευελιξία και ο προγραμματισμός. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τοπολογίες των πρότυπων αρχιτεκτονικών μητροπολιτικού δικτύου, δικτύου κορμού και υπολογιστικών κέντρων δεδομένων ως πεδία αναφοράς σε επίπεδο συστήματος των προτεινόμενων οπτικών πομποδεκτών πολλαπλών οπτικών ροών, με χωρητικότητα έως 1 Tb/s έχοντας ως δίκτυο αναφοράς το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο της Telecom Italia. Με την περιγραφή των πρότυπων αρχιτεκτονικών ως πεδίο εφαρμογής, γίνεται εκτενής αναφορά στις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά των προτεινόμενων ευέλικτων πομποδεκτών πολλαπλών ροών, καθώς και στην αρχιτεκτονική του οπτικού κόμβου, βασισμένου σε επιλεκτικούς μεταγωγείς μήκους κύματος (WSS), ικανού να εκμεταλλευτεί και να διαχειριστεί καταλλήλως τις νέες και άκρως αποδοτικές δυνατότητες των πομποδεκτών νέας γενιάς.

Στη συνέχεια, γίνεται μια εκτενής ανάλυση στο κομμάτι του τρόπου διασύνδεσης και της μεταφοράς των ηλεκτρικών ροών δεδομένων του δικτύου, μέσω ενθυλάκωσης αυτών σε ενός γενικού τύπου πλαισίου μεταφοράς, γνωστό ως OTN, ώστε να διαμορφωθούν πάνω στα οπτικά φέροντα των προτεινόμενων ευέλικτων πομποδεκτών, μεταφέροντας την πληροφορία στον επιθυμητό προορισμό του δικτύου. Έχοντας αναλύσει τόσο τον ηλεκτρικό τρόπο ομαδοποίησης των δεδομένων όσο και τις οπτικές δυνατότητες των προτεινόμενων πομποδεκτών, παρουσιάζεται η ευελιξία καθώς και τα πλεονεκτήματα του υπό σχεδίαση κόμβου συνδεδεμένου με τους προτεινόμενους πομποδέκτες όσο αφορά την ανακατανομή και την διέλευση των εκάστοτε μηκών κύματος WDM καθώς και την δυνατότητα να ανακατευθύνονται τα επιλεγμένα αυτά μήκη κύματος σε διαφορετικές οπτικές διαδρομές, προσδίδοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την ικανότητα αυτοδιοργάνωσης στις απαιτήσεις του δικτύου με γρήγορους ρυθμούς.

Τέλος, ακολουθεί η περιγραφή της τοπολογίας ελέγχου των προαναφερθέντων οπτικών συσκευών και κατ' επέκταση ο υλοποιημένος SDO agent με τα σενάρια λειτουργίας του, στη γραφική γλώσσα προγραμματισμού Labview, ο οποίος ελέγχει όλες τις οπτικές παραμέτρους, τόσο των οπτικών πομπών όσο και των WSSs. Παράλληλα, παρουσιάζεται η περιγραφή και ο τρόπος υλοποίησης σε επίπεδο προγραμματισμού του επεξεργαστή OTN, που έλαβε χώρα στο matlab και της κοινής προσομοίωσης με το VPI για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων πολλαπλών ροών, πολλαπλού ρυθμού και σχήματος διαμόρφωσης των προτεινόμενων πομποδεκτών. Ως εκ τούτου, γίνεται εκτενής ανάλυση των λειτουργιών και του τρόπου υλοποίησης σε γλώσσα Verilog της αναπροσαρμογής σε πραγματικό χρόνο των δυνατοτήτων του FPGA, αποδίδοντας κατ' αυτό τον τρόπο τις επιπρόσθετες ιδιότητες, πέραν των πολλαπλών οπτικών ροών μέσω της τελευταίας έκδοσης του SDO agent, των πολλαπλών ρυθμών και πολλαπλών σχημάτων διαμόρφωσης στους προτεινόμενους οπτικούς πομποδέκτες. Τέλος, γίνεται μια τελική παρουσίαση του ανεπτυγμένου SDO agent, όπου μέσω αυτού δίνεται η δυνατότητα επιλογής του αριθμού των οπτικών ροών, του μήκους κύματος κάθε ροής, των ενεργών θυρών των WSSs, του σχήματος διαμόρφωσης και του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων προσδίδοντας στους προτεινόμενους οπτικούς πομπούς όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ώστε να καταστούν αναγκαίοι στα μελλοντικά ευέλικτα οπτικά δίκτυα.

4.2 Εξέλιξη και Έννοια του Ευέλικτου Οπτικού Δικτύου

Η αρχιτεκτονική ευέλικτου οπτικού δικτύου (Elastic Optical Network, EON) [47] στηρίζεται στην αποτελεσματική χρησιμοποίηση του οπτικού φάσματος, μέσω μιας βελτιστοποιημένης υποδομής δικτύου που υλοποιεί μια ευέλικτη κατανομή καναλιού, χρησιμοποιώντας υποδοχές συχνότητας με μειωμένα μεγέθη (π.χ. από τα τρέχοντα σταθερά συστήματα 50 GHz Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) [209] σε παραμετροποιήσιμες υποδοχές πολλαπλάσιες των 12.5 GHz [209], όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.1). Επιπλέον, τα ευέλικτα οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούν το πλεονέκτημα της παροχής εξατομικευμένων φασματικών πλεγματών κάθε φορά που εγκαθίστανται νέα οπτικά μονοπάτια.



Εικόνα 4.1: Ιδέα ευέλικτου πλέγματος πάνω στο οπτικό φάσμα.

Με αυτές τις δυνατότητες κατά νου, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών-Τομέας Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, ITU-T) [210] έχει παραθέσει τις συστάσεις G.694.1 και G.872, για να συμπεριλάβει την ιδιότητα της ευελιξίας εντός του πλέγματος ITU [211]. Μια πρωτότυπη ιδέα βασισμένη στο DWDM [209] έχει καθοριστεί από την ομάδα ITU-T Study Group 15 [212], ξεκινώντας από τη σύσταση G.694.1, με την επισημοποίηση των ονομαστικών κεντρικών συχνοτήτων (διακριτότητας 6.25 GHz), του πλάτους του καναλιού (πολλαπλάσιο 12.5 GHz) και την έννοια της υποδοχής συχνότητας. Σε ένα τέτοιο σύστημα, η σύνδεση του επιπέδου δεδομένων δρομολογείται με βάση κατανεμημένες και μεταβλητού μεγέθους περιοχές συχνότητας εντός του οπτικού φάσματος (κανάλια μέσων-media channels), παρέχοντας το πρώτο βήμα για τα EONs. Μόλις το πλέγμα ITU προσαρμοστεί με το ευέλικτο σχήμα, οι τωρινοί αναμεταδότες, πομποδέκτες και επαναπροσδιοριζόμενοι οπτικοί πολυπλέκτες πρόσθεσης ή αφαίρεσης οπτικών καναλιών (reconfigurable optical add-drop multiplexer, ROADMs) [213] θα ακολουθήσουν την ίδια πορεία.

Ο πομποδέκτης πρέπει να κινηθεί από την τρέχουσα αρχιτεκτονική σταθερού δικτύου προς την ευέλικτη μετάδοση, με τη δυνατότητα να προσαρμόζει το οπτικό φάσμα, επεκτείνοντας αμέσως ή εμμέσως το ζητούμενο εύρος ζώνης. Αυτό είναι εφικτό με τη χρήση αναμεταδοτών μεταβλητού εύρους ζώνης (bandwidth variable transponders, BVTs), που μπορούν να συντονίζουν δυναμικά το οπτικό εύρος ζώνης τους, για παράδειγμα μεταβάλλοντας το ρυθμό συμβόλων, που βασίζεται σε μια δυναμική ανταλλαγή μεταξύ απόστασης και χωρητικότητας (χρησιμοποιώντας υψηλής ταχύτητας μετάδοσης φασματικά αποδοτικά σχήματα διαμόρφωση π.χ. 8PSK, 16QAM, 64QAM για κοντινές διασυνδέσεις, και πιο ισχυρά, αλλά λιγότερο αποδοτικά σχήματα διαμόρφωσης π.χ. QPSK, BPSK για τις διασυνδέσεις μεγάλων αποστάσεων). Οι BVTs μπορούν επίσης να ρυθμίζουν το συνολικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, την κωδικοποίηση διόρθωσης σφαλμάτων (forward error correction, FEC) [214] και γενικά, το σχήμα διαμόρφωσης και μορφοποίησης του οπτικού φάσματος (pulse shaping) [215].

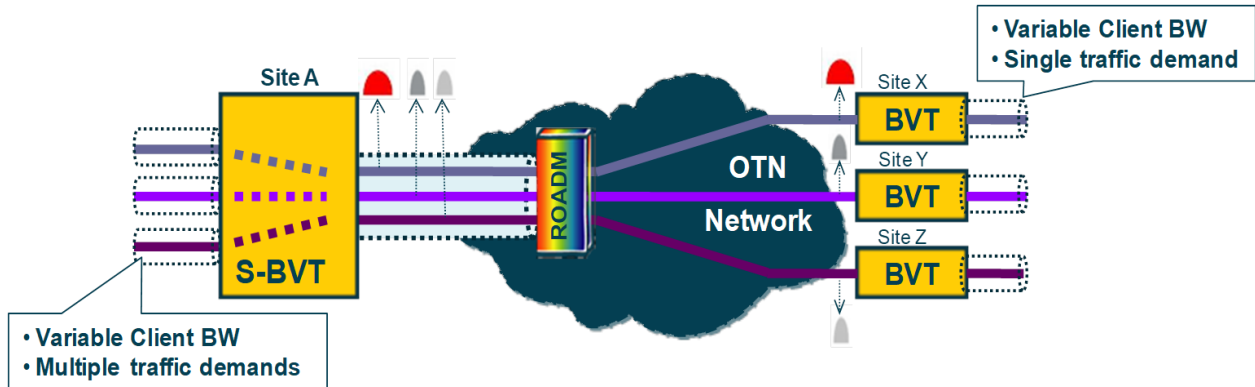
Σε έναν BVT, το εύρος ζώνης μετάδοσης είναι αφιερωμένο αποκλειστικά (μέχρι το μέγιστο) σε μια μεμονωμένη ζήτηση κυκλοφορίας και υπό τον έλεγχο λογισμικού αναπροσαρμόζεται δυναμικά στις πραγματικές ανάγκες των χρηστών και τις συνθήκες του δικτύου, προκειμένου να:

- ακολουθεί τις τυπικές περιοδικές διακυμάνσεις φορτίου (ημερήσια, εβδομαδιαία ...) που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο,
- ρυθμίζει δυναμικά τη χρήση του φάσματος σε σχέση με την απόσταση (π.χ., υψηλότερο αποδοτικό σχήμα διαμόρφωσης για κοντινή διαδρομή, συνήθως συντομότερη και να στρέφεται σε λιγότερο αποδοτικό σχήμα διαμόρφωσης για προστατευμένη διαδρομή, συνήθως μεγαλύτερης απόστασης),
- αποφεύγεται η ανάγκη αγοράς πολλών διαφορετικών αναμεταδοτών εύρους ζώνης: ο στόχος είναι να υπάρχει ένα είδος αναμεταδότη που παρέχει το ευρύ φάσμα των απαιτούμενων ρυθμών μετάδοσης.

Ο BVT χαρακτηρίζεται ως “sliceable” (δηλαδή έχει την ικανότητα να τεμαχίζει σε μικρά διαστήματα το οπτικό φάσμα), όταν η διαθέσιμη χωρητικότητα μετάδοσης μπορεί ταυτόχρονα να μοιράζεται από μία έως αρκετές (χαμηλός ρυθμός μετάδοσης) απαιτήσεις κυκλοφορίας (βλέπε εικόνα 4.2). Κατά αυτό τον τρόπο, οι S-BVTs ενισχύουν τις λειτουργίες των BVTs και είναι σε θέση να διαθέτουν την καθαρή χωρητικότητάς τους σε μία ή περισσότερες ανεξάρτητες οπτικές ροές που στη συνέχεια μεταδίδονται σε έναν ή περισσότερους προορισμούς [216]. Κατά συνέπεια, σε αντίθεση με τους BVTs, το καθαρό εύρος ζώνης μετάδοσή τους (μέχρι μια μέγιστη τιμή), μπορεί να κατανέμεται σε διαφορετικές ανεξάρτητες απαιτήσεις. Όλα οι πόροι των S-BVTs από τους ηλεκτρικούς μέχρι τους οπτικούς έρχονται και δημιουργούν μια δεξαμενή δεδομένων ώστε να κατανεμηθούν ευέλικτα σε έναν αριθμό ομάδων ίσο με τον αριθμό των ανεξάρτητων απαιτήσεων. Ως αποτέλεσμα, η οπτική έξοδος ενός S-BVT είναι μια ομάδα υπερ-καναλιών με

διαφορετικούς προορισμούς, σχήματα διαμόρφωσης και διαφορετική φασματική απόδοση που τροφοδοτούν μια μόνο Add/Drop θύρα του ROADM. Ένας S-BVT θεωρείται ως μια συλλογή από ομάδες λογικών/εικονικών μικρότερης χωρητικότητας BVTs, που συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθούν υπερ-κανάλια. Συνοψίζοντας:

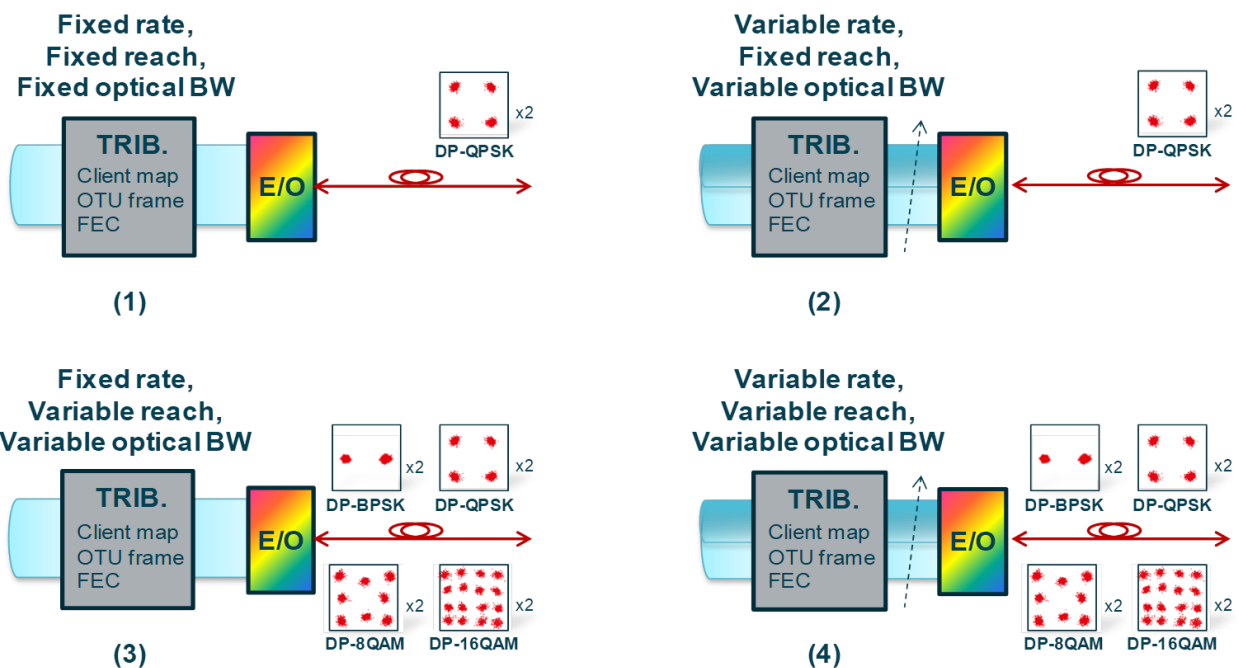
- Η χωρητικότητα ενός S-BVT μπορεί να χρησιμοποιηθεί έως το μέγιστο, ακόμα και όταν σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα δεν υπάρχει μόνο μια ζήτηση κυκλοφορίας που απαιτεί ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης.
- Χρησιμοποιούμενο ευρύ οπτικό φάσμα μπορεί στη συνέχεια να διαμοιράσει σε ισαπέχοντα διαστήματα στο οπτικό στρώμα από συμβατούς ROADMs ευέλικτου πλέγματος και τα διάφορα (συνεχόμενα ή μη) τμήματα του φάσματος να αποσταλούν σε διαφορετικούς προορισμούς [217].



Εικόνα 4.2: Ιδέα sliceable Bandwidth Variable Transponders (S-BVT).

Η εικόνα 4.3 απεικονίζει την εξέλιξη της λειτουργίας των οπτικών αναμεταδοτών υψηλής ταχύτητας. Ήταν κοινή προσέγγιση να χρησιμοποιείται μία μονάδα αναμεταδότη ανά ρυθμό οπτικής γραμμής από τις πρώτες σταθερές λύσεις (μία μονάδα εξοπλισμού ανά ρυθμό οπτικής γραμμής και σχήμα διαμόρφωσης) σε πιο ευέλικτες, οι οποίες είναι προετοιμασμένες για ποικίλα σχήματα διαμόρφωσης (στην εικόνα 4.3/Περίπτωση 3: το πολύπλοκο σχήμα διαμόρφωσης και η φασματική απόδοση (SE) μπορούν να είναι ισορροπημένα με την απόσταση μετάδοσης).

Μια πλήρης ευέλικτη δομή χαρτογράφησης της έννοιας του S-BVT θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ένα σύνολο από μια ή περισσότερες ελαστικές μονάδες που καλύπτουν ένα ευρύτερο φάσμα των τρόπων λειτουργίας σε σχέση με τους ρυθμούς γραμμής, τα σχήματα διαμόρφωσης και τον αριθμό των οπτικών φερόντων που μπορούν να υποστηριχθούν. Η χρήση των πόρων του εξοπλισμού μεγιστοποιείται από τη δυναμική ανακατανομή των ηλεκτρικών και οπτικών συσκευών, μέσω πολλών διαφορετικών περιπτώσεων κυκλοφορίας.



Εικόνα 4.3: Εξέλιξη λειτουργίας οπτικού αναμεταδότη.

4.3 Εφαρμογή Ευέλικτων Πομποδεκτών σε Μητροπολιτικά Δίκτυα

Λαμβάνοντας υπόψη την τεράστια ποικιλία των πιθανών αρχιτεκτονικών των μητροπολιτικών δικτύων και την ευρεία διανομή των αποστάσεων που έχουν ήδη περιγραφεί στο δεύτερο κεφάλαιο, μια κατηγορία πομποδεκτών ικανοί να συντονίζουν δυναμικά το απαιτούμενο οπτικό εύρος ζώνης και την εμβέλεια μετάδοσης μέσω της ρύθμισης των εσωτερικών παραμέτρων (όπως το συνολικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, την κωδικοποίηση FEC, το σχήμα διαμόρφωσης και τον ανασχηματισμό του οπτικού φάσματος) έχει μεγάλο ενδιαφέρον για το μητροπολιτικό περιβάλλον. Αυτή η μια συνιστώσα που πληροί όλα τα προηγούμενα κριτήρια, είναι σε θέση να προσαρμόζεται δυναμικά στην πραγματική ζήτηση της κυκλοφορίας και της απόστασης και μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της απλότητας του εξοπλισμού, με αποτέλεσμα εξοικονόμηση του CAPEX [218] (μείωση ανταλλακτικών κομματιών, μείωση αλόγιστης σπατάλης εύρους ζώνης, αύξηση των μοιραζόμενων πόρων) και του OPEX [218] (κοινή διαχείριση και παρακολούθηση).

Χρησιμοποιώντας φασματικά αποδοτικά σχήματα διαμόρφωσης (π.χ., PM-8PSK, PM-16QAM, PM-64QAM) για συνδέσεις μικρών και μεσαίων αποστάσεων, και πιο ισχυρά, αλλά λιγότερο αποτελεσματικά σχήματα διαμόρφωσης (π.χ. PM-QPSK) για μεγάλες αποστάσεις, ο ευέλικτος πομποδέκτης μπορεί να υιοθετηθεί αποτελεσματικά ως βυσματούμενα οπτικά πλάγιας γραμμής (line side pluggable optics) σε κάρτες αναμεταδοτών, σε θύρες μεταγωγών άκρων, σε διεπαφές δρομολογητών, σε κάρτες εξοπλισμού και σε μεταγωγείς του τμήματος οπισθόζευξης (backhauling) του δικτύου κινητής [219]. Το εύρος ζώνης μετάδοσης (μέχρι μια μέγιστη τιμή) μπορεί να είναι αποκλειστικά αφιερωμένο, τόσο σε μια μόνο ζήτηση κυκλοφορίας, τροφοδοτώντας μια μόνο σύνδεση, ή να προσαρμόζεται δυναμικά για να τροφοδοτήσει πολλαπλές συνδέσεις και διαφορετικές οπτικές απαιτήσεις προς έναν ή πολλαπλούς προορισμούς. Στην τελευταία περίπτωση, κόμβοι βασισμένοι σε ROADMs ευέλικτου πλέγματος απαιτούνται, ώστε να χειρίζονται αποτελεσματικά αυτή τη δυναμικότητα, λαμβάνοντας υπόψη ότι μπορεί να προκύψουν ορισμένοι περιορισμοί σε κάθε σύνδεση, ιδίως όσον αφορά το μέγεθος των ελάχιστων και μέγιστων superchannel ρών [220]. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα του αριθμού των οπτικών φερόντων και το εύρος ως προς την επιλεξιμότητα του μήκους κύματος τους, δημιουργείται ένα αποτελεσματικό οπτικό εύρος ζώνης που θα μπορούσε να ληφθεί με τις αντίστοιχες απαιτούμενες κενές φασματικές ζώνες (ή προστατευμένες ζώνες-guard bands) για οπτική δρομολόγηση και μεταγωγή χωρίς κυρώσεις. Απλοί, λιγότερο από πέντε βαθμούς ελευθερίας, με αναισθησία ως προς το μήκος κύματος ROADMs ευέλικτου πλέγματος είναι τα οπτικά στοιχεία μεταγωγής που απαιτούνται στην περίπτωση της φωτονικής δρομολόγησης ή σε αρχιτεκτονικές δακτυλίων.

4.4 Εφαρμογή Ευέλικτων Πομποδεκτών σε Δίκτυα Κορμού

Όσον αφορά τον εξοπλισμό του δικτύου κορμού, συνήθως δεν χρησιμοποιούνται βυσματούμενα οπτικά πλάγιας γραμμής λόγω του γεγονότος ότι απαιτούνται υψηλού επιπέδου πολυπλοκότητας κάρτες γραμμής και υψηλού επιπέδου εξελιγμένα ηλεκτρονικά, τα οποία πρέπει να εισαχθούν σε αυτές τις κάρτες για πλαίσια OTN [221], κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση FEC, και αλγορίθμους ανάλυσης. Οι ευέλικτοι πομποδέκτες, ωστόσο, ειδικά αν υιοθετηθεί σχήμα διαμόρφωσης για μεγάλη απόσταση, θα μπορούσαν να είναι μέρος των μεγαλύτερων οπτικών μονάδων πλάγιας γραμμής, ως ένας αποτελεσματικός τρόπος για την επίτευξη μιας ενοποιημένης οπτικής συναρμολόγησης πομπού μετάδοσης και δέκτη για περιορισμένο αριθμό υποφερόντων. Στην περίπτωση αυτή η επιλογή θα είναι ουσιαστικά μεταξύ περιορισμένου αριθμού σχημάτων διαμόρφωσης, θεωρώντας ως ευκαιρία τη δυνατότητα να διανέμουν τη χωρητικότητα τους σε μια ή περισσότερες ανεξάρτητες οπτικές ροές. Λύσεις υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων είναι προτιμητέες, δημιουργώντας συνενωμένες ομάδες πομποδεκτών προκειμένου να επιτευχθεί τεράστιος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε ένα μεγάλο εύρος ζώνης υπερ-καναλιού. Πολυβαθμιαίοι, άχρωμοι (colorless) και αναισθητοί ως προς την κατεύθυνση (directionless) φασματικοί επιλεκτικοί μεταγωγείς στο εσωτερικό των ROADMs είναι αφιερωμένοι για τη φωτονική δρομολόγηση των υπερ-καναλιών κατά μήκος του δικτύου [222].

4.5 Εφαρμογή Ευέλικτων Πομποδεκτών σε Υπολογιστικά Κέντρα Δεδομένων

Οι διεπαφές γραμμής του εξοπλισμού του πυρήνα των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων για τη διασύνδεση μεταξύ υπολογιστικών κέντρων δεδομένων είναι ουσιαστικά οι ίδιες διεπαφές που έχουν ήδη περιγραφεί για τα τμήματα του μητροπολιτικού δικτύου και του δικτύου κορμού. Αντίθετα, για τη

συνδεσιμότητα του εξοπλισμού εντός υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, οι οπτικές διεπαφές είναι αρκετά διαφορετικές: πρώτα απ' όλα, υποτίθεται ότι πρέπει να είναι μικρότερες, απλούστερες και φθηνότερες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συνδεσιμότητα εντός του υπολογιστικού κέντρου δεδομένων απαιτεί υψηλό αριθμό συνδέσεων, ομοιόμορφο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και διαχείρισης, λειτουργώντας όλοι μαζί στη μέγιστη θερμοκρασία και υπό πλήρες φορτίο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνδεσιμότητα εντός γραφείων (intra-office) ή συνδέσεις κοντινής απόστασης είναι τυπικές για τα δίκτυα υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, ιδιαίτερα φασματικά αποδοτικά σχήματα διαμόρφωσης (π.χ., PM-16QAM, PM-64QAM) είναι προτιμότερα και η επιλογή πολλαπλών φερόντων θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για τη δημιουργία ξεχωριστών ροών που κατευθύνονται προς διαφορετικούς προορισμούς με απλό σχήμα πολυπλεξίας στο μήκος κύματος όπως παθητικοί διαχωριστές και η σύμφωνη ανίχνευση χωρίς χρήση οπτικού φίλτρου (filterless), λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση ευέλικτων πομποδεκτών. Έτσι, μια αρχιτεκτονική χαμηλού κόστους WDM θα μπορούσε να εφαρμοστεί με αξιοποίηση της σύμφωνης ανίχνευσης για την επιλογή του οπτικού φέροντος, αντί της ανίχνευσης υψηλής ευαισθησίας. Πρέπει επίσης να αποφευχθεί η χρήση ηλεκτρονικών FEC, λόγω της περιορισμένης εμβέλειας των διασυνδέσεων που απαιτείται.

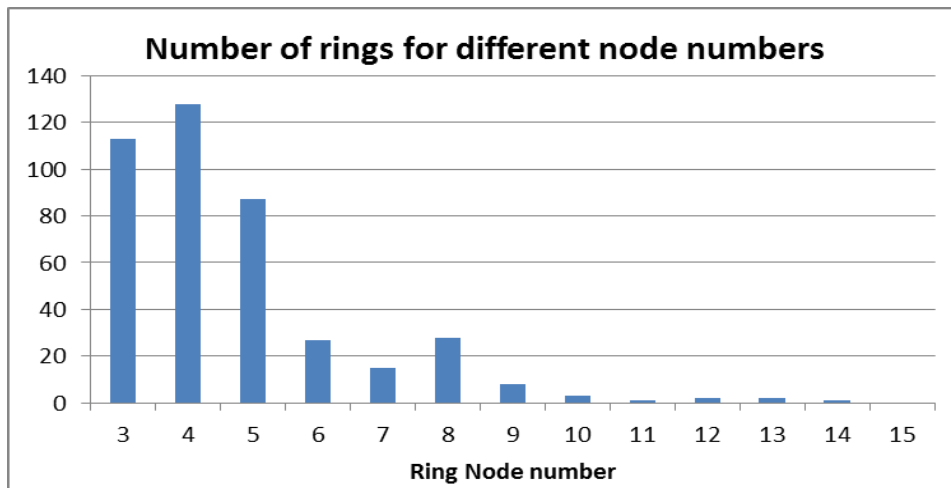
4.6 Σενάρια Χρήσης των Ευέλικτων Πομποδεκτών

Αυτή η ενότητα αναφέρεται στις σημαντικότερες περιπτώσεις χρήσης για την εφαρμογή των ευέλικτων πομποδεκτών στα πλαίσια των πραγματικών δικτύων. Τρία διαφορετικά σενάρια εφαρμογής προσδιορίζονται για τους προτεινόμενους ευέλικτους πομποδέκτες: τα τμήματα του μητροπολιτικού δικτύου (καλύπτονται τόσο το τμήμα της συνάθροισης (aggregation) όσο και του πυρήνα (core) [223]), το δίκτυο κορμού (backbone core), και τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων. Ο στόχος αυτών των περιπτώσεων χρήσης είναι να περιγραφεί η πιθανή εξέλιξη των δικτύων υπό ανάλυση από την άποψη του εξοπλισμού και το χειρισμό των ροών κυκλοφορίας.

4.6.1 Σενάρια Χρήσης για Μητροπολιτικό Τμήμα Δικτύου (Metro segment)

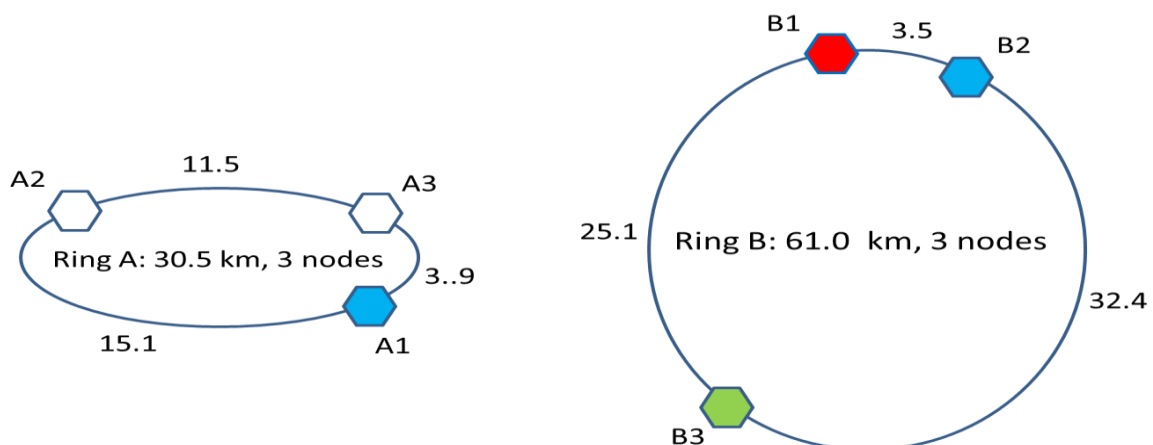
Σε αυτή την ενότητα παρέχεται μια επισκόπηση των δακτυλίων WDM της συνάθροισης και των βασικών τμημάτων του μητροπολιτικού δικτύου έχοντας ως δίκτυο αναφοράς αυτό της Telecom Italia. Οι δακτύλιοι WDM παρέχουν μια μεγάλη ποικιλία, όσον αφορά τον αριθμό των κόμβων, των τομέων και των μηκών των δακτυλίων. Για το λόγο αυτό παρέχονται ορισμένα σημαντικά παραδείγματα με σκοπό να επιλεγεί ένας περιορισμένος αριθμός σημαντικών υποθέσεων. Έλεγχος της επάρκειας και της οικονομικής βιωσιμότητας μιας λύσης σε μια δεδομένη περίπτωση αναφοράς παρέχει τα αποτελέσματα που μπορούν να επεκταθούν στο σύνολο των δακτυλίων που ανήκουν στην κατηγορία του.

Το κριτήριο που χρησιμοποιείται για να επιλεγεί μια συλλογή αντιπροσωπευτικών δακτυλίων προκύπτουν από την ανάλυση του διαγράμματος της παρακάτω εικόνας 4.4. Καθώς ο αριθμός των δακτυλίων είναι μεγαλύτερος σε περιοχές μικρού μήκους (0-25 km και 25-50 km) ένας δακτύλιος αναφοράς επιλέγεται για κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες (δακτύλιοι A και B, αντίστοιχα). Οι άλλοι δακτύλιοι αναφοράς επιλέγονται για να καλύψουν περισσότερες από μία κατηγορίες απόστασης στο διάγραμμα του εικόνας 4.4. Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει ότι όλα τα εκπροσωπούμενα σύνολα (εκτός από εκείνο του οποίου η ακτίνα οριοθετείται από τη μεγαλύτερη απόσταση, λόγω του σχετικά χαμηλού αριθμού των δακτυλίων που ανήκουν σε αυτό) είναι περίπου τα ίδια σε μέγεθος. (Δακτύλιος C καλύπτει τις αποστάσεις 50-75 km και 75-100 km, δακτύλιος D καλύπτει τις αποστάσεις 100-200 km και 200-300 km και ο δακτύλιος E καλύπτει αποστάσεις μεγαλύτερες των 300 km).



Εικόνα 4.4: Διάγραμμα κατανομής των κόμβων των δακτυλίων του μητροπολιτικού περιφερειακού δικτύου WDM της Telecom Italia.

Ο εκπροσωπούμενος δακτύλιος μιας δεδομένης ομάδας επιλέγεται μεταξύ των δακτυλίων της επόμενης απόστασης, με έναν αριθμό κόμβων που είναι ο χαμηλότερος (ή πολύ κοντά στο χαμηλότερο) της αντίστοιχης κατηγορίας. Αυτό σημαίνει, με υψηλό βαθμό πιθανότητας, ότι η προϋπόθεση της δυνατότητας μετάδοσης στον οπτικό σχεδιασμό ενός δακτυλίου αναφοράς εκπληρώνεται από τους άλλους δακτυλίους της ομάδας που εκπροσωπεί. Οι επιλεγμένοι δακτύλιοι, η αντίστοιχη τάξη των δυνατών αποστάσεις και άλλα κύρια χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στον πίνακα 6.

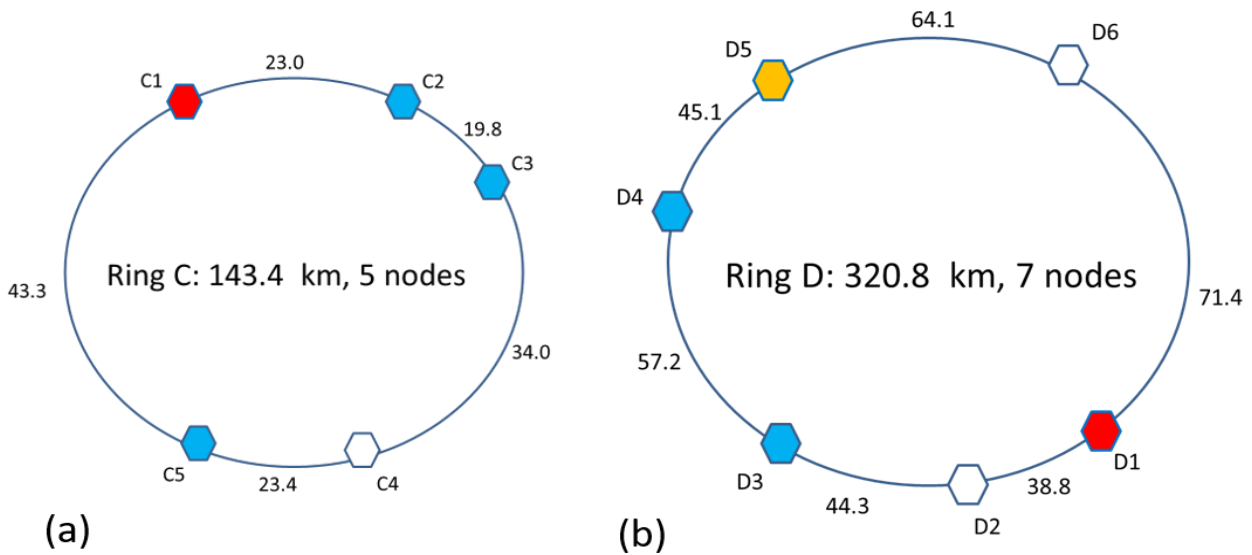


Εικόνα 4.5: Μικρής απόστασης δακτύλιοι A και B συνολικού μήκους 30.5 km και 61 km αντίστοιχα και με 3 κόμβους έκαστος.

Πίνακας 6: Λίστα των δακτυλίων αναφοράς και οι κατηγορίες που αντιπροσωπεύουν.

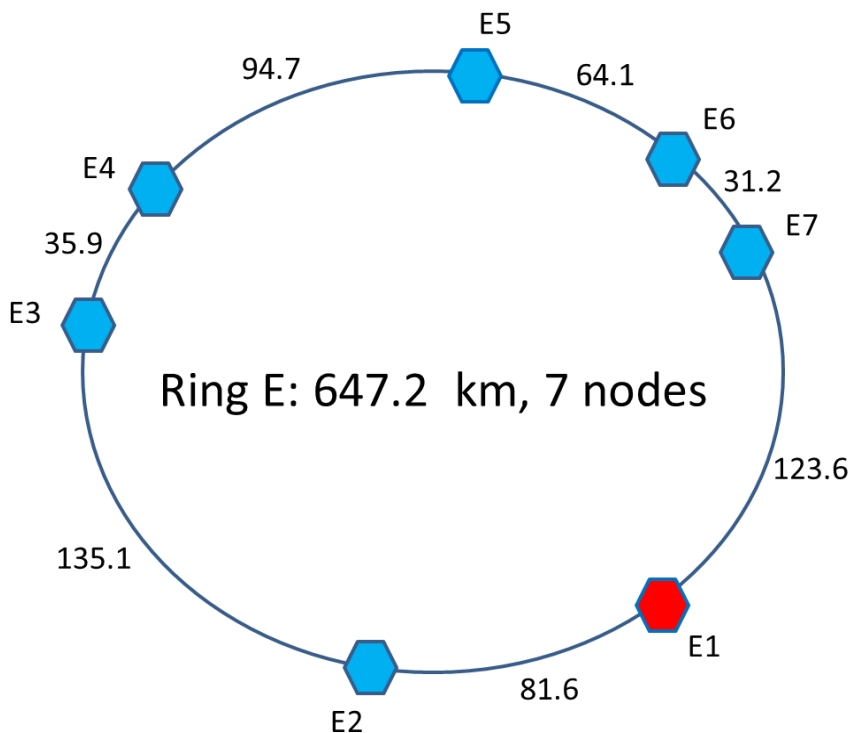
Ring	Ring length [km]	Number of nodes	Length ranges covered [km]	Number of rings in the range	Number of nodes involved
A	30.5	3	0-25	102	401
B	61.0	3	25-50	86	359
C	143.4	5	50-100	83	362
D	320.8	7	100-300	107	538
E	647.2	7	>300	37	208

Για παράδειγμα, ο δακτύλιος A είναι ένας δακτύλιος μικρού μήκους (30,2 km) με μόνο τρεις κόμβους, με τους ακόλουθους πέντε πραγματικούς δακτυλίους να καθορίζονται λεπτομερώς μέσω των κόμβων και των τμηματικών μηκών των δακτυλίων.



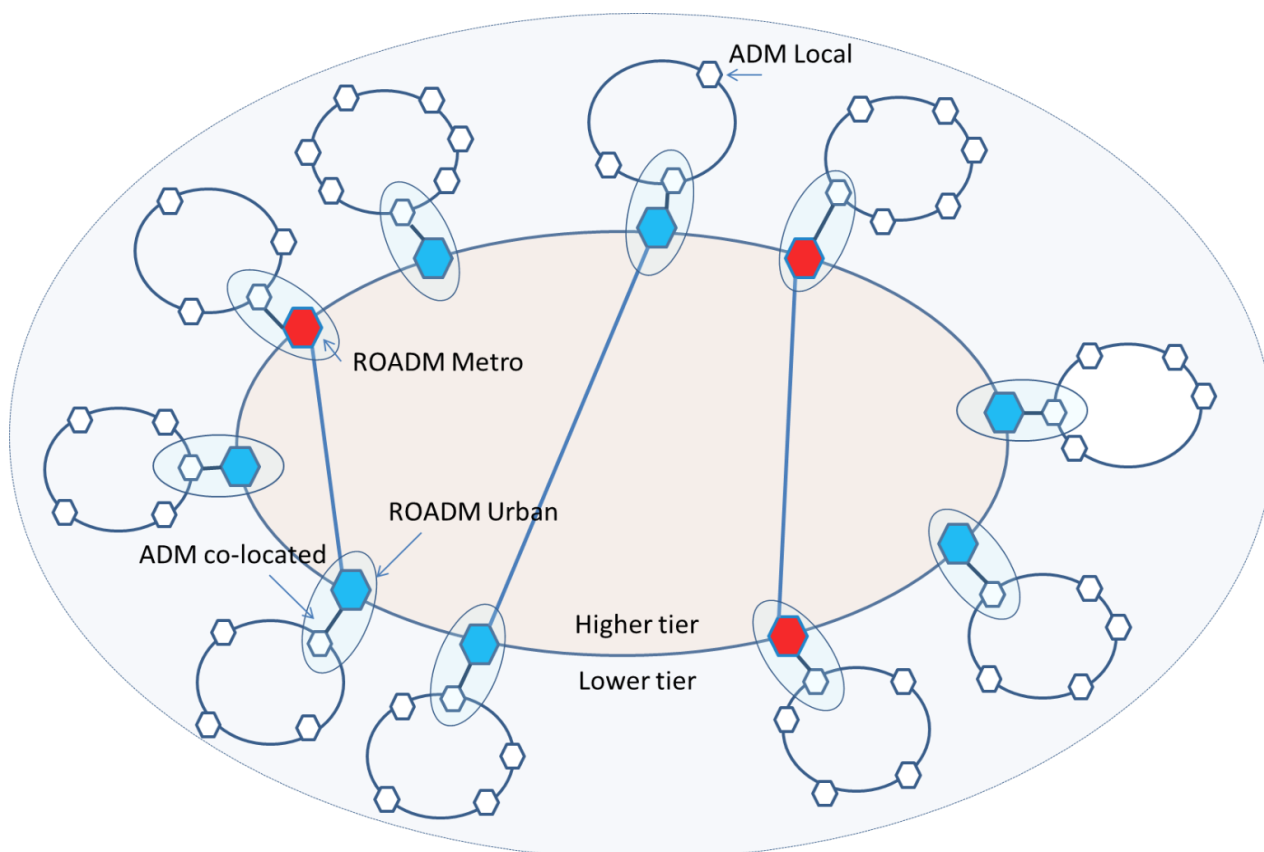
Εικόνα 4.6: Μεσαίας απόστασης δακτύλιος C συνολικού μήκους 143.4 km με 5 κόμβους και μεγάλης απόστασης δακτύλιος D συνολικού μήκους 320,8 km με 7 κόμβους.

Η δομή του μελλοντικού δικτύου οπτικής μεταφοράς της Telecom Italia δεν έχει ακόμα αποφασιστεί, αλλά κατά πάσα πιθανότητα το δίκτυο θα αναδιοργανωθεί απορρίπτοντας τα σημερινά συστήματα, τα οποία θα καταστούν παρωχημένα μέσα στα επόμενα 3-5 χρόνια, μέσω της ανάπτυξης ενός δικτύου που θα χτιστεί εκ νέου ξεκινώντας από μηδενική βάση. Το νέο περιφερειακό μητροπολιτικό δίκτυο μεταφοράς θα οργανωθεί στη βάση ενός μακρο-περιφερειακού διαμερισμού του δικτύου, με στόχο τον εξορθολογισμό της υποδομής WDM.



Εικόνα 4.7: Μεγάλης απόστασης δακτύλιος E συνολικού μήκους 647.2 km με 7 κόμβους.

Η ιδέα βασίζεται στο διαχωρισμό του εθνικού εδάφους σε 10 μακρο-περιφερειακές περιοχές. Σε κάθε τομέα, μια σειρά από 50 έως 100 οπτικούς κόμβους μεταφοράς θα οργανωθούν σε δύο επίπεδα: μια υψηλότερη βαθμίδα με περίπου δέκα κόμβους, συμπεριλαμβανομένων των μητροπολιτικών κόμβων (2 έως 4 ανά μακρο-περιφέρεια) και μια χαμηλότερη βαθμίδα από δίκτυα λίγων κόμβων (έως δέκα) που συνδέονται με μια ενιαία γραμμή επιστροφής σε κόμβους υψηλότερης βαθμίδας. Η υψηλότερη βαθμίδα θα μπορούσε να είναι ένα πλέγμα με διάμετρο το πολύ 300 km (600 km στην περίπτωση των κόμβων που συνδέονται σε έναν δακτύλιο), ενώ η κατώτερη βαθμίδα θα μπορούσε να είναι δακτύλιοι το πολύ 200 km

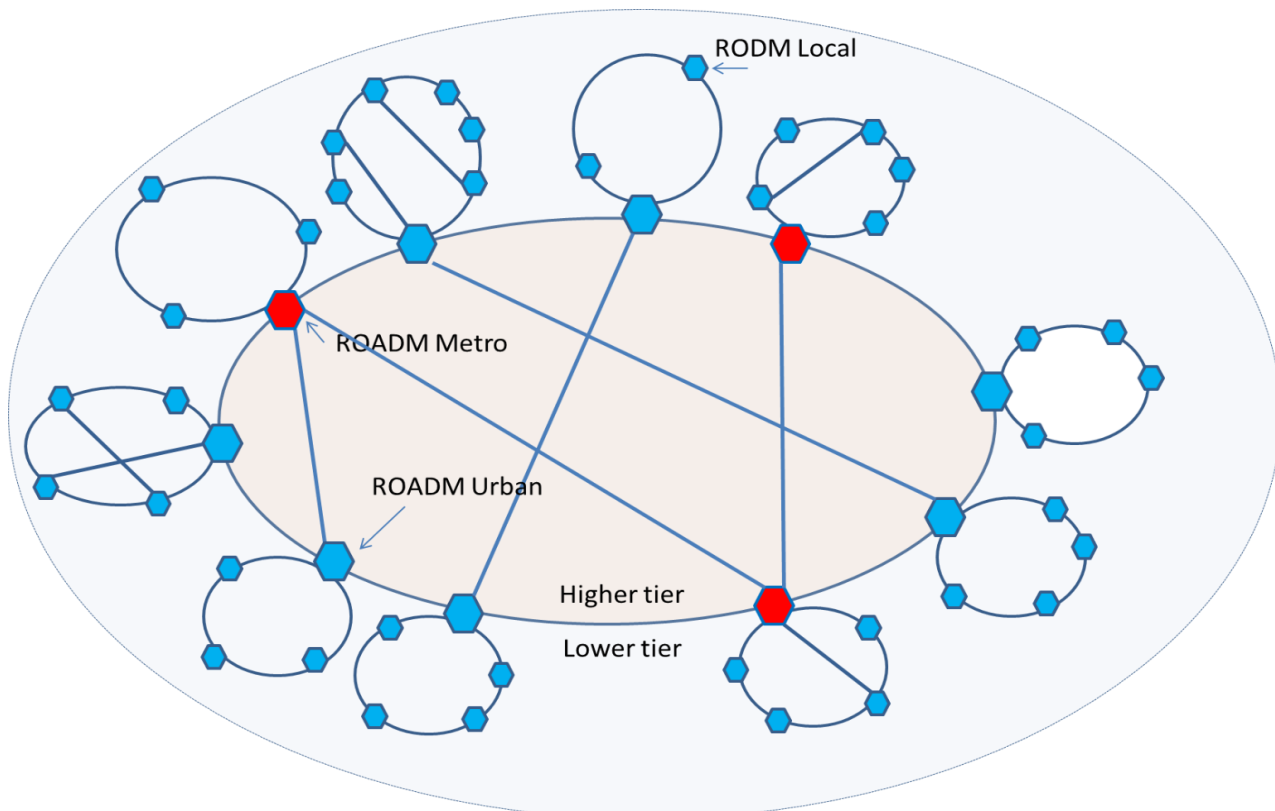


Εικόνα 4.8: Πιθανή εξέλιξη του περιφερειακού μητροπολιτικού οπτικού δικτύου μεταφοράς σε βραχυπρόθεσμο/μεσοπρόθεσμο διάστημα.

(διάμετρος 100 km σε περίπτωση δικτυωτών δικτύων). Η μέγιστη απόσταση του μονοπατιού από σημείο σε σημείο είναι της τάξης 500 km, αν και το μεγαλύτερο μέρος της κυκλοφορίας θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με μονοπάτια μικρότερα από 300 km.

Λόγω του υψηλότερου αριθμού των συστημάτων του εξοπλισμού που απαιτεί στο σύνολό της η υποδομή που αφορά τα περιφερειακά μητροπολιτικά δίκτυα, η εισαγωγή προηγμένων και υψηλού κόστους δυνατοτήτων (παραμετροποίηση δηλαδή χρήση ROADMs, ευελιξία, δηλαδή η χρήση ευέλικτου πλέγματος BVT και S-BVT, λειτουργίες επιπέδου ελέγχου, δηλαδή W/S-SON και/ή SDN) προγραμματίζονται να εισαχθούν σταδιακά και μόνο όταν πραγματικά θα είναι αναγκαίες.

Ένα πρώτο βήμα εξέλιξης για το βραχυπρόθεσμο/μεσοπρόθεσμο διάστημα θα μπορούσε να είναι αυτό που απεικονίζεται στην εικόνα 4.8, όπου η μόνη σημαντική καινοτομία αφορά τη χρήση πολυβαθμιαίων ROADMs στην υψηλότερη βαθμίδα. Αντίθετα, στη χαμηλότερη βαθμίδα, χρησιμοποιούνται οι OADMs [224] λόγω του χαμηλού κόστους τους και επειδή σε αυτό το χρονικό διάστημα η απαίτηση του δικτύου μεταφοράς δεν περιλαμβάνει τις δυνατότητες που προσφέρονται από πιο προηγμένο εξοπλισμό. Διαφανείς οπτικές συνδέσεις από άκρο σε άκρο (end-to-end) θα επιτρέπονται σε ολόκληρο τον περιφερειακό μητροπολιτικό τομέα από τη διασύνδεση μεταξύ OADM και ROADM. Σε ένα δεύτερο στάδιο που σχετίζεται με το μεσοπρόθεσμο/μακροπρόθεσμο χρονοδιάγραμμα, περισσότερη καινοτομία θα εισαχθεί και το δίκτυο θα μπορεί να είναι ένα αναδιαρθρώσιμο δίκτυο ευέλικτου πλέγματος για το σύνολο των περιφερειακών μητροπολιτικών τομέων. Πολυβαθμιαίοι ROADM Ευέλικτου πλέγματος (Flexgrid) (ή άλλου τύπου φωτονικές συσκευές δρομολόγησης που θα είναι διαθέσιμες εκείνη τη χρονική περίοδο) θα χρησιμοποιούνται σε κάθε κόμβο και η νέα δομή του δικτύου θα μπορούσε να είναι αυτή που απεικονίζεται στην εικόνα 4.9. Με βάση αυτό το σχήμα η υψηλότερη βαθμίδα είναι ένα δικτυωτό δίκτυο και η χαμηλότερη βαθμίδα αποτελείται από δακτυλίους ή πλέγματα, εξαρτώμενη από με τον αριθμό των κόμβων της καλυπτόμενης περιοχής και από άλλους παράγοντες, όπως οι απαιτήσεις της κυκλοφορίας και η διαθεσιμότητα των οπτικών ινών.



Εικόνα 4.9: Πιθανή εξέλιξη του περιφερειακού μητροπολιτικού οπτικού δικτύου μεταφοράς σε μεσοπρόθεσμο/μακροπρόθεσμο διάστημα.

4.6.2 Σενάρια Χρήσης για Δίκτυα Κορμού

Το δίκτυο πρέπει να μελετηθεί και στην περίπτωση του επιπέδου όπου βρίσκεται η ραχοκοκαλιά του δικτύου (επίπεδο κορμού) όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 2. Σε αυτή την περίπτωση, έχει 40 κόμβους, 70 συνδέσεις και περίπου 2000 km διάμετρο δικτύου (αξιολογήθηκε με τη συντομότερη διαδρομή) και αντιστοιχεί στο πραγματικό δίκτυο κορμού της Telecom Italia.

Όλες οι καινοτομίες σήμερα που προσβλέπουν στην οπτική δικτύωση είναι πιθανό να λάβουν μέρος στα μέλλοντικά φωτονικά δίκτυα κορμού: ευέλικτο πλέγμα, αναμεταδότες πολλαπλών ροών, μετάδοση πληροφορίας συνολικής χωρητικότητας 1 Tb/s και δυνατότητες ευφυή προγραμματιζόμενων δικτύων (SDN). Τα κύρια τοπολογικά χαρακτηριστικά (αριθμός κόμβων, δομή πλέγματος) δεν αναμένεται να αλλάξουν σημαντικά. Εκτός από την τοπολογία του δικτύου κορμού, γίνεται αναφορά στη ζήτηση κυκλοφορίας για τα μελλοντικά δίκτυα κορμού, η οποία παρέχεται με βάση τις πηγές κυκλοφορίας που είναι γνωστές σήμερα. Άλλες ανάγκες κυκλοφορίας, σήμερα άγνωστες, σίγουρα θα αναγνωριστούν και θα ληφθούν υπόψη στο μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο διάστημα. Η ζήτηση κυκλοφορίας που προβλέπεται για το δίκτυο κορμού προέρχεται από τρεις πηγές: την οπτική συνδεσιμότητα που απαιτείται από το εθνικό δίκτυο κορμού IP, το δίκτυο OTN που απαιτείται για την συνδεσιμότητα των μεταγωγών και ένα σύνολο απαιτήσεων που απαιτούνται απευθείας στο οπτικό στρώμα από τους πελάτες, που συμβολίζεται ως Lambda. Η πρώτη εγκατάσταση του δικτύου ονομάζεται «βασική» και είναι σχετική με ένα ενδιάμεσο σενάριο και χαρακτηρίζεται από μια συνολική ζήτηση 18 Tb/s. Έως και 13% της κυκλοφορίας απαιτεί 1+1 προστασία. Ως αποτέλεσμα, το συνολικό εύρος ζώνης (αποδοτικό συν την προστασία) που μεταφέρεται από το οπτικό δίκτυο να είναι περίπου 20 Tb/s. Για τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη της κυκλοφορίας έχουν δημιουργηθεί μια σειρά από πίνακες κίνησης, κλιμακώνοντας το συνολικό όγκο της κυκλοφορίας από έναν παράγοντα δύο ανά βήμα, που προκαλείται κυρίως από το αυξανόμενο σχετικό ποσοστό της κίνησης IP.

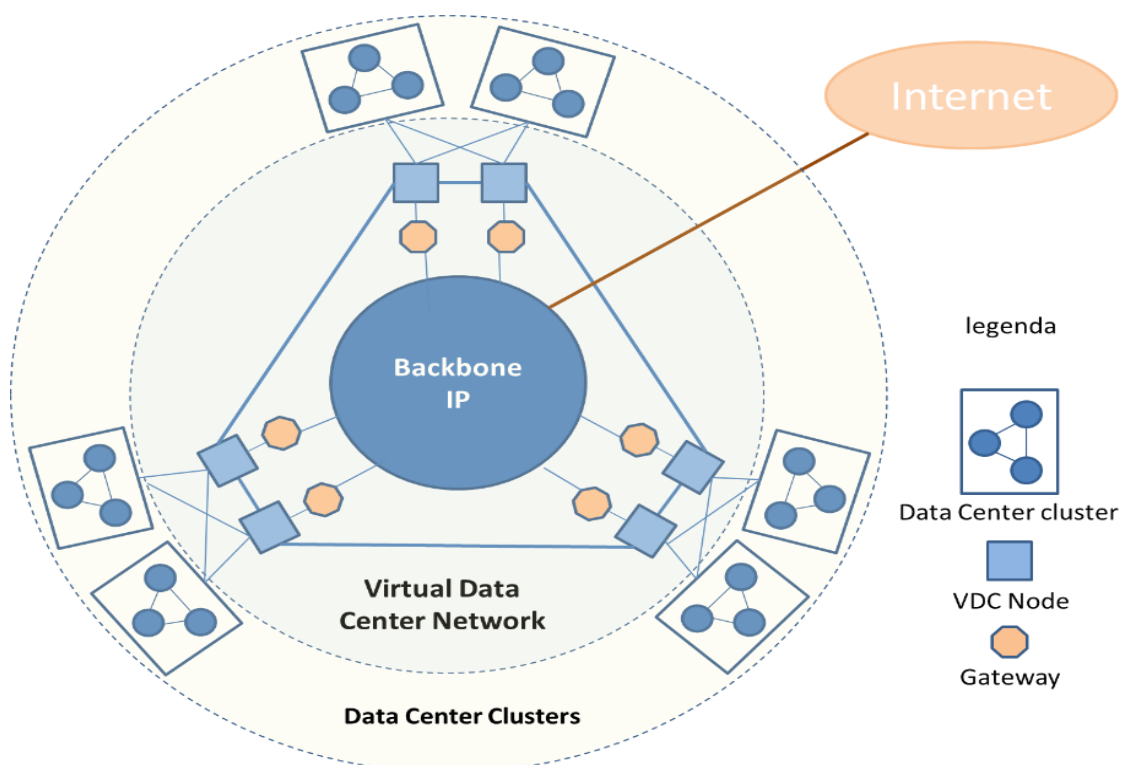
4.6.3 Σενάρια Χρήσης για Υπολογιστικά Κέντρα Δεδομένων

Τα προτεινόμενα σενάρια για τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων (DC) λαμβάνουν υπόψη υποθέσεις εμπνευσμένες από την τρέχουσα δομή της υποδομής των DCs της Telecom Italia. Η υποδομή DC της Telecom Italia στηρίζεται σε μια αρχιτεκτονική δύο επιπέδων: τη βαθμίδα που αφορά συμπλέγματα (clusters) υπολογιστικών κέντρων δεδομένων και τη βαθμίδα που περιλαμβάνει το δίκτυο διασύνδεσης των

συμπλεγμάτων DC, η οποία ονομάζεται εικονικό δίκτυο υπολογιστικών κέντρων (Virtual Data Network Center, VDCN). Η εικόνα 4.10 δείχνει μια τέτοια δομή δύο βαθμίδων. Οι καθορισμένες περιπτώσεις χρήσης σχετίζονται με το δίκτυο που διασυνδέει τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων, αλλά όχι την εσωτερική τους αρχιτεκτονική (οι διαμοιραστές (servers) και οι μεταγωγείς συνδέονται σε μια δομή fat-tree) ή άλλη παρεμφερής δομή). Έτσι, η συνολική κίνηση περιλαμβάνει την κίνηση μεταξύ των DCs και αυτήν που ανταλλάσσεται με άλλα δίκτυα και το διαδίκτυο, αλλά δεν αποτελεί την κυκλοφορία μεταξύ των DCs. Εν τω μεταξύ, τα συμπλέγματα των DC είναι τοπικά δίκτυα μέσα σε μια μητροπολιτική περιοχή (σε ορισμένες περιπτώσεις μια εκτεταμένη μητροπολιτική περιοχή που περιλαμβάνει κοντινές πόλεις). Η συνδεσιμότητα μεταξύ των DCs του ίδιου συμπλέγματος γίνεται από τις συνδέσεις με το περιφερειακό μητροπολιτικό δίκτυο μεταφοράς. Η διάμετρος των συμπλεγμάτων των DC είναι το πολύ 120 km.

Από την άλλη πλευρά, το VDCN είναι ένα πανεθνικό δίκτυο που διασυνδέει τα συμπλέγματα των DC. Ο σκοπός του VDCN είναι να διασυνδεθούν τα DCs, ώστε να δημιουργηθεί ένα ενιαία υπερ-υπολογιστικό κέντρο δεδομένων σε εθνική κλίμακα: με αυτήν την προσέγγιση τα αποθηκευμένα δεδομένα ευθυγραμμίζονται με ένα αξιόπιστο και γρήγορο τρόπο. Το VDCN έχει πλευρές με δικούς του κόμβους (σήμερα υπάρχει ένας ενιαίος δρομολογητής IP κλάσης σε κάθε πλευρά του VDCN). Προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του δικτύου, κάθε σύμπλεγμα DC συνδέεται σε διπλή γραμμή επιστροφής με ένα ζευγάρι κόμβων του VDCN. Τα συμπλέγματα DC και το ζευγάρι κόμβων του VDCN ανήκουν στην ίδια περιοχή του μητροπολιτικού δικτύου. Το δίκτυο VDCN έχει τη δική του υποδομή που είναι ένα πλέγμα φυσικών συνδέσεων (κυκλώματα L1) μεταξύ των κόμβων των VDCN (στην εικόνα 4.10 απεικονίζεται μια δομή δακτυλίου, αλλά σε γενικές γραμμές η τοπολογία είναι ένα πλέγμα). Σε κάθε πλευρά του VDCN υπάρχει επίσης μια πύλη που διασυνδέει το VDCN προς το δίκτυο κορμού IP. Όλη η κίνηση που ανταλλάσσει με το εξωτερικό, συμπεριλαμβανομένης της κίνησης στο διαδίκτυο, λαμβάνει χώρα μέσω του κορμού IP.

Η διάμετρος του σημερινού δικτύου VDCN είναι περίπου 600 km, αλλά στο μέλλον όταν το VDCN θα μπορεί να έχει κόμβους σε περισσότερες πλευρές (ή τοποθεσίες) τότε θα αυξηθεί η διάμετρος του δακτυλίου σε 1000 ή 1200 km. Η αναμενόμενη ανάπτυξη του δικτύου DC δεν είναι στη δομή της αρχιτεκτονική αλλά στο μέγεθος του δικτύου καθώς τα συμπλέγματα αναμένονται να αυξηθούν σε αριθμό των διασυνδεδεμένων DC και το εθνικό VDCN αναμένεται να αυξηθεί σε αριθμό πλευρών. Η διασύνδεση με το δίκτυο κορμού IP υποτίθεται ότι θα είναι παρούσα σε κάθε πλευρά του VDCN (οι πλευρές του VDCN που θα επιλεγούν θα πρέπει να συσσεγάζονται με τα 32 IP POPs του δικτύου κορμού). Η εικόνα 4.11 απεικονίζει την ενδεχόμενη ενδιάμεση εξέλιξη της υποδομής του δικτύου DC ενώ η εικόνα 4.10 παρουσιάζει τη σημερινή αρχιτεκτονική των DCs.

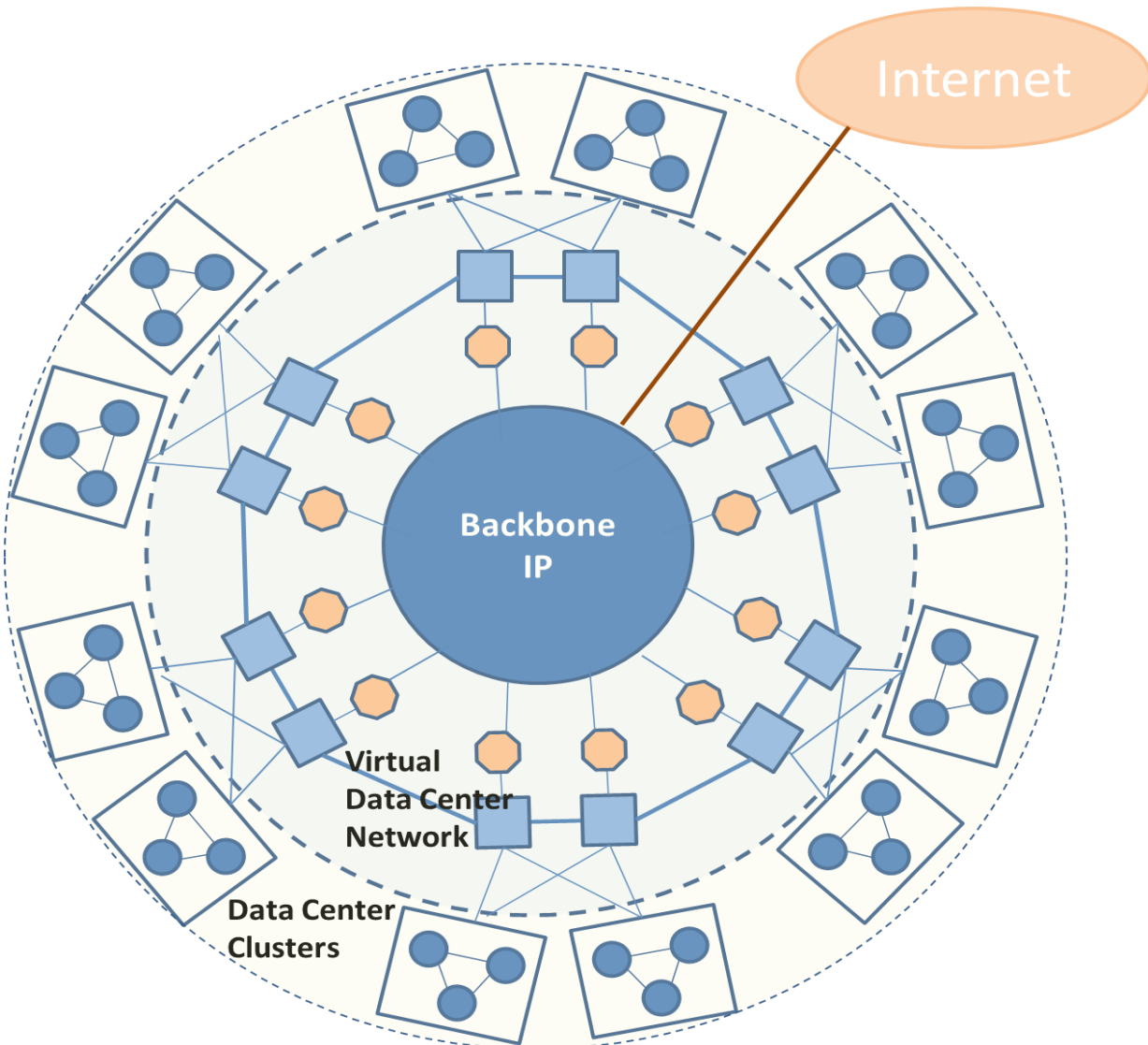


Εικόνα 4.10: Αρχιτεκτονική της υποδομής υπολογιστικών κέντρων δεδομένων.

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά στοιχεία των σεναρίων χρήσης στην περίπτωση των DCs.

Timeframe	Interface	Num. of clusters	Num. of CD per cluster	Cluster diameter (km)	VCDN diameter (km)
Reference (Now)	10G	6	3	120	600
Mid term	100G/400G	12	4	100	1000
Long term	400G/1T	24	6	80	1800

Ο πίνακας 7 περιλαμβάνει τα στοιχεία σχετικά με την υποδομή του Data Center για τρεις συγκεκριμένες χρονικές περιόδους (τρωινή, ενδιάμεση και μακροπρόθεσμη). Μαζί με το μέγεθος του δικτύου και τις αποστάσεις παρέχεται επίσης, μια πρόβλεψη σχετικά με τη χωρητικότητα των διασυνδέσεων μεταξύ των κόμβων (μεταξύ ενός συμπλέγματος DC και των κόμβων του VCDN, μεταξύ των κόμβων του VCDN και μεταξύ των κόμβων VCDN και των κόμβων πύλης).



Εικόνα 4.11: Εξέλιξη της αρχιτεκτονική της υποδομής υπολογιστικών κέντρων δεδομένων.

4.7 Απαιτήσεις Πομποδεκτών για τα Διαφορετικά Σενάρια Χρήσης

Σύμφωνα με τις κυκλοφοριακές ανάγκες και τις προβλέψεις για την εξέλιξη της κυκλοφορίας που περιγράφεται στις προηγούμενες ενότητες, οι ακόλουθες γενικές απαιτήσεις μπορούν να οριστούν για τους πομποδέκτες επόμενης γενιάς [225]. Ο εξοπλισμός για μητροπολιτικά δίκτυα και δίκτυα υπολογιστικών κέντρων δεδομένων θα υιοθετεί χαμηλού κόστους συνδεδεμένους πομποδέκτες, έχοντας χαρακτηριστικά όπως ευέλικτο εύρος ζώνης ή ρυθμό μετάδοσης και τη δυνατότητα sliceability. Όντας βυσματωμένες συσκευές, η οπτική μονάδα πολλαπλών ροών είναι εκτός του πεδίου εφαρμογής για αυτά τα σεναρία.

Πίνακας 8: Απαιτήσεις πομποδεκτών για διαφορετικά σενάρια χρήσης.

	Pluggable	Reach [km]	Capacity per port	Flexible band	Sliceable	Multiflow optical module
Metro	Y	200	400	Y	Y	N
Intra-DC	Y	100	100	Y	Y	N
Inter-DC	Y/N	200	400	Y	Y	Y
Backbone	N	1000	1000	Y	N	Y

Λαμβάνοντας υπόψη την περιορισμένη απαιτούμενη απόσταση και την απαιτούμενη χωρητικότητα ανά θύρα να μην υπερβαίνει 400G, η ικανότητα διαμοιρασμού του φάσματος (sliceability) είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να αξιοποιηθεί από τους προτεινόμενους πομποδέκτες σε περιβάλλον τόσο μητροπολιτικού δικτύου όσο και δικτύου υπολογιστικού κέντρου δεδομένων. Τελικά μια αύξηση του αριθμού των οπτικών φερόντων πρέπει να ληφθεί υπόψη για τη μελλοντική εξέλιξη της αρχιτεκτονικής πομποδέκτη. Αντίθετα, ο εξοπλισμός του δικτύου κορμού έχει να αντιμετωπίσει τη μεγαλύτερη ζητούμενη απόσταση μετάδοσης σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση δικτύων, καθώς και υψηλότερη χωρητικότητα ανά θύρα εξόδου. Αυτές οι δύο απαιτήσεις είναι συμπληρωματικές στους προτεινόμενους πομπούς, επειδή σχήματα διαμόρφωσης υψηλής χωρητικότητας, όπως 16-QAM και 64-QAM μπορούν να υποστηρίξουν μετάδοση μόνο σε περιορισμένες αποστάσεις [226].

Αυτή είναι η περίπτωση για την εισαγωγή της οπτικής συσκευής πολλαπλών ροών που ενσωματώνει έναν κατάλληλο αριθμό μονάδων με ευέλικτα υποφέροντα: κάθε μονάδα με ευέλικτα υποφέροντα αφορά ένα προτεινόμενο πομπό δύο φερόντων λειτουργώντας στο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης θέτοντάς τον ικανό για την επίτευξη της ζητούμενης απόστασης. Η δυνατότητα επιλογής μήκους κύματος του οπτικού φέροντος επιτρέπει το πακετάρισμα πολλών μηκών κύματος σε μορφή Nyquist δημιουργώντας το απαιτούμενο superchannel χωρητικότητας 1Tb/s [227].

4.8 Σχήματα Διαμόρφωσης Πομποδεκτών για Μητροπολιτική Εφαρμογή και Εφαρμογή σε Υπολογιστικά Κέντρα Δεδομένων

Λαμβάνοντας υπόψη ρυθμό μετάδοσης 100G για εφαρμογή σε μητροπολιτικά δίκτυα και υπολογιστικά κέντρα δεδομένων, καθώς και την απαίτηση για περιορισμένη εφικτή απόσταση μετάδοσης, μπορούν να υιοθετηθούν πολύπλοκα ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης, όπως 64-QAM. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη την προσέγγιση μονής πόλωσης, η επιλογή δύο φερόντων μπορεί να αξιοποιηθεί για να οριστούν δύο ανεξάρτητες ροές, ώστε κάθε μια από αυτές να είναι σε θέση να παρέχει το απαιτούμενο εύρος ζώνης με μειωμένο αριθμό πόρων. Αυτή η χωρητικότητα μπορεί να διπλασιαστεί χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της διπλής πόλωσης ή της αύξησης του ρυθμού μετάδοσης. 50 Gbaud θα πρέπει να είναι η μέγιστη δυνατή τιμή λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική απαίτηση χαμηλού κόστους ηλεκτρονικών και εύκολης συνδεσιμότητας της συσκευής.

Πίνακας 9: Διαμόρφωση πομποδεκτών για ελάχιστη κίνηση 100 Gb/s.

Modulation format (F)	Baud Rate (GBaud)	Max bandwidth (GHz)	Carriers' number (C)	Bit/rate (total) (Gbit/s)	Sliceable (Y/N)	MAX Bit/rate (each flow) (Gbit/s)
SP-64QAM	32	100	2	384	Y	192
DP-64QAM	32	100	2	768	Y	384

Εάν απαιτείται ένας υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (δηλαδή τουλάχιστον 400G) και πρέπει να χρησιμοποιηθούν χαμηλότερου ρυθμού ηλεκτρονικά είναι σκόπιμη η επιλογή μιας οπτικής ροής με διπλή πόλωση με δύο φέροντα δημιουργώντας ένα superchannel. Αυξάνοντας το ρυθμό μετάδοσης των συμβόλων, μια προσέγγιση μονής πόλωσης και η λύση δημιουργίας πολλών διακριτών τμημάτων (slices) στο φάσμα γίνεται εφικτή.

Πίνακας 10: Διαμόρφωση πομποδεκτών για ελάχιστη κίνηση 400 Gb/s.

Modulation format (F)	Baud Rate (GBaud)	Max bandwidth (GHz)	Carriers' number (C)	Bit/rate (total) (Gbit/s)	Sliceable (Y/N)	Max Bit/rate (each flow) (Gbit/s)
DP-64QAM	32	100	2	768	N	768
SP-64QAM	50	100	2	600	N	600
DP-64QAM	50	100	2	1200	Y	600
SP-64QAM	64	100	2	768	N	768
DP-64QAM	64	100	2	1536	Y	768

4.9 Σχήματα Διαμόρφωσης Πομποδεκτών για Εφαρμογή σε Δίκτυα Κορμού

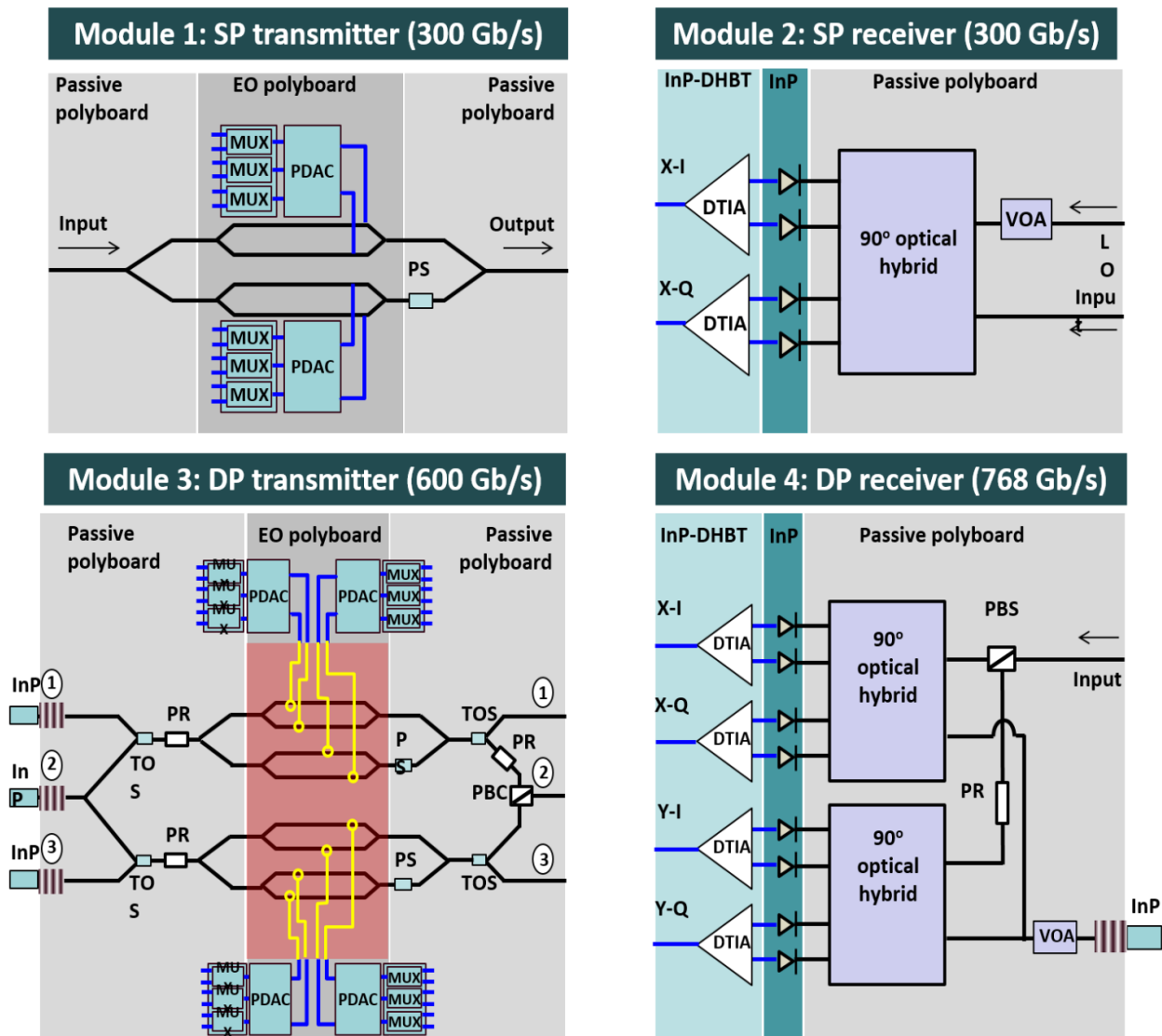
Για δίκτυα κορμού, σε ένα μακροπρόθεσμο σενάριο, θα απαιτούνται οπτικές διασυνδέσεις χωρητικότητας 1 Tb/s, ενώ διασυνδέσεις για μεγάλες αποστάσεις απαιτούν τη χρήση απλούστερων σχημάτων διαμόρφωσης όπως QPSK και 16QAM. Μόνο το σχήμα διαμόρφωσης δύο φερόντων 64 GBaud DP-16QAM είναι σε θέση να παράγει κυκλοφορία με χωρητικότητα 1T με μία μόνο μονάδα πομποδέκτη. Για μικρότερους ρυθμούς συμβόλων ή μεγαλύτερη στιβαρότητα όσον αφορά τον οπτικό σηματοθορυβικό λόγο (optical Signal to Noise Ratio, OSNR), η χωρητικότητα 1 Tb/s θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνο με ευέλικτους οπτικούς πομπούς ώστε να δημιουργηθεί ένα superchannel με περισσότερα από δύο φέροντα. Σε αυτή την υπό μελέτη περίπτωση, πρέπει να προταθεί μία αρχιτεκτονική που ενσωματώνει έναν οπτικό πομποδέκτη πολλαπλών ροών συνδυάζοντας ζεύγη υποφερόντων που παράγονται από ευέλικτες συσκευές.

Πίνακας 11: Διαμόρφωση πομποδεκτών για ελάχιστη κίνηση 1 Tb/s.

Modulation format (F)	Baud Rate (GBaud)	Max bandwidth (GHz)	Carriers' number (C)	Bit/rate (total) (Gbit/s)	Sliceable (Y/N)	Subcarrier in multiframe optical module
DP-QPSK	32	100	2	256	N	Y (8 carriers)
DP-16QAM	32	100	2	512	N	Y (4 carriers)
DP-QPSK	50	125	2	400	N	Y (6 carriers)
DP-16QAM	50	125	2	800	N	Y (4 carriers)
DP-QPSK	64	175	2	512	N	Y (4 carriers)
DP-16QAM	64	175	2	1024	N	N

4.10 Περιγραφή των Προτεινόμενων Ευέλικτων Πομποδεκτών Πολλαπλών Ροών

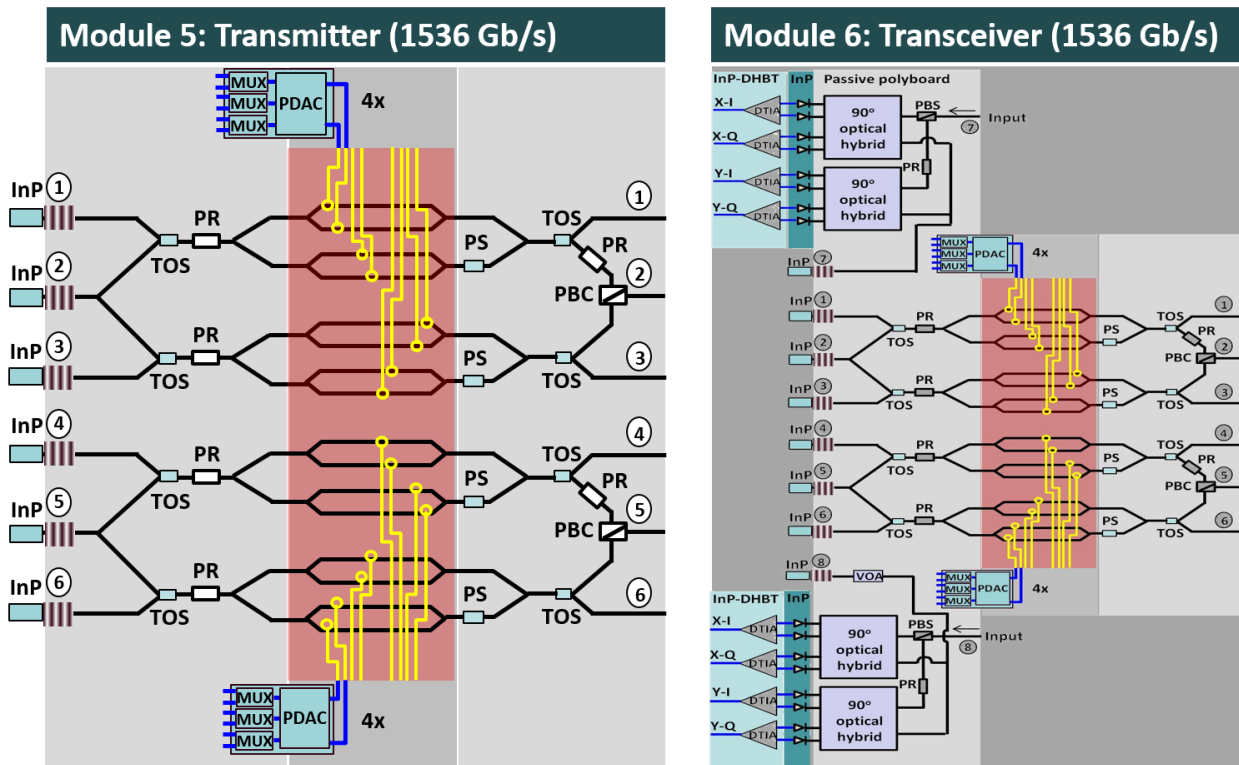
Στην παράγραφο αυτή, παρέχεται η περιγραφή των προτεινόμενων πομποδεκτών, ικανοί να παράγουν οπτικές ροές με ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 1.5 Tb/s. Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται παρακάτω 5 συγκεκριμένες μονάδες (modules 1-5) διαφορετικών χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων με τα απεικονιστικά τους διαγράμματα να παρουσιάζονται στις εικόνες 4.12 και 4.13. Η τελευταία συσκευή περιλαμβάνει ολοκληρωμένο πομποδέκτη (συσκευή 6), βρίσκεται στο τέλος της καμπύλης ανάπτυξης με τη μέγιστη δυνατή χωρητικότητα και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.13. Η περιγραφή των συσκευών ξεκινά από τους οπτικούς πομπούς (συσκευές 1, 3 και 5) και συνεχίζεται με τους οπτικούς δέκτες (συσκευές 2 και 4).



Εικόνα 4.12: Σχηματικά διαγράμματα των προτεινόμενων οπτικών πομπών και δεκτών πολλαπλών ροών (modules 1-4).

Η συσκευή 1 σχετίζεται με την πρώτη μονάδα πομπού και αποτελείται από ένα διαμορφωτή IQ οδηγούμενο από δύο κυκλώματα οδήγησης. Η συγκεκριμένη συσκευή μπορεί να παράξει μια μόνο οπτική ροή και θεωρείται ως πρόδρομος συσκευή της προτεινόμενης υβριδικής ολοκλήρωσης. Το οπτικό τμήμα του πομπού αποτελείται από 2 επιμέρους παθητικά πολυμερικά chips (polyboards) και μια ενεργή οπτική δομή: ένα παθητικό polyboard στην αριστερή πλευρά, δύο διαμορφωτές Mach Zehnder (MZMs) μονολιθικά ολοκληρωμένοι σε EO υλικό (είτε πολυμερικό είτε InP) στη μέση και ένα δεύτερο παθητικό polyboard στη δεξιά πλευρά. Τα τρία οπτικά chips ενώνονται με τη χρήση της τεχνικής butt-coupling. Σχετικά με το ηλεκτρικό μέρος του πομπού, αυτό αποτελείται από δύο κυκλώματα οδήγησης InP-DHBT, καθένα αποτελούμενο με τη σειρά του από τρεις 2:1 επιλογείς και ένα κύκλωμα ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπέα (digital to analog converter, DAC) τριών bit μαζί με ενισχυτική βαθμίδα (Power DAC) [228].

Αυτά τα τέσσερα στοιχεία ενσωματώνονται σε ένα ενιαίο chip. Το buffer εξόδου του SPDAC παρέχει δύο συμπληρωματικές ηλεκτρικές γραμμές εξόδου που είναι σε θέση να οδηγήσουν είτε διαφορικά το κάθε MZM σε ένα σύστημα διπλής οδήγησης, είτε χρησιμοποιώντας ένα σχήμα μονής οδήγησης τερματίζοντας την αχρησιμοποίητη έξοδο. Η συσκευή 1 είναι σε θέση να υποστηρίξει τη λειτουργία μονής πόλωσης και μια ποικιλία σχημάτων διαμόρφωσης συμπεριλαμβανομένων BPSK, QPSK, 16-QAM και 64-QAM. Ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων που υποστηρίζονται είναι 32 Gbaud και 50 Gbaud, γεγονός που συνεπάγεται συνολική χωρητικότητα του πομπού (line-rate) έως 300 Gb/s. Οι περιορισμοί προς υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης είναι λόγω του πεπερασμένου εύρους ζώνης των κυκλωμάτων SPDAC σε αυτή την πρώτη συσκευή. Το φως εισόδου συζευγνύεται στον διαμορφωτή IQ με χρήση οπτικής ίνας εισόδου και χρησιμοποιώντας ένα εξωτερικό λέιζερ.



Εικόνα 4.13: Σχηματικό διάγραμμα του προτεινόμενου οπτικού πομπού και πομποδέκτη πολλαπλών ροών με χωρητικότητα έως 1.5 Tb/s.

Η συσκευή 3 αποτελεί τη δεύτερη και κυριότερη μονάδα πομπού με συνολική χωρητικότητα έως 600 Gb/s. Αποτελείται από δύο παράλληλους διαμορφωτές IQ και τέσσερα κυκλώματα οδήγησης InP-DHBT. Το οπτικό τμήμα του πομπού αποτελείται πάλι από 2 ανεξάρτητα polyboards. Το πρώτο παθητικό polyboard στην αριστερή πλευρά περιλαμβάνει τρία πανομοιότυπα λέιζερ με επιλεξιμότητα ως προς το μήκος κύματος βασισμένα στη πολυμερική πλατφόρμα, δύο ρυθμιζόμενους συζεύκτες (TOSs) και δύο στροφείς πόλωσης 90° (Polarization Rotator, PR). Ο PR στρέφει την πόλωση TE της εξόδου του λέιζερ σε πόλωση TM, δίνοντας κατά αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα να συνδυαστεί η συγκεκριμένη δομή και με ΕΟ πολυμερικούς διαμορφωτές καθώς μόνο η πόλωση TM δίνει προϊόντα διαμόρφωσης στην έξοδό τους, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 1. Ενδιάμεσα των δύο παθητικών δομών τοποθετούνται 4 παράλληλα MZMs, τα οποία έχουν τη δυνατότητα τόσο για μονή όσο και διπλή οδήγηση. Το δεύτερο παθητικό polyboard στη δεξιά πλευρά αποτελείται από δύο οπτικούς ολισθητές φάσης (PS), δύο TOSs, έναν PR και ένα συζεύκτη πολυπλεξίας πόλωσης (Polarization Beam Combiner, PBC). Τα λέιζερ με επιλεξιμότητα ως προς το μήκος κύματος είναι πραγματικά λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας με την κοιλότητά τους να εκτείνεται κατά μήκος του κυματοδηγού InP του chip κέρδους (Gain Chip, GC) και του πολυμερικού κυματοδηγού της παθητικής πλατφόρμας.

Ο ημιδιαφανής καθρέπτης του λέιζερ υλοποιείται μέσω ενός πολυμερικού φράγματος περίθλασης Bragg, το οποίο μπορεί να συντονιστεί ως προς το μήκος κύματος πάνω στη C μπάντα. Οι TOSs υλοποιούνται από την άλλη πλευρά, ως παθητικές δομές κυματοδηγού, βασισμένες σε θερμο-οπτικά στοιχεία και επιτρέπουν την δρομολόγηση των οπτικών σημάτων πάνω στο chip. Χρησιμοποιώντας αυτούς τους TOSs, δίνεται η δυνατότητα να ενεργοποιούνται ή απενεργοποιούνται τα λέιζερ 1-3, μέσω της δρομολόγησης του εκπεμπόμενου φωτός σε ανενεργές δομές διαμόρφωσης της συσκευής. Πιο συγκεκριμένα, η συσκευή 3 μπορεί να παράγει δύο ανεξάρτητες οπτικές ροές μονής πόλωσης από τις θύρες 1 και 3, ή, εναλλακτικά, να λειτουργεί με μια μεμονωμένη οπτική ροή διπλής πόλωσης από τη θύρα 2. Το ηλεκτρικό μέρος της συσκευής αποτελείται από 4 ανεξάρτητα κυκλώματα οδήγησης, καθένα από αυτά ενσωματώνει τρεις 2:1 επιλογείς και ένα 3-bit SPDAC ικανά να λειτουργούν σε ταχύτητες έως και 50 Gbaud. Με τη χρήση των προηγμένων ηλεκτρονικών στοιχείων, η συσκευή 3 είναι σε θέση να υποστηρίξει μια ποικιλία σχημάτων διαμόρφωσης συμπεριλαμβανομένων BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM μονής ή διπλής πόλωσης. Ο υποστηριζόμενος ρυθμός σύμβολων είναι 32 Gbaud και 50 Gbaud, με αποτέλεσμα η συνολική χωρητικότητα του πομπού (line-rate) να αγγίζει τα 600 Gb/s, περιοριζόμενο κυρίως από το πεπερασμένο εύρος ζώνης τόσο των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων SPDAC όσο και των οπτικών διαμορφωτών.

Η συσκευή 5 είναι η τελική μονάδα πομπού και είναι στην πραγματικότητα επέκταση της συσκευής 3, καθώς αποτελείται από τέσσερις παράλληλους δίδυμους IQ διαμορφωτές (ουσιαστικά οκτώ MZMs) με έξι όμοια λέιζερ με επιλεξιμότητα ως προς το μήκος κύματος, έξι θύρες εξόδου με κατάλληλη κλιμάκωση όλων των άλλων δομικών στοιχείων. Σε σύγκριση με την προηγούμενη συσκευή 3 η νέα μονάδα έχει 3 συγκριτικά πλεονεκτήματα:

- Μπορεί να υποστηρίξει την επιλογή ανάμεσα σε ένα μεγαλύτερο αριθμό οπτικών ροών και πιο συγκεκριμένα ανάμεσα σε 1, 2, 3 ή 4 ανεξάρτητες οπτικές ροές. Η λειτουργία με μια μόνο οπτική ροή αντιστοιχεί στην περίπτωση λειτουργίας δύο υποφερόντων (βλέπε παρακάτω) με πολυπλεγμένα σήματα στην πόλωση που εξέρχονται της συσκευής από τις θύρες 2 και 5. Η λειτουργία με τέσσερις οπτικές ροές αντιστοιχεί αντίθετα στη λειτουργία με τέσσερα ανεξάρτητα σήματα (διαμόρφωση σε μία πόλωση) που εξέρχονται από τις θύρες 1, 3, 4 και 6, όταν τα λέιζερ 1, 3, 4 και 6 βρίσκονται σε λειτουργία και οι τέσσερις διαμορφωτές IQ τροφοδοτούνται ανεξάρτητα από τα κυκλώματα οδήγησης της συσκευής.
- Μπορεί να υποστηρίξει τη λειτουργία τύπου δύο υποφερόντων όταν τα λέιζερ 2 και λέιζερ 5 είναι ενεργοποιημένα με συγκεκριμένη συχνοτική απόσταση μεταξύ των δύο καναλιών (π.χ. 100 GHz).
- Μπορεί να υποστηρίξει τη λειτουργία σε ταχύτητες έως και 64 Gbaud, καθώς βασίζεται στη δεύτερη γενιά των κυκλωμάτων οδήγησης InP-DHBT με μεγαλύτερο εύρος ζώνης συγκριτικά με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που τοποθετούνται στις συσκευές 1 και 3. Η λειτουργία σε αυτό το ρυθμό και σε συνδυασμό με την πλήρη (3-bit) δυνατότητα των SPDACs, η συνολική χωρητικότητα (line rate) της συσκευής αγγίζει 1.536 Tb/s.

Όσον αφορά τη συσκευή 2, αυτή είναι η πρώτη μονάδα ολοκληρωμένου δέκτη και αποτελείται από ένα απλό σύμφωνο δέκτη με ένα οπτικό κύκλωμα στο μπροστινό μέρος (front-end) της συσκευής και ένα ηλεκτρονικό τμήμα για την ενίσχυση των λαμβανόμενων συνιστωσών I/Q. Το οπτικό front-end αποτελείται από ένα παθητικό πολυμερικό polyboard με δύο κυματοδηγούς εισόδου (για το διαμορφωμένο σήμα εισόδου και τον τοπικό ταλαντωτή), ένα μεταβλητό οπτικό εξασθενητή (VOA), ένα οπτικό υβρίδιο 90°, και ένα ενιαίο InP chip με μια τετραπλή σειρά φωτοδιόδων. Το κύκλωμα InP-DHBT στο πίσω άκρο είναι υβριδικά ολοκληρωμένο με το φωτονικό chip InP και αποτελείται από δύο διαφορικούς ηλεκτρικούς ενισχυτές δια-σύνθετης αντίστασης (Differential Transimpedance Amplifiers, DTIAs) [229] για την ενίσχυση των λαμβανόμενων ηλεκτρικών σημάτων από τις φωτοδιόδους. Η συσκευή 2 είναι ικανή να ανιχνεύσει οπτικά σήματα μονής πόλωσης και λειτουργεί σε ταχύτητες έως και 50 Gbaud. Οι περιορισμοί προς υψηλότερους ρυθμούς συμβόλων οφείλονται στο εύρος ζώνης των DTIAs πρώτης γενιάς. Η συνολική χωρητικότητα (line rate) της συσκευής 2 είναι 300 Gb/s και συνδυάζεται με τη συσκευή 1, όπως αναλύθηκε παραπάνω (σε συνδυασμό με τους κατάλληλους αλγόριθμους για την ανίχνευση σημάτων 64-QAM και κατάλληλο FEC).

Η συσκευή 4 είναι η δεύτερη και τελευταία έκδοση του δέκτη και βασίζεται πάλι στην υβριδική ολοκλήρωση ενός πολυμερικού παθητικού polyboard, ενός InP φωτονικού chip με φωτοδιόδους και ενός chip InP-DHBT με DTIAs. Ο δέκτης είναι σε θέση να ανιχνεύει ένα πολυπλεγμένο σήμα στην πόλωση ή ένα σήμα μονής πόλωσης. Το οπτικό front-end αποτελείται από ένα λέιζερ με επιλεκτικότητα ως προς το μήκος κύματος βασισμένο στην παθητική πολυμερική πλατφόρμα (λειτουργώντας ως τοπικός ταλαντωτής), ένα VOA, ένα διαχωριστή πόλωσης (PBS), δύο οπτικά υβρίδια 90° και μια οκταπλή σειρά φωτοδιόδων. Το ηλεκτρικό back-end πάνω στο InP-DHBT chip αποτελείται από μια τετραπλή σειρά DTIAs με αυξημένο εύρος ζώνης που επιτρέπει τη λειτουργία έως 64 Gbaud. Λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργία με διαμορφωμένα σήματα DP-64QAM, η συνολική χωρητικότητα του δέκτη είναι έως 768 Gb/s.

Τέλος, η συσκευή 6 αποτελεί μια ολοκληρωμένη μονάδα πομποδέκτη που έχει ως στόχο να ξεπεράσει τα όρια της υβριδικής 2D/3D φωτονικής ολοκλήρωσης [230] και να ενσωματώσει σε μια ενιαία μονάδα έναν πομπό τύπου συσκευής 5 και δύο δέκτες τύπου συσκευής 4. Η μονάδα είναι ικανή να λειτουργεί έως 64 Gbaud και να παρέχει αμφίδρομη χωρητικότητα (line-rate) 1.536 Tb/s. Η συσκευή 6 διαθέτει συνολικά 6 θύρες εξόδου (για την μετάδοση) και συνολικά 2 θύρες εισόδου (για τη λειτουργία ανίχνευσης) που υποστηρίζει μέχρι 4 οπτικές ροές κατά τη μετάδοση και 2 οπτικές ροές κατά τη λειτουργία της ανίχνευσης. Ο παρακάτω πίνακας 12 συνοψίζει την βασική περιγραφή των έξι συσκευών πομπού/δέκτη.

Πίνακας 12: Σύνοψη των βασικών χαρακτηριστικών των προτεινόμενων πομποδεκτών πολλαπλών ροών.

Module 1 – Basic Single-Polarization Transmitter	
Αριθμός IQ διαμορφωτών	2
Αριθμός κυκλωμάτων οδήγησης	2

Αριθμός ολοκληρωμένων tunable lasers	-
Αριθμός οπτικών δομών (TC, PS, στοιχεία χειρισμού πόλωσης)	1
Αριθμός θυρών εξόδου	1
Αριθμός οπτικών ροών	1
Μέγιστος ρυθμός συμβόλων (Gbaud)	50
Δυνατότητα διπλής πόλωσης	OXI
Συνολική χωρητικότητα (Gb/s)	300 (με χρήση σχήματος 64-QAM)
Module 2 – Single-Polarization Receiver	
Αριθμός ολοκληρωμένων tunable lasers (local oscillators)	-
Αριθμός οπτικών δομών (90° hybrids, VOAs, στοιχεία χειρισμού πόλωσης)	2
Αριθμός φωτοδιόδων	4
Αριθμός DTIAs	2
Μέγιστος ρυθμός συμβόλων (Gbaud)	50
Δυνατότητα διπλής πόλωσης	OXI
Συνολική χωρητικότητα (Gb/s)	300 (με χρήση σχήματος 64-QAM)
Δυνατότητα διπλής πόλωσης	NAI
Συνολική χωρητικότητα (Gb/s)	600 (με χρήση σχήματος 64-QAM)
Module 3 – Dual-Polarization 768 Gb/s Transmitter	
Αριθμός IQ διαμορφωτών	4
Αριθμός κυκλωμάτων οδήγησης	4
Αριθμός ολοκληρωμένων tunable lasers	3
Αριθμός οπτικών δομών (TC, PS, στοιχεία χειρισμού πόλωσης)	10
Αριθμός θυρών εξόδου	3
Αριθμός οπτικών ροών	1-2
Μέγιστος ρυθμός συμβόλων (Gbaud)	50
Δυνατότητα διπλής πόλωσης	NAI
Συνολική χωρητικότητα (Gb/s)	600 (με χρήση σχήματος 64-QAM)
Module 4 – Dual-Polarization 768 Gb/s Coherent Receiver	
Αριθμός ολοκληρωμένων tunable lasers (local oscillators)	1
Αριθμός οπτικών δομών (90° hybrids, VOAs, στοιχεία χειρισμού πόλωσης)	5
Αριθμός φωτοδιόδων	8
Αριθμός DTIAs	4
Μέγιστος ρυθμός συμβόλων (Gbaud)	64
Δυνατότητα διπλής πόλωσης	NAI
Συνολική χωρητικότητα (Gb/s)	768 (με χρήση σχήματος 64-QAM)
Module 5 – 1.536 Gb/s Transmitter	
Αριθμός IQ διαμορφωτών	8
Αριθμός κυκλωμάτων οδήγησης	8
Αριθμός ολοκληρωμένων tunable lasers	6
Αριθμός οπτικών δομών (TC, PS, στοιχεία χειρισμού πόλωσης)	20
Αριθμός θυρών εξόδου	6
Αριθμός οπτικών ροών	1-4
Μέγιστος ρυθμός συμβόλων (Gbaud)	64
Δυνατότητα διπλής πόλωσης	NAI
Συνολική χωρητικότητα (Gb/s)	1536 (με χρήση σχήματος 64-QAM)
Module 6 – 1.536 Gb/s Transmitter	
Αριθμός IQ διαμορφωτών	8
Αριθμός κυκλωμάτων οδήγησης	8

Αριθμός ενσωματωμένων tunable lasers	8
Αριθμός οπτικών δομών (TC, PS, στοιχεία χειρισμού πόλωσης)	30
Αριθμός θυρών εξόδου	6
Αριθμός οπτικών ροών	1-4 (στη λειτουργία Tx)/1-2 (στη λειτουργία Rx)
Μέγιστος ρυθμός συμβόλων (Gbaud)	64
Δυνατότητα διπλής πόλωσης	NAI
Συνολική χωρητικότητα (Gb/s)	1536 (αμφίδρομη)
Αριθμός φωτοδίοδων	16
Αριθμός DTIAs	8

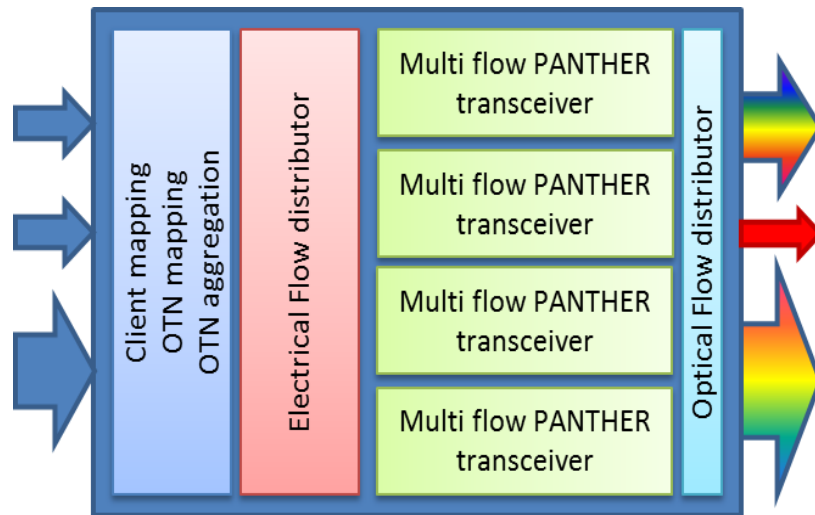
4.11 Εφαρμογή των Προτεινόμενων Πομποδεκτών σε Αρχιτεκτονικές Δικτύων

Το τμήμα αυτό εξετάζει τη δυνατότητα εφαρμογής των προηγούμενων προτεινόμενων πομποδεκτών πολλαπλών ροών στα ήδη υπάρχοντα οπτικά δίκτυα καθώς και στα νέα γενιάς που λειτουργούν από τον πάροχο υπηρεσιών ή από ένα πάροχο δικτύου πρόσβασης. Οι προαναφερθείσες προτεινόμενες συσκευές μπορούν να αποτελέσουν μέρος των μελλοντικών πομποδεκτών (βυσματούμενος-pluggable) ή των αναμεταδοτών-καρτών που χρησιμοποιούνται για τον εξοπλισμό του δικτύου, ανάλογα με το πλαίσιο εφαρμογής. Στον πίνακα 13 το πλαίσιο εφαρμογής κατηγοριοποιείται με βάση τη μέγιστη δυνατή απόσταση και το μεγαλύτερο ανεκτό σχήμα διαμόρφωσης. Υποθέτοντας ότι η μετάδοση πραγματοποιείται σε ένα SSMF τύπου G.652, συμβατικά περιθώρια σχεδιασμού και η ευαισθησία του δέκτη τελευταίας γενιάς (δηλαδή το λιγότερο δυνατό OSNR αντιστοιχεί σε 12 dB για το DP-QPSK) καθώς και το υψηλότερη συμβατό σχήμα διαμόρφωσης σύμφωνα με τη μέγιστη απόσταση μετάδοσης αναφέρονται επίσης.

Πίνακας 13: Πλαίσια εφαρμογής βάση της απόστασης και του μέγιστου σχήματος διαμόρφωσης.

Application	Campus	Short Haul	Medium Haul	Long Haul	Ultra Long Haul
Distance range	<10 km	>10 km < 100 km	>100 km and <500 km	>500 km and <2000 km	> 2000 km
(Max) Mod Format	Non-coherent	coherent 64QAM	coherent 16QAM	coherent 8QAM/QPSK	coherent QPSK/BPSK
Intra DC	X				
DC cluster		X	X		
VDCN				X	
Metro access		X			
Metro core			X		
Backbone				X	
Continental					X

Η εικόνα 4.14 δείχνει τη γενική αρχιτεκτονική των αναμεταδοτών πολλαπλών ροών που μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα ή περισσότερους πομποδέκτες πολλαπλών ροών στηριζόμενες στις προτεινόμενες μονάδες, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.9. Για απλούστερες εφαρμογές με χαμηλότερο αριθμό παραμετροποιήσιμων επιλογών, ένας μόνο πομποδέκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την περίπτωση με την επιλογή μονής οπτικής ροής διπλής πόλωσης (DP) να μπορεί να εφαρμοστεί σε μια μονάδα. Στην περίπτωση ενός πομποδέκτη διπλής πόλωσης (DP), είναι απαραίτητες μια μονάδα 3 (DP πομπός) και μια μονάδα 4 (DP δέκτης). Στην περίπτωση δύο ροών διπλής πόλωσης (DP), η συσκευή 6 (πομπός και δέκτης) είναι απαραίτητη. Για συσκευές με υψηλότερο επίπεδο πολυπλοκότητας, όπως, για παράδειγμα, ένας αναμεταδότης μεγάλων ή πολύ μεγάλων αποστάσεων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πιο δομημένη διάταξη με τη χρήση πολλαπλών βασικών πομποδεκτών (ονομάζεται επίσης οπτική μονάδα πολλαπλών ροών).



Εικόνα 4.14: Γενική αρχιτεκτονική του αναμεταδότη πολλαπλών ροών υλοποιούμενου από τις προτεινόμενες συσκευές πολλαπλών ροών.

Ο πίνακας 14 περιγράφει ορισμένες απαιτήσεις υψηλού επιπέδου για τον πομποδέκτη και τους αναμεταδότες για έξι δικτυακά σενάρια εφαρμογής αναγνωρισμένα ως σημαντικά και απαραίτητα στα αναπτυγμένα δίκτυα. Οι απαιτήσεις στηρίζονται σε μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις. Οι τρεις πρώτες χρήσεις αφορούν τα δίκτυα υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, σε τρία διαφορετικά ιεραρχικά επίπεδα, ενώ τα τρία τελευταία είναι τα τμήματα του μητροπολιτικού δικτύου και κορμού (μητροπολιτικά και περιφερειακά δίκτυα), εθνικά και ηπειρωτικά δίκτυα κορμού (national και continental backbone). Οι απαιτήσεις για την τελευταία περίπτωση χρήσης είναι κατάλληλες και για τα συστήματα μετάδοσης υποθαλάσσιου δικτύου. Το τμήμα του μητροπολιτικού δικτύου πρόσβασης δεν θεωρείται ενδιαφέρον, διότι συνεπάγεται πομποδέκτες χαμηλών δυνατοτήτων που δεν είναι συμβατοί με τους προτεινόμενους πομποδέκτες, οι οποίοι προσφέρουν πολύ υψηλές επιδόσεις όσον αφορά το εύρος ζώνης, την απόσταση μετάδοσης και την ευελιξία. Μεταξύ των έξι χρήσεων κάποιες από αυτές έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά και μπορούν να ομαδοποιηθούν, μειώνοντας σημαντικά τις χρήσεις εφαρμογής σε τέσσερις. Ειδικότερα, τα VDCNs και backbone έχουν παρόμοιες απαιτήσεις, καθώς και το σύμπλεγμα DC και μητροπολιτικό/περιφερειακό δίκτυο.

Πίνακας 14: Μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες απαιτήσεις για πομποδέκτες ή αναμεταδότες για διαφορετικά πλαίσια εφαρμογής του δικτύου.

Context	Pluggability	Reach [km]	Max Net Capacity per flow [Gb/s]	Flexrate	Flexgrid	Multi flow
Intra DC	Y	Campus	400	N	N	N
DC cluster	Y/N	SH/MH	200	Y/N	Y/N	Y/N
VDCN	N	LH	400	Y	Y	Y
Metro access	Y	SH	100	N	N	N
Metro core	Y/N	MH	200	Y/N	Y/N	Y/N
Backbone	N	LH	1000	Y	Y	Y
Continental	N	ULH	1000	Y	Y	Y

Οι συνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων δεδομένων αποτελούν ουσιαστικά ζεύξεις από σημείο σε σημείο. Οι οπτικές διεπαφές είναι ουσιαστικά κουμπωτές μονάδες που πρέπει να ενσωματωθούν στο πάνω μέρος των μεταγωγέων των υπολογιστικών συστημάτων (Top of Rack Switches) [231] και στους δρομολογητές. Οι δυνατότητες ευέλικτου ρυθμού, ευέλικτων φασματικών διαστημάτων και πολλαπλών ροών δεν απαιτούνται, γιατί η ευελιξία αντιμετωπίζεται άμεσα από τα πρωτόκολλα των ανώτερων επιπέδων. Από την άλλη πλευρά ζητείται υψηλή χωρητικότητα για κάθε οπτική σύνδεση. Οι σκέψεις αυτές ισχύουν επίσης για το μητροπολιτικό δίκτυο πρόσβασης, λόγω του γεγονότος ότι απαιτείται μικρότερη χωρητικότητα.

Στην περίπτωση ενός συμπλέγματος υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, συγκεντρώνοντας περισσότερα από ένα, ανάλογα με την εσωτερική αρχιτεκτονική του δικτύου, ορισμένα χαρακτηριστικά της ευελιξίας θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως δυνητικά ενδιαφέροντα μαζί με την δυνατότητα να χρησιμοποιούν ειδικό μητροπολιτικό σύστημα WDM. Στην περίπτωση αυτή η λειτουργία βυσμάτωσης θα μπορούσε να μην γίνεται υποχρεωτική. Η λύση αυτή καλύπτει επίσης το σενάριο εφαρμογής κυκλοφορίας του μητροπολιτικού δικτύου κορμού. Για εικονικά δίκτυα υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, το δίκτυο κορμού και οι ηπειρωτικές δικτυακές εφαρμογές λόγω του γεγονότος ότι η απαιτούν υψηλή αξιοπιστία, πλήρη αξιοποίηση του εύρους ζώνης, και υψηλή φασματική απόδοση η ευελιξία είναι μια αξιόλογη επιλογή, ενώ η ιδιότητα βυσμάτωσης του πομποδέκτη δεν είναι υποχρεωτική, ειδικά αν χρησιμοποιείται ειδικός εξοπλισμός μεταφοράς.

4.12 Εφαρμογή Προτεινόμενων Ευέλικτων Πομποδεκτών σε Συμπλέγματα DC και Μητροπολιτικό Δίκτυο Κορμού (Medium Haul)

Αφού ορίστηκαν οι μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες απαιτήσεις στα διάφορα σενάρια εφαρμογής (βλέπε πίνακας 14), η ανάλυση εστιάζεται στην τοποθέτηση των υπό παρουσίαση πομποδεκτών ως προτεινόμενη λύση για τη μεταφορά της απαιτούμενης κίνησης. Μια σωστή επιλογή του ρυθμού συμβόλων και του σχήματος διαμόρφωσης συντελούνται λαμβάνοντας υπόψη τόσο ένα συμβατικό (σταθερό δίκτυο DWDM) όσο και ένα καινοτόμο-ευέλικτου πλέγματος (Flexgrid) σενάριο εφαρμογής καθώς και τη δυνατότητα που επιτρέπει την επιλογή της ικανότητας διαμοιρασμού του φάσματος.

Για σενάριο που αφορά ένα σύμπλεγμα υπολογιστικών κέντρων δεδομένων και μητροπολιτικό δίκτυο κορμού, η μέγιστη εμβέλεια καθορίστηκε μεταξύ 200 και 300 km και οι μονάδες κυκλοφορίας (αντιστοιχούν σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων) 100G και 400G θεωρήθηκαν ως πιθανή κυκλοφορία πελατών (με μέγιστο αριθμό έξι μονάδες κυκλοφορίας 100G στον πίνακα 15 και τρεις μονάδες κυκλοφορίας 400G στον πίνακα 16). Ένας μόνο υπό εξέταση πομποδέκτης που λειτουργεί με σχήμα διαμόρφωσης 32 Gbaud 64QAM είναι σε θέση να ικανοποιήσει όλες τις προαναφερθείσες απαιτήσεις της κυκλοφορίας 100G αλλάζοντας τη διαμόρφωση του όπως περιγράφηκε στον πίνακα 15. Ανάλογα με το μέγεθος της κίνησης που πρόκειται να μεταφερθεί, επιλέγεται μονή ή διπλή πόλωση και χρησιμοποιούνται ένα ή δύο φέροντα. Η δυνατότητα των δύο φερόντων επιτρέπει την πιθανότητα η συσκευή να θεωρηθεί ως sliceable ή εναλλακτικά να οριστεί ένα οπτικό superchannel που καταλαμβάνει ένα οπτικό εύρος ζώνης που είναι το διπλάσιο του εύρους ζώνης ενός μονού καναλιού (με μια προσθήκη 12.5 GHz ώστε να ληφθούν υπόψη ποινές λόγω οπτικού φιλτραρίσματος).

Πίνακας 15: Πομποδέκτες 100G σταθερού πλέγματος συμβατοί για συμπλέγματα DC και μητροπολιτικά δίκτυα.

100G Traffic	Slice able	Modulation format	# carriers	Baud Rate	Bit/symbol	Min BW/carrier	Min BW	BW (flexgrid)	BW (legacy)	Bit/rate	Extra Traffic	Max reach
1	N	SP-64QAM	1	32	6	37.5	37.5	50	50	192	1x40G	300
3	N	DP-64QAM	1	32	6	37.5	37.5	50	50	384		300
2	Y	SP-64QAM	2	32	6	37.5	75	87.5	100	384	3x40G	300
6	Y	DP-64QAM	2	32	6	37.5	75	87.5	100	768		300

Σε περίπτωση συνολικής κίνησης 100G και 200G, λόγω της επιλογής του σχήματος διαμόρφωσης και κατά συνέπεια, της διαθεσιμότητας υψηλότερου καθαρού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, η μεταφορά επιπλέον κίνησης σε χαμηλότερου ρυθμό μετάδοσης (40G πελάτες) θεωρείται εγγυημένη. Επιπλέον, ένας προτεινόμενος πομποδέκτης πολλαπλών ροών που λειτουργεί με σχήμα διαμόρφωσης 64QAM σε 50 και 64 Gbaud είναι σε θέση να ικανοποιήσει όλες τις προαναφερθείσες απαιτήσεις της κυκλοφορίας 400G αλλάζοντας τη διαμόρφωση του όπως περιγράφηκε στον πίνακα 16. Ανάλογα με το μέγεθος της κίνησης που πρόκειται να μεταφερθεί, επιλέγεται μονή ή διπλή πόλωση. Αντίθετα, για την επιλογή χαμηλότερου ρυθμού συμβόλων η απαιτούμενη κίνηση 400G πραγματοποιείται από δύο φέροντες ως ένα οπτικό υπερκανάλι, ενώ η επιλογή 64 Gbaud διπλής πόλωσης επιτρέπει την εφαρμογή του διαμοιρασμού του φάσματος (sliceability) μέσω των πολλαπλών ροών. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση χρήσης, κάποιες διαμορφώσεις επιτρέπουν χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης (100G πελάτες) επιπλέον κίνησης χωρίς προβλήματα.

Πίνακας 16: Πομποδέκτες 400G που απαιτούν ευέλικτο πλέγμα συμβατοί για συμπλέγματα DC και μητροπολιτικά δίκτυα.

400G Traffic	Sliceable	Modulation format	# carriers	Baud Rate	Bit/symbol	Min BW/carrier	Min BW	BW (flexgrid)	BW (legacy)	Bit/rate	Extra Traffic	Max reach
1	N	DP-64QAM	2	32	6	37.5	75	87.5	100	768	2x100G	300
1	N	SP-64QAM	2	50	6	50	100	112.5	NA	600		300
2	Y	DP-64QAM	2	50	6	50	100	112.5	NA	1200	1x100G	300
1	N	SP-64QAM	2	64	6	75	150	162.5	NA	768	2x100G	220
2	Y	DP-64QAM	2	64	6	75	150	162.5	NA	1536	4x100G	220
3	N	DP-64QAM	2	64	6	75	150	162.5	NA	1536		220

4.13 Εφαρμογή Προτεινόμενων Ευέλικτων Πομποδεκτών σε VDCN και Εθνικά Δίκτυα Μεγάλων Αποστάσεων (Long Haul)

Για σενάριο εφαρμογής εικονικών υπολογιστικών κέντρων δεδομένων (VDCN) και εθνικών δικτύων (μεγάλων αποστάσεων), οι μέγιστες αποστάσεις κυμαίνονται από 1000 έως 5000 km, και οι μονάδες κυκλοφορίας 100G και 400G θεωρήθηκαν ως πιθανή κυκλοφορία των πελατών (πίνακας 17 και 18 αντίστοιχα). Η εμβέλεια της απόστασης καθορίζει το σχήμα διαμόρφωσης σε QPSK ή 16QAM.

Πίνακας 17: Πομποδέκτες 100G σταθερού πλέγματος συμβατοί με VDCN και εθνικά δίκτυα.

100G Traffic	Sliceable	Modulation format	# carriers	Baud Rate	Bit/symbol	Min BW/carrier	Min BW	BW flex grid	BW legacy	Bit/rate	Extra Traffic	Max reach
2	Y	DP-QPSK	2	32	2	37.5	75	87.5	100	256		5500
2	Y	SP-16QAM	2	32	4	37.5	75	87.5	100	256		1100
4	Y	DP-16QAM	2	32	4	37.5	75	87.5	100	512		1100

Για 400G κυκλοφορίας, ένας μόνο υπό εξέταση πομποδέκτης δεν είναι αρκετός και πρέπει να ληφθεί υπόψη η αρχιτεκτονική της οπτικής μονάδας πολλαπλών ροών που περιγράφεται στην εικόνα 4.14, σε περίπτωση που δεν να χρησιμοποιηθεί υψηλότερος ρυθμός συμβόλων.

Πίνακας 18: Πομποδέκτες 400G για εφαρμογή σε VDCN και εθνικά δίκτυα.

400G Traffic	Sliceable	Modulation format	# carriers	Baud Rate	Bit/symbol	Min BW/carrier	Min BW	BW (flexgrid)	Bit/rate	Extra Traffic	Max reach
1	N	DP-QPSK	4	32	2	37.5	150	162.5	512		5500
1	N	DP-16QAM	2	32	4	37.5	75	87.5	512		1100
1	Y	DP-QPSK	3	50	2	50	150	162.5	600		5500
1	N	DP-16QAM	2	50	4	50	100	112.5	800	2x100G	1100
1	N	DP-QPSK	2	64	2	75	150	162.5	512		5500
2	Y	DP-16QAM	2	64	4	75	150	162.5	1024		1100

4.14 Εφαρμογή Προτεινόμενων Ευέλικτων Πομποδεκτών σε Ηπειρωτικά Δίκτυα

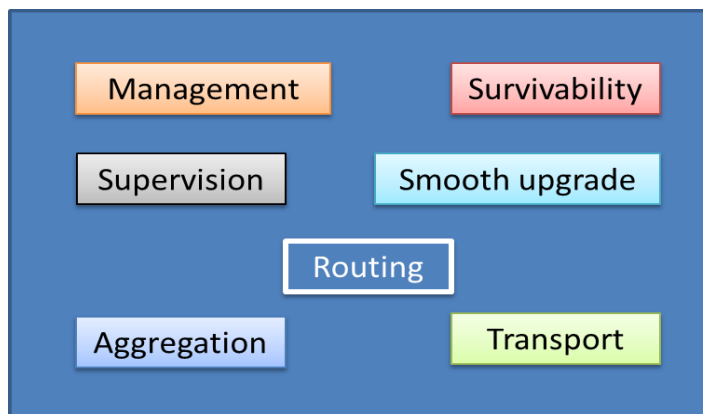
Όσον αφορά το σενάριο εφαρμογής σε ηπειρωτικά δίκτυα (πολύ μεγάλων αποστάσεων), η μονάδα κίνησης 1 Tb/s λήφθηκε υπόψη (πίνακας 19). Η εμβέλεια της απόστασης καθορίζει το σχήμα διαμόρφωσης σε QPSK και/ή 16QAM. Για όλες τις επιλογές ρύθμισης παραμέτρων, ένας μόνο πομποδέκτης δεν είναι αρκετός και γι' αυτό το λόγο πρέπει να χρησιμοποιηθεί η αρχιτεκτονική της οπτικής μονάδας πολλαπλών ροών που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.14.

Πίνακας 19: Πομποδέκτες 1 Tb/s απαιτώντας ευέλικτο πλέγμα για εφαρμογή σε ηπειρωτικά δίκτυα.

1T Traffic	Slice able	Modulation format	# carriers	Baud Rate	Bit/symbol	Min BW/carrier	Min BW	BW (flexgrid)	Bit/rate	Extra Traffic	Max reach
1	N	DP-QPSK	10	32	2	37.5	375	387.5	1280		5500
1	Y	DP-16QAM	5	32	4	37.5	187.5	200	1280		1100
1	N	DP-QPSK	6	50	2	50	300	312.5	1200		5500
1	Y	DP-16QAM	3	50	4	50	150	162.5	1200		1100
1	Y	DP-QPSK	5	64	2	75	375	387.5	1280		5500
1	Y	DP-16QAM	3	64	4	75	225	237.5	1536	2x100G	1100
2	Y	DP-QPSK	10	64	2	75	750	762.5	2560	1x100G	5500
2	Y	DP-16QAM	6	64	4	75	450	462.5	3072	4x100G	1100

4.15 Σχεδίαση Οπτικού Φωτονικού Κόμβου για Πομποδέκτες Πολλαπλών Ροών

Με την ολοκλήρωση της εξέτασης των σεναρίων χρήσης και της εφαρμογής των προτεινόμενων πομποδεκτών σε όλους τους τύπους διασύνδεσης των δικτύων, η παρούσα ενότητα εστιάζει στην αρχιτεκτονική του οπτικού φωτονικού κόμβου, καθώς μία από τις βασικές προϋποθέσεις για την επόμενη γενιά οπτικών κόμβων είναι απλά η προσαρμοστικότητα στις νέες δικτυακές εφαρμογές και απαιτήσεις. Βασισμένη σε αυτή την προσαρμοστικότητα του κόμβου, διάφορες αρχιτεκτονικές κόμβων βασισμένες σε υποσυστήματα με διαφορετικές προσεγγίσεις όσον αφορά την εσωτερική κατανομή των απαραίτητων συσκευών θα απεικονιστούν. Τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία των ηλεκτρικών και οπτικών κόμβων είναι αυστηρά συνδεδεμένα με τις λειτουργίες του κόμβου. Όπως αναφέρθηκε, οι βασικές λειτουργίες είναι οι ακόλουθες: η μεταφορά, η συνάθροιση, η δρομολόγηση, η εποπτεία και η ικανότητα επιβίωσης των σημάτων των πελατών που υποβάλλονται σε επεξεργασία τόσο στο φωτονικό όσο και στο ψηφιακό πεδίο (εικόνα 4.15).



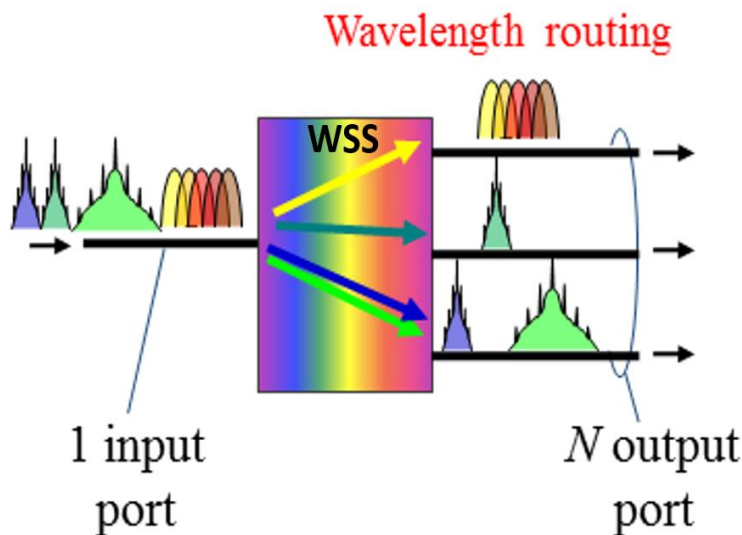
Εικόνα 4.15: Βασικές λειτουργίες που πρέπει να υποστηρίζουν τα ευέλικτα οπτικά δίκτυα.

Η οπτική μεταφορά παρέχεται μέσω ελαστικών οπτικών μονοπατιών [232], τα οποία αποτελούν οπτικές ζεύξεις κατά μήκος των οπτικών ινών. Με τη σειρά τους, οι φωτονικές ζεύξεις οπτικών ινών ενώνουν ευέλικτες οπτικές διασυνδέσεις (Flex-OXC) [233], όπου ο αριθμός των συνδέσεων ή των οπτικών ζεύξεων μεταξύ των κόμβων υποδεικνύει το βαθμό του κόμβου. Ανεξάρτητα από την επιλεγμένη αρχιτεκτονική, οι απαιτήσεις της ομαλής αναβάθμισης από την άποψη του βαθμού ελευθερίας του κόμβου, τη διακίνηση της κυκλοφορίας και την ικανότητα επιβίωσης του δικτύου από καταστροφές δεν είναι επιλέξιμες καθώς και δυνατές από κάθε μοντέλο στοιχείου του δικτύου. Η χαρτογράφηση ODU, η προστασία και οι μηχανισμοί αποκατάστασης βασίζονται σε κόμβους Flex-OXC και συντονίζονται από διεργασίες στο επίπεδο ελέγχου και στο επίπεδο δεδομένων πληροφοριών παρακολούθησης σε μια σύνθετη συνολικά διαδικασία ελαστικότητας που οφείλεται στην κατηγορία των υπηρεσιών όπως ορθά ορίζεται για κάθε μεταφερόμενη υπηρεσία. Η επιλογή των εναλλακτικών διαδρομών για το μηχανισμό ελαστικότητας (resilience) μπορεί να βοηθηθεί με μεθόδους αυτόματης ανακάλυψης, οι οποίες υλοποιούνται μέσα στον κόμβο. Επιπλέον, οι μηχανισμοί αυτο-ανακάλυψης στις κάρτες δικτύου, στις διασυνδέσεις, και στις συσκευές βοηθούν στην αναδιαμόρφωση του κόμβου σε περίπτωση δυναμικών αρχιτεκτονικών.

Τα τοπικά φασματικά διαστήματα κινούνται προς/από οποιοσδήποτε οπτικές γραμμές μέσω των ευέλικτων και αναπροσαρμόσιμων συσκευών πρόσθεσης/αφαίρεσης οπτικών σημάτων (add/drop). Αυτές παρέχουν το τελευταίο βήμα για να εισαχθούν τα δεδομένα στα ελαστικά οπτικά δίκτυα μεταφορών.

Δρομολογήσιμα (Routable) φασματικά διαστήματα μπορούν να επιλεγθούν αυθαίρετα ανάμεσα σε όλα εκείνα που μπορούν να πολυπλέκονται συνολικά στη γραμμή σήματος WDM. Κάθε συνδυασμός και κάθε επιλογή ευέλικτων φασματικών διαστημάτων θα πρέπει να είναι δυνατή. Οι απαιτήσεις αυτές οδηγούν στην ανάπτυξη οπτικού κόμβου με αναισθησία στο μήκος κύματος (colorless), στη κατεύθυνση (directionless) και στο περιεχόμενο (contentionless) [234]. Φυσικά, ακόμα πιο περιορισμένη δρομολόγηση μπορεί να υλοποιηθεί σύμφωνα με την επιθυμητή εφαρμογή. Βασικά, όλες οι απαιτήσεις δεν χρειάζονται να είναι διαθέσιμες ανά πάσα στιγμή και για οποιαδήποτε οπτικά κανάλια. Κατά συνέπεια, στην επιθυμητή εφαρμογή, μπορούν να δημιουργηθούν διαφορετικές αρχιτεκτονικές πρόσθεσης (add) και αφαίρεσης (drop) μηκών κύματος.

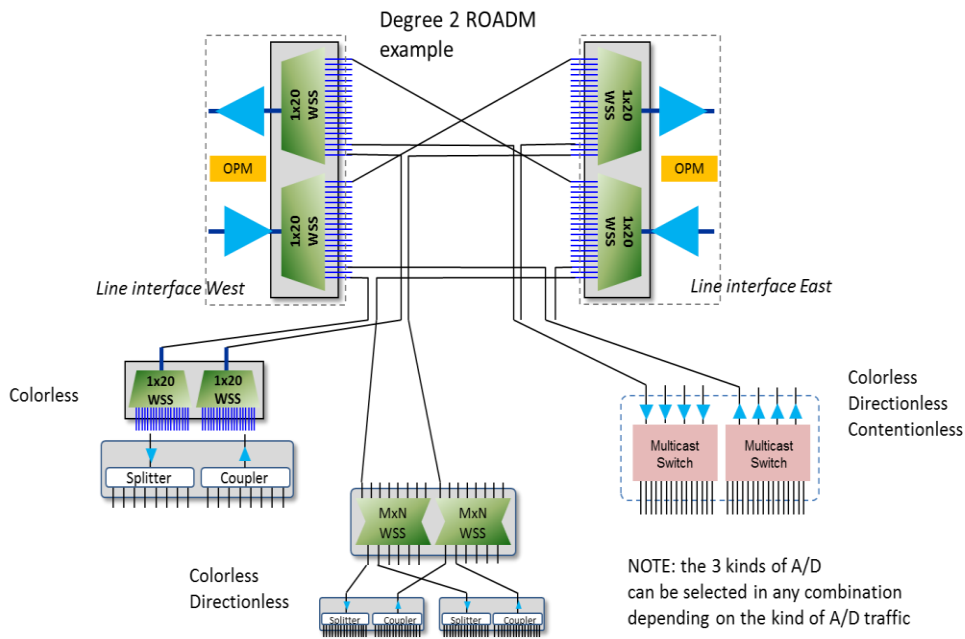
Κατ' επέκταση, τα κανάλια δρομολόγησης μπορούν να υλοποιηθούν με χρήση ενός ή περισσότερων επιλεκτικών μεταγωγέων μήκους κύματος (WSS) [235]. Αυτές οι συσκευές αποτελούν ένα καθαρό οπτικό μέσο με $1 \times N$ θύρες (συσκευές με 1×20 θύρες είναι εμπορικά διαθέσιμες) ικανές να επιλέξουν ένα (ή περισσότερα) μήκη κύματος τα οποία μπορούν να είναι ακόμα και συνδυασμένα καθώς εισέρχονται στη μονή θύρα της μια πλευράς της συσκευής και αποστέλλονται σε μια από τις πολλαπλές θύρες της άλλης πλευράς του, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.16. Όταν η ικανότητα φιλτραρίσματος και μεταγωγής του WSS αφορά τη δημιουργία φασματικών "διαστημάτων" (με ένα εύρος ζώνης που αναλογεί σε πολλαπλά διαστήματα 12.5 GHz και με ανάλυση της τάξης των 6.25 GHz πάνω στο φάσμα, όπως ορίζεται στην πρόταση της ITU-T 694.1), αντίθετα από το σταθερό πρότυπο 50 GHz καναλιών DWDM, η συσκευή χαρακτηρίζεται ως ευέλικτου πλέγματος (flexgrid) και ονομάζεται επίσης και φασματικός επιλεκτικός μεταγωγέας (Spectrum Selective Switch, SSS) [236]. Στο εξής, για λόγους απλότητας, ο όρος WSS θα χρησιμοποιείται για μεταγωγείς τόσο σταθερού όσο και ευέλικτου πλέγματος.



Εικόνα 4.16: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας WSS.

Ο ROADM με βάση τα WSS (ή SSS) υλοποιείται από ένα μέρος της γραμμής δεδομένων που εισέρχεται και από ένα μέρος "add και drop" (στο εξής Add/Drop). Το τμήμα της γραμμής, που φαίνεται στην άνω πλευρά της εικόνας 4.17, συνδέει το OXC με τους άλλους κόμβους του δικτύου (δύο κόμβοι στη συγκεκριμένη περίπτωση) και επιτρέπει είτε να μεταχθούν τα οπτικά σήματα που μεταφέρονται από μια θύρα γραμμής σε μια άλλη θύρα γραμμής (από ένα σημείο του κόμβου ενός βαθμού ελευθερίας σε ένα άλλο κόμβο σε διαφορετικό επίπεδο του δικτύου) ή να λαμβάνει και να μεταδίδει σήματα, τα οποία τερματίζονται στα τοπικά κανάλια. Το τμήμα Add/Drop του κόμβου οργανώνεται σε μπλοκ και είναι υπεύθυνο για να θέσει τα σήματα εντός του κόμβου και, κατά συνέπεια, μέσα στο δίκτυο. Τα μπλοκ Add/Drop μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αναγέννηση σημάτων όταν απαιτείται.

Στην εικόνα 4.17 παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα των Add/Drop μπλοκ. Στην κάτω, αριστερή πλευρά, απεικονίζεται ένα colorless (αναισθησία ως προς το μήκος κύματος) Add/Drop μπλοκ. Σε αυτή την περίπτωση το Add/Drop μπλοκ είναι αφιερωμένο σε μία μόνο σύνδεση και γι' αυτό δεν είναι ούτε directionless ούτε contentionless, αλλά είναι colorless, χάρη στις ιδιότητες φιλτραρίσματος του WSS. Στο κεντρικό κάτω μέρος της εικόνας 4.17, παρουσιάζεται ένα colorless και directionless μπλοκ. Σε αυτή την περίπτωση η ιδιότητα directionless είναι εξασφαλισμένη από τη σύνδεση του μπλοκ προς όλες τις γραμμές WSS. Από την άλλη μεριά, η ιδιότητα contentionless εξαρτάται από την εφαρμογή δομής τύπου $N \times N$ WSS,

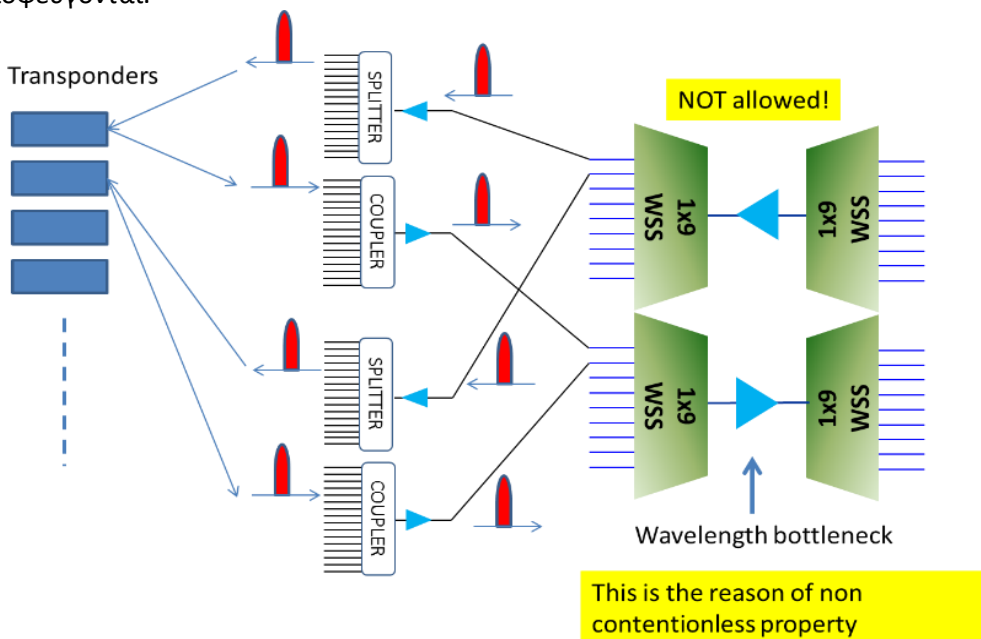


Εικόνα 4.17: Γενική δομή ROADM WSS με C, CD και CDC Add/Drop μπλοκ.

απλά ακόμη και σήμερα εμπορικά διαθέσιμες εφαρμογές δεν υποστηρίζουν την δυνατότητα contentionless σε NxM WSS μπλοκ. Η πτυχή αυτή εξηγείται λεπτομερώς παρακάτω.

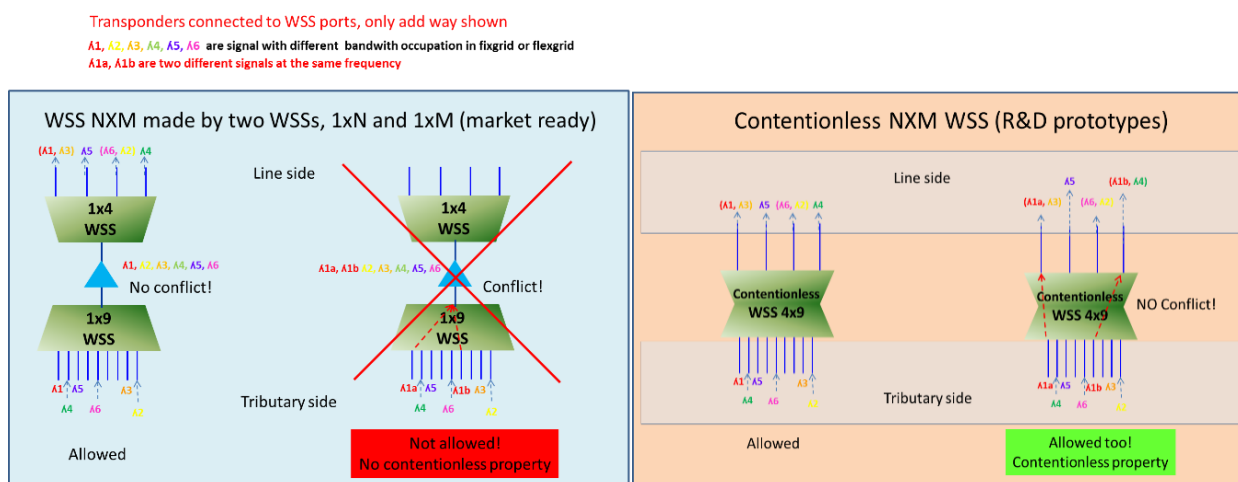
Στο κάτω μέρος της δεξιάς πλευράς της εικόνας 4.17 φαίνεται ένα Add/Drop μπλοκ που βασίζεται σε μεταγωγείς πολλαπλής διανομής (MultiCast Switches, MCS) [237]. Τέτοιου είδους συσκευές επιτρέπουν την δυνατότητα contentionless, αλλά στην παρούσα κατάσταση της τεχνολογίας υπάρχουν περιορισμούς λόγω του μεγάλου κόστους και του αριθμού των θυρών που μπορούν να έχουν (MCS της τάξης των 4x16 θυρών είναι οι μεγαλύτερες δυνατές διαθέσιμες σήμερα).

Στην εφαρμογή, η οποία αναλύεται στην εικόνα 4.18, η ιδιότητα contentionless δεν μπορεί να επιτευχθεί επειδή δύο ή περισσότερα σήματα ίδιας συχνότητας συγκρούονται (επικαλύπτονται σε εύρος ζώνης) στη θύρα διασύνδεσης των δύο στοιχείων WSS. Μια διαφορετική εφαρμογή ενός μπλοκ NxM WSS βασίζεται σε μια απλή συστοιχία βασισμένη στην τεχνολογία υγρών κρυστάλλων σε σιλκόνη (liquid crystal on silicon, LCOS) [236] με ευέλικτες ζώνης διέλευσης. Στις προτεινόμενες όμως υλοποιήσεις, οι συγκρούσεις μεταξύ των οπτικών σημάτων εισόδου, με την ίδια συχνότητα, αλλά με κατεύθυνση προς διαφορετικές εξόδους, αποφεύγονται.



Εικόνα 4.18: NxM WSS A/D μπλοκ υλοποιημένο από ένα 1xN και ένα 1xM WSS.

Στη συνέχεια, η εικόνα 4.19 παρουσιάζει την ιδιότητα contentionless των δύο WSSs, τα οποία βασίζονται στα Add/Drop μπλοκ. Στην αριστερή πλευρά της εικόνας, το Add/Drop μπλοκ είναι κατασκευασμένο από δύο WSSs διαδοχικά συνδεδεμένα (σε σειρά) (ένα 1x4 συν ένα 1x9), ενώ στην δεξιά πλευρά το μπλοκ Add/Drop είναι ένα contentionless 4x9 WSS. Στην περίπτωση καναλιών που έχουν διαφορετικά μήκη κύματος και καταλαμβάνουν διαφορετικό εύρος ζώνης (αυτό ισχύει στα πλαίσια σταθερού ή ευέλικτου πλέγματος) και οι δύο τύποι Add/Drop μπλοκ επιτρέπουν την επιλογή των καναλιών και τη δρομολόγηση προς τις εξόδους. Στην περίπτωση δύο σημάτων ίδιας συχνότητας, μόνο το contentionless WSS Add/Drop μπλοκ είναι κατάλληλο για τη δρομολόγηση και των δύο μηκών κύματος σε διαφορετικές εξόδους. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι περίπλοκες contentionless αρχιτεκτονικές που απασχολούν μεταγωγείς πολλαπλής διανομής (MCS) είναι εκτός του πεδίου μελέτης της συγκεκριμένης διατριβής και οφείλεται τόσο στην πολυπλοκότητα του κόμβου όσο και σε θέματα κόστους.



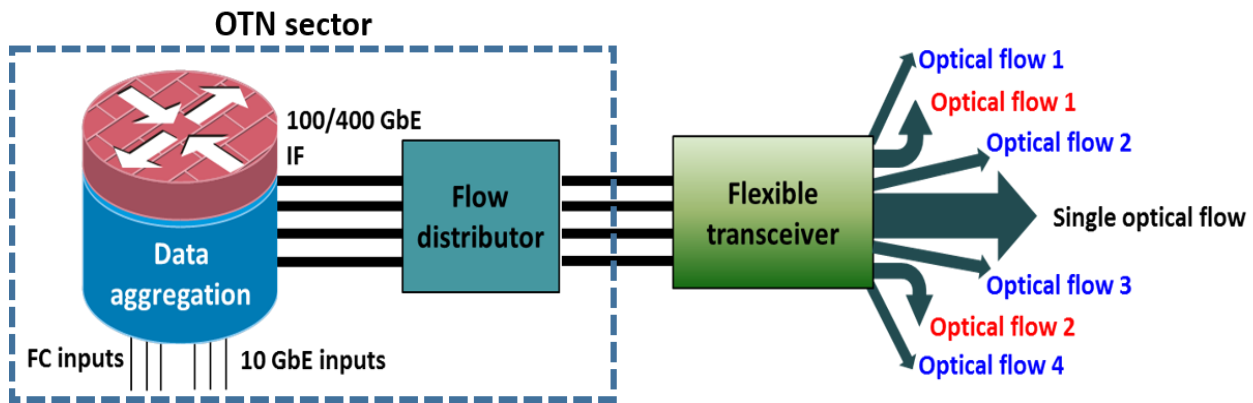
Εικόνα 4.19: Contention συμπεριφορά των A/D μπλοκ υλοποιημένα από δύο 1xN WSS στοιχεία (αριστερό μέρος) και ολοκληρωμένο NxM contentionless WSS στοιχείο (δεξιό μέρος).

Αφού μελετήθηκε η διαδικασία και η υλοποίηση της δρομολόγησης, η οποία καθίσταται υπεύθυνη για τη μεταφορά των καναλιών πληροφορίας σε όλους τους κόμβους του δικτύου, το επόμενο στάδιο αφορά τους αναμεταδότες, καθώς είναι υπεύθυνοι για τη μετατροπή των ηλεκτρικών δεδομένων προερχόμενα από τα ανώτερα στρώματα του δικτύου σε οπτική πληροφορία.

4.16 Προτεινόμενοι Ευέλικτοι Πομποδέκτες σε Συνδυασμό με το OTN

Οι μεταβλητού εύρους ζώνης αναμεταδότες (BVT), όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου 4 έχουν την ικανότητα διαμοιρασμού του φάσματος (sliceability), ονομάζονται S-BVT και εκμεταλλεύονται την πλήρη ευελιξία με σκοπό τη χαρτογράφηση των σημάτων του πελάτη στο οπτικό μέσο μετάδοσης. Ο S-BVT θεωρείται ως η συσκευή-μέσο για τη διασύνδεση του ψηφιακού με το οπτικό στρώμα. Χαρακτηριστικά, αυτού του είδους οι αναμεταδότες δεν είναι ακόμα διαθέσιμοι στο εμπόριο ως μέρος ενός συστήματος, όμως το μοντέλο τους είναι υπό ανάπτυξη σε πολλές ομάδες που ασχολούνται με έρευνα και ανάπτυξη [238,239] με στόχο τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του υψηλού επιπέδου τους. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η περιγραφή μιας πιθανής εφαρμογής ενός S-BVT έχοντας ως κύριο σημείο αναφοράς τους προτεινόμενους πομποδέκτες πολλαπλών ροών όπως παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.9.

Οι προτεινόμενοι πομποδέκτες αυτής της διατριβής είναι κατάλληλοι για όλες τις ηλεκτρικές και οπτικές αρχιτεκτονικές κόμβων που περιεγράφηκαν παραπάνω. Κατ' επέκταση, είναι σε θέση να δημιουργούν ανεξάρτητα μήκη κύματος και/ή κανάλια πληροφορίας με οπτικές προδιαγραφές συμβατές με τις προαναφερθείσες ηλεκτρικές και οπτικές αρχιτεκτονικές κόμβων. Για να αξιοποιηθεί πλήρως η ικανότητα διαμοιρασμού του φάσματος (δηλαδή, η δυνατότητα να κατευθύνονται τα υπερ-κανάλια προς διάφορους προορισμούς), συγκεκριμένες λειτουργίες είναι κατάλληλα κατανομημένες μεταξύ των ηλεκτρικών (OTN τμήμα) και οπτικών στρωμάτων, όπως περιγράφεται στην εικόνα 4.20. Πολλαπλές απαιτήσεις κυκλοφορίας εισόδου συνδέονται με τις μονάδες μεταφοράς OTN μέσα από μια ευέλικτη και παραμετροποιήσιμη συσκευή δημιουργίας OTN πακέτων, ικανή να πραγματοποιήσει τη χαρτογράφηση των δεδομένων πελάτη και τις λειτουργίες συνάθροισης και διαμερισμού δυναμικά της συνολικής απόδοσής της σε πολλαπλές διασυνδέσεις OTN. Αυτές οι μονάδες μεταφοράς ορίζονται ως OTUCn, με καθαρή χωρητικότητα ίση με $n \times 100\text{G}$ με $n \geq 2$. Η ίδια συσκευή θα πρέπει επίσης να είναι σε θέση να διανέμει κάθε OTUCn μεταξύ πολλών



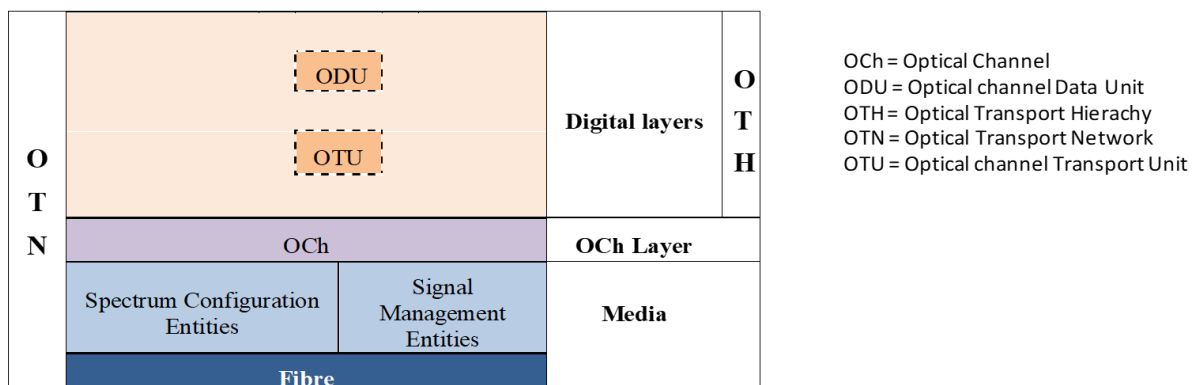
Εικόνα 4.20: Γενική αρχιτεκτονική ευέλικτων πομποδεκτών πολλαπλών ροών μαζί με το τμήμα του OTN.

εισφέρουσων ομάδων (tributary groups) OTN (OTUCnTGs) προκειμένου να επιτρέψει τη διανομή τους σε διαφορετικά υποφέροντα, ή ακόμα και αν δεν μπορούν να αποφευχθούν, πάνω σε διαφορετικά υπερκανάλια. Δεδομένα από τα OTUCnTGs τροφοδοτούν μια μεταβλητή δεξαμενή των οπτικών πομποδεκτών πολλαπλών ροών μέσω μιας διασύνδεσης πολλαπλών γραμμών.

Τελικά, η συνολική αρχιτεκτονική του των ευέλικτων πομποδεκτών πολλαπλών ροών (ή των S-BVTs) αποτελείται από την ηλεκτρική μονάδα του διανομέα ροής (flow distributor), η οποία δέχεται και ομαδοποιεί τα δεδομένα από το δίκτυο με τη χρήση του OTN, από μια ή αρκετές μονάδες ευέλικτων πομποδεκτών και τέλος, από μια οπτική μονάδα διανομέα ροής που θα μπορούσε να είναι ένας οπτικός συζεύκτης ή ένας ευέλικτος πολυπλέκτης, όπως συζητήθηκε προηγουμένως. Όσον αφορά την ηλεκτρική μονάδα του διανομέα ροής, αυτή διανέμει τα δεδομένα μεταφοράς OTN μεταξύ των διαφόρων ευέλικτων υποφερόντων μονάδων. Αυτή η κατανομή γίνεται μέσω μιας διαδικασίας αντίστροφης πολυπλεξίας του OTUCnTG σε χαμηλότερου ρυθμού OTLCs (πραγματικές γραμμές), τα οποία οδηγούν τους οπτικούς διαμορφωτές. Όσον αφορά το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων των OTLCs, πιθανές επιλογές είναι 28 Gb/s ή 56 Gb/s, όπως προκύπτουν από τους διάφορους φορείς, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την τυποποίηση των προδιαγραφών.

4.17 Επίπεδο OTN για Χαρτογράφηση και Εξυπηρέτηση της Κίνησης των Πελατών

Σε αυτή την ενότητα γίνεται αναλυτική αναφορά σχετικά με την τεχνολογία OTN καθώς και με τον τρόπο χρήσης του εντός ευέλικτου οπτικού δικτύου. Το OTN είναι η τεχνολογία μεταφοράς για το οπτικό δίκτυο που αναπτύχθηκε από τον φορέα ITU-T και βασίζεται στην αρχιτεκτονική του δικτύου όπως ορίζεται στο ITU-T G.872 "Αρχιτεκτονική για το οπτικό δίκτυο μεταφοράς (OTN)" [240]. Η ITU-T ανέπτυξε το πρότυπο πλαίσιο OTN, με γενικό στόχο να προσθέσει στο WDM μήκη κύματος των SDH/SONET [241] με χαρακτηριστικά όπως (παρακολούθηση των επιδόσεων, την ανίχνευση σφαλμάτων, τα κανάλια μέσω κλπ.), με τα οποία οι φορείς τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιούσαν και ήταν ήδη εξοικειωμένοι. Η λειτουργικότητα του επιπέδου OTN παρέχει τη μεταφορά, τη συνάθροιση, τη δρομολόγηση, την εποπτεία και την ικανότητα επιβίωσης των σημάτων των πελατών που υποβάλλονται σε επεξεργασία τόσο στο φωτονικό όσο και στο ψηφιακό στρώμα.



Εικόνα 4.21: Επισκόπηση της γενικής διαστρωμάτωσης OTN (ITU-T G.872 [240]).

Σε γενικές γραμμές, η κάθετη δομή του OTN μπορεί να χωριστεί σε ανεξάρτητα μακρο-στρώματα σε μια σχέση πελάτη-εξυπηρετητή. Πρώτα απ' όλα, υπάρχει ένα ψηφιακή στρώμα OTN που περιλαμβάνει την ηλεκτρική ευέλικτη ψηφιακή προετοιμασία και λειτουργίες μεταγωγής, με βάση το OTN χρησιμοποιώντας ένα "περιτύλιγμα" ανεξάρτητο του σήματος πελάτη. Η ενσωμάτωση των πακέτων ή λειτουργιών αγνωστικιστικής μεταγωγής είναι επίσης δυνατές επιλογές. Οι πελάτες αντιστοιχίζονται σε ψηφιακά στρώματα για την πολυπλεξία σε κλωβούς μεταφοράς (containers) ODU και τελικά συσκευάζονται σε μονάδες OTU προκειμένου να προσαρμοστούν σε ένα οπτικό αναλογικό σήμα στο στρώμα OCh του πελάτη. Ένα οπτικό στρώμα καναλιού (Optical Channel layer, OCh) είναι κατά κάποιον τρόπο στη μέση της αρχιτεκτονικής στοίβας: προσφέρεται για την μεταφορά των OCh-P (ωφέλιμο φορτίο, payload) που μεταφέρει διαφανώς OTU πληροφορίας μεταξύ των 3R σημείων του δικτύου OTN. Το οπτικό σήμα OCh οδηγείται στον προορισμό του με ένα κανάλι μέσων που δημιουργείται και ρυθμίζεται από το στρώμα των μέσων. Η αναγέννηση 3R, η αλλαγή της συχνότητας του φέροντος, η ανασυγκρότηση των φασματικών πόρων και άλλα προηγμένα χαρακτηριστικά, από λειτουργικής άποψης, περιλαμβάνουν σε γενικές γραμμές τον τερματισμό του OCh, το κανάλι μέσων, και των περιεχομένων OTU. Το OTN εγγυείται τη χαρτογράφηση και την προσαρμογή των σημάτων των πελατών σε καθολικούς κλωβούς μεταφοράς OTU/ODU (από ODU0 σε ODU4, συμπεριλαμβανομένου του ODUflex) και σε νέας γενιάς OTUCn χρησιμοποιώντας μια 'n × 100G' επαναληπτική δομή με $n \geq 2$.

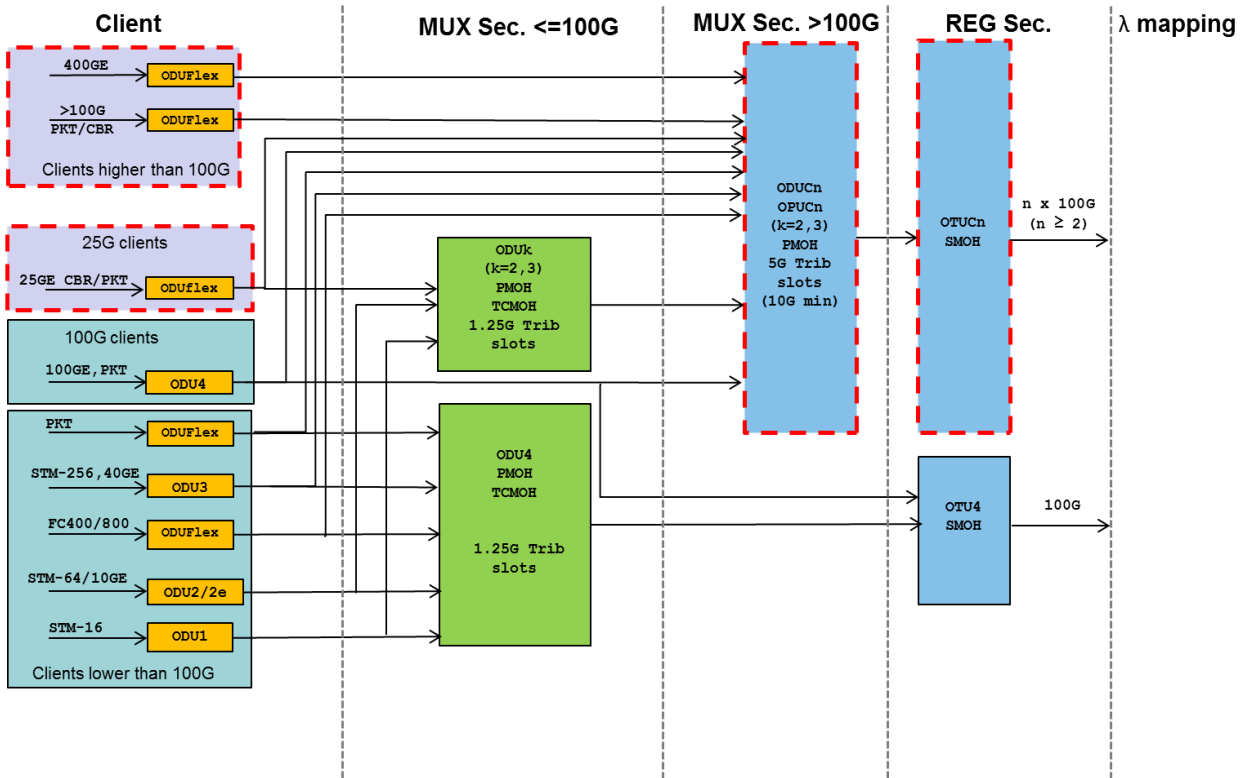
Πίνακας 20: Πλαίσιο OTN και ρυθμοί μετάδοσης OTUk (k=1,2,3,4), όπως έχουν τυποποιηθεί σήμερα.

OTU type	OTUk bit rate	OPUk payload rate	Example of typical clients
OTU1	~ 2.666057 Gb/s	~ 2.488320 Gb/s	STM-16, GbE, FC-100/200
OTU2	~ 10.709225 Gb/s	~ 9.995277 Gb/s	STM-64, 10GbE WAN, 10GbE LAN FC-400/800
OTU3	~ 43.018414 Gb/s	~ 40.150519 Gb/s	40GbE LAN, STM256
OTU4	~ 111.809974 Gb/s	~ 104.335975 Gb/s	100GbE LAN

Η προσέγγιση αυτή έχει επιπτώσεις σε ολόκληρη την ιεραρχική δομή της μεταγωγής και πολυπλεξίας OTN, όπως ορίζονται στο ITU-T G.709 [242]. Για ότι αφορά το ψηφιακό επίπεδο, η πρόταση που έχει μια ευρύτερη συναίνεση αυτή τη στιγμή στο φορέα ITU-T, συνίσταται στον ορισμό των ευέλικτων ODU και OTU επιπέδων μέσω περισσότερων νέων σταθερών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων αντί για αυστηρά καθορισμένων. Η σημερινή κυρίαρχη πρόταση υπέρ του καθορισμού ενός επιπέδου που ονομάζεται OTUCn χρησιμοποιώντας μια «n×100 διεμπλεκόμενη (interleaved)» δομή με $n \geq 2$, η οποία αναμένεται να ταιριάζει καλά επίσης στην ανάγκη κατανομής των bits σε πολλαπλές γραμμές ή στην περίπτωση της αντίστροφης-πολυπλεξίας. Το OTUCn υποστηρίζεται από ένα επίπεδο ODUcn που μπορεί να μεταφέρει ένα πολυπλεγμένο σήμα ODU2, ODU2e, ODU3, ODU4, ODUflex «κάτω από 100G» και ODUflex «πάνω από 100G» (έχοντας μια διακριτικότητα 5 Gb/s αντί 1.25 Gb/s), ως εξής:

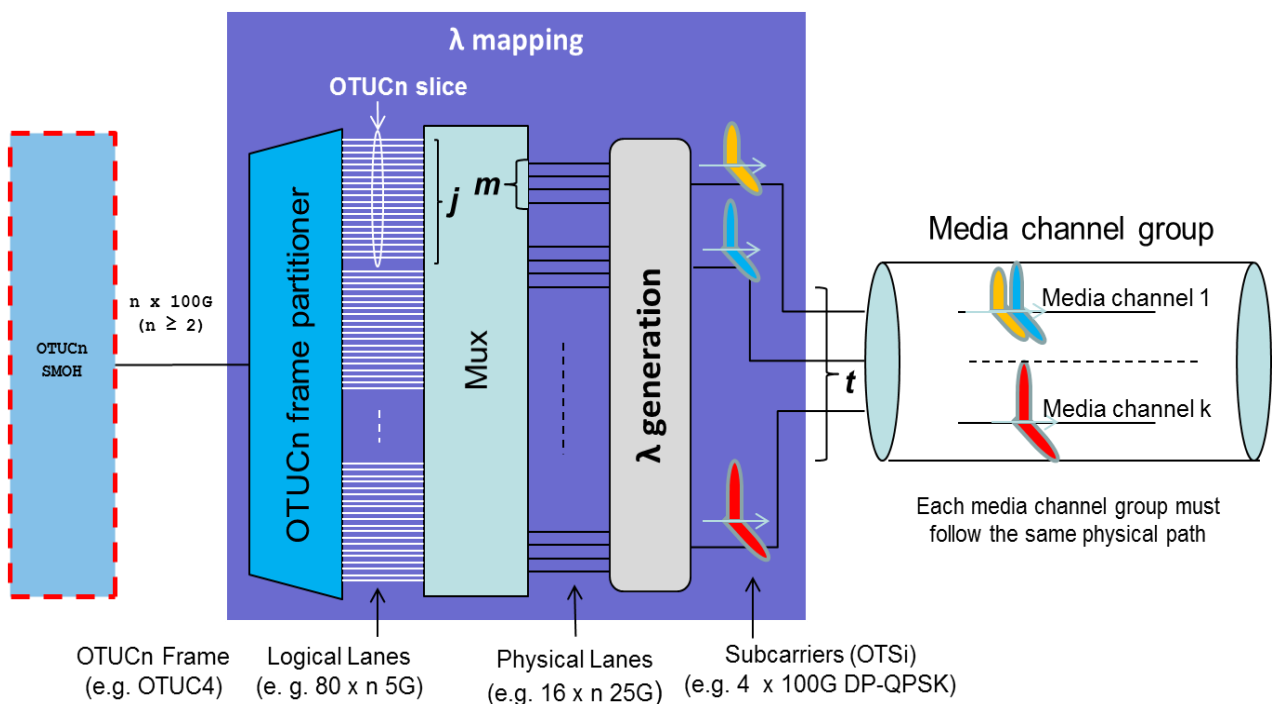
- τα ODU2, ODU3 και ODU4 μπορούν να θεωρηθούν τόσο για τους πελάτες όσο και για τις μονάδες πολυπλεξίας,
- πολυπλεγμένα ODUk (k = 2,3,4) σήματα μπορούν να φέρουν πολυπλεγμένα σήματα ODUj πελάτη,
- σήματα πελάτη πάνω από 100G σταθερού ρυθμού (Constant bitrate, CBR) (συμπεριλαμβανομένου του 400 GbE) χαρτογραφούνται μέσα σε ένα ODUflex (πάνω από 100G) που παραδίδονται στις OTN διεπαφές OTUCn.

Η εικόνα 4.22 συνοψίζει την πρόταση σχετικά με τα σήματα που υπάγονται υπό το καθεστώς του OTN, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Τα κουτιά που εμφανίζονται με διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τα θέματα υπό συζήτηση, ενώ τα άλλα καλύπτονται από το πρότυπο G.709 [242]. Οι κλωβοί μεταφοράς OTUCn σχετίζονται με τις οντότητες OCh με διαφορετικούς τρόπους, για παράδειγμα σχέση 1:1 ή σχέση 1:N στην περίπτωση ενός κατακερματισμένου OTUCn. Σε αυτή την περίπτωση, ένα στοιχείο OCh διατηρεί μια σχέση 1:1 με τον ψηφιακό ομόλογο του OTUCnTG.



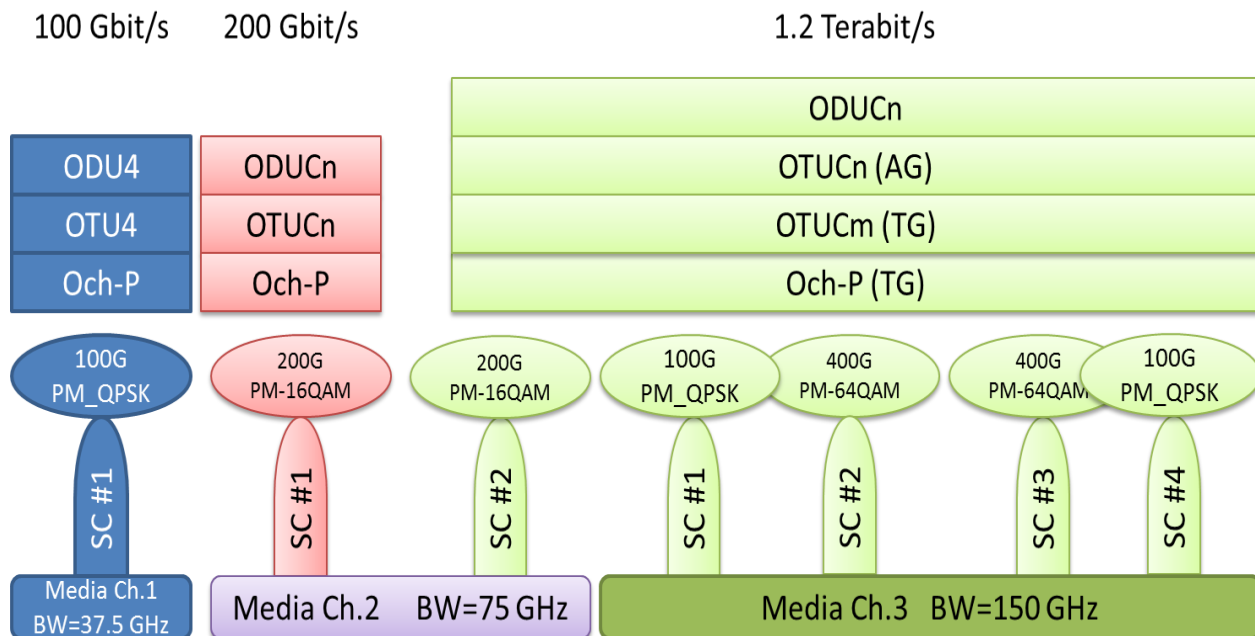
Εικόνα 4.22: Καθεστώς χαρτογράφησης και πολυπλεξίας των σημάτων OTN συμπεριλαμβανομένων των σημάτων πέραν 100G.

Ένα παράδειγμα μπορεί να εξηγήσει καλύτερα αυτό το σενάριο: έστω ότι παρουσιάζεται μια ζήτηση κυκλοφορίας, η οποία δεν μπορεί να ικανοποιηθεί στο σύνολό της, είτε λόγω της μη διαθεσιμότητας ενός αρκετά ευρέος συνεχόμενου τμήματος του φάσματος, ή επειδή μια μόνο οπτική μονάδα πολλαπλών ροών δεν έχει αρκετούς ελεύθερους ηλεκτρικούς ή οπτικούς πόρους για χρήση. Μια τέτοια ελαστική οπτική διαδρομή θα μπορούσε να υλοποιηθεί με ένα “ευέλικτο OCh”. Στην περίπτωση αυτή, διαφορετικά OTUCnTGs ανήκουν στο ίδιο OTUCn και θα ανατεθούν σε διαφορετικά μη συνεχή φασματικά διαστήματα. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να μεταφερθούν σε όλο το δίκτυο μέσω διαφορετικών καναλιών μέσων.



Εικόνα 4.23: Χαρτογράφηση μήκους κύματος Lambda ενός OTUCn (Lambda Mapping of OTUCn).

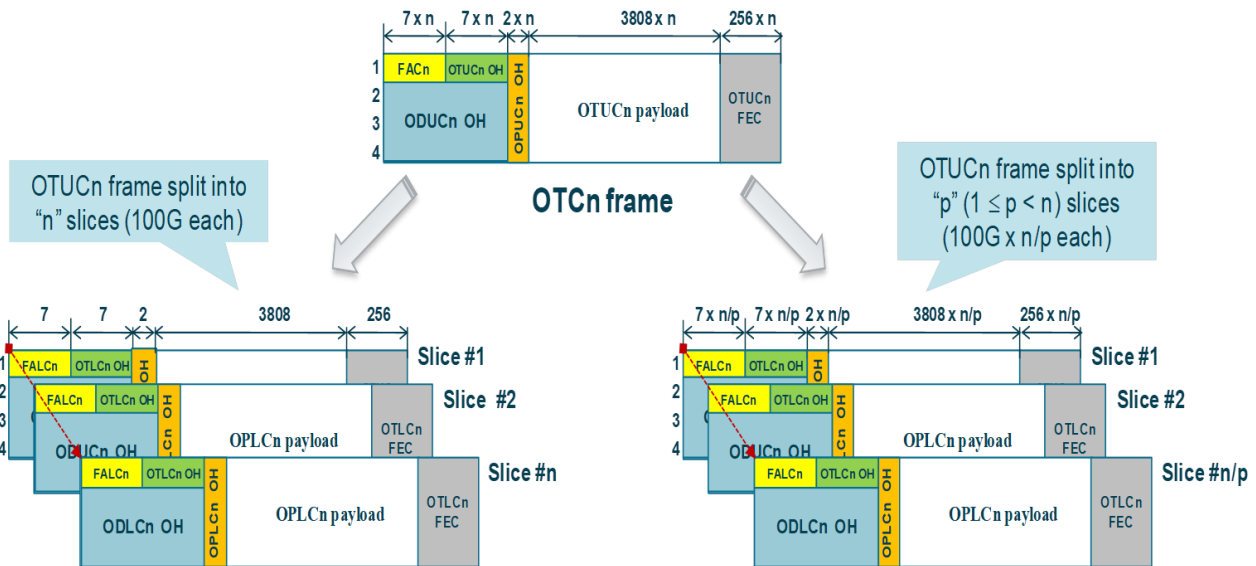
Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστούν τα σενάρια κατακερματισμού των OTUCn και της διανομής των τμημάτων μεταξύ των διαφόρων καναλιών μέσω είναι να εισαχθούν οι έννοιες της διοικητικής συνάθροισης OTUCn (Administrative Aggregation, AG), ώστε να εκπροσωπηθεί το σύνολο των OTUCn όταν είναι κατακερματισμένα (OTUCn->OTUCnAG), και της εισφέρουσας ομάδας OTUCn (Tributary Group, TG) για την αναγνώριση κάθε κομματιού. Η εικόνα 4.23 δείχνει τη σχέση 1:1 μεταξύ OTUCm (TG) και OCh-P (TG), OTUCn και OCh-P και τη σχέση 1:N μεταξύ ενός καναλιού μέσω και του πελάτη OCh-P (TGs) (που οργανώθηκε σε μια δομή υπερ-καναλιού S-OCh). Ένα ενιαίο μεγάλο ODUCn θα μπορούσε να καταναμηθεί μεταξύ πολλών καναλιών μέσω, αλλά με την προϋπόθεση ότι όλα τους ακολουθούν την ίδια διαδρομή κατά μήκος του δικτύου.



Εικόνα 4.24: Ολοκληρωμένη δομή πολυπλεξίας και χαρτογράφησης των OTUCn σε κανάλια μέσω.

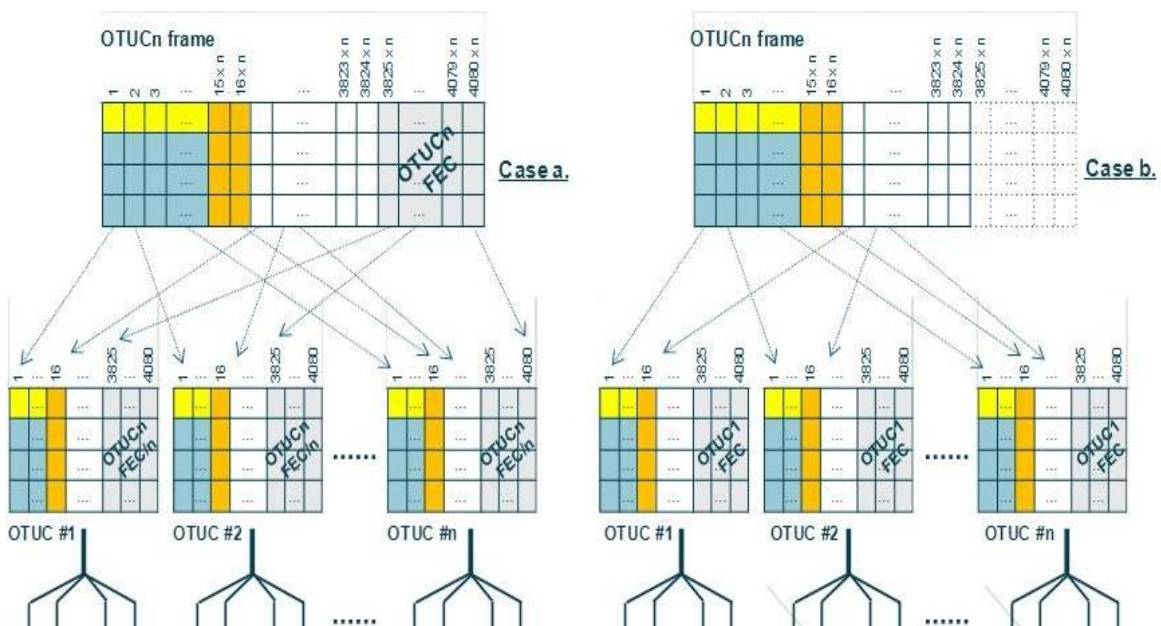
Σε ό,τι αφορά τους μελλοντικούς ευέλικτους πομποδέκτες πολλαπλών ροών (ή των S-BVTs υψηλής χωρητικότητας), προβλέπεται μια χωρητικότητα με βήματα των 100G που κυμαίνεται από ένα ελάχιστο 100G με ανώτατο όριο άνω του 1Tb/s. Ο ευέλικτος πομποδέκτης πολλαπλών ροών (ή ο S-BVT) θα έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει μια ελαστική δεξαμενή του OTUCn ή τμήματα από αυτό (OTUCnTG: Εισφέρουσες Ομάδες) με μεταβλητή 'n' συναρτήσει του χρόνου για να ακολουθήσει τις τυπικές κυκλικές διακυμάνσεις φορτίου του δικτύου (ημερήσια, εβδομαδιαία κ.λπ.). Εάν η πλήρης διαθέσιμη χωρητικότητα δεν αξιοποιείται από μια μόνο ζήτηση κυκλοφορίας, οι αχρησιμοποίητοι πόροι μετάδοσης μπορούν να ανατεθούν σε άλλες (χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων) απαιτήσεις κυκλοφορίας. Είναι σαφές ότι ένας ευέλικτος πομποδέκτης πολλαπλών ροών (ή ένας S-BVT) μπορεί να υποστηρίξει πολλούς πιθανούς συνδυασμούς ρυθμών μετάδοσης OTU, πολλά σχήματα διαμόρφωσης και μεγάλο αριθμό υποφερόντων δυναμικά μεταβαλλόμενο από χρόνο σε χρόνο και να τον καταναίμει σε έναν αριθμό διαφορετικών οπτικών καναλιών. Ο αριθμός των υποφερόντων διανέμονται μεταξύ «k» ομάδων που αντιστοιχούν σε «k» ανεξάρτητα οπτικά κανάλια με καθαρή χωρητικότητα να λαμβάνεται, συνοψίζοντας ότι από τα αντίστοιχα υποφέροντα σε κάθε ομάδα, το σχήμα διαμόρφωσης και ο ρυθμό συμβόλων υποτίθεται ότι είναι πανομοιότυπα. Οποιοσδήποτε συνδυασμός αυτών των μεταβλητών θα καθορίσει ένα πιθανό "τρόπο λειτουργίας" του ευέλικτου πομποδέκτη πολλαπλών ροών (ή του S-BVT).

Το πλαίσιο OTUCn είναι η διεμπλοκή των 'n' υπο-πλαισίων που μοιάζει με ένα πρότυπο OTU4 κατά τρόπο όμοιο με το SDH. Ο δείκτης 'n' δείχνει αμέσως τη δυνατότητα μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης σε βήματα 100 Gb/s, με τη δυνατότητα να μοιραστούν μεγάλα σήματα (π.χ. 400 Gb/s ή παραπάνω) σε πολλαπλές λεπτότερες γραμμές ώστε να μεταφερθούν σε πολλαπλά υποφέροντα. Για να επιτρέψει αυτό, μεγάλα σήματα OTUCn, αν και αντιμετωπίζονται ως μια ενιαία οντότητα, μπορεί τελικά να κατακερματιστεί σε υπό-πλαίσια "n×OTUC1" ή "p×OTUCm" (με m = n/p) (βλέπε εικόνα 4.25). Κάθε υπο-πλαίσιο θα είναι με τη σειρά του αντίστροφα πολυπλεγμένο σε ένα αριθμό "πραγματικών γραμμών".



Εικόνα 4.25: Παράδειγμα κατακερματισμού ενός πλαισίου OTUCn σε υπο-πλαίσια ($n \times 100\text{G}$ στα αριστερά ή με μεγαλύτερη διακριτότητα στα δεξιά).

Η αντίστροφη διαδικασία πολυπλεξίας στηρίζεται σε j λογικές γραμμές για να χαρτογραφήσει το τμήμα OTUCn σε m φυσικές διαδρομές οδήγησης της οπτική διεπαφής DWDM (π.χ. έναν διαμορφωτή IQ). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι η «οπτική διασύνδεση» αναφέρεται στη μονάδα πομποδέκτη ως μεταγωγέα άκρων ενός υπολογιστικού κέντρου δεδομένων, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή των ηλεκτρικών πακέτων προς το οπτικό πεδίο. Ένα πιθανό παράδειγμα αυτής της οντότητας, παρόμοιο με ό,τι έχει γίνει στο G.709 Παράρτημα C [242] για το OTU4 πάνω σε πολυκαναλικές παράλληλες διασυνδέσεις, είναι η λογική γραμμή 5 G. Κατά συνέπεια ένα OTUCn δημιουργεί $n \times j$ λογικές γραμμές (logical lanes, LL) και $n \times m$ φυσικές γραμμές. Επιλέγοντας τον αριθμό t των οπτικών εισφέρουσων σημάτων (Optical Tributary Signals, OTSi) (κάθε ένα σχετίζεται με ένα υπο-φέρον λ) να μεταφέρει το σύνολο του OTUCn, έπεται ότι οι λογικές γραμμές ομαδοποιούνται σε αριθμό των $(n \times j)/t$ γραμμές, ενώ οι φυσικές γραμμές ομαδοποιούνται σε $(n \times m)/t$ γραμμές. Για παράδειγμα, αν $n=4$ (ένα OTUC4 μεταφέρει 400 Gb/s), μια πιθανή τιμή για το j είναι 20, για το m και το t είναι 4 και για τα δύο.



Εικόνα 4.26: Παράδειγμα κατανομής ενός πλαισίου OTUCn σε λογικές γραμμές. (a) Περίπτωση ενός OTUCn FEC (μονό $n \times 100\text{G}$ FEC). (b) Περίπτωση $n \times \text{OTUC1}$ ανεξάρτητου FEC ανά 100G κανάλι.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εντελώς τυποποιημένη δομή του πλαισίου OTUCn στην τρέχουσα σχεδίαση του OTN εμπεριέχει την κωδικοποίηση FEC εντός του πλαισίου. Υποθέτοντας το ίδιο και για την ιεραρχία B100G, τουλάχιστον για τις διεπαφές που θα είναι αντικείμενο της τυποποίησης για τους εμπλεκόμενους φορείς,

η διαδικασία αντίστροφης πολυπλεξίας OTUCn πάνω σε 'm' σήματα OTLCn.m πολλαπλών γραμμών μπορεί να μοιάζει όπως εμφανίζεται στην εικόνα 4.26. Δύο είναι οι πιθανές εναλλακτικές λύσεις που παρουσιάζονται σε αυτήν την εικόνα:

a) Ένας μονολιθικός OTUCn FEC: ο κώδικας FEC υπολογίζεται στο σύνολο του πλαισίου OTUCn ($n \times 100G$).

b) 'n' ανεξάρτητα OTUC1 FECs: ο κώδικας FEC υπολογίζεται ανά υπο-πλαίσια 100G.

Η δεύτερη επιλογή φαίνεται προτιμότερη από πλευράς επιδόσεων, πολυπλοκότητας και δυνητικών επαναχρησιμοποιήσεων όπως έχει ήδη αναπτυχθεί για την περίπτωση του OTU4.

Τέλος, είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί εδώ ότι είναι δυνατόν να βρεθούν παραδείγματα όπου πολλαπλά υποφέροντα, διαμορφωμένα από εισφερόμενα οπτικά σήματα μεταφέροντας ένα κομμάτι ωφέλιμου φορτίου ODUcn/OTUCn, τοποθετούνται μαζί και μεταφέρονται σε ένα μόνο κανάλι μέσων. Άλλα υποφέροντα, τα οποία παρέχουν τα ίδια κομμάτια ωφέλιμου φορτίου ODUcn/OTUCn πρέπει να διανέμονται μέσω διαφορετικών καναλιών μέσων, λόγω έλλειψης ενός αρκετά ευρέος μεμονωμένου διαστήματος συχνότητας. Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι οι πόροι του συστήματος που καταναλώνονται από το άθροισμα όλων των υποφερόντων που απέχουν στενά διαστήματα σε ένα μόνο κανάλι μέσων, είναι συνήθως μικρότεροι από εκείνους που χρησιμοποιούνται σε περίπτωση πολλαπλών καναλιών μέσων.

Γι' αυτό και η απαίτηση ενός ρυθμιζόμενου ή ευέλικτου πλαισίου OTU για το νέο OTN "πέραν 100G" αντιμετωπίζεται με διαφορετικό τρόπο και σύμφωνα με τις ακόλουθες παραδοχές:

- Όλα τα οπτικές φέροντα υποτίθεται ότι συν-δρομολογούνται μέσα στην ίδια οπτική ίνα ή δρομολογούνται σε διαφορετικές ίνες μέσα στο ίδιο καλώδιο, έτσι ώστε να αποφευχθούν μεγάλα buffers για την αντιστάθμιση της διαφορετικής καθυστέρησης στο τερματισμένα σημεία της ζεύξης,
- η από σημείο σε σημείο σχέση 1:1 μεταξύ των πελατών και των μεταφερόμενων οντοτήτων κρατά τις διαδικασίες OAM&P (Operations Administration Maintenance and Provisioning) απλές.

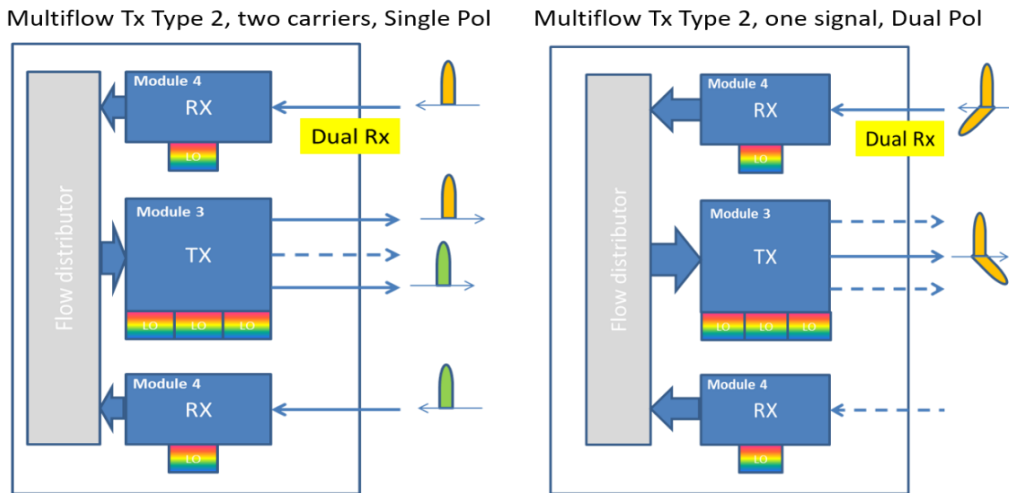
Δύο είναι τα βασικά μέσα για να οικοδομηθεί ένα ελαστικό πλαίσιο OTN. Θα πρέπει να:

- a. διατηρεί σταθερή τη δομή του τρέχοντος πλαισίου ODUk/OTUk και να μεταβάλλει το ρυθμό μετάδοσης αλλάζοντας το ρυθμό επανάλψης του πλαισίου ODUk/OTUk (προσέγγιση OTUflex, με μια δομή πλαισίου 4x4080 bytes)
- b. καθορίζει το ρυθμό επανάλψης του πλαισίου ODUk/OTUk και να μεταβάλλει το ρυθμό μετάδοσης με την κατασκευή μιας μεταβλητής δομής πλαισίου ODUk/OTUk παρόμοια με ό,τι έγινε στο παρελθόν για τις διασυνδέσεις STM-N της ιεραρχίας SONET/SDH (προσέγγιση OTUCn για ρυθμό μετάδοσης πέρα 100G, με μια δομή πλαισίου των 4x4080xh bytes)

Και οι δύο προσεγγίσεις έχουν το πλεονέκτημα να αντιμετωπίζονται ως μεμονωμένες περιπτώσεις, ενώ το OTUflex έχει το πλεονέκτημα της διατήρησης της τρέχουσας δομής του πλαισίου OTU, το OTUCn, το οποίο μπορεί εύκολα να διαμοιραστεί σε υπο-πλαίσια. Ενώ το OTUCn είναι αναμφισβήτητη η προτιμώμενη επιλογή για την εξέλιξη του OTN "πέραν 100G", η επιλογή για μια λύση "κάτω 100G" μπορεί να είναι πιο αμφιλεγόμενη. Από τη μία πλευρά θα μπορούσε να κρατηθεί η μορφή του παρόντος πλαισίου (π.χ., ένα μεταβλητού μεγέθους OTUflex με βήμα 10G) σε ομοιογένεια με τη σημερινή ιεραρχία του OTN να αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό μέχρι 100G, ενώ από την άλλη πλευρά θα μπορούσε να επεκταθεί η μορφή "πέραν 100G" με τα θετικά χαρακτηριστικά του, επίσης, κάτω από 100G.

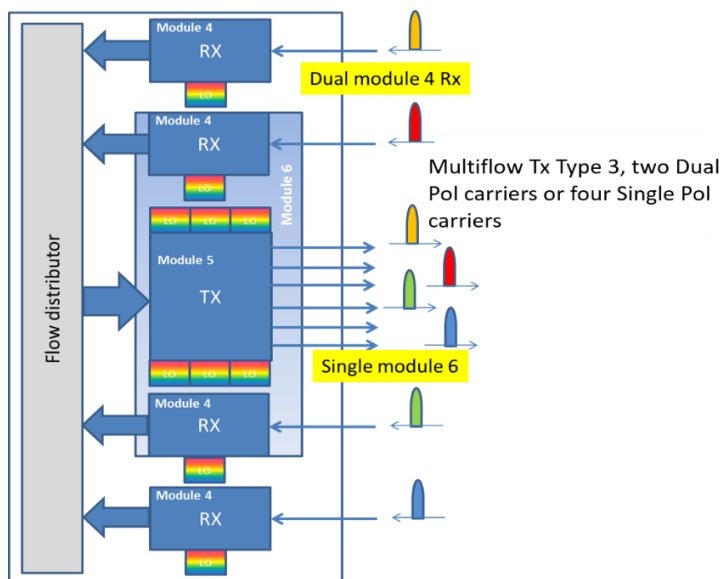
4.18 Προτεινόμενοι Ευέλικτοι Πομποδέκτες Πολλαπλών Ροών Μέσα στους Ευέλικτους Οπτικούς Κόμβους

Κάθε μονάδα πομποδέκτη πολλαπλών ροών κωδικοποιεί σε ένα μονό/διπλό/τετραπλό οπτικό υποφέρον τη ζήτηση της κυκλοφορίας την εκάστοτε χρονική στιγμή που της έχει ανατεθεί από τον διανομέα ροής βασισμένο στο πρότυπο του OTN. Η μονάδα πομποδέκτη πολλαπλών ροών περιλαμβάνει ένα σύνολο σύμφωνων οπτικών front-ends (πηγές φωτός, διαμορφωτές IQ και οπτικούς δέκτες, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 4.9) που συσχετίζονται με την ηλεκτρονική επεξεργασία (DAC, ADC, TX και RX DSP, DTIAs, κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση FEC). Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και το εύρος ζώνης μπορεί να μεταβληθεί με την αλλαγή του σχήματος διαμόρφωσης, του ρυθμού των συμβόλων, της μορφοποίησης του οπτικού φάσματος (pulse shaping) και της κωδικοποίησης FEC.



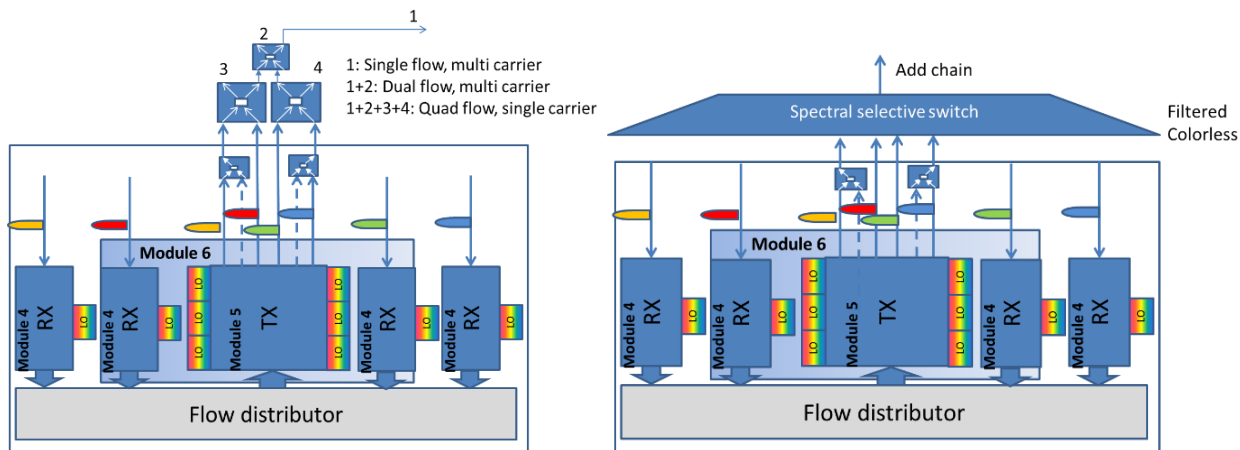
Εικόνα 4.27: Προτεινόμενος οπτικός πομποδέκτης βασισμένος στην αρχιτεκτονική ενός ή δυο οπτικών φορέων (single and dual carrier architecture).

Όλες τα ενεργά υποφέροντα πρώτα ομαδοποιούνται λογικά σε υπερ-κανάλια και στη συνέχεια, συνδέονται οπτικά μεταξύ τους μέσω της οπτικής μονάδας του διανομέα ροής, προκειμένου να διανεμηθούν σε διαφορετικά κανάλια πληροφορίας στις θύρες add/drop μιας οπτικής διασύνδεσης. Λαμβάνοντας υπόψη μια δυναμική πρόσβαση στους πόρους του οπτικού πομποδέκτη πολλαπλών ροών από τις διαφορετικές απαιτήσεις κυκλοφορίας, ένα άλλο θέμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η διαθεσιμότητα των παρακείμενων τμημάτων του φάσματος να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να φιλοξενήσει τα διαφορετικά αιτήματα. Παρά τα μεγάλα πλεονεκτήματα αυτής της αρθρωτής ευέλικτης αρχιτεκτονικής, είναι δυνατόν η πολυπλοκότητά του να επιφέρει ισχυρό αντίκτυπο στα αρχικά αυξημένα κόστη του συστήματος, παρόλο που θα μπορούσαν να μετριαστούν με προσεκτικό σχεδιασμό. Δύο παραδείγματα των προτεινόμενων πομποδεκτών πολλαπλών ροών παρουσιάζονται στην εικόνα 4.27 και εικόνα 4.28. Και οι δύο συσκευές, που έχουν ήδη παρουσιαστεί και αναλυθεί νωρίτερα, υιοθετούν τη συσκευή 4 ως τον σύμφωνο δέκτη του συστήματος και χρησιμοποιούν τη συσκευή 3 και 6 ως ένα μεταβλητού εύρους ζώνης πομπό πολλαπλών ροών. Κατ' επέκταση, ο αριθμός των ενεργών χρησιμοποιούμενων θυρών εξόδου είναι συναρτήσει του σχήματος διαμόρφωσης (μονής ή διπλής πόλωσης) και του αριθμού των φερόντων. Η οπτική ομαδοποίηση των φερόντων καθορίζεται λογικά στην οπτική μονάδα του διανομέα πολλαπλών ροών (στη μονάδα WSS του προτεινόμενου οπτικού κόμβου), αλλά θα μπορούσε να ενσωματωθεί στους προτεινόμενους πομποδέκτες για την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων και της πλήρους εκμετάλλευσής του οφέλους του υλικού ολοκλήρωσης.



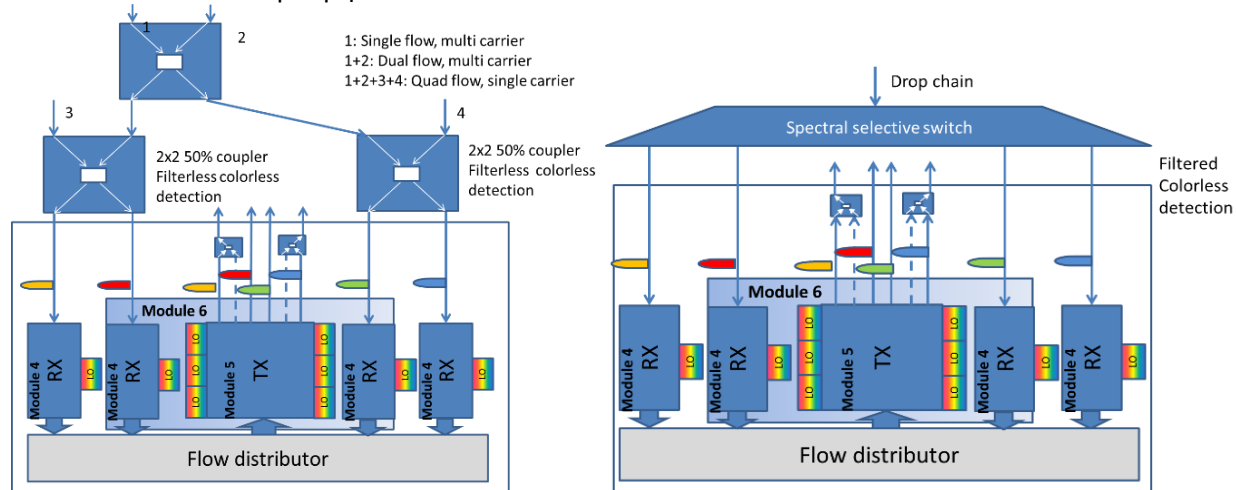
Εικόνα 4.28: Προτεινόμενος οπτικός πομποδέκτης βασισμένος στην αρχιτεκτονική δύο ή τεσσάρων οπτικών φορέων (dual and quad carrier architecture).

Ένα σύνολο παραδειγμάτων οπτικής μονάδας του διανομέα πολλαπλών οπτικών ροών απεικονίζονται στην εικόνα 4.29 για το τμήμα πομπού και στην εικόνα 4.30 για το τμήμα του δέκτη. Και οι δύο επιλογές επιτρέπουν τη λειτουργία πολλαπλών ροών σε συνδυασμό με τη δημιουργία και την επιλογή ευέλικτων υπερ-καναλιών ανάλογα με τη ζήτηση της κυκλοφορίας προερχόμενη από τα ανώτερα στρώματα του δικτύου. Όσον αφορά το τμήμα του οπτικού πομπού, η λειτουργία add μπορεί να υλοποιηθεί με δύο δυνατούς τρόπους με βάση την εικόνα 4.29. Ο πρώτος περιλαμβάνει τη χρήση παθητικών συζευκτών ως μια χαμηλού κόστους επιλογή ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιεί ένα WSS αποδίδοντας κατά αυτό τον τρόπο τις ιδιότητες colorless και directionless στην αρχιτεκτονική αυτή.



Εικόνα 4.29: Αρχιτεκτονική μονάδας οπτικής διανομής πολλαπλών ροών: χωρίς φίλτρο (αριστερά) ή με φίλτρο (δεξιά) το τμήμα του πομπού.

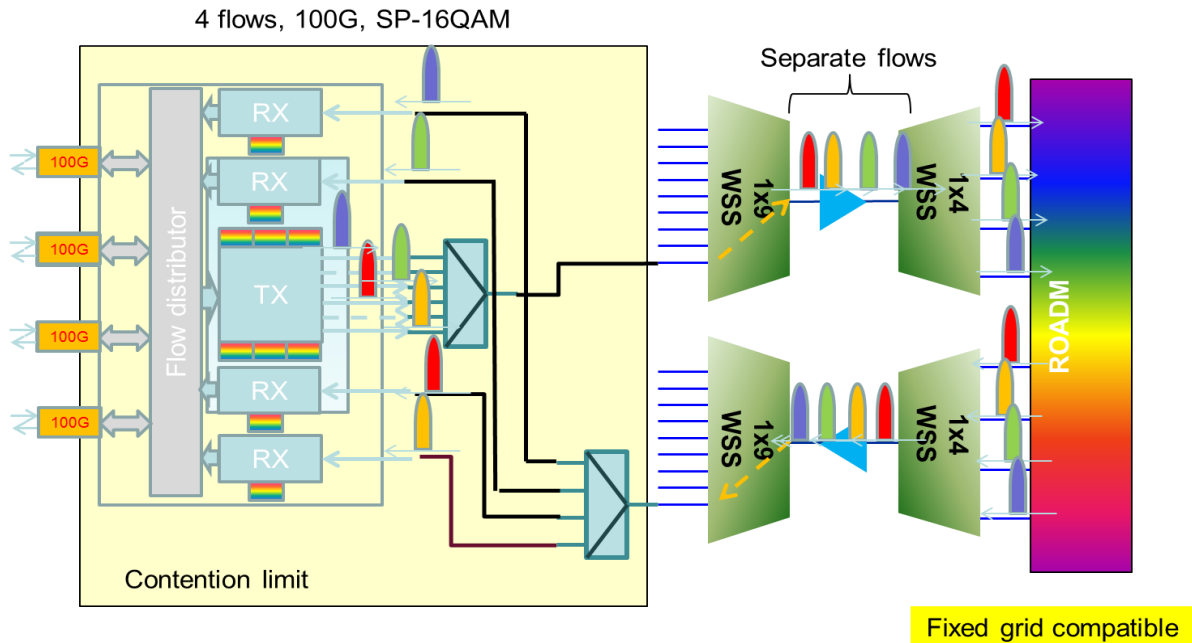
Στο τμήμα του δέκτη, η λειτουργία drop ακολουθεί το παράδειγμα του πομπού και μπορεί να υλοποιηθεί με παθητικούς συζεύκτες (εικόνα 4.29, αριστερά) ως μια οικονομικά αποδοτική λύση στηριζόμενη μόνο σε σύμφωνη ανίχνευση για την επιλογή των φερόντων ή με ευέλικτου πλέγματος WSS οδηγώντας πάλι σε μια colorless και directionless αρχιτεκτονική (εικόνα 4.30, δεξιά), ώστε να μπορεί να συνδυαστεί με την περίπτωση του προτεινόμενου οπτικού πομπού πολλαπλών ροών εντός δικτυακών σεναρίων. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημανθεί ότι η επιλογή χωρίς τη χρήση του οπτικού φίλτρου (WSS) είναι λιγότερο δαπανηρή και απλούστερη αντί της επιλογής με χρήση αυτού και είναι καταλληλότερη για την εφαρμογή σε μητροπολιτικά δίκτυα και σε υπολογιστικά κέντρα δεδομένων, όπου η ιδιότητα directionless δεν είναι κρίσιμη.



Εικόνα 4.30: Αρχιτεκτονική μονάδας οπτικής διανομής πολλαπλών ροών: χωρίς φίλτρο (αριστερά) ή με φίλτρο (δεξιά) το τμήμα του δέκτη.

Η αρχιτεκτονική που στηρίζεται στη χρήση flexgrid WSS θα μπορούσε να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους: αν η λειτουργία πολλαπλών ροών είναι χαρακτηριστικό του πομποδέκτη, όπως αυτοί που αναλύθηκαν στην ενότητα 4.9, οι διαφορετικές θύρες του WSS θα πρέπει να αντιμετωπιστούν όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.29 και εικόνα 4.30, δηλαδή κάθε έξοδος του πομπού και του δέκτη και κατ' επέκταση κάθε οπτική ροή να αντιστοιχεί σε μια θύρα του WSS. Η δεύτερη και προτιμότερη επιλογή υπό αξιολόγηση είναι να χρησιμοποιηθεί μια μόνο θύρα του add/drop WSS με ένα 1x6 παθητικό συζεύκτη και να πραγματοποιηθεί η δημιουργία υπερ-καναλιών και η δρομολόγηση πολλαπλών ροών μέσω της γραμμής

των συσκευών WSS, ώστε να αποδοθεί μεγαλύτερη αυτονομία και ευελιξία καθώς οι αχρησιμοποίητες θύρες θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για άλλες λειτουργίες και εφαρμογές του δικτύου όπως φαίνεται στην εικόνα 4.31 και εικόνα 4.32, μειώνοντας το συνολικό κόστος και αυξάνοντας το βαθμό ελευθερίας του οπτικού κόμβου.

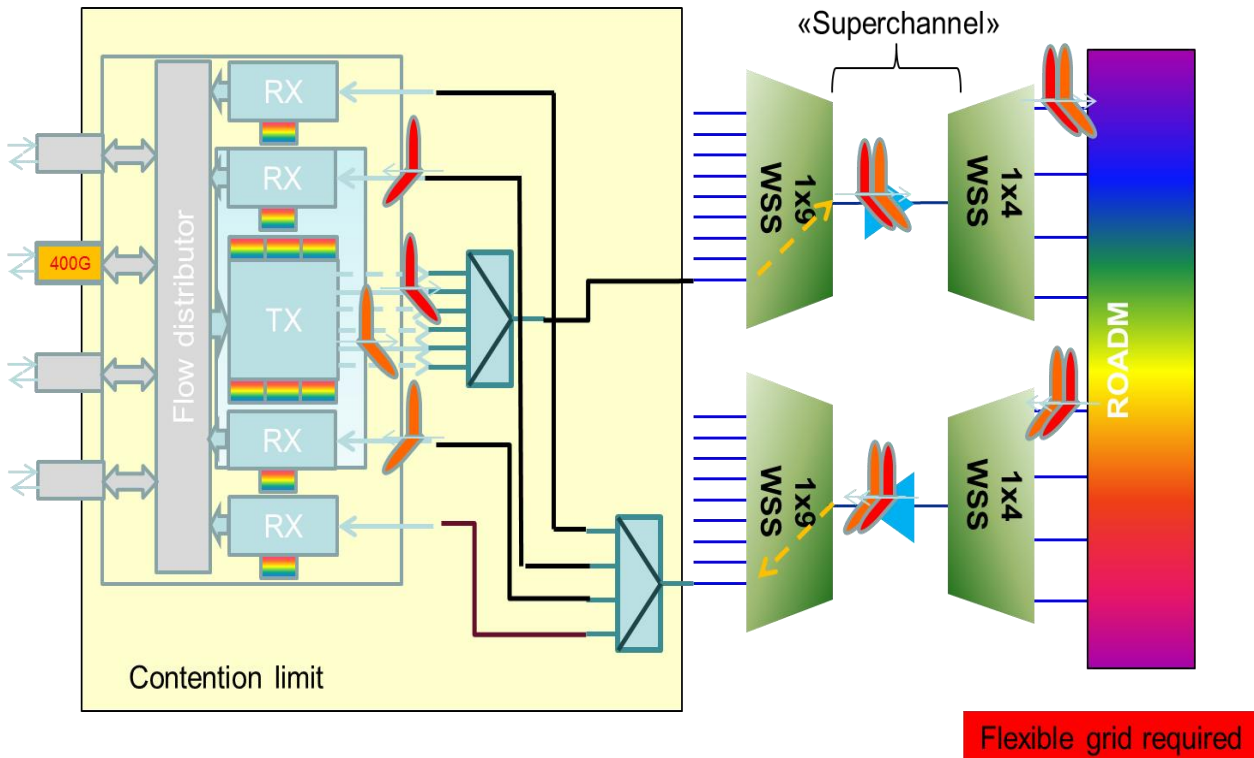


Εικόνα 4.31: Αρχιτεκτονική μονάδας οπτικής διανομής πολλαπλών ροών αξιοποιώντας WSSs (είτε σταθερού είτε ευέλικτου πλέγματος) για τη δρομολόγηση των οπτικών ροών.

Αναλυτικότερα, στην εικόνα 4.31 μια μονάδα οπτικής διανομής ροών ικανή να παράγει και να ανιχνεύσει μέχρι 4 οπτικές ροές έχει σαν υποδοχή 4 ηλεκτρικές ροές δεδομένων (100G η κάθε μια), οι οποίες πρέπει να μεταφερθούν από τον προτεινόμενο οπτικό κόμβο στους υπόλοιπους κόμβους διαφορετικών κατευθύνσεων του ευέλικτου οπτικού δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνολική χωρητικότητα που πρέπει να μεταφερθεί σε 4 διαφορετικές κατευθύνσεις αντιστοιχεί σε 400G, η μονάδα οπτικής διανομής ροών δημιουργεί 4 διαφορετικές μονές οπτικές ροές με σχήμα διαμόρφωσης 16QAM μονής πόλωσης, οι οποίες εισέρχονται στον παθητικό συζεύκτη όντας συνδεδεμένος σε μια μόνο θύρα του WSS στην έξοδο του προτεινόμενου κόμβου. Η συγκεκριμένη υλοποίηση στοχεύει στην εξοικονόμηση των θυρών του WSS αποσκοπώντας σε μεγαλύτερη ευελιξία στο παρών σύστημα. Στη συνέχεια, οι 4 οπτικές ροές αφού ενισχυθούν μέσω EDFA χωρίς χρήση φίλτρου ταξιδεύοντας στην ίδια φυσική γραμμή, προσπίπτουν στο δεύτερο WSS εξόδου του κόμβου και αντιστοιχίζονται στις τέσσερις εξόδους του, ώστε να μεταδοθούν σε 4 διαφορετικούς προορισμούς. Ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία αυτής που περιεγράφηκε σε αυτή την παράγραφο και σύμφωνα με την εικόνα 4.31, οι 4 εισερχόμενες οπτικές ροές διέρχονται μέσω του οπτικού κόμβου εισόδου με χρήση των δύο WSSs, καταλήγοντας στους δέκτες της οπτικής μονάδας διανομής πολλαπλών ροών για ανίχνευση και αποστολή των ηλεκτρικών ροών σε ανώτερα στρώματα του δικτύου.

Βασισμένη στην ίδια λογική με την προαναφερθείσα ανάλυση, η αρχιτεκτονική της εικόνα 4.32 χρησιμοποιεί πάλι μια μονάδα οπτικής διανομής ροών δεχόμενη όμως μια μόνο ηλεκτρική ροή 400G στον ηλεκτρικό διανομέα ροών. Γι' αυτό το λόγο διαμορφώνεται η μονάδα οπτικής διανομής ροών με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να μεταφέρει αυτή την χωρητικότητα στην ζητούμενη κατεύθυνση με παραγωγή δύο οπτικών υποφερόντων με σχήμα διαμόρφωσης 16QAM διπλής πόλωσης, συνιστώντας μια οπτική ροή σε μορφή υπερ-καναλιού στην έξοδο του δεύτερου WSS του οπτικού κόμβου εξόδου (εναλλακτικά θα μπορούσαν να παραχθούν 2 οπτικές ροές 200 G η κάθε μια με σχήμα διαμόρφωσης QPSK διπλής πόλωσης). Αντίστροφη διαδικασία ακολουθείται κατά την είσοδο ενός οπτικού υπερ-καναλιού, δύο οπτικών υποφερόντων στον οπτικό κόμβο εισόδου του δικτύου, όπου μετά από το διαχωρισμό του οπτικού υπερ-καναλιού μέσω του WSS τα διαμορφωμένα υποφέροντα ανιχνεύονται με τη χρήση των προτεινόμενων οπτικών σύμφωνων δεκτών.

1 flow, 400G, 2 Sub Carriers DP-16QAM (or 200G, 2 SC DP-QPSK)

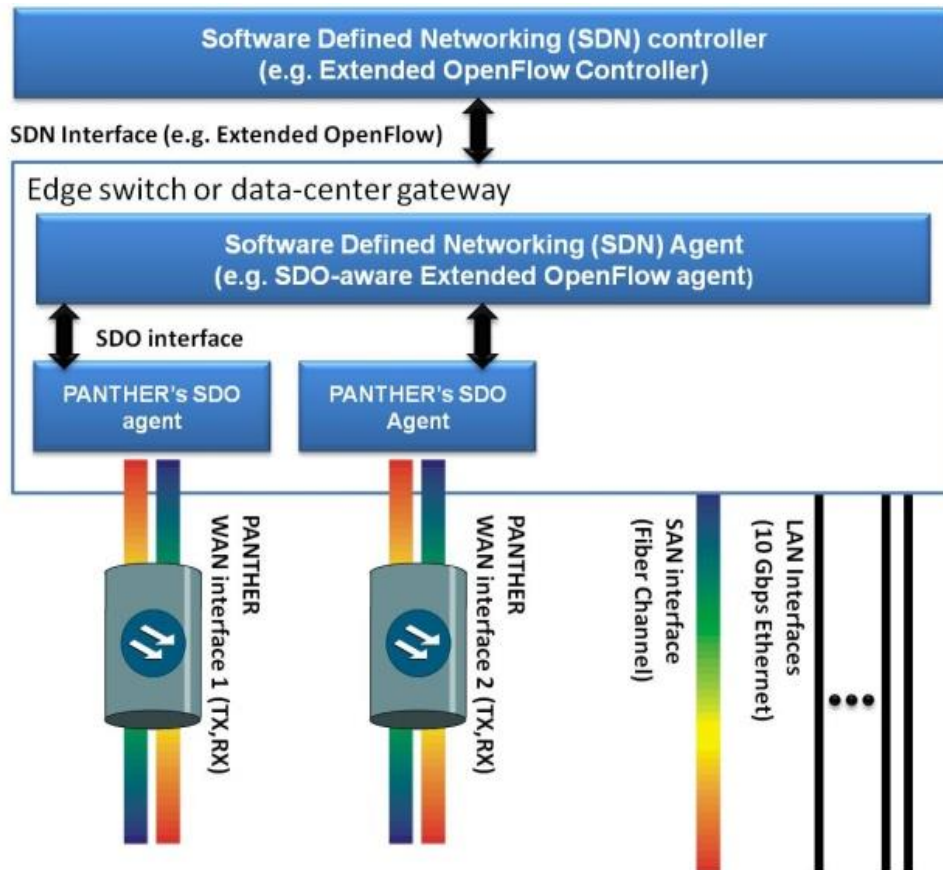


Εικόνα 4.32: Αρχιτεκτονική μονάδας οπτικής διανομής πολλαπλών ροών αξιοποιώντας WSSs ευέλικτου πλέγματος για τη συνάθροιση υπερ-καναλιών και τη δρομολόγηση των οπτικών ροών.

4.19 Υλοποίηση Λογισμικού Ελέγχου Οπτικών Συσκευών μέσω Πλατφόρμας SDO

Έχοντας ολοκληρωθεί η ανάλυση των αρχιτεκτονικών των δικτύων, η παρουσίαση των δυνατοτήτων των προτεινομένων ευέλικτων πομποδεκτών πολλαπλών ροών καθώς και της σχεδίασης του ευέλικτου οπτικού κόμβου βασισμένου στη χρήση των WSS, όπου βρίσκουν εφαρμογή οι προηγούμενοι πομποδέκτες, σειρά παίρνει ο τρόπος και η τοπολογία ελέγχου όλων των οπτικών συσκευών για να χρησιμοποιηθούν σε ευέλικτα καθώς και ευφυή προγραμματιζόμενα δίκτυα (software defined networks, SDN), στα οποία οι παράμετροι της οπτικής μεταφοράς και της πληροφορίας είναι προσβάσιμοι και ελέγξιμοι μέσω ενός κεντρικού ελεγκτή SDN που βρίσκεται στο ανώτερο στρώμα της ιεραρχίας SDN. Για να ενεργοποιηθεί αυτή η αρχιτεκτονική, ο μεταγωγέας άκρων ή η πύλη του υπολογιστικού κέντρου πρέπει να σχεδιαστεί ως ένα εικονικός μεταγωγέας που είναι μέρος της τοπολογίας του οπτικού κόμβου ενός ευέλικτου δικτύου. Ο σχεδιασμός του κόμβου του δικτύου όπως έχει περιγραφεί αναλυτικά στις προηγούμενες ενότητες έχει λάβει υπόψη τη μετάδοση και μεταγωγή των ευέλικτων οπτικών ροών θεωρώντας ως βασικά χαρακτηριστικά την μεταβολή του μήκους κύματος του φέροντος και του εύρους ζώνης, τα οποία εξαρτώνται από την επιλογή της ευέλικτης διαμόρφωσης mQAM, το ρυθμό συμβόλων και τον αριθμό των υποφερόντων. Οι προδιαγραφές για την οπτική μετάδοση των αντίστοιχων οπτικών ροών θα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις του υψηλότερου επιπέδου του δικτύου σε σχέση με τους διαθέσιμους πόρους ως προς το εύρος ζώνης και την εμβέλεια μετάδοσης της υπολογισμένης διαδρομής του δικτύου.

Η εικόνα 4.33 απεικονίζει την ιεραρχία SDN και τη ροή πληροφοριών από το επίπεδο δικτύου (ελεγκτής SDN) προς τα κάτω στο φυσικό επίπεδο μεταφοράς (προτεινόμενοι οπτικοί Tx/Rx της ενότητας 4.9). Ο ελεγκτής SDN που έχει μια ευρεία εικόνα του δικτύου επικοινωνεί με τους μεταγωγείς άκρων και τις πύλες του υπολογιστικού κέντρου μέσω του εκτεταμένου πρωτοκόλλου OpenFlow (διεπαφή SDN) [243,244]. Με τη σειρά της, η πληροφορία αυτή κοινοποιείται προς τα κάτω στις πραγματικές θύρες του μεταγωγέα μέσω της διασύνδεσης με το λογισμικό καθορισμένης οπτικής (software defined optics, SDO) και ιδίως με τον SDO agent που ελέγχει άμεσα το καθεστώς λειτουργίας των ευέλικτων πομποδεκτών και των θυρών εισόδου και εξόδου των WSSs.

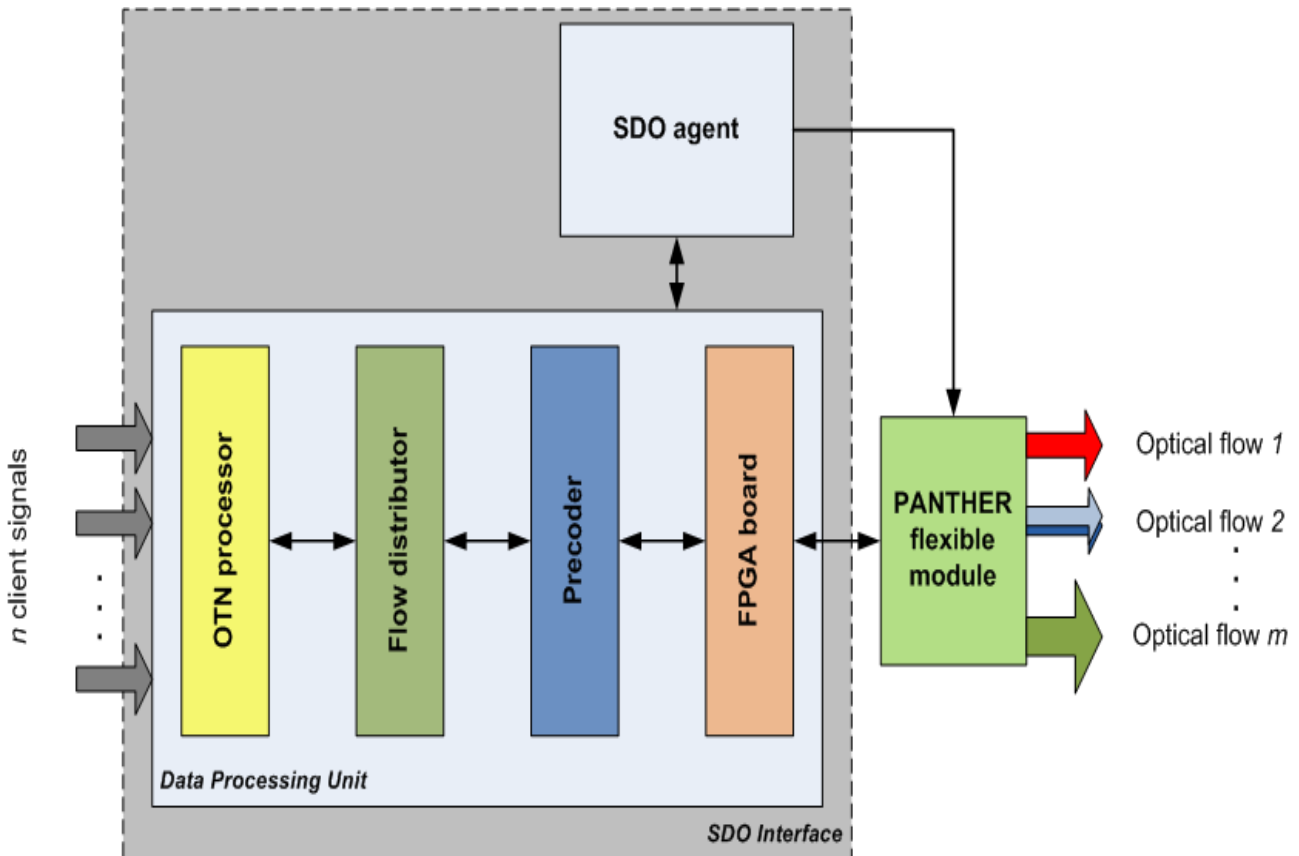


Εικόνα 4.33: Αρχιτεκτονική SDN και η επέκτασή της προς τα κάτω στο στρώμα οπτικής μεταφοράς που βασίζεται στη χρήση των προτεινόμενων ευέλικτων πομποδεκτών και του SDO agent. Η βόρεια επικοινωνία (northbound) προς τον ελεγκτή SDN πραγματοποιείται μέσω της διασύνδεσης SDN (με βάση το εκτεταμένο Openflow) και της νότιας επικοινωνίας (southbound) προς τον οπτικό εξοπλισμό μεταφοράς (ευέλικτοι προτεινόμενοι πομποδέκτες και στοιχεία WSS) επιτυγχάνεται μέσω της διεπαφής SDO και του SDO agent.

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη της διεπαφής SDO προς το οπτικό στρώμα (southbound interface) για τον έλεγχο της λειτουργίας και των παραμέτρων των ευέλικτων προτεινόμενων πομπών πολλαπλών ροών, όπως επίσης και των μονάδων WSS. Ένα σύνολο εργαλείων λογισμικού έχει αναπτυχθεί για τη ρύθμιση των παραμέτρων της μετάδοσης του φυσικού στρώματος των παραγόμενων οπτικών ροών και θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο μια απόδειξη της ιδέας μέσω πειραματικής επίδειξης του SDO agent με βάση τη χρήση πρωτότυπων μονάδων πομπού πολλαπλών ροών (πρόδρομος της προαναφερθείσας συσκευής 3 της ενότητας 4.9).

4.20 Ανάπτυξη Διεπαφής SDO για Ευέλικτους Πομπούς Πολλαπλών Ροών

Ο σχεδιασμός της διεπαφής SDO (southbound) απεικονίζεται στην εικόνα 4.34 και αποτελείται από δύο κύρια δομικά στοιχεία: α) τη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων και β) τον SDO agent. Η μονάδα επεξεργασίας δεδομένων είναι υπεύθυνη για την χαρτογράφηση και την ενθυλάκωση των δεδομένων των πελατών σε πλαίσια OTN στον επεξεργαστή OTN, την οργάνωση/διανομή τους σε σχέση με τον αριθμό των οπτικών ροών εξόδου που θα προκύψουν στο διανομέα ροής, την επιλογή του μεταβλητού σχήματος διαμόρφωσης στον προκωδικοποιητή και, τέλος, την παραγωγή των κατάλληλων ηλεκτρικών ροών δεδομένων στον επιλεγμένο ρυθμό μετάδοσης στην πλακέτα FPGA, προκειμένου να οδηγήσει τις προτεινόμενες ευέλικτες μονάδες πομπού. Ο SDO agent έχει σχεδιαστεί με κατάλληλο τρόπο ώστε να ελέγχει την κατάσταση λειτουργίας των ευέλικτων μονάδων ρυθμίζοντας το μήκος κύματος των συντονισμών πηγών λέιζερ στο επιλεγμένο κανάλι ITU και την κατάσταση λειτουργίας των ρυθμιζόμενων θερμο-οπτικών διακοπών, έτσι ώστε να αποφασίζουν ποιο μέρος των διαθέσιμων πόρων των διαμορφωτών του ευέλικτου πομπού θα χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, ο SDO agent έχει σχεδιαστεί για να ρυθμίζει τις θύρες εισόδου/εξόδου των WSSs ανάλογα με τον προορισμό των παραγόμενων οπτικών ροών προσαρμόζοντας τα χαρακτηριστικά του επιπέδου εξασθένισης και τη ζώνη διέλευσης πλάτους των θυρών εισόδου/εξόδου του.

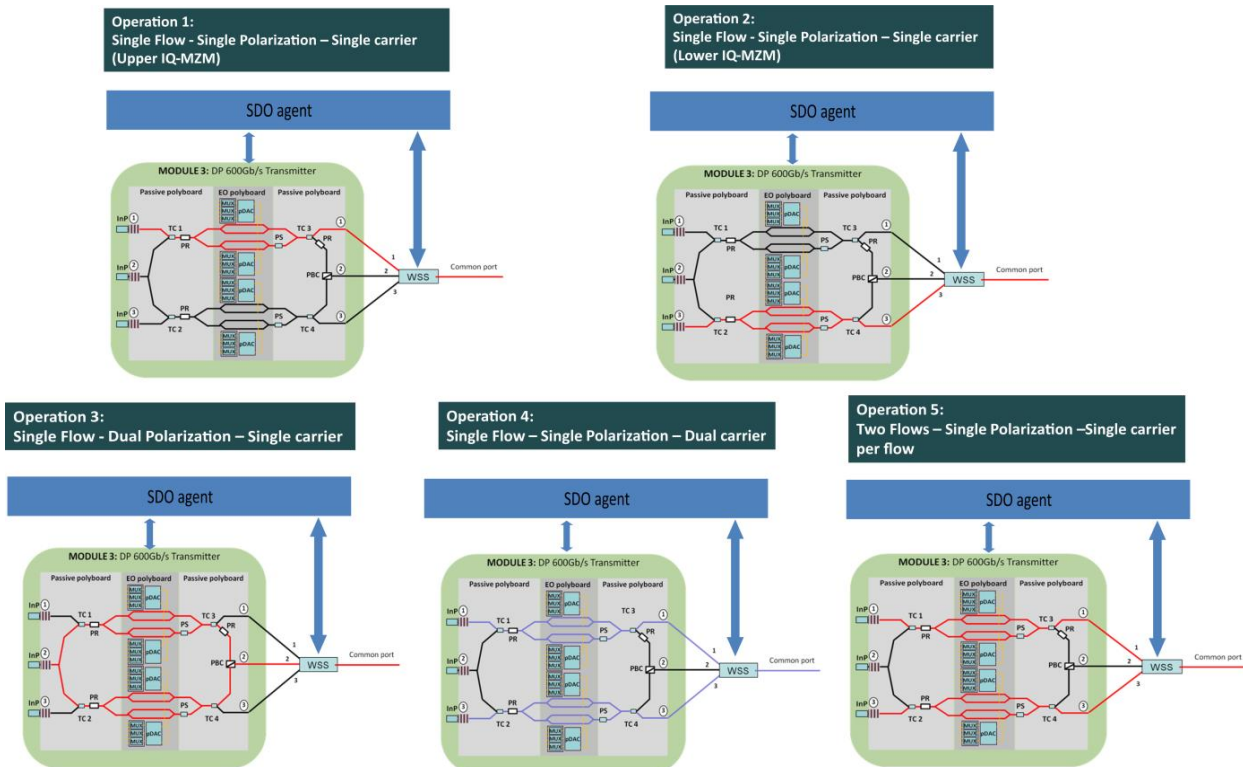


Εικόνα 4.34: Αρχιτεκτονική της διεπαφής SDO και τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία του: Η μονάδα επεξεργασίας δεδομένων αποτελείται από τον α) επεξεργαστή OTN για τη χαρτογράφηση και την ενθυλάκωση των δεδομένων των πελατών σε πλαίσια OTN, β) τον διανομέα ροής για την οργάνωση των δεδομένων με τις κατάλληλες ροές, γ) τον προκωδικοποιητή για την παραγωγή των κατάλληλων δεδομένων I και Q για την οδήγηση των προτεινόμενων πομπών και δ) της πλακέτας FPGA για την παραγωγή των αντίστοιχων ηλεκτρικών δεδομένων στον επιλεγμένο ρυθμό μετάδοσης. Το λογισμικό του SDO agent ελέγχει άμεσα το μήκος κύματος των ολοκληρωμένων πηγών λέιζερ και ρυθμίζει το καθεστώς λειτουργίας των ευέλικτων πομπών για τη δημιουργία μονών ή πολλαπλών οπτικών ροών. Επιπλέον, ελέγχει τον αριθμό των σημάτων στις εισόδους των ολοκληρωμένων SPDACs με βάση το επιλεγμένο σχήμα διαμόρφωσης και επικοινωνεί με τη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων μέσω ενός συνόλου γενικών παραμέτρων λειτουργίας και με την πλακέτα FPGA για τον έλεγχο του επιλεγμένου ρυθμού συμβόλων.

Η μονάδα επεξεργασίας δεδομένων και ο SDO agent είναι προγραμματισμένα να μεταφράζουν ένα σύνολο των ιδιοτήτων της οπτικής μεταφοράς, προκειμένου να ελέγχουν κατάλληλα τις προτεινόμενες ευέλικτες μονάδες. Αυτό το σύνολο αναφέρεται στον αριθμό των παραγόμενων οπτικών ροών, στον επιλεγμένο ρυθμό συμβόλων, στο σχήμα διαμόρφωσης, στο μήκος κύματος του φέροντος και στον αριθμό των υποφερόντων. Η συσκευή 3 της ενότητας 4.9 αποτελεί τη θεμελιώδη μονάδα του ευέλικτου οπτικού πομπού και, συνεπώς, χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της διεπαφής SDO. Οι δυνατότητες πολλαπλών ροών της συσκευής 3 απεικονίζονται μέσω των σεναρίων λειτουργίας που παρατίθενται παρακάτω:

- Περίπτωση 1: Ενιαία οπτικής ροής - Ενιαία πόλωση - Ενιαία φορέα (Ανω IQ-MZM)
- Περίπτωση 2: Ενιαία οπτικής ροής - Ενιαία πόλωση - Ενιαία φορέα (Κάτω IQ-MZM)
- Περίπτωση 3: Ενιαία οπτικής ροής - Διπλή πόλωση - Ενιαία φορέα
- Περίπτωση 4: Ενιαία οπτικής ροής - Ενιαία πόλωση - Διπλή φορέα
- Περίπτωση 5: Δύο οπτικές ροές - Ενιαία πόλωση - Ενιαία φορέα ανά ροή

Η εικόνα 4.35 απεικονίζει σχηματικά τα πέντε σενάρια λειτουργίας. Μια μονή οπτική ροή ή δύο ανεξάρτητες οπτικές ροές μπορούν να παραχθούν με αυθαίρετη διαμόρφωση mQAM, ρυθμό συμβόλων και μήκος κύματος του φέροντος.



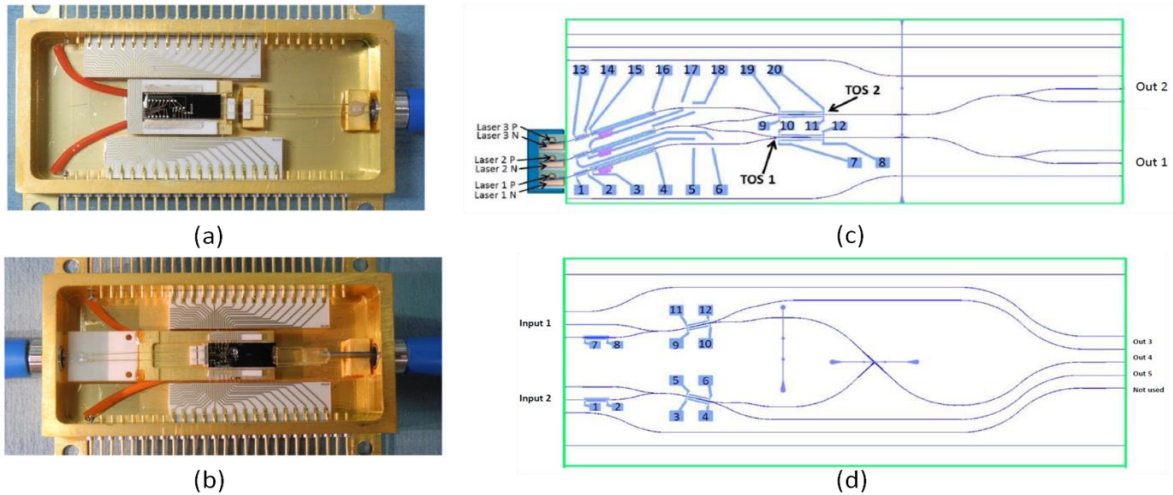
Εικόνα 4.35: Καθεστάτα λειτουργίας για την επίδειξη της λειτουργίας πολλαπλών ροών υποστηριζόμενα από την προτεινόμενη συσκευή 3. Ο SDO agent διασυνδέεται άμεσα με τους θερμο-οπτικούς διακόπτες των παθητικών πολυμερικών δομών (polyboards) και με τα ηλεκτρόδια των φραγμάτων περίθλασης Bragg των InP chips κέρδους της μονάδας πομπού και επίσης με τα ευέλικτα WSSs για τη ρύθμιση του προτεινόμενου οπτικού κόμβου.

Οι παραπάνω περιπτώσεις λειτουργίας που απεικονίζονται στην εικόνα 4.35 επισημαίνονται με κόκκινο και μπλε χρώμα. Για την περίπτωση 1, μια οπτική ροή παράγεται βάσει του ελέγχου του ρεύματος έκχυσης στο InP chip κέρδους και του ρεύματος του φράγματος περίθλασης Bragg για την πηγή λέιζερ 1, τους ρυθμιζόμενους οπτικούς συζεύκτες TOS1 και TOS3 και τα ηλεκτρόδια μετατόπισης φάσης του άνω IQ-MZM μέσω της υλοποιημένης SDO πλατφόρμας. Ο SDO agent είναι επίσης υπεύθυνος για τη ρύθμιση της θύρας του WSS (θύρα #1), της ζώνης διέλευσης πλάτους του, το αντίστοιχο κανάλι ITU με βάση το μήκος κύματος της οπτικής ροής και το αντίστοιχο επίπεδο εξασθένησης (μηδενική εξασθένηση αντιστοιχεί σε πλήρως επιτρεπτή μετάδοση της παραγομένης οπτικής ροής). Το πλάτος ζώνης διέλευσης ορίζεται με βάση τον αριθμό των μικρότερων επιτρεπτών διαστημάτων συχνότητας πλάτους 12.5 GHz με τουλάχιστον 4 συνεχόμενα διαστήματα που ορίζουν ένα κανάλι πλάτους 50 GHz.

Για την περίπτωση 2, μια παρόμοια διαδικασία ακολουθείται για τον έλεγχο του ρεύματος του InP chip κέρδους και του ρεύματος που ελέγχει τη λειτουργία του φράγματος περίθλασης Bragg για την πηγή λέιζερ 3, των ρυθμιζόμενων οπτικών συζευκτών TOS2 και TOS4 και τα ηλεκτρόδια μετατόπισης φάσης για τον IQ-MZM που βρίσκεται στην κάτω πλευρά του πομπού. Κατά τον ίδιο τρόπο, η διαμόρφωση των θυρών εισόδου/εξόδου του WSS αφορά την έξοδο 3 της μονάδας του πομπού, η οποία συνδέεται με τη θύρα #3 του WSS, ρυθμιζόμενη μέσω της διεπαφής SDO.

Για την περίπτωση 3, ο SDO agent ρυθμίζει το απαιτούμενο ρεύμα για το InP chip κέρδους 2 και τα αντίστοιχα ρεύματα για το φράγμα περίθλασης Bragg, τους ρυθμιζόμενους συζεύκτες TOS1, TOS2, TOS3 και TOS4 και τα ηλεκτρόδια φάσης τόσο του άνω όσο και του κάτω IQ-MZMs. Η οπτική ροή διπλής πόλωσης μεταδίδεται από την έξοδο 2 της μονάδας του πομπού και λειτουργεί ως σήμα εισόδου της θύρας #2 του WSS.

Για την περίπτωση 4, ο SDO agent ρυθμίζει τις πηγές λέιζερ 1 και 3, τους ρυθμιζόμενους συζεύκτες TOS1-TOS4 και τα ηλεκτρόδια μετατόπισης φάσης τόσο για τον άνω όσο και τον κάτω IQ-MZM. Οι δύο οπτικές ροές παράγονται στην έξοδο 1 και έξοδος 3 της μονάδας πομπού και τροφοδοτούν τις θύρες #1 και #3 του WSS, οι οποίες καθορίζονται κατάλληλα μέσω της SDO διεπαφής. Στην περίπτωση αυτή, η παραγόμενη οπτική ροή μεταδίδεται με τη μορφή ενός υπερ-καναλιού. Οι παράμετροι της περίπτωση 5 είναι παρόμοιοι με την περίπτωση 4 με τη διαφορά όμως ότι οι δύο οπτικές ροές που είναι παρούσες στις εξόδους 1 και 3 του πομπού μεταδίδονται ως δύο ανεξάρτητες οπτικές ροές.



Εικόνα 4.36: Back-end και front-end συσκευές μονάδας 0. (a-b) Συσκευασμένες συσκευές και οι αντίστοιχες μάσκες σχεδίασης τους (c-d).

Η πρώτη επίδειξη της απόδειξης της έννοιας των δυνατοτήτων των ευέλικτων μονάδων πολλαπλών ροών βασίζεται στη χρήση μιας μονάδας προδρόμου οριζόμενη ως μονάδα 0, η οποία έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό. Η μονάδα 0 περιλαμβάνει δύο συσκευασμένες συσκευές καθεμιά από τις οποίες αποτελείται από τα οπίσθια (back-end) και εμπρόσθια (front-end) παθητικά πολυμερικά chips, τα οποία έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί για την προαναφερθείσα μονάδα 3. Η εικόνα 4.36 απεικονίζει τα σχέδια της μάσκας της back-end και front-end τυποποιημένης μονάδας 0 και τις αντίστοιχες συσκευασμένες συσκευές.

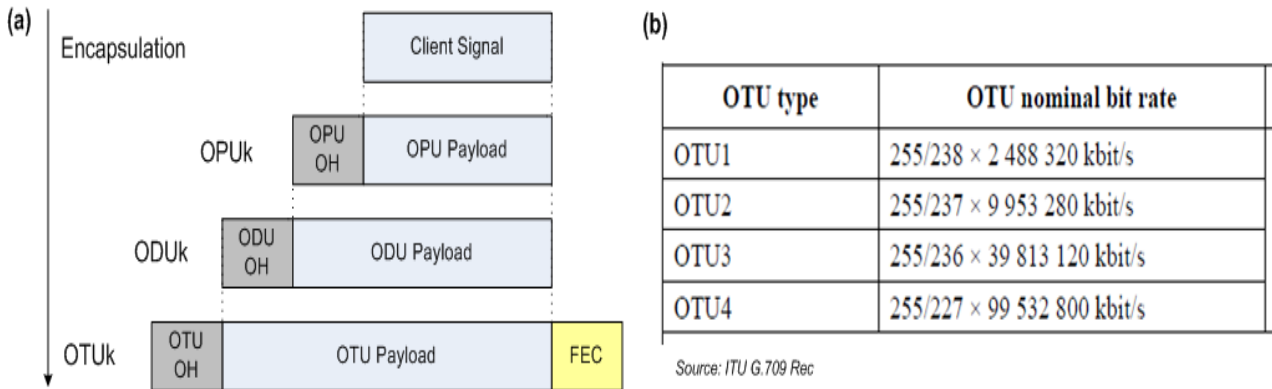
Η back-end μονάδα 0 περιλαμβάνει τα ολοκληρωμένα InP chips κέρδους ενωμένα με την τεχνική butt-coupling με την παθητική πολυμερική δομή με τους κυματοδηγούς εισόδου και τους ρυθμιζόμενους θερμο-οπτικούς διακόπτες εισόδου (TOSs). Από την άλλη πλευρά, η front-end μονάδα 0 περιλαμβάνει την παθητική πολυμερική δομή με τους κυματοδηγούς εξόδου και τους ρυθμιζόμενους θερμο-οπτικούς διακόπτες εξόδου μαζί με τα παθητικά πολωτικά στοιχεία. Όπως θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 5, τα πειράματα για την επίδειξη της λειτουργικότητας των πολλαπλών ροών βασίζονται στη χρήση αυτών των δύο συσκευών και στη χρήση εξωτερικών LiNbO₃ IQ MZMs εξομοιώνοντας τη λειτουργία των IQ διαμορφωτών, οι οποίοι θα ενσωματωθούν στην προαναφερθείσα ολοκληρωμένη συσκευή 3.

4.21 Επεξεργαστής OTN

Το OTN (Optical Transport Network) όπως αναλύθηκε εκτενώς στην ενότητα 4.16, είναι μια νέα τεχνολογία μεταφοράς για οπτικά δίκτυα που σχεδιάστηκε για να καλύψει το κενό μεταξύ της αύξησης του ρυθμού μετάδοσης της γραμμής πληροφοριών που υπαγορεύεται από την εμφάνιση νέων υπηρεσιών διαδικτύου και από τις έννοιες των ευέλικτων οπτικών δικτύων και των ευφυή προγραμματιζόμενων δικτύων (SDN) και από τους μη εξελισσόμενους ρυθμούς μεταγωγής που παρέχονται από τα δίκτυα SDH/SONET. Επιπλέον, το OTN σχεδιάστηκε για να προσφέρει προηγμένες λειτουργίες όσον αφορά την απόδοση μετάδοσης και τις δυνατότητες λειτουργίας και συντήρησης. Τα κύρια πλεονεκτήματά του είναι η συμπερίληψη ισχυρότερων FEC (εμπρόσθια διόρθωση σφαλμάτων) προσφέροντας έως και 6.2 dB κέρδος κωδικοποίησης, μέχρι και έξι επίπεδα παρακολούθησης της αλυσωτής σύνδεσης (tandem connection monitoring, TCM), η οποία επιτρέπει την παρακολούθηση από σημείο σε σημείο (end-to-end) και την ποιότητα των λειτουργιών των υπηρεσιών, ακόμη και όταν τα δεδομένα πληροφορίας των πελατών περνούν μέσα από το δίκτυο άλλου φορέα/διαχειριστή, καθώς και τη μετάδοση τυχόν σημάτων των πελατών χωρίς να αφαιρείται η αντίστοιχη επιβάρυνση της πληροφορίας και η επεκτασιμότητα μεταγωγής μέσω της χαρτογράφησης του και οι αρχές πολυπλεξίας.

Χαρτογράφηση και ενθυλάκωση OTN

Ο επεξεργαστής OTN έχει υλοποιηθεί στο πρόγραμμα Matlab [245] και οι κύριες λειτουργίες του αφορούν το ρυθμό προσαρμογής των σημάτων πελάτη μέσω της χαρτογράφησης και ενθυλάκωσης τους σε κλωβούς μεταφοράς OTN με βάση την ιεραρχία OTN και την ένταξη του FEC. Η ιεραρχία OTN απεικονίζεται στην εικόνα 4.37 (a) και τα αντίστοιχα είδη και ποσοστά OTU απεικονίζονται στην εικόνα 4.37 (b).



Εικόνα 4.37: (a) Ιεραρχία OTN και (b) τύποι OTU με τους αντίστοιχους ονομαστικούς ρυθμούς μετάδοσης (ITU-T G.709).

Πιο συγκεκριμένα, το σήμα του πελάτη μπορεί να είναι οποιοδήποτε σήμα πελάτη προερχόμενο από το δίκτυο (SONET/SDH, Ethernet), το οποίο πρώτα ενθυλακώνεται σε ένα πλαίσιο OPUk με χαρτογράφηση των δεδομένων πελάτη στο ωφέλιμο φορτίο OPU, περιλαμβάνοντας επίσης την επιβάρυνση OPU (overhead, OH). Στη συνέχεια, το πλαίσιο OPUk αντιστοιχείται με το ωφέλιμο φορτίο ODUk συμπεριλαμβανομένης της επιβάρυνσης ODUk OH. Τέλος, το πλαίσιο ODUk ενθυλακώνεται με το ωφέλιμο φορτίο OTUk μαζί με την OTUk OH. Τα bytes ελέγχου ισοτιμίας FEC υπολογίζονται από την επιβάρυνση OTUk και από τα OTUk bytes ωφέλιμου φορτίου πληροφοριών με βάση την κωδικοποίηση Reed Solomon. Τα πλαίσια OTUk αντιστοιχούν σε ένα οπτικό κανάλι (OCh), το οποίο στη συνέχεια διαμορφώνεται σε ένα οπτικό κανάλι-φορέα (OCC) πάνω σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Οι τέσσερις τύποι πλαισίων OTU ανάγονται σε ρυθμούς μεταφοράς μέχρι 100G (OTU4).

Το OTN κάνει χρήση των πλαισίων δεδομένων με σταθερό μήκος σε αντίθεση με το SONET/SDH, στο οποίο το μήκος του πλαισίου δεδομένων αλλάζει σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Η δομή ενός πολλαπλού OTN απεικονίζεται στην εικόνα 4.38. Κάθε πολλαπλό OTUk αποτελείται από τέσσερις σειρές και 4080 στήλες από τις οποίες οι 16 πρώτες στήλες είναι αφιερωμένες στα πεδία επιβάρυνσης OPUk, ODUk και OTUk, οι στήλες 17 έως 3824 είναι αφιερωμένες στα bytes ωφέλιμου φορτίου πληροφορίας και οι στήλες 3825-4080 αφιερωμένες στα 256 bytes ισοτιμίας FEC. Το σήμα ευθυγράμμισης πλαισίου (Frame Alignment Signal, FAS) αποτελείται από ένα σήμα επιβάρυνσης (OH) έξι bytes οριζόμενο στη γραμμή 1 και στήλες 1 έως 6 όπως, Byte1: OA1, Byte2: OA1, Byte3: OA1, Byte4: OA2, Byte5: OA2, Byte6: OA2, όπου OA1 είναι «1111 0110» και OA2 είναι «0010 1000». Το σήμα ευθυγράμμισης πολλαπλού πλαισίου (MultiFrame Alignment Signal, MFAS) ορίζεται στη γραμμή 1 και στήλη 7 ως ένα μόνο byte που χρησιμοποιείται για διαδοχική αρίθμηση των πολλαπλών πλαισίων OTUk σε περίπτωση που ένα ή περισσότερα πεδία επιβάρυνσης εκτείνονται σε πολλαπλά πλαίσια. Το MFAS χρησιμοποιείται επίσης στην διαδικασία πολυπλεξίας του OTN. Η OTUk OH περιέχει πληροφορίες για τις λειτουργίες και τη συντήρηση, όπως η παρακολούθηση τμημάτων και σήματα εντοπισμού σφαλμάτων. Η ODUk OH περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις λειτουργίες παρακολούθησης διαδρομών και της αλυσωτής σύνδεσης και η OPUk OH περιέχει πληροφορίες σχετικά με την αλληλοσύνδεση (δομή αναγνώρισης ωφέλιμου φορτίου-Payload Structure Identifier, PSI) και το είδος των σημάτων πελάτη (τύπος ωφέλιμου φορτίου-Payload Type, PT). Αναλυτικές πληροφορίες για τα πεδία επιβάρυνσης OTUk, ODUk και OPUk μπορούν να βρεθούν στο ITU-T G.709 Rec. στο κεφάλαιο 15 [242]. Η σειρά μετάδοσης των bytes που περιέχονται σε κάθε πολλαπλό πλαίσιο OTN είναι από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Μέσα σε κάθε byte τα πιο σημαντικά bits (most significant bits, MSB) μεταδίδονται πρώτα και ακολουθούν τα λιγότερο σημαντικά bit (least significant bits, LSB).

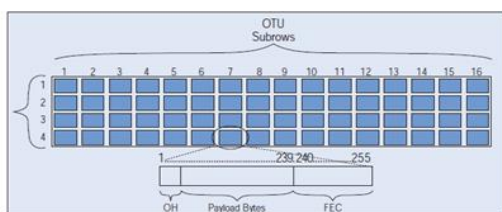
Η πρώτη εφαρμογή του επεξεργαστή OTN λαμβάνει υπόψη ένα δοκιμαστικό σήμα ψευδοτυχαίας δυαδικής ακολουθίας (PRBS) ως σήμα πελάτη. Ο τύπος του ωφέλιμου φορτίου είναι της μορφής "1 1 1 1 1



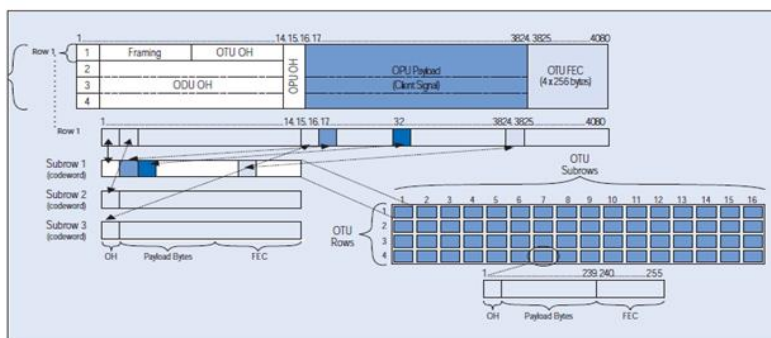
Εικόνα 4.38: Δομή πολλαπλού πλαισίου OTN.

1 1 0". Τα bits δεδομένων πελάτη οργανώνονται σε οκτάδες και κάθε οκτάδα καταλαμβάνει μία θέση byte στην περιοχή ωφέλιμου φορτίου OTUk με βάση την καθορισμένη σειρά μετάδοσης. Στο Matlab κάθε πολλαπλό πλαίσιο OTUk υλοποιείται ως μία συστοιχία κελιών, στην οποία κάθε κελί περιλαμβάνει 8 bits. Στην περίπτωση που η τελευταία οκτάδα δεν έχει συμπληρωθεί με 8 bits τα υπόλοιπα δυαδικά ψηφία συμπληρώνονται με μηδενικά. Το ίδιο γίνεται για τυχόν θέσεις byte στο ωφέλιμο φορτίο OTUk, οι οποίες παραμένουν αχρησιμοποίητες. Κάθε φορά που η περιοχή ωφέλιμου φορτίου OTUk είναι γεμάτη με bytes πληροφορίας δεδομένων του σήματος του πελάτη, ένα νέο πλαίσιο OTUk δημιουργείται με αυξανόμενη αρίθμηση πλαισίου. Όπως αναφέρθηκε ήδη, ορισμένα πεδία επιβάρυνσης υπολογίζονται σε πολλαπλά OTUk πολλαπλών πλαισίων, όπως για παράδειγμα το σήμα κώδικα ανίχνευσης σφαλμάτων ενός byte για κάθε πεδίο παρακολούθησης της αλυσωτής σύνδεσης, το οποίο βασίζεται σε κώδικα ισοτιμίας διεμπλεκόμενων bit (bit-interleaved-parity-8) (πεδίο BIP-8) το οποίο περιέχεται στο ODUk OH. Οι τιμές επιβάρυνσης έχουν υπολογιστεί με βάση τα στοιχεία που παρέχονται στην πρόταση ITU-T G.709 [242].

Το FEC βασίζεται στη χρήση του αλγόριθμου (n,k) Reed Solomon για να υπολογίσει τον αριθμό $n-k=2t$ συμβόλων ισοτιμίας. Η δυνατότητα του FEC εντοπίζεται στο γεγονός ότι μπορεί να διορθώσει μέχρι t σύμβολα, τα οποία περιέχουν λάθη σε μια κωδική λέξη n -συμβόλων. Στην περίπτωση αυτή, το πρωτόκολλο FEC βασίζεται σε κώδικες (255,239) RS που διεμπλέκουν ένα byte επιβάρυνσης και 238 bytes δεδομένων για τον υπολογισμό 16 bytes ισοτιμίας και, ως εκ τούτου αποδίδουν μπλοκ 255-byte το καθένα, περιλαμβάνοντας μια κωδική λέξη. Ο αποκωδικοποιητής FEC βασισμένος στην κωδικοποίηση (255,239) RS έχει την ικανότητα να διορθώσει μέχρι και 8 λάθη συμβόλων ή $8*8=64$ bits.



(a)



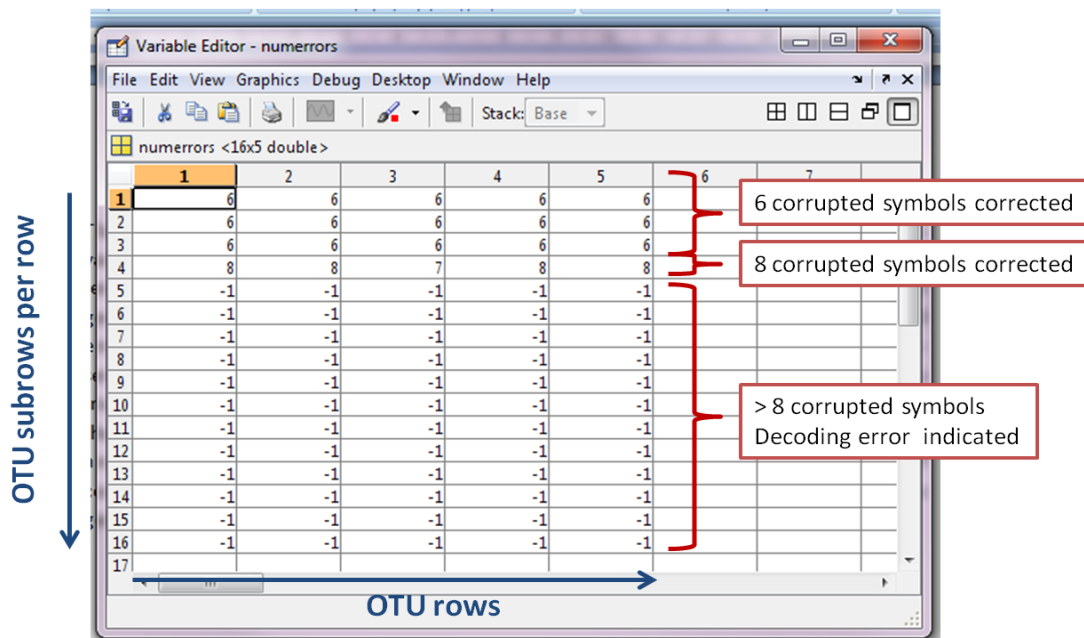
(b)

Εικόνα 4.39: Επεξεργασία FEC βασισμένη στους κώδικες (255,239) Reed Solomon.

Η διαδικασία επεξεργασίας FEC έχει εφαρμοστεί διαιρώντας κάθε σειρά του πολλαπλού πλαισίου OTUk σε 16 υποσειρές όπως φαίνεται στην εικόνα 4.39 (a). Κάθε υποσειρά διεμπλέκει ένα byte και 238 bytes δεδομένων πληροφορίας επί των οποίων υπολογίζονται 16 bytes FEC ισοτιμίας, όπως περιγράφεται παραπάνω. Η διαδικασία διεμπλοκής απεικονίζεται στην εικόνα 4.39 (b). Η πρώτη υποσειρά διεμπλέκει το πρώτο μεταδιδόμενο byte επιβάρυνσης και το πρώτο μεταδιδόμενο byte δεδομένων, η δεύτερη διεμπλέκει το δεύτερο μεταδιδόμενο byte επιβάρυνσης και το δεύτερο μεταδιδόμενο byte δεδομένων, και ούτω καθεξής μέχρι τη δέκατη έκτη υποσειρά. Τα bytes ισοτιμίας FEC που υπολογίζονται πάνω από κάθε υποσειρά τοποθετούνται στην κατάλληλη θέση στην περιοχή OTUk FEC βασισμένα στον ίδιο μηχανισμό διεμπλοκής.

Η υλοποίηση του επεξεργαστή OTN στο Matlab αποθηκεύει τις λέξεις-μήνυμα που δημιουργούνται σε μια μεταβλητή, προκειμένου να τις συγκρίνει με τις αποκωδικοποιημένες κωδικό-λέξεις στην πλευρά του δέκτη. Για τους σκοπούς της δοκιμής, έχει δημιουργηθεί ένα σήμα πελάτη με βάση ένα περιοδικό σήμα δεδομένων PRBS-15 (8 περίοδοι) και αντιστοιχίζεται σε μια δομή πολλαπλού 2-πλασιού OTUk (2-frame) μέσω της διαδικασίας χαρτογράφησης OTN και της διαδικασίας ενθυλάκωσης που περιγράφεται στην εικόνα 4.37 (a). Τα δεδομένα πληροφορίας καταλαμβάνουν τις τέσσερις σειρές του πρώτου πολλαπλού πλαισίου OTN και της πρώτης σειράς του δεύτερου πολλαπλού πλαισίου OTN. Οι τρεις τελευταίες σειρές

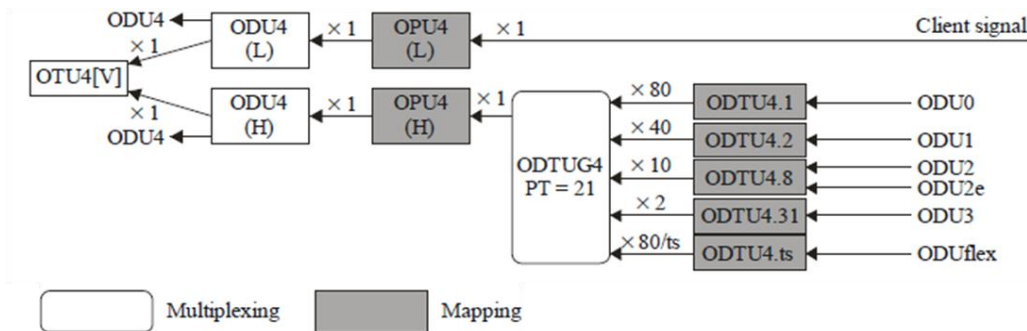
της δεύτερης δομής του πολλαπλού πλαισίου γεμίζεται με μηδενικά. Το σήμα μεταδίδεται ως πολλαπλού 2-πλασίου μπλοκ δεδομένων, αφού περάσει μέσα από τη διαδικασία σειριοποίησης/αποσειριοποίησης (serializer/deserializer, SERDES) που εκτελεί παράλληλη σε σειριακή μετατροπή των δεδομένων. Η εισαγωγή των σφαλμάτων κατά μήκος του καναλιού μετάδοσης προσομοιώνεται μέσω μιας συνάρτησης θορύβου η οποία παράγει έναν ορισμένο αριθμό σφαλμάτων ανά μεταδιδόμενη κωδική-λέξη. Στην πλευρά του δέκτη, η δομή πολλαπλού 2-πλασίου κατασκευάζεται εκ νέου από τα ληφθέντα δεδομένα μετά τη διέλευση πάλι από το SERDES για σειριακή σε παράλληλη μετατροπή και στη συνέχεια τροφοδοτεί τον αποκωδικοποιητή Reed Solomon. Ο αποκωδικοποιητής ανακτά τις αποκωδικοποιημένες λέξεις-μήνυμα και διορθώνει τα κατεστραμμένα σύμβολα σε περίπτωση που ο αριθμός των σφαλμάτων είναι χαμηλότερος από το μέγιστο αριθμό των λαθών που ο αποκωδικοποιητής μπορεί να χειριστεί. Κατά την έξοδο, επιστρέφει μια μεταβλητή που ονομάζεται *numerrors* που δείχνει τον αριθμό των διορθωμένων σφαλμάτων ανά μεταδιδόμενη υποσειρά από τις 16 μεταδιδόμενες υποσειρές ανά σειρά OTU ενός πολλαπλού πλαισίου OTN. Η εικόνα 4.40 απεικονίζει μία εκτύπωση οθόνης της μεταβλητής *numerrors* της εξόδου η οποία υποδεικνύει ότι οι υποσειρές OTU 1 έως 4 έχουν επιτυχώς αποκωδικοποιηθεί και μπορούν να διορθωθούν μέχρι 8 σφάλματα στα σύμβολα με τη βοήθεια της κωδικοποίησης FEC. Η αποκωδικοποίηση της μεταδιδόμενης πληροφορίας που περιέχεται στις υποσειρές OTU 5-16 ανέδειξε ένα σφάλμα αποκωδικοποίησης και το FEC απέτυχε να διορθώσει τα κατεστραμμένα σύμβολα, τα οποία σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πάνω από 8 ξεπερνώντας το ανώτατο όριο του.



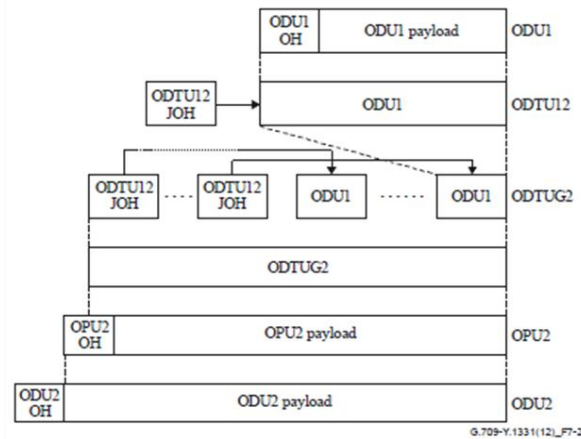
Εικόνα 4.40: Διόρθωση σφαλμάτων των κατεστραμμένων συμβόλων μέσω των κωδικών RS (255,239) του FEC. Η μεταβλητή *numerrors* δείχνει τον αριθμό των διορθωμένων σφαλμάτων ανά μεταδιδόμενη υποσειρά OTU μιας δομής πολλαπλού 2-πλασίου. Η έξοδος -1 αντιστοιχεί σε ένα σφάλμα αποκωδικοποίησης στην περίπτωση που ο αριθμός ή τα κατεστραμμένα σύμβολα είναι μεγαλύτερα από τις δυνατότητες του FEC.

Αρχές OTN πολυπλεξίας

Η χαρτογράφηση ενός σήματος πελάτη σε ένα πλαίσιο ODU γίνεται μέσω δύο διαδικασιών. Η πρώτη μέθοδος έχει ήδη συζητηθεί στις προηγούμενες παραγράφους, στην οποία χρησιμοποιείται μία απλή διαδικασία ενθυλάκωσης για τη χαρτογράφηση του σήματος πελάτη σε ένα OPUk, ODUK και στη συνέχεια σε ένα OTUK. Η δεύτερη διαδικασία στηρίζεται στην πολυπλεξία αρκετών ODUs χαμηλότερου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων ODU που θα αντιστοιχεί στη συνέχεια στο OTUK συμπεριλαμβανομένων όλων των κατάλληλων πληροφοριών επιβάρυνσης. Το τελευταίο επιτυγχάνεται μέσω της χαρτογράφησης του αντίστοιχου χαμηλότερου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων ODU σε μια βοηθητική οπτική μονάδα ωφέλιμου φορτίου δεδομένων (Optical Data Unit Tributary, ODTU) και με την ενθυλάκωση των ευθυγραμμισμένων bytes επιβάρυνσης (justification overhead bytes, JOH), τα οποία με τη σειρά τους πολυπλέκονται σε μια ομάδα βοηθητικών οπτικών μονάδων δεδομένων (optical Data Tributary Unit Group, ODTUG). Η ODTUG στη συνέχεια αντιστοιχίζεται σε μεγαλύτερης τάξης OPU και ακολουθεί την τυπική διαδικασία ενθυλάκωσης για την ένταξη της ODU και των πληροφοριών επιβάρυνσης OTU καθώς και το FEC.



(a)

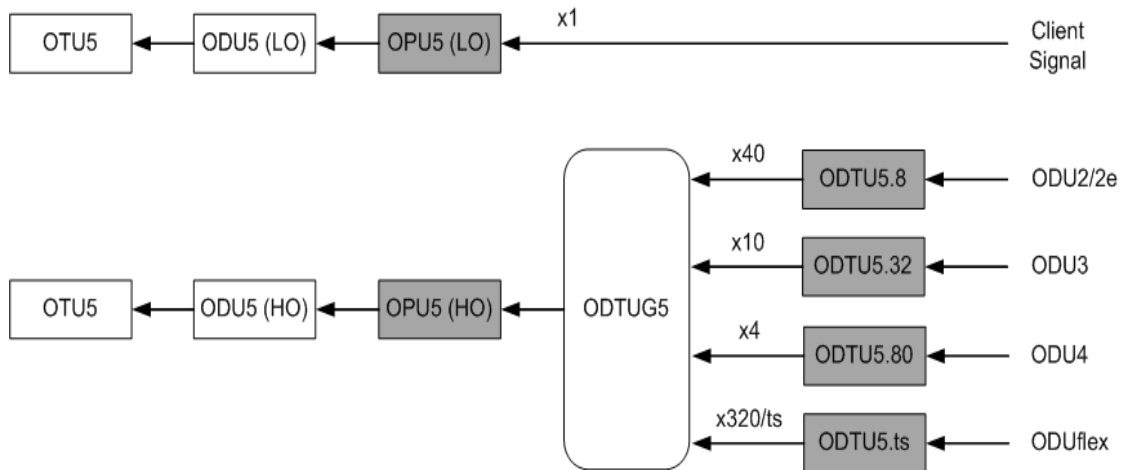


(b)

Εικόνα 4.41: (a) Χαρτογράφηση OTN και αρχές πολυπλεξίας, (b) πολυπλεξία ενός ODU1 σε ODU2 μέσω ODTUG2. [ITU-T G.709 Rec [242]]

Η εικόνα 4.41 απεικονίζει την χαρτογράφηση OTN και τους μηχανισμούς πολυπλεξίας μέσω δύο τυπικών παραδειγμάτων. Η εικόνα 4.41 (a) δείχνει ότι ένα OTU4 μπορεί να παραχθεί είτε μέσω χαρτογράφησης ενός αυθαίρετου σήματος πελάτη σε ένα χαμηλότερης τάξης OPU4 και στη συνέχεια να συμπεριλάβει όλα τα αναγκαία ODU και OTU bytes επιβάρυνσης και τα FEC bytes, ή μέσω πολυπλεξίας διάφορων συνδυασμών ODUs μέχρι ODU3 μέσω ODU χαρτογράφησης στα κατάλληλα ODTUs και ODTUG πολυπλεξίας. Το παράδειγμα δείχνει ότι η πολυπλεξία ODU μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρτογραφηθούν έως ογδόντα ODU0s ή έως σαράντα ODU1s ή έως δέκα ODU2s ή μέχρι δύο ODU3s ή μέχρι 80/ts ODUflex, όπου ts είναι ο αριθμός των 1.25G εισφέρουσων θυρίδων που περιέχονται στο ODUflex (π.χ. ένα σήμα πελάτη 25G αντιστοιχίζεται σε ένα ODUflex μεταφέροντας 20 εισφέρουσες θυρίδες 1.25G και ως εκ τούτου μέχρι τέσσερα ODUflex μπορούν να πολυπλέκονται χρονικά με ένα ODU4) στο κατάλληλο ODTU4 και στη συνέχεια να πολυπλέκονται χρονικά με το ODTUG4. Η εικόνα 4.41 (b) απεικονίζει την αρχή της πολυπλεξίας ODU για την χαρτογράφηση τεσσάρων ODU1s σε ODU2 μέσω του ODTUG2 και την ενθυλάκωση των ευθυγραμμισμένων bytes επιβάρυνσης (JOH bytes).

Οι προτεινόμενοι ευέλικτοι πομποδέκτες στοχεύουν σε ρυθμούς μετάδοσης 400 Gb/s μέχρι 1 Tb/s. Τα 400 Gb/s αναμένονται να είναι το επόμενο πρότυπο και το μονοπάτι προς το 1 Tb/s. Ένα επιπλέον OPU για να μεταφέρει σήματα 400G θα είναι απαραίτητο να τυποποιηθεί το οποίο εδώ έχει οριστεί ως OPU5. Το OPU5 αντιστοιχίζεται σε ένα ODU5 και τελικά σε ένα OTU5, μετά την τυπική διαδικασία ενθυλάκωσης που απεικονίζεται στην εικόνα 4.37 (a). Το OTU5 θα δημιουργηθεί είτε μέσω χαρτογράφησης ενός 400G σήματος πελάτη σε OPU5 χαμηλής τάξης (low order, LO) ή μέσω χαρτογράφησης των διάφορων χαμηλής τάξης ODUs (μέχρι ODU4) σε ODTU5.ts και χρονική πολυπλεξία των ODTU5.ts μέσω ODTUG5. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.42, έως σαράντα ODU2s ή έως δέκα ODU3s ή έως τέσσερα ODU4s ή έως 320/ts ODUflex μπορούν να χαρτογραφηθούν σε αντίστοιχο ODTU5 και στη συνέχεια πολυπλέκονται χρονικά μέσω του ODTUG5. Στην τελευταία περίπτωση, το ODUflex μπορεί να οριστεί ως ένα σήμα 50G (δηλαδή ts ισούται με 40 εισφέρουσες θυρίδες 1.25G και επομένως οκτώ ODUflex θα αντιστοιχίζονται σε ένα ODTU5.8 και στη συνέχεια θα πολυπλέκονται χρονικά μέσω ενός ODTUG5), εναλλακτικά, το ODUflex μπορεί να οριστεί ως ένα σήμα 200G (δηλαδή ts ισούται με 160 εισφέρουσες θυρίδες 1.25G και ως εκ τούτου δύο ODUflex θα αντιστοιχίζονται σε ένα ODTU5.2 και στη συνέχεια θα πολυπλέκονται χρονικά μέσω ODTUG5).

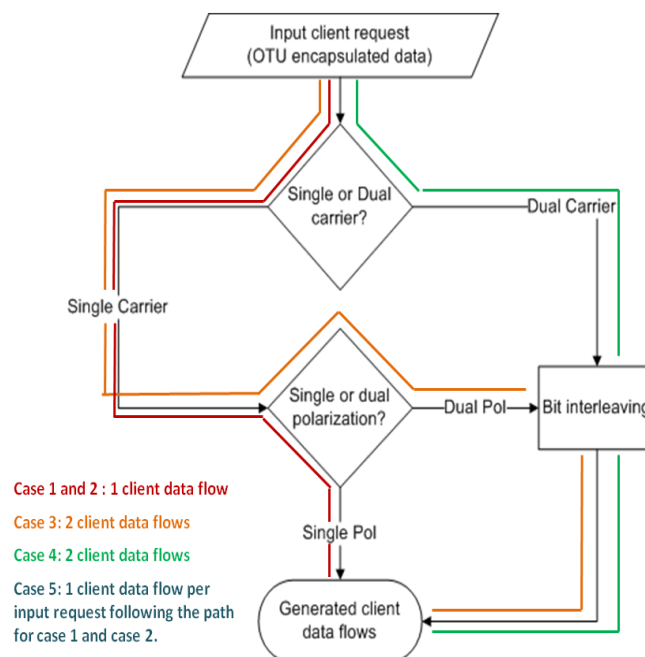


Εικόνα 4.42: Χαρτογράφηση OTN και εφαρμογή πολυπλεξίας για την παραγωγή πολυπλεγμένου σήματος 400G OTU5.

Ως εκ τούτου, ο επεξεργαστής OTN επεξεργάζεται κάθε αίτημα πελάτη ανεξάρτητα, προκειμένου να χαρτογραφήσει τα δεδομένα του πελάτη με το κατάλληλο ODU με βάση τις αρχές χαρτογράφησης και πολυπλεξίας που έχουν ήδη περιγραφεί και θα δημιουργήσει επίσης τα bytes ιστιμίας FEC που θα χρησιμοποιηθούν για τη διόρθωση σφαλμάτων των κατεστραμμένων συμβόλων κατά μήκος του καναλιού μετάδοσης. Τα ενθυλακωμένα δεδομένα του πελάτη στη συνέχεια θα οργανώνονται κατάλληλα στο διανομέα ροής σύμφωνα με τον τύπο (μονού ή διπλού φέροντος) και το σχήμα διαμόρφωσης (μονής ή διπλής πόλωσης με διαμόρφωση mQAM) της οπτικής ροής που θα δημιουργηθεί στην έξοδο των ευέλικτων πομπών.

4.22 Υλοποιημένος Διανομέας Ροής OTN

Ο διανομέας ροής λαμβάνει τα ενθυλακωμένα δεδομένα από τον επεξεργαστή OTN για κάθε αίτημα του πελάτη και είναι υπεύθυνος για τη διανομή τους στις κατάλληλες ηλεκτρικές ροές δεδομένων πελάτη που τελικά θα οδηγήσουν τους οπτικούς διαμορφωτές των προτεινόμενων οπτικών συσκευών. Με βάση τα σενάρια λειτουργίας που περιγράφονται στην ενότητα 4.19, τα δεδομένα ενός μόνο αιτήματος πελάτη μπορούν να εξυπηρετηθούν από μια μονή οπτική ροή σε ένα φέρον και διαμόρφωση mQAM μονής πόλωσης (περίπτωση 1 και την περίπτωση 2), ή από οπτική ροή βασισμένη στη διαμόρφωση mQAM διπλής πόλωσης (περίπτωση 3), ή, τέλος, από μια οπτική ροή επιμερισμένη μεταξύ δύο φερόντων και διαμόρφωσης mQAM μονής πόλωσης (περίπτωση 4). Η εικόνα 4.43 απεικονίζει το διάγραμμα λειτουργίας του διανομέα ροής.



Εικόνα 4.43: Διάγραμμα λειτουργίας του διανομέα ροής. Κάθε αίτηση πελάτη εισέρχεται στο διανομέα ροής υπό τη μορφή ενθυλακωμένων δεδομένων OTU, τα οποία κατόπιν υποβάλλονται σε επεξεργασία με βάση τον αριθμό των οπτικών φερόντων και του σχήματος πολυπλεξίας πόλωσης της αντίστοιχης οπτικής ροής, ώστε να παράγουν τις κατάλληλες ροές δεδομένων πελάτη που θα οδηγήσουν τα IQ MZMs των ευέλικτων προτεινόμενων οπτικών μονάδων.

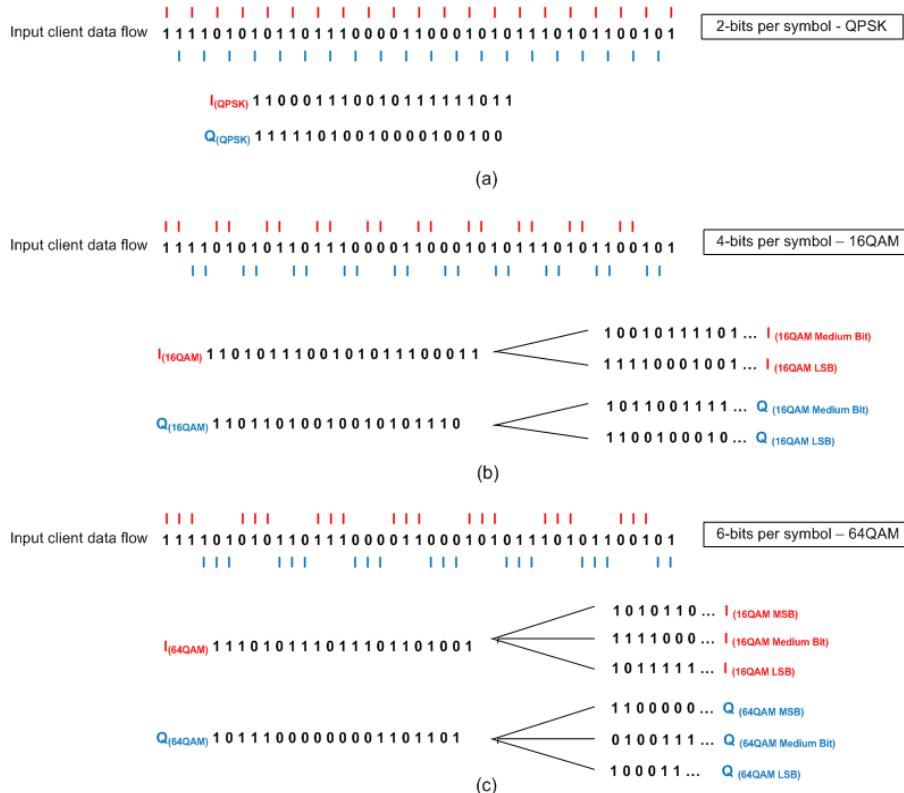
Το διάγραμμα δείχνει τα βήματα που πρέπει να ακολουθούνται για τις υποστηριζόμενες περιπτώσεις λειτουργίας για την προτεινόμενη μονάδα πομπού 3.

Πιο συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις 1 και 2 (όπως αναλύθηκαν στην ενότητα 4.19), τα ενθυλακωμένα δεδομένα απεικονίζονται απευθείας σε μια εξερχόμενη ροή δεδομένων πελάτη χωρίς καμία περαιτέρω επεξεργασία. Στην περίπτωση 3, τα ενθυλακωμένα δεδομένα πελάτη διεμπλέκονται σε επίπεδο bit προκειμένου να παραχθούν δύο ροές δεδομένων πελάτη που καθεμιά από αυτές θα χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση οπτικού φέροντος σε κάθε κατάσταση πόλωσης. Ουσιαστικά, η πρώτη ροή δεδομένων πελάτη θα χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση του άνω IQ MZM της συσκευής 3 και η δεύτερη ροή δεδομένων πελάτη θα χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση του κάτω IQ MZM της ίδιας συσκευής.

Στην περίπτωση 4, τα ενθυλακωμένα δεδομένα πελάτη διεμπλέκονται σε επίπεδο bit προκειμένου να παραχθούν δύο ροές δεδομένων πελάτη, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση δύο οπτικών φερόντων της παραγόμενης οπτικής ροής. Τέλος, στην περίπτωση που δύο ανεξάρτητες οπτικές ροές δημιουργούνται από δύο αιτήματα ανεξάρτητων πελάτων (περίπτωση 5), η παραπάνω διαδικασία εκτελείται στο διανομέα ροής για κάθε εισερχόμενο αίτημα πελάτη ξεχωριστά. Ωστόσο, η συσκευή 3 έχει την ικανότητα να παράγει δύο ανεξάρτητες οπτικές ροές μεταφερόμενες μόνο σε ένα οπτικό φέρον μονής πόλωσης ανά οπτική ροή. Ως εκ τούτου, κάθε ανεξάρτητο αίτημα πελάτη αντιμετωπίζεται όπως στις περιπτώσεις 1 και 2. Επιπροσθέτως, η περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων που περιέχονται σε κάθε ροή δεδομένων πελάτη γίνεται από τον προκωδικοποιητή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την οργάνωση των δεδομένων των εισερχόμενων ροών πελάτη σύμφωνα με το επιλεγμένο σχήμα διαμόρφωσης mQAM.

4.23 Λειτουργία Προκωδικοποιητή OTN

Ο προκωδικοποιητής είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία των κατάλληλων μοτίβων για τις ηλεκτρικές ακολουθίες NRZ που θα τροφοδοτούν τις εισόδους των SPDACs στο εσωτερικό των προτεινόμενων ευέλικτων συσκευών σύμφωνα με το επιλεγμένο σχήμα διαμόρφωσης mQAM. Κάθε ροή δεδομένων πελάτη θα διεμπλέκεται σε επίπεδο bit προκειμένου να δημιουργηθούν οι ψηφιακές ροές δεδομένων για τις συνιστώσες της φάσης (I) και του πλάτους (Q) της διαμόρφωσης mQAM, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.44.



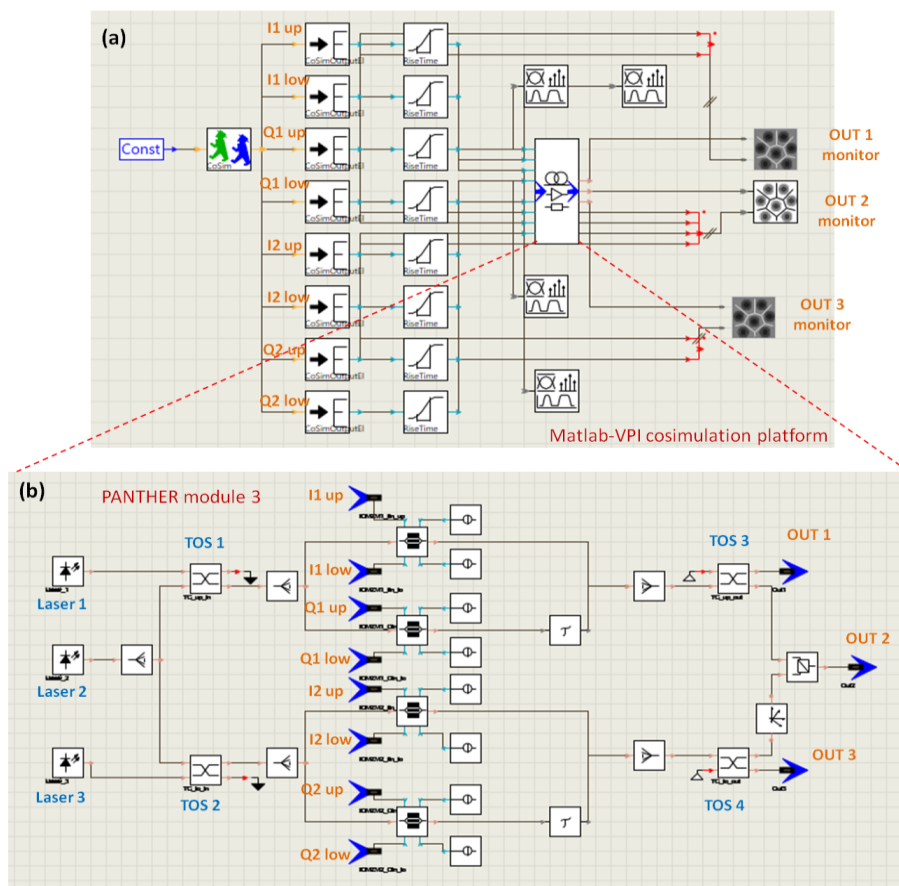
Εικόνα 4.44: Αρχή λειτουργίας του προκωδικοποιητή για τη δημιουργία των κατάλληλων εισερχόμενων μοτίβων δεδομένων που θα τροφοδοτήσουν τα SPDACs των προτεινόμενων ευέλικτων μονάδων για την παραγωγή οπτικών ροών με σχήμα διαμόρφωσης: (a) QPSK, (b) 16QAM και (c) 64QAM.

Για διαμόρφωση QPSK η εισερχόμενη ροή των δεδομένων πελάτη διεμπλέκεται κάθε δύο δυαδικά ψηφία, ώστε να παραχθούν οι συνιστώσες I και Q που θα τροφοδοτούν ένα μόνο bit εισόδου των SPDACs

που οδηγεί τους αντίστοιχους βραχίονες I και Q των MZMs. Για 16QAM η εισερχόμενη ροή των δεδομένων πελάτη διεμπλέκεται κάθε τέσσερα bits των οποίων τα δύο πρώτα αντιστοιχούν στη συνιστώσα I και τα δύο επόμενα στη συνιστώσα Q. Το πρώτο και το δεύτερο bit των ηλεκτρικών ακολουθιών I και Q αντιστοιχούν στο μεσαίο bit (Medium Bit, Med) και στο λιγότερο σημαντικό bit (Least Significant Bit, LSB) στις εισόδους των SPDACs. Με ένα παρόμοιο τρόπο, για 64QAM στο οποίο 6 bits αντιστοιχούν σε ένα σύμβολο, η ροή των δεδομένων πελάτη διεμπλέκεται κάθε έξι bits εκ των οποίων η πρώτη τριάδα περιλαμβάνει τη συνιστώσα I και η επόμενη τριάδα που ακολουθεί περιλαμβάνει τη συνιστώσα Q του σήματος. Το πρώτο, δεύτερο και το τρίτο bit αντιστοιχούν στο LSB, Med και MSB των SPDACs οδηγώντας τους βραχίονες I και Q των MZMs, αντίστοιχα.

4.24 Αναπτυγμένη Πλατφόρμα Προσομοίωσης για τη Διεπαφή SDO - Κοινή Προσομοίωση Matlab-VPI (cosimulation interface)

Μια πλατφόρμα προσομοίωσης για την εκτέλεση προκαταρκτικών δοκιμών με τις προτεινόμενες ευέλικτες μονάδες έχει υλοποιηθεί στο VPI TransmissionMaker. Η πρώτη έκδοση της πλατφόρμας προσομοίωσης μιμείται τη λειτουργία της συσκευής 3 χρησιμοποιώντας στοιχεία από τη βιβλιοθήκη των μονάδων του VPI [246]. Η λειτουργία πολλαπλών ροών της μονάδας 3 διαμορφώνεται μέσω μιας ταυτόχρονης και κοινής διεπαφής προσομοίωσης Matlab-VPI που ζητά από το χρήστη να επιλέξει το καθεστώς λειτουργίας (ως μια από τις περιπτώσεις 1, 2, 3, 4, 5) για μια συγκεκριμένη ζήτηση (request) δεδομένων πελάτη και εκτελεί την απαραίτητη επεξεργασία μέσω του επεξεργαστή OTN, του διανομέα ροής και τις λειτουργίες προκωδικοποιητή στο Matlab. Στη συνέχεια, το Matlab επιστρέφει στο VPI τα κατάλληλα ηλεκτρικά σήματα δεδομένων που οδηγούν τα MZMs IQ της μονάδας 3.



Εικόνα 4.45: (a) Σχηματική πλατφόρμα κοινής προσομοίωσης Matlab-VPI, (b) υλοποίηση προτεινόμενου πομπού 3 στο πρόγραμμα VPI TransmissionMaker.

Πιο συγκεκριμένα, στην εικόνα 4.45 παρουσιάζεται η σχηματική πλατφόρμα κοινής προσομοίωσης Matlab-VPI. Η μονάδα 3 προσομοιώνεται ως ένας διπλός IQ MZM βασισμένος σε δύο τετράδες Mach Zehnder διαμορφωτών (MZMs) οδηγούμενοι με διαφορεικό τρόπο με πλάτος σήματος RF ίσο με V_{π} και έχει πολωθεί με DC στο σημείο $V_{\pi}/2$. Ως εκ τούτου, οι παραγόμενες ροές δεδομένων I και Q χωρίζονται σε δύο και οδηγούν τόσο τα άνω όσο και τα κάτω RF ηλεκτρόδια των MZMs, αντίστοιχα. Ο ανώτερος IQ MZM λαμβάνει τα ηλεκτρικά σήματα I1_up, I1_lo, Q1_up και Q1_lo και ο χαμηλότερος IQ MZM λαμβάνει τα

ηλεκτρικά σήματα I2_up, I2_lo, Q2_up και Q2_lo από το Matlab με βάση το επιλεγμένο καθεστώς λειτουργίας.

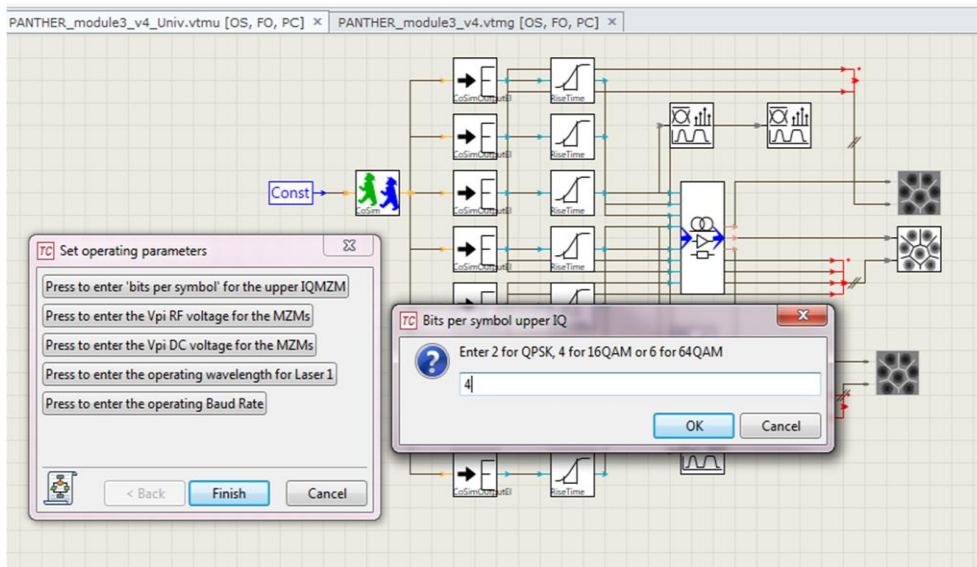
Οι ολοκληρωμένοι θερμο-οπτικοί διακόπτες προσομοιώνονται με τη χρήση των συντονιζόμενων οπτικών συζευκτών 2x2. Η κατάσταση «ON» του TOS ορίζεται ως το 70% της διερχόμενης οπτικής ισχύς εισόδου, το οποίο σημαίνει ότι αν η μέγιστη οπτική ισχύς πρέπει να περάσει στην άνω έξοδο του συζευκτη 2x2 ο λόγος σύζευξης πρέπει να οριστεί σε 0.7, διαφορετικά η μέγιστη οπτική ισχύς πρέπει να διέλθει στην κάτω έξοδο του συζευκτη 2x2 με λόγο σύζευξης ορισμένο σε 0.3. Το καθεστώς λειτουργίας της μονάδας 3 καθώς και η απαραίτητη ψηφιακή επεξεργασία δεδομένων στο Matlab ορίζεται από ένα αρχείο Macro του VPI που έχει αναπτυχθεί για τον έλεγχο των παραμέτρων προσομοίωσης τόσο του VPI όσο και του Matlab. Στο VPI, η κατάσταση των τριών πηγών λέιζερ και των MZMs ορίζεται ως «Ενεργή» ή «Ανενεργή» και οι λόγοι σύζευξης των συντονιζόμενων συζευκτών εισόδου και εξόδου (προσομοιώνουν τη λειτουργία του TOS 1,2,3,4) έχουν ρυθμιστεί με βάση ποιος IQ MZM της ενότητας 4.19 χρησιμοποιείται.

Στο Matlab, το σύνολο των παραμέτρων προσομοίωσης εισόδου έχουν ρυθμιστεί αυτόματα από τα αρχεία Macro που αντιστοιχούν στον αριθμό των εισερχόμενων αιτημάτων των πελατών (num_req ισούται με 1 για το αίτημα ενός πελάτη ή 2 για δύο ανεξάρτητες αιτήσεις που πρέπει να εξυπηρετηθούν), στον αριθμό των παραγόμενων οπτικών ροών (num_opt_flows ισούται με 1 ή 2), στο καθεστώς πολυπλεξίας πόλωσης (pol_mux ισούται με 1 για διπλή πόλωσης ή 0 για μονή πόλωση), στον αριθμό των οπτικών υποφερόντων (num_SC ισούται με 1 για μονή φέρουσα και 2 για διπλή φέρουσα) και στον αριθμό των ενεργών πηγών λέιζερ (η μεταβλητή ActiveLaser ισοδυναμεί με 1, 2, 3, ή 0, με το τελευταίο να αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου και τα δύο λέιζερ 1 και 3 είναι ενεργά). Τέλος, το αρχείο Macro ζητά από το χρήστη να εισάγει προσαρμοσμένες τιμές για ένα σύνολο παραμέτρων με τη βοήθεια ενός παραγόμενο πλαισίου ερωτήματος. Οι παράμετροι που ορίζονται από τον χρήστη αντιστοιχούν στην τιμή των μηκών κύματος των λέιζερ (lambda1, lambda2 και lambda3), την τάση οδήγησης Vpi των MZMs (MZM_PFVpi), την τάση πόλωσης (DC biasing) των MZMs (MZM_DCVpi), τα bits ανά σύμβολο για το ανώτερο IQ MZM και το κατώτερο IQ MZM (bits_per_symbol_up και bits_per_symbol_lo) και το λειτουργικό ρυθμό μετάδοσης συμβόλων, ο οποίος καθορίζεται από το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων των ηλεκτρικών σημάτων οδήγησης (BitRateDefault).

		Macro Filename	SR_SP_SC_upIQ	SR_SP_SC_loIQ	SR_DP_SC	SR_SP_DC	DR_SP_SC
		Operating Regime	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Generated by the Macro	VPI parameters for PANTHER module 3	L1_Active	ON	OFF	OFF	ON	ON
		L2_Active	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
		L3_Active	OFF	ON	OFF	ON	ON
		MZM1_Active	ON	OFF	ON	ON	ON
		MZM2_Active	ON	OFF	ON	ON	ON
		MZM3_Active	OFF	ON	ON	ON	ON
		MZM4_Active	OFF	ON	ON	ON	ON
		TC_up_in_CoupleRatio - TOS 1	0,7	0,5	0,3	0,7	0,7
		TC_lo_in_CoupleRatio - TOS 2	0,5	0,7	0,3	0,7	0,7
	TC_up_out_CoupleRatio - TOS 3	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7	
	TC_lo_out_CoupleRatio - TOS 4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	
	Operating Matlab Parameters	num_req	1	1	1	1	2
		num_opt_flows	1	1	1	1	2
		pol_mux	0	0	1	0	0
		num_SC	1	1	1	2	1
ActiveLaser		1	3	2	0	0	
Prompted by the User	Module 3 Parameters	lambda1					
		lambda2					
		lambda3					
		MZM_RFVpi					
		MZM_DCVpi					
		bits_per_symbol_up					
		bits_per_symbol_lo					
	Global Parameters	BitRateDefault					

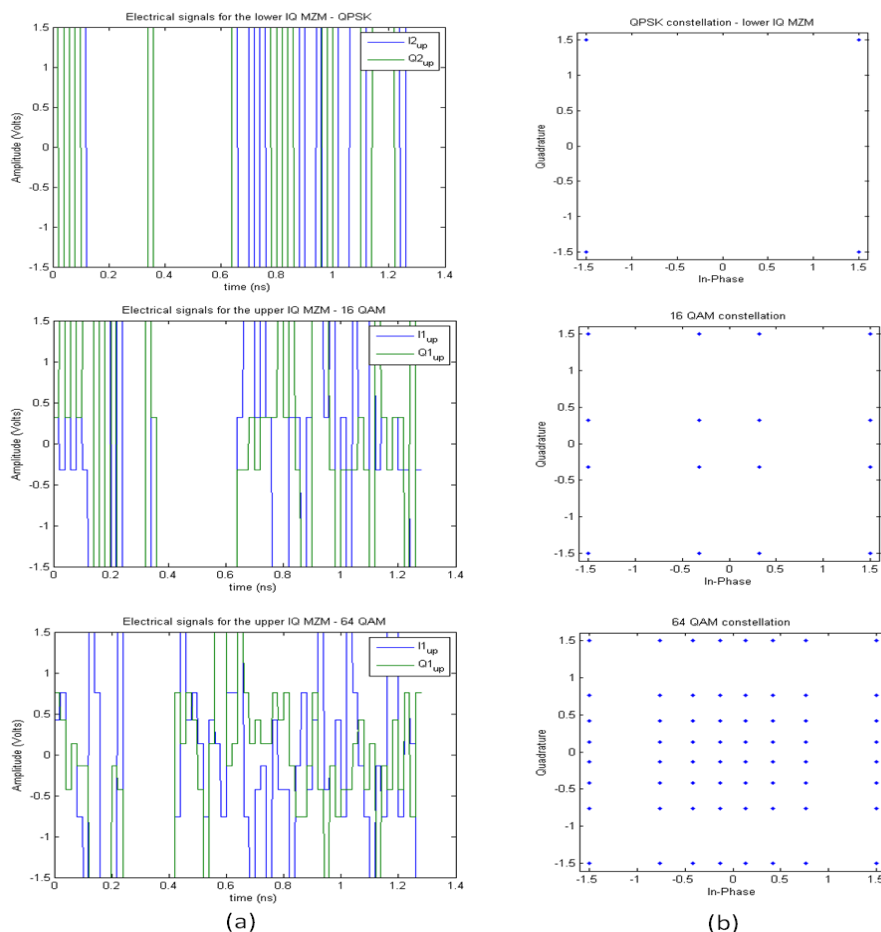
Εικόνα 4.46: Ρύθμιση παραμέτρων για την κοινή προσομοίωση Matlab-VPI μέσω των αρχείων Macros του VPI.

Η εικόνα 4.46 παραθέτει τις ρυθμίσεις διαμόρφωσης για την κοινή διεπαφή προσομοίωσης Matlab-VPI μέσω ενός απλού αρχείου μακροεντολών που παράγεται στο VPI για κάθε καθεστώς λειτουργίας (βλέπε περίπτωση 1, 2, 3, 4 και 5). Η εικόνα 4.47 απεικονίζει το παραγόμενο πλαίσιο ερωτήματος που δημιουργείται από το αρχείο μακροεντολών στο VPI που ζητά από τον χρήστη να επιλέξει το σχήμα διαμόρφωσης για μια ενιαία οπτική ροή που παράγεται από τον άνω IQ MZM (Περίπτωση 1) της συσκευής 3, αναφέροντας τον αριθμό των bits ανά σύμβολο και το ρυθμό μετάδοσης συμβόλων. Οι τάσεις RF και DC των MZMs και το μήκος κύματος λειτουργίας για το λέιζερ 1 ζητούνται επίσης να καθοριστούν από το χρήστη.



Εικόνα 4.47: Παράμετροι κοινής προσομοίωσης που εισάγονται από το χρήστη μέσω του παραγόμενου αρχείου Macro. Το καθεστώς λειτουργίας έχει οριστεί στη περίπτωση 1.

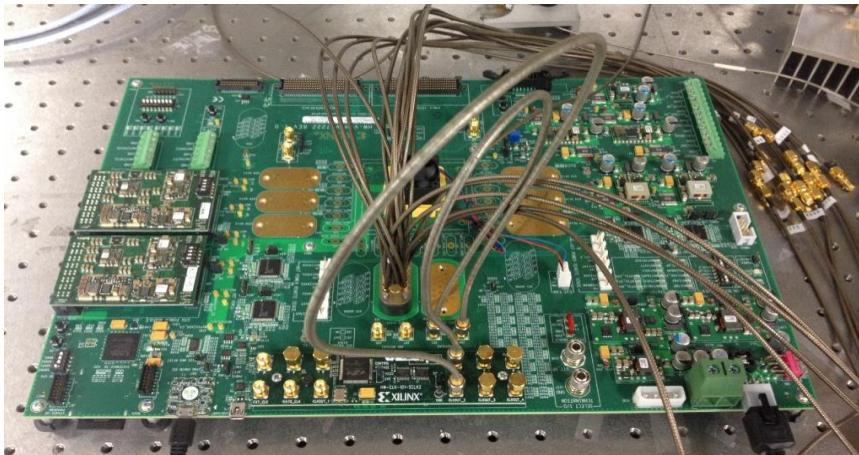
Οι ροές δεδομένων που παράγονται στο Matlab τροφοδοτούν με πολυεπίπεδα ηλεκτρικά σήματα τα MZMs που οδηγούν τους κλάδους I και Q των άνω και κάτω IQ MZMs, αντίστοιχα. Μια συνάρτηση προπαραμόρφωσης (predistortion function) εφαρμόζεται επίσης και αντισταθμίζει τη μη γραμμική συνάρτηση μεταφοράς των MZMs, έτσι ώστε τα εξερχόμενα διαγράμματα αστερισμού mQAM να αποτελούνται από ισαπέχοντα σύμβολα. Η εικόνα 4.48, απεικονίζει τα παραγόμενα ηλεκτρικά σήματα και τη χαρτογράφηση των bits σε επίπεδο συμβόλου που παράγονται από τη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων για διαφορετικά καθεστάτα λειτουργίας πολλαπλών ροών και επιλεγμένα σχήματα διαμόρφωσης QPSK, 16QAM και 64QAM σε ρυθμό μετάδοσης 50 GBaud.



Εικόνα 4.48: (α) Ηλεκτρικά σήματα με προπαραμόρφωση στο Matlab για 50 GBaud QPSK, 16QAM and 64QAM, και (β) η αντίστοιχη χαρτογράφηση τους από bits σε σύμβολο.

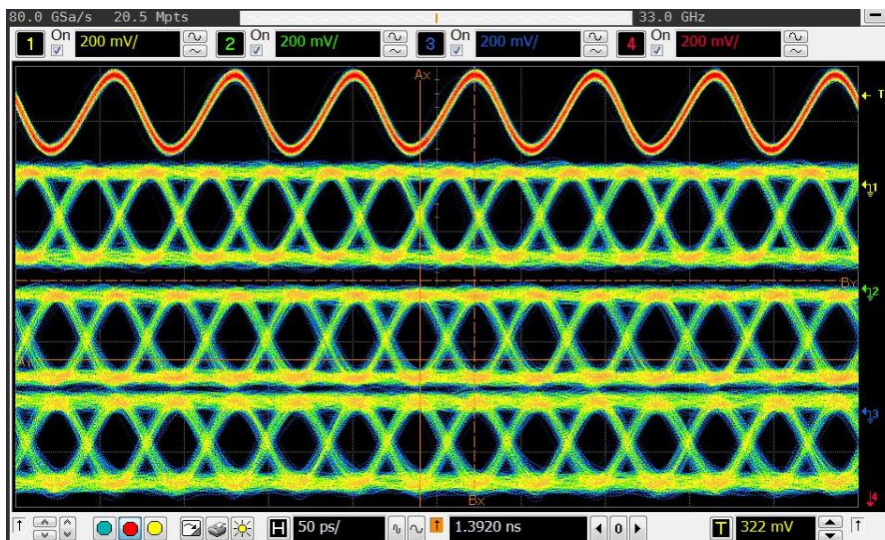
4.24 Αναμεταδότης FPGA

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιαστεί ο αναμεταδότης που υλοποιήθηκε για την υποστήριξη των ευέλικτων οπτικών πομπών πολλαπλών ροών μέσω της χρήσης και προγραμματισμού μιας πλακέτα αξιολόγησης FPGA. Η συγκεκριμένη πλακέτα αξιολόγησης ανήκει στην οικογένεια Virtex 7 FPGA από τη Xilinx (Xilinx XC7VH580T-G2HCG1155E) [247], περιλαμβάνει δύο τύπους ηλεκτρικών πομποδεκτών GTH και GTZ και είναι σε θέση να παράγει μέχρι 24x13.1 Gb/s RF γραμμές για τους πομποδέκτες GTH και μέχρι 8x28.05 Gb/s RF γραμμές για τους GTZ πομποδέκτες. Η πλακέτα αξιολόγησης FPGA έχει τη δυνατότητα να παρέχει προκαθορισμένα πρότυπα που αυτοματοποιούν τις ρυθμίσεις των πομποδεκτών για τυποποιημένα βιομηχανικά πρωτόκολλα (για παράδειγμα, CPRI, Gigabit Ethernet, ή XAUI). Αυτά τα πρότυπα παραμετροποιούν αυτόματα τις αναλογικές ρυθμίσεις των πομποδέκτες, υποστηρίζοντας επίσης την κατάλληλη κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση για κάθε τύπο πλαισίου (64B/66B, 64B/67B, και 8B/10B). Επιπλέον, οι πομποδέκτες GTH/GTZ είναι ιδιαίτερα παραμετροποιήσιμοι και στενά συνδεδεμένοι με τους λογικά προγραμματιζόμενους πόρους του FPGA επιτρέποντας κατά αυτό τον τρόπο στο χρήστη να σχεδιάσει τις RF γραμμές των πομποδεκτών για την παραγωγή PRBS ακολουθιών έως $2^{31}-1$ ή κωδικοποιημένες ακολουθίες, προκειμένου να ενθυλακώνονται σε Ethernet ή άλλου τύπου πλαίσια.



Εικόνα 4.49: Ο αναμεταδότης FPGA της Xilinx (Xilinx XC7VH580T-G2HCG1155E) με 24x13.1 Gb/s (πομποδέκτες GTH) και 8x28.05 Gb/s (πομποδέκτες GTZ) γραμμές και δυνατότητα παραγωγής διαφόρων πρωτοκόλλων επικοινωνίας.

Η εικόνα 4.49 απεικονίζει την πλακέτα αξιολόγησης FPGA με τον σύνδεσμο τύπου bullseye στο μέσον της πρώτης. Οι πρώτες δοκιμές των πομποδεκτών του FPGA έγιναν μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού της Xilinx φτάνοντας σε ταχύτητες μετάδοσης μέχρι 28.05 Gb/s, χρησιμοποιώντας 3 πομποδέκτες τύπου GTZ για τη μεταφορά μιας ακολουθίας PRBS-7 σε κάθε κανάλι. Στην εικόνα 4.50 παρουσιάζονται οι παραχθείσες ηλεκτρικές ροές δεδομένων καθώς και το ρολόι ημίσεος ρυθμού 14.025 GHz με τη χρήση παλμογράφου πραγματικού χρόνου.



Εικόνα 4.50: Δοκιμαστικά σήματα που παράγονται από την πλακέτα FPGA. Εδώ απεικονίζονται τρία σήματα δεδομένων 28.05 Gb/s, χρησιμοποιώντας πομποδέκτες GTZ και ένα ρολόι 14.025 GHz.

Ο αναμεταδότης βασισμένος σε FPGA διασυνδέει ουσιαστικά τη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων με τις προτεινόμενες ευέλικτες μονάδες μεταφράζοντας τα επεξεργασμένα δεδομένα πελάτη στα κατάλληλα ηλεκτρικά σήματα δεδομένων στο επιλεγμένο ρυθμό μετάδοσης που θα τροφοδοτήσουν τα SPDACs των ολοκληρωμένων ευέλικτων οπτικών πομποδεκτών. Αυτό γίνεται με την φόρτωση των αντίστοιχων ακολουθιών δεδομένων στους πομποδέκτες του FPGA και παρέχοντας ένα ηλεκτρικό ρολόι στο μισό ρυθμό μετάδοσης. Επίσης, πραγματοποιείται χρονικός συγχρονισμός στις ροές δεδομένων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα SPDACs έχουν ενσωματωμένη λειτουργία πολυπλεξίας, ο μέγιστος λειτουργικός ρυθμός συμβόλων των οπτικών ροών που θα προκύψουν είναι 56 Gbaud βασιζόμενος στη χρήση των πομποδεκτών GTZ. Ένα σύνολο 6 δεδομένων εισόδου (3 bits εισόδου και οι συμπληρωματικές ροές δεδομένων τους) και ένα σήμα ηλεκτρικού ρολογιού απαιτούνται για τη λειτουργία ενός μόνο SDPAC. Για την επίδειξη της μέγιστης χωρητικότητας έως και DP-64QAM με βάση την προτεινόμενη συσκευή 3, απαιτείται ένα σύνολο 28 πομποδεκτών του FPGA.

4.25 Ανάπτυξη πλατφόρμας FPGA για την Παραγωγή Πολλαπλών Ρυθμών και Πολλαπλού Αριθμού Ηλεκτρικών Πομπών για την Υποστήριξη των Ευέλικτων Πομπών Πολλαπλών Ροών

Σε αυτή την ενότητα γίνεται μια εκτενής παρουσίαση της αναπτυγμένης υλοποίησης-σχεδίασης (design) που επιτρέπει την παραγωγή πολλαπλών ρυθμών και πολλαπλού αριθμού ηλεκτρικών πομπών με στόχο την δημιουργία πολλαπλών ανωτέρων σχημάτων οπτικής διαμόρφωσης σε διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης, έχοντας ως βάση για αυτή την ανάπτυξη τη συσκευή ευέλικτων πομπών πολλαπλών ροών 3. Αυτή η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε στην πλατφόρμα *nivado* [248] της Xilinx, η οποία είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη, εξομοίωση, φόρτωση και έλεγχο της πλακέτας αξιολόγησης FPGA Virtex 7 XC7VH580T-G2HCG1155E. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.24, η συγκεκριμένη πλακέτα αξιολόγησης περιλαμβάνει δύο τύπους πομποδεκτών GTH και GTZ και είναι σε θέση να παράγει μέχρι 24x13.1 Gb/s RF γραμμές για τους πομποδέκτες GTH και μέχρι 8x28.05 Gb/s RF γραμμές για τους GTZ πομποδέκτες. Με χρήση του προγράμματος *nivado* και στην γλώσσα περιγραφής και προσομοίωσης υλικού ψηφιακών κυκλωμάτων Verilog [249] δημιουργήθηκαν όλοι οι απαραίτητοι κώδικες με στόχο την επιτυχή ανάπτυξη και υλοποίηση της ιδιότητας πολλαπλών ρυθμών και πολλαπλών σχημάτων διαμόρφωσης με χρήση των πομποδεκτών GTH με ρυθμούς δεδομένων μέχρι 12.5 Gb/s.

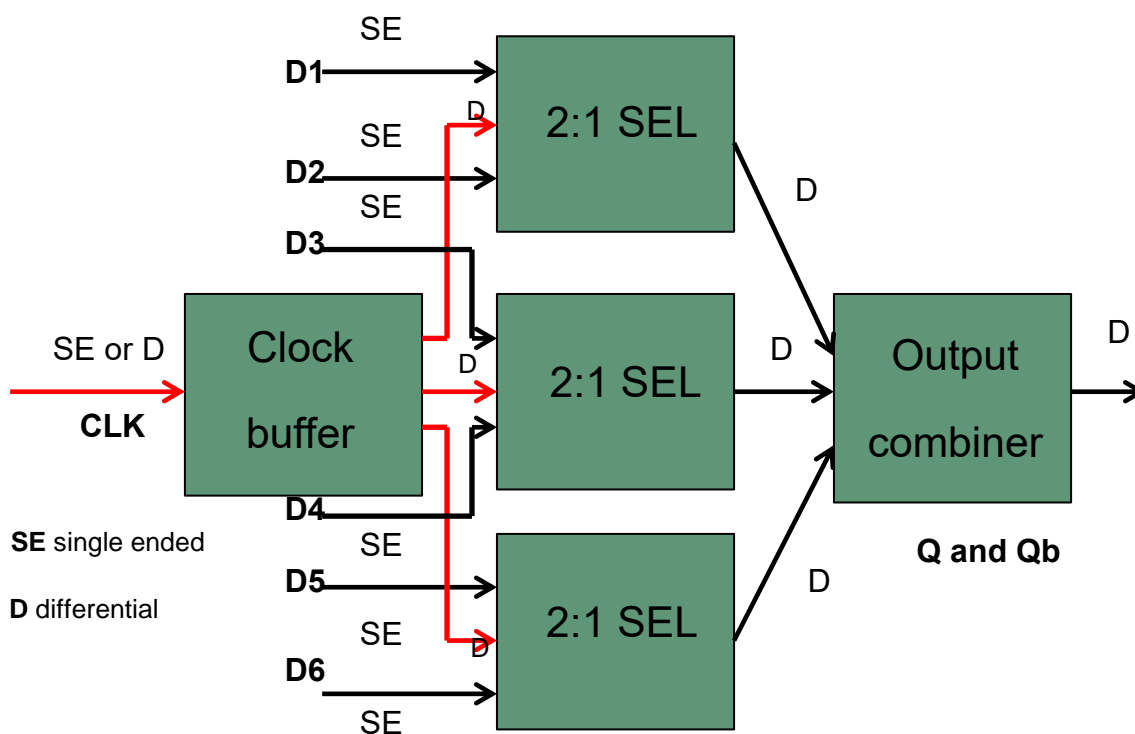
Αναλυτικότερα, τα στοιχεία προγραμματιζόμενης λογικής με χρήση της γλώσσας Verilog μπορούν να προγραμματιστούν, έτσι ώστε να παρουσιάζουν τη λειτουργικότητα απλών λογικών πυλών (“and”, “or”, “xor”, “not”) ή τη λειτουργικότητα περισσότερο σύνθετων συνδυαστικών συναρτήσεων, όπως είναι η αποκωδικοποίηση (αποκωδικοποιητές), η άθροιση (αθροιστές) και άλλες μαθηματικές συναρτήσεις. Επίσης, στα στοιχεία αυτά περιλαμβάνονται πολλές φορές και στοιχεία μνήμης τα οποία είτε είναι απλά flip-flops, είτε είναι πλήρη τμήματα (blocks) μνήμης. Όλα αυτά τα στοιχεία μπορούν να διασυνδεθούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής την οποία καλούνται να υλοποιήσουν με τη βοήθεια της υπάρχουσας ιεραρχίας των προγραμματιζόμενων διασυνδέσεων. Αυτή η λειτουργικότητα θα μπορούσε να παρομοιασθεί με εκείνη ενός προγραμματιζόμενου “breadboard”.

Πιο συγκεκριμένα, η βασική αρχιτεκτονική που απαντάται σε ένα FPGA περιλαμβάνει μία διάταξη από λογικές δομικές μονάδες (Configurable Logic Blocks, CLBs) καθώς και κανάλια διασύνδεσης. Μία τυπική λογική δομική μονάδα ενός FPGA αποτελείται από ένα LUT (Look-Up Table) τεσσάρων εισόδων και από ένα flip-flop. Ένα n-ψηφίων (n-bits) LUT υλοποιείται με χρήση ενός πολυπλέκτη (multiplexer) ο οποίος έχει ως εισόδους σταθερές, ενώ οι εισοδοί επιλογής του είναι οι είσοδοι του LUT (n τον αριθμό). Έτσι, ένα n-ψηφίων (n-bits) LUT μπορεί να κωδικοποιήσει οποιαδήποτε Boolean λογική συνάρτηση n-εισόδων με χρήση του πίνακα αλήθειας (truth table) που της αντιστοιχεί. Αυτός ο τρόπος αναπαράστασης λογικών συναρτήσεων είναι πολύ αποτελεσματικός ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι στα FPGAs και πιο συγκεκριμένα στον επιλεγμένο τύπο FPGA όπου υλοποιήθηκε το design χρησιμοποιούνται έξι ψηφίων (6-bits) LUT. Στο σημείο αυτό γίνεται σαφές ότι ένα FPGA έχει εκ κατασκευής συγκεκριμένο αριθμό από LUTs και έτσι μόνο κυκλώματα τα οποία καλύπτονται από τους υπάρχοντες πόρους ενός δεδομένου FPGA μπορούν να «χαρτογραφηθούν» σε αυτό.

Επιπροσθέτως, πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των FPGAs είναι το ότι υποστηρίζουν την πλήρη ή μερική επαναδιάταξη (reconfiguration) τους, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα αλλαγής της σχεδίασης (design) «on-the-fly», κατά τη διάρκεια δηλαδή της εκτέλεσης. Κάτι τέτοιο είναι χρήσιμο, είτε γιατί μία τέτοιου είδους δυναμική επαναδιάταξη των στοιχείων μπορεί να

αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της εφαρμογής, είτε γιατί μπορεί να απαιτείται για κάποια αναβάθμιση του συστήματος. Εκμεταλλεύόμενοι αυτές τις δυνατότητες των FPGA, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος λειτουργίας πολλαπλών ρυθμών και πολλαπλού αριθμού ηλεκτρικών πομπών που βρίσκονται πάνω στην πλακέτα αξιολόγησης FPGA. Οι αναμεταδότες του FPGA με τη σειρά τους είναι απευθείας συνδεδεμένοι με τους SPDACs με στόχο να παράγουν στις εξόδους τους πολυεπίπεδα ηλεκτρικά σήματα (PAM2, PAM4, PAM8) σε διαφορετικούς ρυθμούς συμβόλων (12.5 και 25 Gbaud) ώστε να οδηγήσουν τους οπτικούς IQ διαμορφωτές των ολοκληρωμένων προτεινόμενων συσκευών για την παραγωγή ανωτέρων οπτικών σχημάτων διαμόρφωσης (QPSK, 16QAM, 64QAM). Κατ' επέκταση, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε επίσης στον ίδιο ανεπτυγμένο κώδικα το σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας (UART to USB interface) στη γλώσσα Verilog με στόχο η πλακέτα αξιολόγησης FPGA να δέχεται σήματα ελέγχου από εξωτερικές συσκευές ή υπολογιστές και να συνδεθεί με τον σχεδιασμένο SDO agent για να ελέγχονται όλοι οι παράμετροι και οι συσκευές κάτω από ένα κοινό δίαυλο ελέγχου, ώστε να επιτευχθεί η λειτουργία πολλαπλών ροών, πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης και πολλαπλών σχημάτων διαμόρφωσης στις προτεινόμενες οπτικές συσκευές.

Η επιλογή της πλακέτας αξιολόγησης FPGA πραγματοποιήθηκε με γνώμονα τον μεγάλο αριθμό των ηλεκτρικών πομποδεκτών (συνολικά 32) καθώς και του μεγίστου δυνατού ρυθμού μετάδοσης (μέχρι 28.05 Gb/s) ώστε να είναι εφικτή η οδήγηση μέχρι τέσσερις SPDACs του προτεινόμενου πομπού 3 της ενότητας 4.9. Αφού αναλύθηκαν οι απαιτήσεις της σχεδίασης με βάση τον ευέλικτο πομπό πολλαπλών ροών (συσκευή 3), το ζητούμενο της υλοποίησης αφορούσε στην δημιουργία ενός μόνο design το οποίο εκμεταλλεύεται την ικανότητα της πλήρους επαναδιάταξης «on-the-fly» των δυνατοτήτων των ηλεκτρικών πομποδεκτών. Ο στόχος του design αφορά την αλλαγή στο ρυθμό μετάδοσης των πομπών από 12.5 Gb/s σε 6.25 Gb/s καθώς και στον αριθμό των χρησιμοποιούμενων πομπών από δύο σε τέσσερις και κατ' επέκταση σε έξι και αντίστροφα. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι χρησιμοποιείται και είναι ενεργός σε κάθε περίπτωση ένας ακόμα πομπός, ο οποίος χρησιμοποιείται ως ηλεκτρικό ρολόι με ήμισυ ρυθμό σε σχέση με τις παραγόμενες ροές δεδομένων των άλλων πομπών. Με βάση την αρχή λειτουργίας των SPDACs, για την παραγωγή των πολυεπίπεδων ηλεκτρικών σημάτων απαιτούνται ένα ηλεκτρικό ρολόι και δύο ή τέσσερα ή έξι bits εισόδου ώστε να παραχθούν ηλεκτρικά σήματα PAM2, PAM4 και PAM8 αντίστοιχα. Οι απαιτούμενες δυάδες των bits καθώς και το ηλεκτρικό ρολόι συγχρονισμού θα πρέπει να έχουν τον ήμισυ ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με τον τελικό ρυθμό λόγω του εσωτερικού ηλεκτρικού πολυπλέκτη κάθε εισόδου, ο οποίος πολυπλέκει χρονικά τα δύο bits σε κάθε είσοδο σε κάθε παλμό του ρολογιού, όπως παρουσιάζεται και στη παρακάτω εικόνα 4.51.



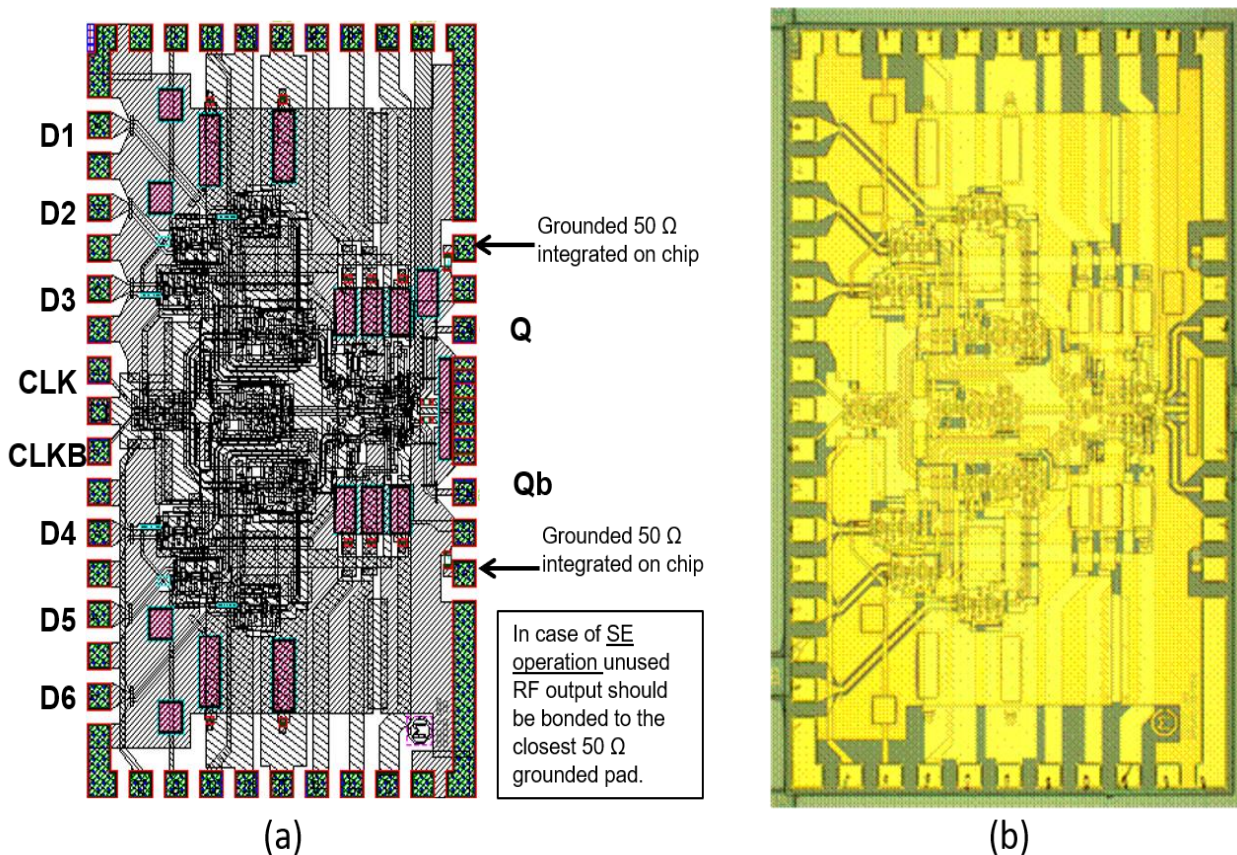
Εικόνα 4.51: Απεικονιστικό διάγραμμα του κυκλώματος 3-bit Selector-PowerDAC.

Αναλυτικότερα, το τμήμα της πολυπλεξίας πραγματοποιείται με τρεις επιλογείς (selectors). Οι έξοδοι των επιλογέων είναι συνδεδεμένοι με το μπλοκ 3-bit PowerDac, το οποίο παράγει σήμα εξόδου μέχρι 8-επίπεδων. Η κατανομή του ρολογιού υψηλής συχνότητας (μέχρι 25 GHz) στους τρεις επιλογείς είναι ένα ευαίσθητο μέρος του σχεδιασμού. Ένα ειδικό buffer εισόδου ρολογιού έχει σχεδιαστεί ώστε να μετατρέπει το σήμα ρολογιού μονής οδήγησης (single ended, SE) σε διαφορικής και να το ενισχύει πριν από τη διανομή του στους τρεις επιλογείς.

Τα κυκλώματα SPDAC 3B θα πρέπει να παρέχουν PAM-8 ηλεκτρικό σήμα μέχρι 50 Gbaud με διαφορικό πλάτος σήματος εξόδου (4.2 Vpp) αρκετό για να οδηγήσει τον IQ διαμορφωτή. Καθώς το στάδιο πολυπλεξίας είναι ενσωματωμένο στο chip, απαιτούνται μόνο σήματα ημίσεος ρυθμού ως εισοδοί του κυκλώματος (NRZ δεδομένα μέχρι 25 Gb/s και ρολόι μέχρι 25 GHz). Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει τη μείωση των διεπαφών υψηλής ταχύτητας (@ 50 Gbaud) προς την μία μόνο κατεύθυνση μεταξύ της εξόδου του ολοκληρωμένου κυκλώματος και της εισόδου του διαμορφωτή.

Στην εικόνα 4.52, παρουσιάζεται η διάταξη του κυκλώματος SPDAC, όπως επίσης η μικροφωτογραφία μετά το στάδιο κατασκευής του. Το αποτύπωμα του κυκλώματος είναι $1.8 \times 3 \text{ mm}^2$. Στην αριστερή πλευρά, υπάρχουν οι RF εισοδοί: έξι εισοδοί δεδομένων μονής γραμμής και στο κέντρο δύο συμπληρωματικές εισοδοί ρολογιού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο η διαφορική όσο και η μονής οδήγησης λειτουργία του ρολογιού είναι δυνατή. Στη δεξιά πλευρά, υπάρχουν δύο συμπληρωματικές εξόδοι Q και Qb. Δύο επιπλέον πέλματα επαφής (pads) (στο πάνω και στο κάτω μέρος) έχουν εφαρμοστεί και έχουν συνδεθεί στις ολοκληρωμένες γειωμένες αντιστάσεις 50 Ω. Αυτή η διάταξη επιτρέπει την εύκολη διασύνδεση μιας αντίστασης 50 Ω με την αχρησιμοποιούμενη εξόδο σε περίπτωση λειτουργίας του οδηγητή σε μονή οδήγηση. Τα επάνω και κάτω πέλματα επαφής χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων με τις απαραίτητες τάσεις DC.

Έχοντας ως σημείο αναφοράς το παραπάνω ηλεκτρικό κύκλωμα SPDAC και γνωρίζοντας ότι για την οδήγηση της συσκευής 3 απαιτούνται κατά το ελάχιστο δύο τέτοιες συσκευές, το design του FPGA θα πρέπει να παράγει μέχρι 14 ανεξάρτητα ηλεκτρικά σήματα με ρυθμό μετάδοσης 6.25 ή 12.5 Gb/s και αντίστροφα, ανάλογα με το επιθυμητό σενάριο λειτουργίας, τον αριθμό των πομπών και το ρυθμό μετάδοσής τους όπως ορίζεται από τον παρακάτω πίνακα. Επίσης παρουσιάζεται ο τελικός ρυθμός συμβόλων στην έξοδο των SPDACs καθώς και το ζητούμενο οπτικό σχήμα διαμόρφωσης.



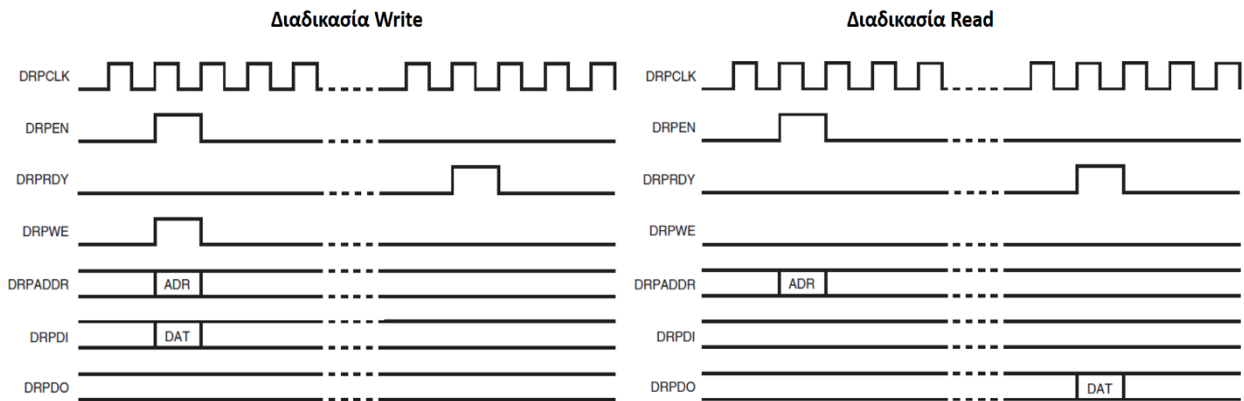
Εικόνα 4.52: (a) Διάταξη και (b) μικροφωτογραφία του κυκλώματος SPDAC3B.

Πίνακας 21: Σενάρια χρήσης και ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων.

		Σενάριο λειτουργίας αντιστοιχία σε ASCII	Αριθμός πομπών για PDAC1	Αριθμός πομπών για PDAC2	Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εισόδου PDAC1	Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εισόδου PDAC2	Πολυεπίπεδο ηλεκτρικό σήμα (έξοδοι PDAC1)	Πολυεπίπεδο ηλεκτρικό σήμα (έξοδοι PDAC2)	Ζητούμενο οπτικό σχήμα διαμόρφωσης IQM1	Ζητούμενο οπτικό σχήμα διαμόρφωσης IQM2
Μονή Οπτική Ροή	Dual Pol IQM1 και IQM2	0/0	2	2	12.5 G	12.5 G	PAM2@25G	PAM2@25G	QPSK	QPSK
		1/1	4	4	6.25 G	6.25 G	PAM4@12.5G	PAM4@12.5G	16QAM	16QAM
		2/2	4	4	12.5 G	12.5 G	PAM4@25G	PAM4@25G	16QAM	16QAM
		3/3	6	6	12.5 G	12.5 G	PAM8@25G	PAM8@25G	64QAM	64QAM
	Dual Carrier - IQM1 και IQM2	4/4	2	2	12.5 G	12.5 G	PAM2@25G	PAM2@25G	QPSK	QPSK
		5/5	2	6	6.25 G	6.25 G	PAM2@25G	PAM8@12.5G	QPSK	64QAM
		6/6	2	6	12.5 G	12.5 G	PAM2@25G	PAM8@25G	QPSK	64QAM
		7/7	4	4	6.25 G	12.5 G	PAM4@12.5G	PAM4@25G	16QAM	16QAM
		8/8	4	4	12.5 G	12.5 G	PAM4@25G	PAM4@25G	16QAM	16QAM
		9/9	6	6	12.5 G	12.5 G	PAM8@25G	PAM8@25G	64QAM	64QAM
Δύο Ανεξάρτητες Οπτικές Ροές	Δύο Ροές - single pol single carrier - IQM1 και IQM2	10/A	2	2	12.5 G	12.5 G	PAM2@25G	PAM2@25G	QPSK	QPSK
		11/B	2	6	12.5 G	12.5 G	PAM2@25G	PAM8@25G	QPSK	64QAM
		12/C	4	4	6.25 G	12.5 G	PAM4@12.5G	PAM4@25G	16QAM	16QAM
		13/D	4	4	12.5 G	12.5 G	PAM4@25G	PAM4@25G	16QAM	16QAM
		14/E	6	4	12.5 G	12.5 G	PAM8@25G	PAM4@25G	64QAM	16QAM
		15/F	6	6	12.5 G	12.5 G	PAM8@25G	PAM8@25G	64QAM	64QAM

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημανθεί ότι παρόλο που εντοπίζονται αρκετές παρόμοιες περιπτώσεις που καταλήγουν στο ίδιο τελικό σχήμα διαμόρφωσης και στο ίδιο ρυθμό μετάδοσης στην πραγματικότητα είναι εντελώς διαφορετικές καθώς αναφέρονται σε διαφορετικά σενάρια οπτικών ροών (ενός ή δύο ανεξάρτητων ροών ή δημιουργία μιας ροής με μορφή υπερ-καναλιού) και μονής ή διπλής πόλωσης. Επιπρόσθετα, σε κάθε σενάριο αντιστοιχούν δύο επιπλέον ηλεκτρικοί πομποί που χρησιμοποιούνται πάντα ένας για κάθε SPDAC αντίστοιχα, παίζοντας το ρόλο των ηλεκτρικών ρολογιών. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι με βάση το design το παραγόμενο ηλεκτρικό ρολόι έχει τη μισή συχνότητα σε σχέση με τους ρυθμούς μετάδοσης των ροών δεδομένων, δηλαδή για ρυθμό μετάδοσης των πομπών 6.25 και 12.5 Gb/s λαμβάνεται στην έξοδο των πομπών-ρολογιών 3.125 και 6.25 GHz αντίστοιχα. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται αμέσως μετά τις εξόδους των πομπών ρολογιών δύο διπλασιαστές συχνότητας με μεγάλο εύρος συχνότητας εισόδου από 3 έως 7 GHz ώστε να παράγουν την απαιτούμενη συχνότητα εισόδου για τους SPDACs (6.25 και 12.5 GHz) και χωρίς να χρειάζεται αλλαγή αυτών των συσκευών ανάλογα με το επιθυμητό σενάριο. Επίσης, κάθε σενάριο χρήσης αντιστοιχείται με ένα χαρακτήρα ASCII ώστε κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας του SDO agent με το FPGA να μπορεί να αναγνωρίζει την κατάσταση που θα πρέπει να μεταβεί και να αποστέλλεται ο αντίστοιχος χαρακτήρας, ο οποίος μπορεί να αναγνωριστεί και να μεταφραστεί σύμφωνα με τις αρχές του πρωτοκόλλου επικοινωνίας σειριακής μετάδοσης δεδομένων.

Η όλη σχεδίαση με βάση τα παραπάνω σενάρια στηρίχθηκε στη λειτουργία της δυναμικής θύρας επαναδιάταξης (dynamic reconfiguration port), μιας ιδιότητας που παρέχει το FPGA και επιτρέπει την δυναμική αλλαγή των ζητούμενων παραμέτρων (αλλαγή ρυθμού μετάδοσης και αριθμού ενεργών πομπών) του κάθε καναλιού-πομποδέκτη για τους GTH (όσο και για τους GTZ). Η διεπαφή DRP είναι μια συγχρονισμένη διεπαφή φιλική προς τον επεξεργαστή με ένα δίαυλος διευθύνσεων (DRPADDR) και ξεχωριστούς δίαυλους δεδομένων για τη ρύθμιση των δεδομένων ανάγνωσης (DRPDO) και εγγραφής (DRPDI) στις υπό παραμετροποίηση μονάδες του design. Ένα σήμα ενεργοποίησης (DRPEN), ένα σήμα ανάγνωσης/εγγραφής (DRPWE), και ένα έτοιμο/έγκυρο σήμα (DRPRDY) είναι τα σήματα ελέγχου που εφαρμόζουν τις λειτουργίες ανάγνωσης και εγγραφής, πιστοποιούν την ολοκλήρωση της λειτουργίας, ή αναφέρουν τη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Παρακάτω ακολουθεί το χρονικό διάγραμμα της λειτουργίας εγγραφής και ανάγνωσης του DRP.



Εικόνα 4.53: Διαδικασία εγγραφής και ανάγνωσης DRP.

Καθώς η μονάδα DRP αποτελείται από σύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα (flip-flops κτλ.), χρειάζεται ένα ρολόι χρονισμού χαμηλής συχνότητας (100 ή 200 MHz), το οποίο δίνεται από τον δυναμικό ταλαντωτή κρυστάλλου που βρίσκεται πάνω στην πλακέτα. Κατά τη διαδικασία εγγραφής της νέα παραμέτρου που πρέπει να σταλεί στην αντίστοιχη θύρα της μονάδας υπό αναπροσαρμογή (σε αυτή την περίπτωση πομπός), το κύκλωμα DRP πέραν του ρολογιού που το διατρέχει συνεχόμενα περιμένει ένα παλμό ενεργοποίησης (DRPEN) για ένα κύκλο του ρολογιού χρονισμού που πυροδοτείται από ένα εξωτερικό γεγονός ενεργοποίησης (από τον SDO agent μέσω του σειριακού πρωτοκόλλου) ώστε να ενεργοποιηθούν όλες οι διαδικασίες είτε αποστολής είτε ανάγνωσης των παραμέτρων που έχει στη μνήμη του το κύκλωμα DRP. Μόλις αναγνωριστεί η θετική ακμή του παλμού DRPEN, στέλνεται στη μονάδα υπό αναπροσαρμογή ένας παλμός που αντιστοιχεί στο DRPWE και ενεργοποιεί τη διαδικασία εγγραφής. Διαφορετικά όταν δεν υπάρχει ο παλμός αυτός (βλέπε χρονικό διάγραμμα διαδικασίας read) ενεργοποιείται η διαδικασία ανάγνωσης. Παράλληλα, διαβάζεται το DRPADDR που αντιστοιχεί στη διεύθυνση του μεμονωμένου κελιού της παραμέτρου του πομπού και στέλνονται τα νέα δεδομένα για εγγραφή (μια σειρά δεδομένων 16 bits) από τους πόρους της λογικής FPGA στον υπό αναπροσαρμογή πομπό. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η διαδικασία ανάγνωσης προηγείται της εγγραφής καθώς είναι απαραίτητο να αποσταλεί η αρχική τιμή των δεδομένων που βρίσκονται κατά τη φάση της αρχικοποίησης της πλακέτας στο κύκλωμα DRP, γιατί η λειτουργία του βασίζεται σε μια λογική πράξη XOR μεταξύ των αρχικών και νέων δεδομένων, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Ουσιαστικά το υλοποιημένο κύκλωμα DRP συμπεριφέρεται ως μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων (finite-state machine, FSM), η οποία έχει αποθηκευμένη συγκεκριμένο αριθμό καταστάσεων και κατ' επέκταση αποθηκευμένες τιμές δεδομένων και από ένα γεγονός ενεργοποίησης προερχόμενο από εξωτερικό παράγοντα αλλάζει τις τιμές των παραμέτρων των πομπών χωρίς να απαιτείται επαναρχικοποίηση της πλακέτας FPGA με ένα νέο design από το χρήστη.

Στη συνέχεια, βασιζόμενοι στο εγχειρίδιο χρήσης των πομποδεκτών του FPGA αναγνωρίστηκαν οι παράμετροι που χρίζουν αλλαγή ώστε να επιτευχθούν και να αποδοθούν στις εξόδους των πομπών οι ζητούμενες αλλαγές. Κατ' επέκταση, θα πρέπει στο design να αλλάζει το ρολόι αναφοράς, το οποίο κλειδώνει τον βρόχο κλειδώματος φάσης (phase-locked loop, PLL) που βασίζεται σε κύκλωμα LC (inductor-capacitor) και χαρακτηριστικά αναφέρεται ως quad PLL (QPLL) καθώς είναι υπεύθυνο για την απόδοση του υψίρρυθμου ρολογιού συχνότητας 6 έως 13.1 GHz στους τέσσερις πομπούς που αποτελούν το κάθε πέλμα επαφής (σειρά quad) για τους διαφορετικούς GTH.

Ο τελικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για κάθε πομπό εξάγεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$f_{PLLCLKout} = f_{PLLCLKin} \times \frac{N}{M \times 2} \quad (4.1)$$

$$f_{LineRate} = \frac{f_{PLLCLKout} \times 2}{D} \quad (4.2)$$

Όπου η 4.1 προσδιορίζει την συχνότητα (GHz) στην έξοδο του PLL και η 4.2 προσδιορίζει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων γραμμής (Gb/s). Το D αντιπροσωπεύει την τιμή του διαιρέτη ρολογιού του TX ή του RX στο κανάλι. Και οι δύο πλευρές ανύψωσης και πτώσεως του PLL CLKOUT χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του απαιτούμενου ρυθμού μετάδοσης γραμμής. Οι μεταβλητές N, M, D καθώς και η συχνότητα του $f_{PLLCLKin}$ καθορίζουν τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης στις εξόδους των πομπών. Καθώς όμως, οι μεταβλητές των παραπάνω εξισώσεων λαμβάνουν καθορισμένες τιμές όπως ορίζονται στο πίνακα 22, θα πρέπει να μεταβάλλεται ταυτόχρονα και η συχνότητα του ρολογιού, το οποίο κλειδώνει το QPLL.

Πίνακας 22: Παράμετροι καθορισμού συχνότητας ρολογιού QPLL.

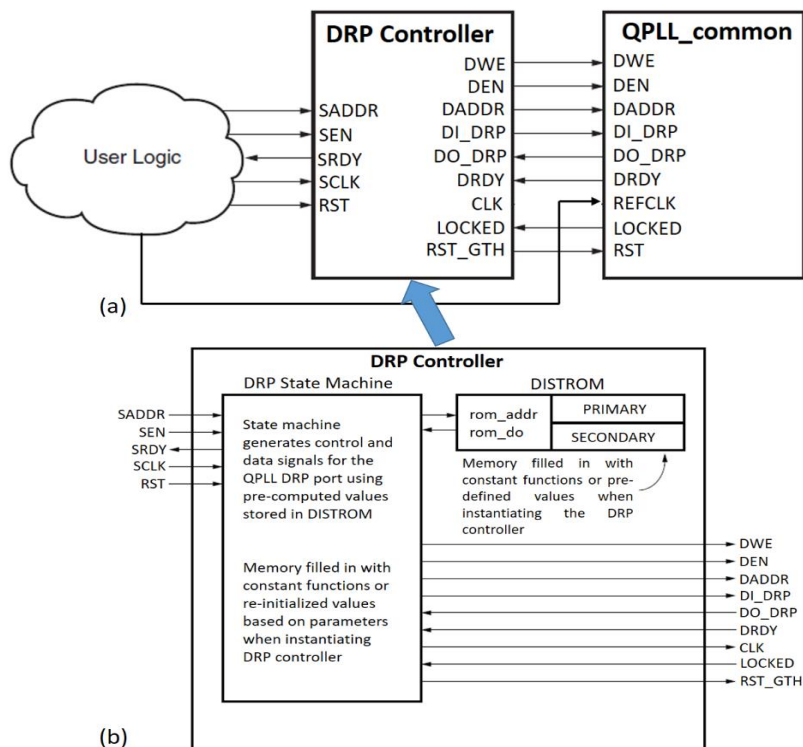
Συντελεστής	Ιδιότητα	Έγκυρες τιμές
M	QPLL_REFCLK_DIV	1,2,3,4
N	QPLL_FBDIV QPLL_FBDIV_RATIO	16, 20, 32, 40, 64, 66, 80, 100
D	RXOUT_DIV TXOUT_DIV	1, 2, 4, 8, 16

Στην περίπτωση όπου οι ζητούμενη ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων είναι 6.25 και 12.5 Gb/s αντιστοιχούν οι παρακάτω μεταβλητές και συχνότητες ρολογιού στην είσοδο των τεσσάρων QPLLs καθώς σύμφωνα με τον πίνακα 21 απαιτούνται 7 πομποί (δηλαδή 2 quad πομπών) για κάθε SPDAC φθάνοντας σε σύνολο τους 14 πομπούς:

- Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 6.25 Gb/s -> συχνότητα ρολογιού εισόδου QPLLs: 500 MHz, M:1, N:100 και D:8
- Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 12.5 Gb/s -> συχνότητα ρολογιού εισόδου QPLLs: 250 MHz, M:1, N:100 και D:2

Μετά την αναγνώριση των κατάλληλων τιμών των παραπάνω μεταβλητών καθώς και των ρολογιών εισόδου των QPLLs, ακολουθεί ο τρόπος λειτουργίας και η ανάπτυξη του κυκλώματος DRP controller στη γλώσσα Verilog, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αλλαγή αυτών των τιμών ανάλογα με το σενάριο λειτουργίας και βασίστηκε στο σημείωση εφαρμογής της Xilinx XAPP888 [250].

Σε αυτή τη σημείωση παρουσιάζεται η υλοποίηση και η χρήση της DRP λειτουργίας μέσω της ανάπτυξης ενός κυκλώματος δρώντας ως ένα state machine 9 διαφορετικών καταστάσεων, το οποίο χρησιμοποιεί καταχωρητές (registers) έχοντας αποθηκεύσει τις τιμές των παραμέτρων των QPLLs όσο και των πομπών που χρίζουν επαναδιαμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα, η συγκεκριμένη σχεδίαση οδηγεί τη θύρα DRP με ένα state machine που κατευθύνεται στο QPLL κάθε τετράδας πομπών, διαβάζει τη προηγούμενη τιμή, δημιουργεί μια μάσκα με τα bits που πρέπει να αλλάξει, θέτει τις νέες τιμές, και τέλος, γράφει τις τιμές στη θύρες DRP του κάθε QPLL. Οι διευθύνσεις, μάσκες (bitmasks), και οι νέες τιμές αποθηκεύονται σε προ-αρχικοποιημένες μνήμες ROM που είναι γεμάτες κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας στο κομμάτι της σύνθεση του design. Η αρχικοποίηση των ROM γίνεται με συνεχή λειτουργίες που παρέχονται με το design.



Εικόνα 4.54: (a) DRP controller εντός του design και χρήση λογικής με βάση τις ανάγκες του χρήστη και (b) εσωτερικό μπλοκ διάγραμμα του DRP controller.

Η παραπάνω εικόνα 4.54 (a) παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο τα σήματα εισόδου της αριστερή πλευράς του drp controller συνδέονται με βάση τις ανάγκες της λογικής του χρήστη και κατ' επέκταση τα σήματα εξόδου με τις εισόδους του κυκλώματος QPLL, ενώ η εικόνα (b) απεικονίζει το εσωτερικό διάγραμμα λειτουργίας του DRP controller, το οποίο αποτελείται από το state machine 9 καταστάσεων, τις εισόδους και εξόδους των σημάτων καθώς και τις απαιτούμενες ROM για την αποθήκευση των προκαθορισμένων τιμών των υπό αναπροσαρμογή παραμέτρων του QPLL. Όσον αφορά το υλοποιημένο state machine 9 καταστάσεων, λειτουργεί ακολουθώντας την παρακάτω ιεραρχία όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 23:

Κατάσταση	Περιγραφή	Επόμενη κατάσταση	Κατάσταση Μετάβασης
RESTART	Αυτή η κατάσταση αρχίζει όταν η SRST είναι θετική ή εάν η current_state πηγαίνει σε μια απροσδιόριστη κατάσταση.	WAIT_LOCK	SRST = 0
WAIT_LOCK	Αυτή η κατάσταση περιμένει το σήμα κλειδώματος από το QPLL. Όταν το κλείδωμα βεβαιωθεί, τότε SRDY = 1.	WAIT_SEN	LOCK = 1
WAIT_SEN	Αυτή η κατάσταση περιμένει το SEN να βεβαιωθεί και ορίζει την κατάλληλη διεύθυνση ROM σύμφωνα με την SADDR.	ADDRESS	SEN = 1
ADDRESS	Αυτή η κατάσταση έχει προέλθει είτε από WAIT_SEN ή από WAIT_DRDY. Η κατάσταση θέτει το DADDR σύμφωνα με την τρέχουσα τιμή που είναι αποθηκευμένη στη ROM και βεβαιώνεται με το DEN.	WAIT_A_DRDY	<Πάντα>
WAIT_A_DRDY	Αυτή η κατάσταση καταχωρείται πάντοτε από το ADDRESS. Περιμένει από το QPLL να επιβεβαιώσει με το σήμα DRDY.	BITMASK	DRDY = 1
BITMASK	Αυτή η κατάσταση έχει εισέλθει από WAIT_A_DRDY. Εκτελεί μια bitwise AND στο DO από το QPLL με την τιμή μάσκας και είναι αποθηκευμένη στη ROM.	BITSET	< Πάντα >
BITSET	Αυτή η κατάσταση προέρχεται πάντοτε από BITMASK. Εκτελεί μια bitwise OR με το BITSET που είναι αποθηκευμένο στη ROM και με την έξοδο από τη λειτουργία BITMASK.	WRITE	< Πάντα >
WRITE	Αυτή η κατάσταση βεβαιώνει τα DEN, DWE και RST_GTH. Ενημερώνει τον μετρητή της κατάστασης, ο οποίος χρησιμοποιείται για να παρακολουθεί τον αριθμό των εγγεγραμμένων καταχωρητών που απαιτούνται για να εκτελέσει μια πλήρη αναδιαμόρφωση.	WAIT_DRDY	< Πάντα >
WAIT_DRDY	Αυτή η κατάσταση περιμένει το DRDY να επιβεβαιωθεί από το QPLL.	ADDRESS (state_count > 0) WAIT_LOCK (state_count ≤ 0)	DRDY = 1

Οι διεργασίες που πρέπει να εφαρμοστούν για να αναδιαμορφώσουν μια τιμή στο QPLL είναι οι ακόλουθες σε σειρά:

- Αποστολή RST στο QPLL
- Ρύθμιση DADDR στο QPLL και αποστολή DEN για έναν κύκλο ρολογιού
- Αναμονή για το σήμα DRDY να βεβαιωθεί από το QPLL
- Εκτέλεση ενός bitwise AND μεταξύ της θύρας DO και του MASK (DI = DO AND MASK)

- Εκτέλεση ενός bitwise OR μεταξύ του σήματος DI και του BITSET ($DI = DI | BITSET$)
- Αποστολή DEN και DWE στο QPLL για έναν κύκλο ρολογιού
- Αναμονή για το σήμα DRDY να βεβαιωθεί από το QPLL
- Αναστολή RST στο QPLL
- Αναμονή QPLL να κλειδώσει

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας 24, όπου αναφέρονται όλες οι εισοδοί και έξοδοι του drp controller.

Θύρα	Κατεύθυνση	Περιγραφή
SADDR	Είσοδος	Αυτή η θύρα επιλέγει την κατάσταση για επαναδιαμόρφωση του QPLL
SEN	Είσοδος	Η θύρα αυτή ενεργοποιεί τη διαδικασία επαναδιαμόρφωσης και ενεργοποιείται στη θετική ακμή του SCLK.
SCLK	Είσοδος	Αυτό είναι το ρολόι του συγχρονισμού του drp controller. Διέρχεται εκτός του κυκλώματος μέσω της εξόδου DCLK.
RST	Είσοδος	Αυτό επαναφέρει το state machine και κατ' επέκταση το QPLL.
SRDY	Έξοδος	Αυτή η θύρα υποστηρίζει για ένα κύκλο ρολογιού στο τέλος μιας διαδικασίας επαναδιαμόρφωσης. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να ειδοποιεί το χρήστη ότι μπορεί να ξεκινήσει μια νέα επαναδιαμόρφωση.
DO[16:0]	Είσοδος	Αυτή η θύρα συνδέεται απευθείας στη θύρα QPLL DO και χρησιμοποιείται για να διαβάσει τιμές του καταχωρητή από το QPLL.
DRDY	Είσοδος	Αυτή η θύρα πρέπει να συνδέεται απευθείας στη θύρα QPLL DRDY για να ενημερώσει το σχέδιο αναφοράς όταν η QPLL είναι έτοιμη να διαβάσει ή να γράψει μια νέα τιμή.
LOCKED	Είσοδος	Αυτή η θύρα πρέπει να συνδέεται απευθείας στη αντίστοιχη θύρα QPLL και χρησιμοποιείται για να ενημερώσει αν είναι κλειδωμένο το QPLL και στη συνέχεια να μεταβεί στην κατάσταση WAIT_LOCK.
DWE	Έξοδος	Αυτή η θύρα πρέπει να συνδέεται απευθείας στη θύρα QPLL DWE για την ενεργοποίηση ενός μητρώου εγγραφής.
DEN	Έξοδος	Αυτή η θύρα πρέπει να συνδέεται απευθείας στη θύρα QPLL DEN. Χρησιμοποιείται για να ξεκινήσει το διάβασμα ή την εγγραφή.
DADDR[6:0]	Έξοδος	Αυτή η θύρα πρέπει να συνδέεται απευθείας στη θύρα QPLL daddr. Χρησιμοποιείται σχετικά με την αναγνώριση της θέσης της παραμέτρου για διάβασμα ή εγγραφή.
DI[15:0]	Έξοδος	Αυτή η θύρα πρέπει να συνδέεται απευθείας στη θύρα MMCM DI. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή μιας νέας τιμής για εγγραφή.
DCLK	Έξοδος	Αυτή η θύρα πρέπει να συνδέεται απευθείας στη θύρα MMCM DCLK. Χρησιμοποιείται για να διαβιβάζει το ρολόι της θύρας αναδιαμόρφωσης στο QPLL ή σε άλλα ψηφιακά κυκλώματα. Ουσιαστικά επιτρέπει τη SCLK να περνά μέσα από το drp controller.
RST_GTH	Έξοδος	Αυτή η θύρα συνδέεται απευθείας στη θύρα RST. Χρησιμοποιείται για την επαναφορά των ψηφιακών κυκλωμάτων κατά τη διάρκεια μιας αναδιαμόρφωσης ή όταν η θύρα εισόδου RST είναι θετική.

Παρακάτω ακολουθεί ο κώδικας στη γλώσσα Verilog όπου υλοποιήθηκε το συνολικό κύκλωμα drp controller καθώς και οι απαραίτητες υπομονάδες που το συντελούν για την ορθή του λειτουργία. Οι εισοδοί και έξοδοι αντιστοιχούνται με βάση τον προηγούμενο πίνακα, τροποποιώντας την ονοματολογία προς χάριν ευκολίας κατά τη διάρκεια της υλοποίησης. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι για την

ορθή λειτουργία του design και για την απόδοση των κατάλληλων χαρακτηριστικών στους πομπούς, ο drp controller παράγει ένα σήμα επαναφοράς (reset) κάθε φορά που υπόκειται σε αλλαγή κατάστασης, το οποίο με τη σειρά του επαναφέρει τόσο τους πομπούς όσο και τα υπόλοιπα δομικά ψηφιακά κυκλώματα του design στην αρχική τους κατάσταση (idle condition) ακολουθώντας τους κανόνες επαναφοράς όπως αυτοί περιγράφονται αναλυτικά στο εγχειρίδιο χρήσης [251] με στόχο την αποφυγή εσφαλμένης λειτουργίας.

```

module top_drp_spdac2
(
  input [3:0] STATE,
  input RST,
  input CLKIN,
  input [15:0] DO_DRP,
  input QPLLOCKED,
  input CPLLOCKED,
  input GTDRDY,
  output [8:0] DADDR_DRP,
  output wire [15:0] DI_GTH,
  output SRDY_DRP,
  output wire RST_GTH,
  output CLK_GT,
  output wire reg DWE_GT,
  output DRP_BUSY_GT,
  output wire reg DEN_DRP
);

  one_pulse_spdac2 enable
  (
    .IN(STATE),
    .CLKSYS(clk_drp), // CLKin
    .RST(RST),
    .OUT(OUT)
  );

  gt_drp_16_states_spdac2_v2 controller
  (
    // These signals are controlled by user logic interface
    .STATE(STATE),
    .SCLK(clk_drp),
    .RST(RST),
    .SRDY(SRDY_DRP),
    .SEN(OUT), // is SEN, which enables the reconfiguration state machine and is triggered if this
                // port is asserted at a rising SCLK edge.
    // These signals are to be connected to the GTHE2_CHANNEL by port name.
    .DO(DO_DRP),
    .DRDY(GTDRDY),
    .QPLL_LOCKED(QPLLOCKED), // provided by QPLLLOCK (output) of gthe2_common_i module
    .CPLL_LOCKED(CPLLOCKED), // provided by CPLLLOCK (output) of gt_gth215_i (port CPLLLOCK)
    .DRP_BUSY(DRP_BUSY_GT),
    .DWE(DWE_GT),
    .DEN(den), // previous value den
    .DADDR(DADDR_DRP),
    .DI(DI_GTH),
    .DCLK(dclk), //dclk
    .RST_GT(rst_gth) );

```

Επίσης παρακάτω ακολουθεί η λογική λειτουργία του κυκλώματος με χρήση μανταλωτών τύπου D (D-latches) γέννησης ενός παλμού ίσου με ένα κύκλο του ρολογιού εισόδου, απαραίτητο για την εκκίνηση της λειτουργίας του state machine κάθε φορά που αλλάζει το σενάριο χρήσης.

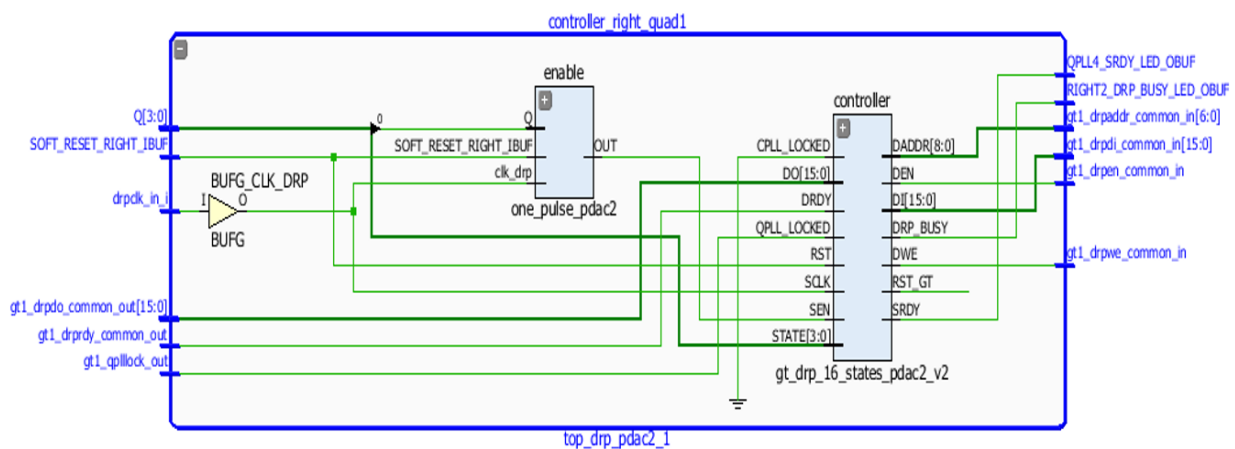
```

assign OUT_int = a ^ b;

always @(posedge CLKSYS) begin
    if (RST)
        begin
            a <= 0;
            b <= 0;
        end
    else begin
        a <= IN;
        b <= a;
        OUT <= OUT_int;
    end
end

```

Τέλος, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 4.55 το σχηματικό διάγραμμα, όπως υλοποιήθηκε μετά το στάδιο της σύνθεσης στο πρόγραμμα vivado και αφορά τη συνολική διάταξη του drp controller. Η διάταξη enable one_pulse_srdac2 σχετίζεται με το υλοποιημένο ψηφιακό κύκλωμα, το οποίο απαιτεί ένα ρολόι συγχρονισμού 100 MHz καθώς και η δεύτερη μονάδα της διάταξης, όπως αποδίδεται από το αρχικό design για τα ψηφιακά ακολουθιακά κυκλώματα παράγοντας τον ένα παλμό σε συνδυασμό με την έλευση του εξωτερικού σήματος ώστε να ενεργοποιηθεί ο drp controller ανάλογα με το ζητούμενο σενάριο. Ο πλήρης κώδικας των δύο υπομονάδων του κυκλώματος top_drp_srdac2 παρατίθενται στο παράρτημα Α.



Εικόνα 4.55: Σχηματικό διάγραμμα drp controller μετά το στάδιο της σύνθεσης στο vivado.

Δεξιά του κυκλώματος enable one_pulse_srdac2 βρίσκεται ο drp controller 16 καταστάσεων-σεναρίων χρήσης με τις αντίστοιχες εισόδους και εξόδους του όπως περιεγράφηκαν παραπάνω. Η είσοδος CPLL_LOCKED τερματίζεται καθώς τα κυκλώματα CPLL δεν χρησιμοποιούνται καθόλου στο design. Όλοι οι υπόλοιποι ακροδέκτες σύνδεσης οδηγούνται προς τα υπόλοιπα κυκλώματα του design και πιο συγκεκριμένα στο QPLL κάθε τετράδας (quad) πομπών. Μέσω αυτού του κυκλώματος επιτυγχάνεται η λειτουργία των πολλαπλών ρυθμών στους πομπούς ανάλογα με τα σήματα ελέγχου στην είσοδο. Από την άλλη πλευρά, για την ιδιότητα της χρήσης διαφορετικού αριθμού πομπών αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε κύκλωμα όπου δέχεται σαν είσοδο το σήμα ελέγχου του ζητούμενου σεναρίου μέσω της διεπαφής UART, το ρολόι συγχρονισμού των flip-flops και ένα σήμα-τάση προερχόμενο από ένα φυσικό διακόπτη πάνω στην πλακέτα. Αυτό το σήμα χρησιμοποιείται για να απενεργοποιεί όλους τους πομπούς της κάθε τετράδας κατά τη διάρκεια των δοκιμών χωρίς να απαιτείται να απενεργοποιηθεί όλη η πλακέτα και να χρειαστεί επαναφόρτωση του design. Οι ακροδέκτες σύνδεσης των εξόδων είναι σε σύνολο 7 όσο και οι ζητούμενοι πομποί για κάθε SPDAC. Με βάση το εγχειρίδιο χρήσης των πομπών [251], για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των πομπών πρέπει να τροφοδοτηθεί ο ακροδέκτης TXPD[1:0] κάθε πομπού με ένα

δίαυλο δύο bits, όπου 00 αντιστοιχεί σε απενεργοποίηση ενώ 11 σε ενεργοποίηση των πομπών. Παρακάτω ακολουθεί μέρος του κώδικα της μονάδας txpd_spdac2, όπου παρουσιάζεται ο αριθμός των ενεργών πομπών για τα δύο πρώτα σενάρια χρήσης καθώς και η κατάσταση όλων των πομπών όταν ο διακόπτης παράγει συνεχόμενη τάση 3.3 V. Ο ολοκληρωμένος κώδικας βρίσκεται στο παράρτημα στο τέλος της διατριβής.

```

    assign ground_i = 0; // Normal mode. Tx are on
    assign vcc_i = 1; // Power-down mode. Tx are off
reg [3:0] operation_r;
reg txs_off_r;

always @(posedge clk_in) begin

    operation_r<=operation;
    txs_off_r<=txs_off;

    if (txs_off_r == 1) begin
        tx1y0 = vcc_i;
        tx1y1 = vcc_i;
        tx1y2 = vcc_i;
        tx1y3 = vcc_i;
        tx1y4 = vcc_i;
        tx1y5 = vcc_i;
        tx1y6 = vcc_i;
    end
    else begin
        case (operation_r)

4'b0000: begin // QPSK at 25 Gbaud ----> two streams at input of spdac2
            tx1y0 = ground_i;
            tx1y1 = ground_i;
            tx1y2 = vcc_i;
            tx1y3 = vcc_i;
            tx1y4 = vcc_i;
            tx1y5 = vcc_i;
            tx1y6 = ground_i;
        end
        4'b0001: begin // 16QAM at 12.5 Gbaud ----> four streams at input of spdac2
            tx1y0 = ground_i;
            tx1y1 = ground_i;
            tx1y2 = vcc_i;
            tx1y3 = vcc_i;
            tx1y4 = ground_i;
            tx1y5 = ground_i;
            tx1y6 = ground_i;
        end
    end
end

```

Το αντίστοιχο σχηματικό διάγραμμα του παραπάνω κυκλώματος απεικονίζεται στην εικόνα 4.56, όπως δημιουργήθηκε μετά το στάδιο της σύνθεσης. Στην εικόνα αυτή φαίνονται τα σήματα ελέγχου που προέρχονται από το φυσικό διακόπτη καθώς και από τη διεπαφή UART και στη δεξιά πλευρά βρίσκονται οι έξοδοι που οδηγούν τους ακροδέκτες TXPD [1:0] του κάθε πομπού και τους ενεργοποιούν/απενεργοποιούν ανάλογα με το ζητούμενο σενάριο.

πρέπει να μεταβούν οι λειτουργίες των ηλεκτρικών πομπών. Το συγκεκριμένο κύκλωμα αποτελείται από δύο υποκυκλώματα σύμφωνα με την εικόνα 4.57 καθώς παρακάτω παρουσιάζεται ο κύριος κώδικας όπου εγκαλούνται τα δύο υποκυκλώματα UART_IP uartip και το state_machine fsm. Το πρώτο (UART_IP uartip) σχετίζεται με το πρωτόκολλο επικοινωνίας UART (universal asynchronous receiver/transmitter) και συνεπώς υλοποιούνται η γεννήτρια baud σε FPGA, η υπομονάδα αποστολής καθώς και η υπομονάδα αποδέκτη. Παράλληλα, τα συγκεκριμένα υπό ανάπτυξη λογικά κυκλώματα θα πρέπει να ταιριάζουν και να συνδεθούν κατάλληλα με τους ακροδέκτες εισόδου και εξόδου του ενσωματωμένου κυκλώματος chip UART που εντοπίζεται στη φυσική δομή του FPGA στο τμήμα του design που αφορά τους περιορισμούς (constraints) της συνολικής σχεδίασης. Το δεύτερο υποκύκλωμα state_machine fsm είναι υπεύθυνο για την μετάφραση των δεδομένων αποστολής από τον SDO agent και την μετατροπή των ASCII χαρακτήρων σε μορφή byte ώστε να διανεμηθούν στα υπόλοιπα ψηφιακά κυκλώματα του design.

```

module UART_LOOPBACK
    UART_IP uartip(
        // UART USB ports
        .sys_clk(sys_clk), // 27 MHZ on SP605
        .RTS(RTS), // I am ready to receive data
        .CTS(CTS), // USB Clear to send
        .TX(TX), // Output to USB
        .RX(RX), // Input to USB
        // FPGA
        .TxD_par(TxD_par),
        .TxD_ready(TxD_ready),
        .RxD_par(),
        .RxD_start()
    );
    state_machine fsm(
        .sys_clk(sys_clk),
        .TxD_par(TxD_par),
        .TxD_ready(TxD_ready),
        .leds(state)
    );

```

Πιο συγκεκριμένα, η μονάδα UART_IP αποτελείται με βάση τον παρακάτω κώδικα από τις υπομονάδες γεννήτρια baud σε FPGA (BaudGen baudgen και Baud16Gen baud16gen) και από τον ασύγχρονο πομπό (UART_TX uart_tx) και δέκτη (UART_RX uart_rx).

```

        // Generate baud clock 115200
        BaudGen baudgen(
            .sys_clk(sys_clk),
            .BaudTick(BaudTick)
        );
        Baud16Gen baud16gen(
            .sys_clk(sys_clk),
            .Baud16Tick(Baud16Tick)
        );
        // Transmit data to USB
        UART_TX uart_tx(
            .RxD_par(RxD_par), // 8 bit data Input from FPGA
            .RxD_start(RxD_start), // start input from FPGA
            .RTS(~RTS), // USB clear to send
            .sys_clk(sys_clk),
            .BaudTick(BaudTick),
            .TxD_ser(TX)
        );
        // Receive data from USB

```



```

UART_RX uart_rx (
    .RxD_ser(RX),
    .CTS(NCTS), // I am clear to receive
    .sys_clk(sys_clk),
    .Baud16Tick(Baud16Tick),
    .TxD_par(TxD_par), //8 bit Output data to fpga
    .TxD_ready(TxD_ready) ); // Ready data to FPGA

```

Αναλυτικότερα, για τη γεννήτρια baud σε FPGA, στην περίπτωση όπου το ρολόι έχει συχνότητα 200MHz παρατηρείτε ότι το 200000000 δεν είναι δύναμη του 2. Οπότε, αντί του λόγου “200000000/115200” θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί “(2²⁸)/154619” = 1736.1 που είναι πλησίον στον επιθυμητό λόγο για την υλοποίηση στο συγκεκριμένο FPGA. Ένα “BaudTick” εισέρχεται την 115234 στιγμή ανά δευτερόλεπτο με σφάλμα 0.03% από το ιδανικό 115200. Στην περίπτωση ρολογιού συχνότητας 100 MHz όπως αυτό προσφέρεται από το FPGA και χρησιμοποιείται σε όλο το design για να συγχρονίσει τα ακολουθιακά κυκλώματα θα πρέπει ο παρονομαστής της παραπάνω πράξης να διπλασιαστεί εξού και ο αριθμός 309238 στην παρακάτω υλοποίηση.

```

reg [28:0] count=0;
// 200e6/115200 ~ 2**28/154619 for 200MHz clock
always @(posedge sys_clk)
begin
    count <= count[27:0] + 309238; // 309238 for 100 MHz clock
end
assign BaudTick = count[28];

```

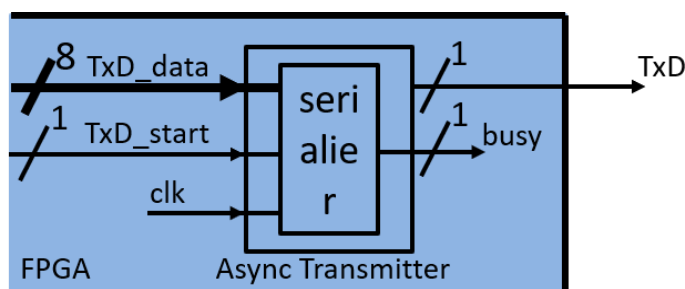
Το παράδειγμα που αναφέρθηκε προηγουμένως χρησιμοποιούσε έναν 29-ψηφίο καταχωρητή (count), ώστε να μπορεί να καταχωρηθεί και να αποθηκευτεί η τιμή 309238 με ρολόι συχνότητας 100 MHz. Όσο η συχνότητα του ρολογιού (clock frequency) αυξάνεται τόσο περισσότερα ψηφία απαιτούνται. Στον κώδικα που ακολουθεί χρησιμοποιείται ένα ρολόι με συχνότητα 200MHz και ένας καταχωρητής (count) με 25 bits.

```

reg [24:0] count=0;
// 200e6/115200 ~ 2**28/154619
// 27e6/115200 ~ 2**19/2237
always @(posedge sys_clk)
begin
    count <= count[23:0] + 154619;
end
assign Baud16Tick = count[24];

```

Το επόμενο αντικείμενο (instance) που δημιουργείται με όνομα “transmit” σύμφωνα με την υπομονάδα (module) του αποστολέα “async_transmitter” συνδέεται ως έξοδος από την θύρα (port) RS-232. Σχηματικά περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα 4.58 το αντικείμενο (instance) “transmit” που δημιουργείται από την υπομονάδα του αποστολέα (UART_TX module) και τα σήματα (signals) που εφαρμόζονται σύμφωνα με τον κώδικα της υπομονάδας κορυφής (top module) και που αρμόζουν στην συγκεκριμένη εφαρμογή.



Εικόνα 4.58: Αντικείμενο που δημιουργείται από την υπομονάδα αποστολής (Transmit instance).

Το σήμα εισόδου (input signal) “TxD_start” του αντικειμένου (instance) “transmit” που δημιουργείται είναι ενός ψηφίου (1bit) και λειτουργεί ως σήμα ελέγχου (control signal). Ο καταχωρητής (register)

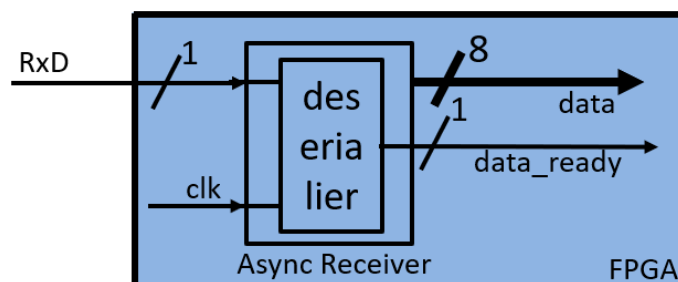
“TxD_data” έχει μήκος 8 bits και χρησιμοποιείται ως σήμα εισόδου δεδομένων (input data signal) στο αντικείμενο (instance) “transmit” της υπομονάδας αποστολής (transmitter module). Η αποστολή των δεδομένων γίνεται από το σήμα εξόδου “TxD” μήκους ενός 1 bit. Με βάση τη λειτουργία της υπομονάδας αποστολής (transmit module) από το εσωτερικό του αντικειμένου (instance) “transmit” τα δεδομένα εξέρχονται (data output) στο σήμα εξόδου “TxD” σε σειριακή μορφή (ενώ εισέρχονται σε “τμήματα” μήκους ενός “byte”). Με άλλα λόγια η πληροφορία TxD σε σειριακή μορφή εξέρχεται από τη θύρα (port) UART-σε-USB του FPGA στο συνδεδεμένο καλώδιο (cable), το οποίο στην άλλη του άκρη υπάρχει το πρόγραμμα εντολών (command program). Ο κώδικας που αντιστοιχεί στη δημιουργία του αντικειμένου (instance) “transmit” σύμφωνα με την υπομονάδα του αποστολέα (UART_TX module) είναι:

```

always @(posedge sys_clk)
begin
if (RxD_start & state<2) begin
RxD_buff <= RxD_par; // Buffer data received
end else if (state[3] & BaudTick) begin
RxD_buff <= (RxD_buff >> 1); // Shift a bit at every baud tick during transmission
end
case(state)
4'b0000: if(RxD_start & RTS) state <= 4'b0010; //Initiate process when data is valied and USB is ready
// to receive
4'b0010: if(BaudTick) state <= 4'b0011; // Synchronize to baudtick,
4'b0011: if(BaudTick) state <= 4'b1000; //start (state !< 2 , state[3]=0 ie TxD = 0)
4'b1000: if(BaudTick) state <= 4'b1001; //bit 0
4'b1001: if(BaudTick) state <= 4'b1010; //bit 1
4'b1010: if(BaudTick) state <= 4'b1011; //bit 2
4'b1011: if(BaudTick) state <= 4'b1100; //bit 3
4'b1100: if(BaudTick) state <= 4'b1101; //bit 4
4'b1101: if(BaudTick) state <= 4'b1110; //bit 5
4'b1110: if(BaudTick) state <= 4'b1111; //bit 6
4'b1111: if(BaudTick) state <= 4'b0001; //bit 7
4'b0001: if(BaudTick) begin //stop
if(RxD_start & RTS) begin
state <= 4'b0011; // Data already synchronized to baudtick
end else begin
state <= 4'b0000; // (state < 2 ie TxD = 1)
end
end
default: if(BaudTick) state <= 4'b0000;
endcase
end
end

```

Από την άλλη πλευρά, δημιουργείται ένα αντικείμενο (instance) με το όνομα “receive” σύμφωνα με την υπομονάδα του αποδέκτη (async_receiver module) ως είσοδος από την θύρα (port) UART του FPGA. Σχηματικά περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα το αντικείμενο (instance) “receive” που δημιουργείται από την υπομονάδα του αποδέκτη (UART_RX module) και τα σήματα (signals) που εφαρμόζονται σύμφωνα με τον κώδικα της υπομονάδας κορυφής (top module) και που αρμόζουν στην συγκεκριμένη εφαρμογή.



Εικόνα 4.59: Αντικείμενο που δημιουργείται από την υπομονάδα αποδέκτη (Receive instance).

Το σήμα εξόδου (output signal) "data_ready" του αντικειμένου (instance) "receive" που δημιουργείται είναι ενός bit. Λειτουργεί ως σήμα ελέγχου (control signal) και ενημερώνει για την πραγμάτωση ή μη αποστολής δεδομένων από το σήμα (signal) "data" προς έναν από τους οκτώ καταχωρητές (registers). Η μεταβλητή "data" έχει μήκος 8 bits. Χρησιμοποιείται ως σήμα εξόδου δεδομένων (output data signal) του αντικειμένου (instance) "receive" της υπομονάδας του αποδέκτη (UART_RX module) και όπως προαναφέρθηκε μεταφέρει τα "bytes" με την πληροφορία-κατάσταση προερχόμενη από τον SDO agent και είναι σε μορφή ASCII. Επίσης, σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη μονάδα απαιτεί να είναι με κάποιο τρόπο σε συγχρονισμό με το εισερχόμενο σήμα (που κανονικά δεν έχει πρόσβαση στο ρολόι που χρησιμοποιείται από τον πομπό), με σκοπό να προσδιορίζει πότε ένα νέο byte δεδομένων έρχεται, αναζητώντας για το "start" bit μέσω υπερδειγματοληψίας του σήματος σε ένα πολλαπλάσιο της συχνότητας ρυθμού baud. Μόλις εντοπιστεί το bit "start", δειγματοληπτείται η γραμμή στο γνωστό ρυθμό baud για να αποκτήθούν τα bits δεδομένων. Τέτοιου είδους δέκτες συνήθως υπερδειγματοληπτούν το εισερχόμενο σήμα 16 φορές του ρυθμού baud (θα πρέπει να επισημανθεί σε αυτό το σημείο ότι ο παρακάτω κώδικας χρησιμοποιεί τη γεννήτρια Baud16Tick). Για 115200 bauds, δίνεται ένας ρυθμός δειγματοληψίας 1843200 Hz.

```
// Data synchronization and stabilization by passing it through 2 flip flops
reg [1:0] RxD_sync;
always @(posedge sys_clk) if(Baud16Tick) RxD_sync <= {RxD_sync[0], RxD_ser};
// Filter data
reg [2:0] RxD_cnt=7;
reg RxD_bit;
always @(posedge sys_clk)
if(Baud16Tick)
begin
if(RxD_sync[1] && RxD_cnt!=3'b111) RxD_cnt <= RxD_cnt + 1; // Count up no of times line is high
else if(~RxD_sync[1] && RxD_cnt!=3'b000) RxD_cnt <= RxD_cnt - 1; //Count down no of times line low
// Determine data
if(RxD_cnt==3'b000) RxD_bit <= 0;
else if(RxD_cnt==3'b111) RxD_bit <= 1;
end
// State machine
reg [3:0] state=0;
always @(posedge sys_clk)
if(Baud16Tick)
case(state)
4'b0000: if(~RxD_bit) state <= 4'b1000; // start bit found?
4'b1000: if(next_bit) state <= 4'b1001; // bit 0
4'b1001: if(next_bit) state <= 4'b1010; // bit 1
4'b1010: if(next_bit) state <= 4'b1011; // bit 2
4'b1011: if(next_bit) state <= 4'b1100; // bit 3
4'b1100: if(next_bit) state <= 4'b1101; // bit 4
4'b1101: if(next_bit) state <= 4'b1110; // bit 5
4'b1110: if(next_bit) state <= 4'b1111; // bit 6
4'b1111: if(next_bit) state <= 4'b0001; // bit 7
4'b0001: if(next_bit) state <= 4'b0000; // stop bit
default: state <= 4'b0000;
endcase
// Ready to receive
assign CTS = (state<2); //ready to receive
// Measure bit spacing
reg [3:0] bit_spacing;
always @(posedge sys_clk)
if(state==0)
bit_spacing <= 0;
```

```

else
if(Baud16Tick) bit_spacing <= bit_spacing + 1;
wire next_bit = (bit_spacing==15);
assign TxD_ready = (state==1);

```

Τελευταία υπομονάδα αφορά ένα state machine για την μεταφορά των δεδομένων που προέρχονται από τον SDO agent και είναι σε κωδικοποίηση ASCII και κατ' επέκταση σε hex μορφή αντιστοιχώντας στα 16 σενάρια χρήσης. Οποιοσδήποτε άλλο χαρακτήρας πέραν των 16 που απεικονίζονται στον πίνακα 22 αφήνουν το design σε αδρανή κατάσταση χωρίς αλλαγή στα χαρακτηριστικά των πομπών. Στην κατάσταση αρχικοποίησης (initialization) δηλώνεται το σημείο αναφοράς ή έναρξης state[6:0]=7'b0 στην οποία βρίσκεται αρχικά το πρώτο σενάριο με τη βοήθεια των καταχωρητών (registers) "TxD_par[7:0]" και η τελική κατάσταση state[6:0]= 7'b1000000, η οποία είναι η τελευταία επιτρεπτή τιμή. Το σήμα ελέγχου (control signal) "TxD_ready" ενεργοποιεί με την πυροδότηση της θετικής ακμής του state machine, έτσι ώστε να ξεκινήσει η αναγνώριση των χαρακτήρων ASCII προερχόμενοι από τον SDO agent. Παρακάτω ακολουθεί ο κώδικας για τρεις καταστάσεις αυτού του state machine, όπως υλοποιήθηκε στο design (καθότι ο ολοκληρωμένος κώδικας βρίσκεται στο παράρτημα):

```

always @(posedge sys_clk) begin
    if(TxD_ready) begin
        state[6:0]<=7'b0;
        case (state)
//*****state 0 *****
        7'b000000:        // state 0/ ascii 0/ hex 30/ b 00110000
            begin
                if ( TxD_par[7:0] == 8'b00110000) begin
                    buffer[3:0]<=4'b0000;        // all leds off
                    state[6:0]<=7'b1000000;        // byte found go to exit state
                end
                else begin state[6:0]<= 7'b0000001;        // byte not found go to state 1
                end
            end
//*****state 1 *****
        7'b0000001:        //state 1 /ascii 1/ hex 31/ 00110001
            begin
                if ( TxD_par[7:0] == 8'b00110001) begin
                    buffer[3:0]<=4'b0001;        // leds: 0 0 0 1
                    state[6:0]<=7'b1000000;        // byte found go to exit state
                end
                else begin state[6:0]<= 7'b0000010;        // byte not found go to state 2
                end
            end
//*****state 2 *****
        7'b0000010:        //state 2/ ascii 2 /hex 32/ b 00110010
            begin
                if (TxD_par[7:0] == 8'b00110010) begin
                    buffer[3:0]<=4'b0010;        // leds: 0 0 1 0
                    state[6:0]<=7'b1000000;        // byte found go to exit state
                end
                else begin state[6:0]<= 7'b0000011;        // byte not found go to state 3
                end
            end
        end
    end

```

Τελευταία υλοποιημένη αλλαγή βαρύνουσας σημασίας στο συγκεκριμένο design αφορά τη χρήση των μονάδων γέννησης των προγραμματιζόμενων ηλεκτρικών ακολουθιών δυαδικής μορφής με ονομασία "frame_gen", καθώς μέσω αυτών φορτωνόντουσαν τα διαφορετικά μοτίβα με στόχο τη δημιουργία

αποσυσχετισμένων ροών δεδομένων που οδηγούν τις εισόδους των SPDACs όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Σε αυτή την ψηφιακή υλοποίηση χρησιμοποιείται μια block Ram 512 θέσεων όπου φορτώνεται ένα αρχείο μορφής .dat με 512 σειρές και 21 στήλες με hex χαρακτήρες και συνολικού παραγόμενου μήκους ακολουθίας στην έξοδο του κάθε πομπού 40960 bits. Κάθε μια τέτοιου είδους μονάδα αντιστοιχεί σε ένα ηλεκτρικό πομπό και συνδέεται με ένα κανάλι 80 bits, τα οποία στέλνονται στον πομπό ανά παλμό του ρολογιού χρονισμού των κυκλωμάτων. Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας σε Verilog της μονάδας “frame_gen” στηριζόμενη σε ένα κύκλωμα μετρητή (counter) 512 θέσεων, η οποία σαρώνει σε κάθε θετική ακμή του ρολογιού κάθε μια θέση της Block Ram και αποστέλλει την πληροφορία 80 bits αφού τη μετατρέψει από hex σε δυαδική μορφή. Κάθε φορά που ολοκληρώνει ο μετρητής τη σάρωση των 512 θέσεων ή εισέλθει σήμα επαναφοράς (από τον dpr controller λόγω αλλαγής κατάστασης), το ψηφιακό κύκλωμα ξανά ξεκινά την αποστολή της ακολουθίας από την πρώτη θέση της Block Ram. Επίσης το τελικό πραγματικό μήκος της ακολουθίας το οποίο παράγεται από τους πομπούς είναι 32768 bits καθώς τελικά στέλνονται 64 bits ανά θέση της Block Ram αφού τα 16 πρώτα bits χρησιμοποιούνται για σήματα ελέγχου σε άλλες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα εντός των πομπών και αφορούν σχήματα κωδικοποίησης (όπου σε αυτό το design δεν χρησιμοποιούνται).

```
// _____ Counter to read from BRAM _____

always @(posedge USER_CLK)
  if(system_reset_r2 || (read_counter_i == "11111111"))
    begin
      read_counter_i <= `DLY 9'd0;
    end
  else read_counter_i <= `DLY read_counter_i + 9'd1;

  // Assign TX_DATA_OUT to BRAM output
  always @(posedge USER_CLK) begin
    TX_DATA_OUT <= `DLY {tx_data_bram_i,tx_data_ram_r[15:0]};
    TXCTRL_OUT <= `DLY tx_ctrl_i;
  end

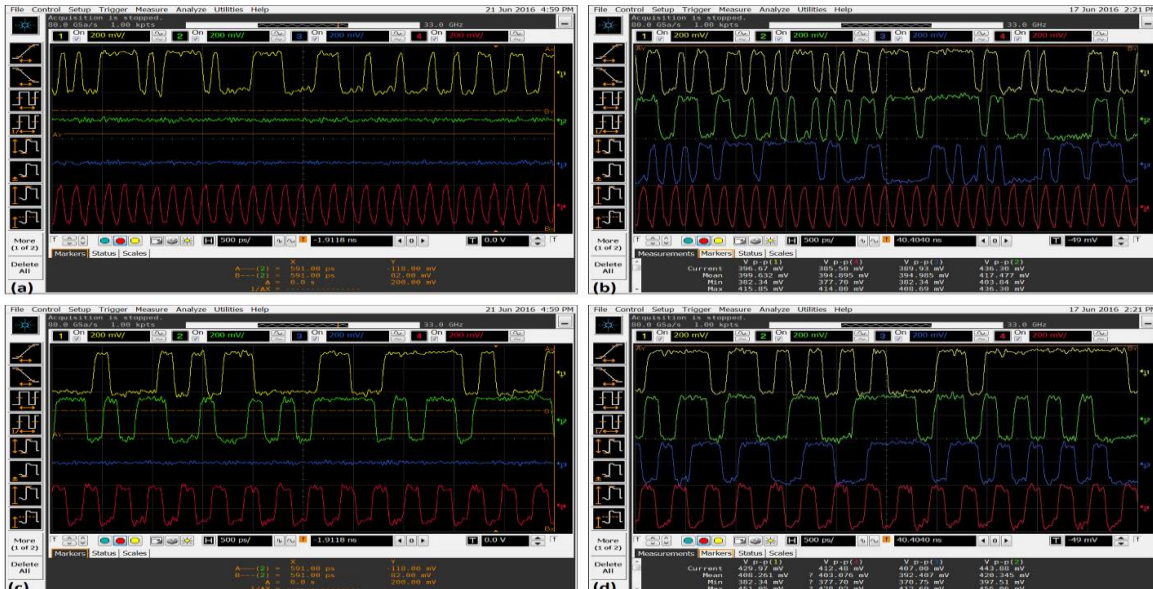
// _____ BRAM Inference Logic _____

assign tx_data_bram_i = tx_data_ram_r[79:16];
assign tx_ctrl_i = tx_data_ram_r[15:8];

initial
begin
  $readmemh("prbs11_hex_1.dat",rom,0,511);
end

always @(posedge USER_CLK)
  tx_data_ram_r <= `DLY rom[read_counter_i];
```

Με χρήση της παραπάνω μονάδας υλοποιήθηκε και η παραγωγή υψίρρυθμου ρολογιού στην έξοδο ενός πομπού που σχετίζεται και είναι απαραίτητη σε κάθε μια μονάδα SPDAC με στόχο την ορθή λειτουργία της ηλεκτρονικής πολυπλεξίας. Σε αυτή την περίπτωση, η μόνη αλλαγή που πραγματοποιήθηκε αφορά το αρχείο της πληροφορίας που φορτώνεται στη Block Ram, όπου δεν περιέχεται ένα προεπιλεγμένο δυαδικό μοτίβο πληροφορίας αλλά μια επαναλαμβανόμενη ακολουθία μορφής “0101010” συντελώντας κατά αυτό τον τρόπο στην παραγωγή ενός ψηφιακού ρολογιού το οποίο οδηγείται στον επιλεγμένο πομπό. Στην έξοδο λαμβάνεται υψίρρυθμο ηλεκτρικό ρολόι ημίσεος συχνότητας από αυτή που έχουν οι ηλεκτρικές ροές δεδομένων με μοτίβα σημάτων (βλέπε εικόνα 4.60).



Εικόνα 4.60: Ηλεκτρικά σήματα στις εξόδους των πομπών: (a) ένας ενεργός πομπός δεδομένων 12.5 Gb/s και ρολόι 6.25 GHz, (b) τρεις ενεργοί πομποί 12.5 Gb/s και ρολόι 6.25 GHz, (c) δύο ενεργοί πομποί 6.25 Gb/s και ρολόι 3.125 GHz και (d) τέσσερις ενεργοί πομποί 6.25 Gb/s και ρολόι 3.125 GHz.

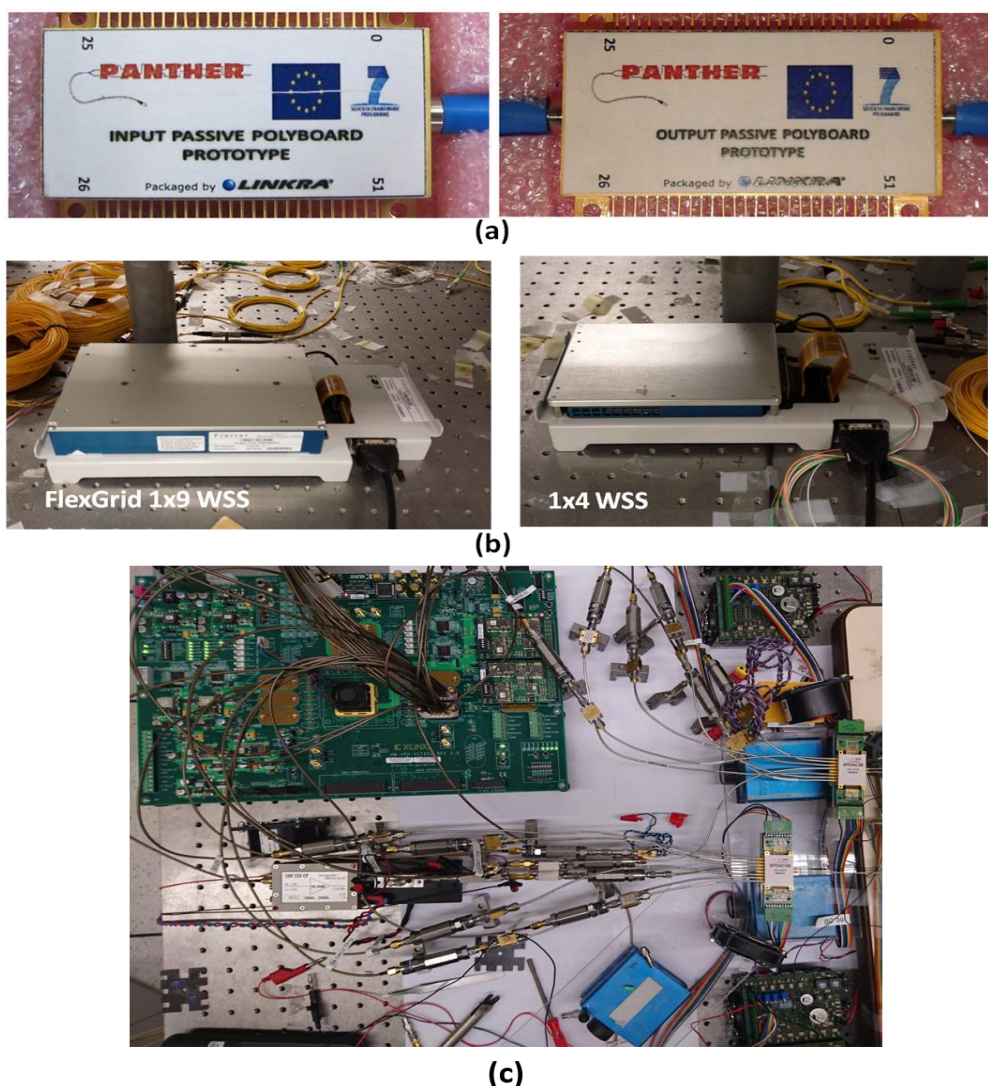
Τέλος, αφού παρουσιάστηκαν όλες οι υλοποιημένες μονάδες ψηφιακών κυκλωμάτων συμπεριλαμβανομένου του τμήματος της διεπαφής επικοινωνίας μεταξύ του SDO agent και του FPGA, στο συγκεκριμένο design αφού ολοκληρώθηκε η σύνθεση χωρίς λάθη και δημιουργήθηκε η πραγμάτωση (implementation) πάνω στην πλακέτα, χαρακτηρίστηκαν όλα τα σενάρια χρήσης στο ηλεκτρικό πεδίο αμέσως μετά τις εξόδους των πομπών με χρήση παλμογράφου πραγματικού χρόνου τόσο για ηλεκτρικές ροές δεδομένων και στους δύο ρυθμούς μετάδοσης σε συνδυασμό με διαφορετικό αριθμό χρησιμοποιούμενων πομπών καθώς και το ηλεκτρικό ρολόι ημίσεος συχνότητας κάθε περίπτωσης. Στην εικόνα 4.60 παρουσιάζονται στα (a)-(b) ένας και τρεις ενεργοί πομποί αντίστοιχα με ρυθμό μετάδοσης 12.5 Gb/s και ρολόι 6.25 GHz ενώ στα (c)-(d) οι ενεργοί πομποί αριθμούνται σε δύο και τρεις αντίστοιχα με ρυθμό μετάδοσης 6.25 Gb/s και ρολόι 3.125 GHz επιβεβαιώνοντας την ορθή λειτουργία του design και την αναδιαμόρφωση των χαρακτηριστικών των πομπών «on-the-fly», με απώτερο σκοπό την χρήση τους ως σήματα εισόδου στις δύο συσκευές SPDACs και την παράθεση της λειτουργίας πολλαπλών ρυθμών και πολλαπλών σχημάτων διαμόρφωσης σε συνδυασμό με τις ολοκληρωμένες οπτικές συσκευές πολλαπλών ροών.

4.26 Ανάπτυξη του SDO agent με Χρήση του Προγράμματος LabVIEW

Σε αυτή την υποενότητα, γίνεται εκτενής αναφορά στον SDO agent, ο οποίος παρέχει λειτουργίες αναδιαμόρφωσης του οπτικού εξοπλισμού μεταφοράς, έτσι ώστε να ελέγχει την κατάσταση λειτουργίας των προτεινόμενων ευέλικτων μονάδων, των στοιχείων WSS καθώς και της πλακέτας αξιολόγησης όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως. Αυτός ο έλεγχος συντελείται μέσω μετάφρασης ενός συνόλου γενικών οπτικών παραμέτρων μετάδοσης που αντιστοιχούν στον αριθμό των παραγόμενων οπτικών ροών, στον αριθμό των οπτικών υποφερόντων, στο/στα μήκος/μήκη κύματος του/ων φέροντος/φερόντων, στο επιλεγμένο σχήμα διαμόρφωσης και στο ρυθμό μετάδοσης των συμβόλων. Ο SDO agent έχει αναπτυχθεί στο λογισμικό LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) [252], μια ισχυρή πλατφόρμα σχεδιασμού συστήματος και ένα περιβάλλον ανάπτυξης σε οπτική γλώσσα προγραμματισμού από την National Instruments. Το LabVIEW επιτρέπει τον έλεγχο των διαφόρων εργαστηριακών οργάνων, τα οποία χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν τις παραμέτρους λειτουργίας των υπό εξέταση ευέλικτων μονάδων και την ενσωμάτωση των λειτουργιών τους σε ένα ενιαίο περιβάλλον εργασίας του λογισμικού, ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο επικοινωνίας του οργάνου (GPIB, Serial, USB κλπ). Πιο συγκεκριμένα, το ανεπτυγμένο λογισμικό LabVIEW ελέγχει τις τρέχουσες πηγές οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη ρύθμιση της κατάστασης λειτουργίας των ενσωματωμένων chip κέρδους InP (ON/OFF κατάσταση) και του μήκους κύματος λειτουργίας τους, καθώς και τις αντίστοιχες πηγές ρεύματος, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη ρύθμιση της κατάστασης λειτουργίας των ρυθμιζόμενων θερμο-οπτικών διακοπών, που είναι ενσωματωμένοι στις παθητικές δομές των ευέλικτων συσκευών. Επιπλέον, ο SDO agent ελέγχει τις

παραμέτρους των WSSs, τα οποία είναι μέρος του σχεδιασμένου κόμβου του δικτύου και αποστέλλουν τις οπτικές ροών των ευέλικτων πομποδέκτων σε διαφορετικές κατευθύνσεις του δικτύου. Ο SDO agent έχει προγραμματιστεί να καθορίζει τον αριθμό των θυρών εισόδου/εξόδου των WSSs που χρησιμοποιούνται, την κεντρική συχνότητα του καναλιού, το πλάτος της ζώνης διέλευσης (μόνο για το FlexGrid WSS) και το επίπεδο εξασθένησης τους. Η εικόνα 4.61 απεικονίζει μια φωτογραφία του οπτικού εξοπλισμού μεταφοράς, ο οποίος ελέγχεται μέσω του SDO agent. Παράλληλα, σε αυτό το ανεπτυγμένο λογισμικό έχει προστεθεί και ο έλεγχος μέσω σειριακής θύρας του αναμεταδότη FPGA, ο οποίος ανάλογα με τα σενάρια χρήσης που έχουν καθοριστεί παραπάνω αναπροσαρμόζει τον αριθμό και το ρυθμό μετάδοσης των ηλεκτρικών πομποδεκτών που βρίσκονται πάνω στην πλακέτα και χρησιμοποιούνται ως σήματα εισόδου των SPDACs, καθορίζοντας με αυτό τον τρόπο τον τελικό ρυθμό μετάδοσης των συμβόλων και το σχήμα διαμόρφωσης.

Ο SDO agent διασυνδέεται με τον εξοπλισμό και πιο συγκεκριμένα με τη μονάδα 0 (πρόδρομος της συσκευής 3) με τη βοήθεια μιας κεντρικής μονάδας ILX (μοντέλο 3916) που φιλοξενεί συνολικά 16 πηγές ρεύματος όλες χρησιμοποιούμενες. Τα τρία chip κέρδους InP, τα φράγματα περίθλασης Bragg τους και τα ηλεκτρόδια οπτικής φάσης καθώς και οι θερμο-οπτικοί διακόπτες (TOS) πρέπει να τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα ώστε να είναι λειτουργικά. Η κεντρική μονάδα ILX συνδέεται με το LabVIEW μέσω θύρας GPIB (διεπαφή γενικού σκοπού με πρωτόκολλο Bus-IEEE 488.2) και οι λειτουργίες που ελέγχονται αφορούν την μεταγωγή ON/OFF, δηλαδή καθορίζουν τις παραμέτρους των τιμών ρεύματος, καθώς και την αποστολή αναφοράς σε τακτά χρονικά διαστήματα σχετικά με την κατάστασή τους (ενεργοποιημένος αριθμός καναλιών, τιμές ρευμάτων και πιθανά όρια τιμών της τάσης-ρεύματος που μπορούν να επιτευχθούν).



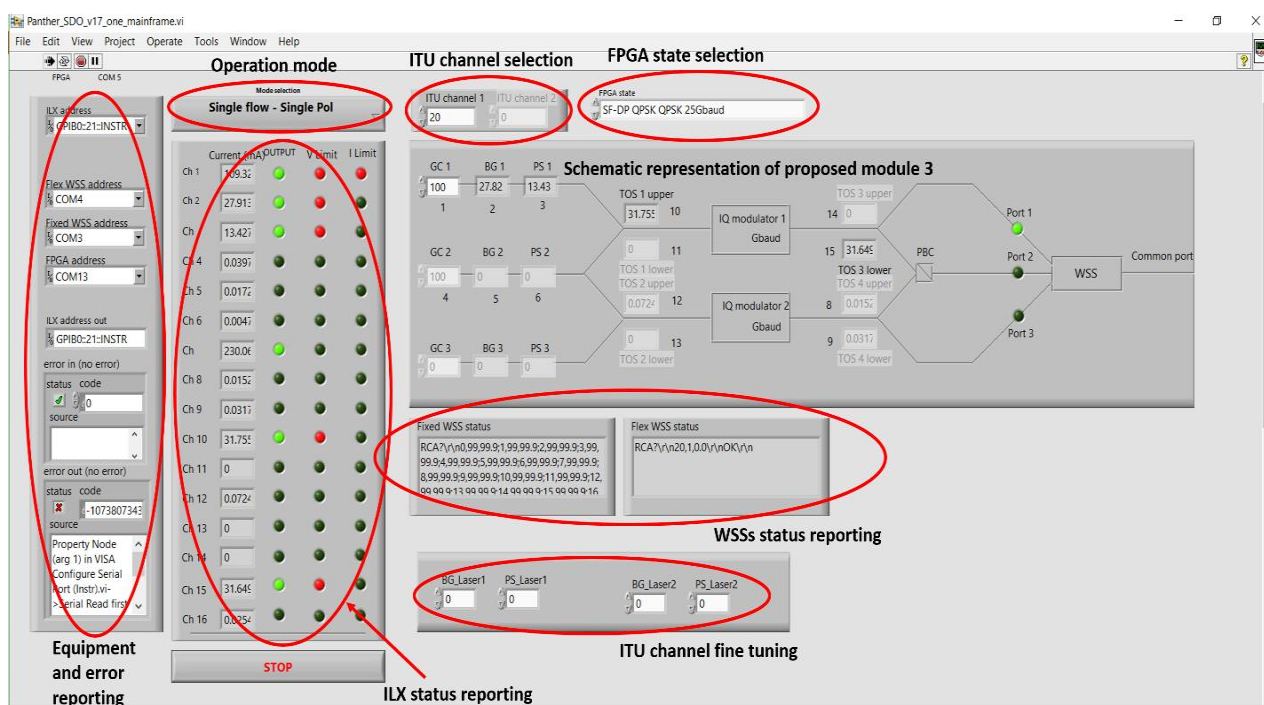
Εικόνα 4.61: Έλεγχος οπτικού εξοπλισμού μεταφοράς μέσω του λογισμικού SDO agent ανεπτυγμένο στο LabVIEW: (a) πρόδρομος μονάδα 0, (b) Finisar WSSs: 1x9 Flexgrid (αριστερά) και 1x4 100 GHz σταθερού πλέγματος (δεξιά) και (c) έξοδοι πλακέτας FPGA συνδεδεμένοι στις εισόδους των δύο SPDACs.

Αυτές οι λειτουργίες μεταφράζονται σε ενεργοποίηση/απενεργοποίηση των chip κέρδους InP, σε αλλαγή του μήκους κύματος ITU του καναλιού λειτουργίας (τα ρεύματα εφαρμογής στα ηλεκτρόδια των φραγμάτων περίθλασης Bragg και της οπτικής φάσης) και σε ρύθμιση της οπτικής διαδρομής πάνω στους κυματοδηγούς των παθητικών δομών polyboard (TOS). Οι ολοκληρωμένες πηγές λέιζερ έχουν εύρος συντονισμού μήκους κύματος πάνω από 23 nm στη C μπάντα (1532-1565 nm) που εκτείνονται κατά μήκος των καναλιών ITU-100GHz από 1 έως 29.

Καθώς όμως, περιγράφεται ένα πλήρως λειτουργικά ελεγχόμενο σύστημα οπτικής εκπομπής και μετάδοσης σε συνδυασμό με τον προτεινόμενο κόμβο και τα WSSs αποτελούν μέρος του σχεδιασμού του κόμβου, ο SDO agent είναι σε θέση να ελέγχει τις παραμέτρους αυτών των οπτικών συσκευών. Ειδικότερα, το 1x9 Flexgrid WSS είναι συνδεδεμένο με τις ευέλικτες συσκευές, οι οποίες παράγουν τις οπτικές ροές και το 1x4 100 GHz/σταθερού πλέγματος WSS χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των παραγόμενων οπτικών ροών σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις του δικτύου ακολουθώντας συγκεκριμένο φυσικό μονοπάτι. Η ανάθεση της θύρας με το ITU κανάλι, η εξασθένιση και το εύρος ζώνης του καναλιού (μόνο για Flexgrid) ελέγχονται μέσω του περιβάλλοντος του LabVIEW. Τα WSSs είναι εξοπλισμένα με σειριακές θύρες για σύνδεση, έτσι ώστε να επικοινωνούν με το LabVIEW χρησιμοποιώντας το σειριακό πρωτόκολλο σε ρυθμό 115.2 kBaud.

Ακολουθώντας την ίδια φιλοσοφία επικοινωνίας όπως στην περίπτωση των WSSs, διασυνδέθηκε μέσω σειριακού πρωτοκόλλου κατά παρόμοιο τρόπο και η πλακέτα FPGA σε ρυθμό 115.2 kBaud μέσω του προγραμματισμού της διεπαφής USB-σε-UART που παισιώνεται πάνω στην πλακέτα και περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Το σκεπτικό της διασύνδεσης στηρίχτηκε στην διεπικοινωνία του SDO agent με την πλακέτα FPGA, λειτουργώντας ο μὲν πρώτος ως πομπός και ο δε δεύτερος ως δέκτης. Κατ' επέκταση, ο SDO agent αποστέλλει τα σήματα ελέγχου σε μορφή ASCII, τα οποία αντιστοιχούν στα προκαθορισμένα σενάρια χρήσης ενώ το FPGA λαμβάνει αυτά τα σήματα, τα αποκωδικοποιεί από δεκαεξαδική μορφή σε δυαδική και αναδιαμορφώνει το ρυθμό μετάδοσης καθώς και τον αριθμό των λειτουργικών ηλεκτρικών πομπών με βάση το εκάστοτε σενάριο χρήσης.

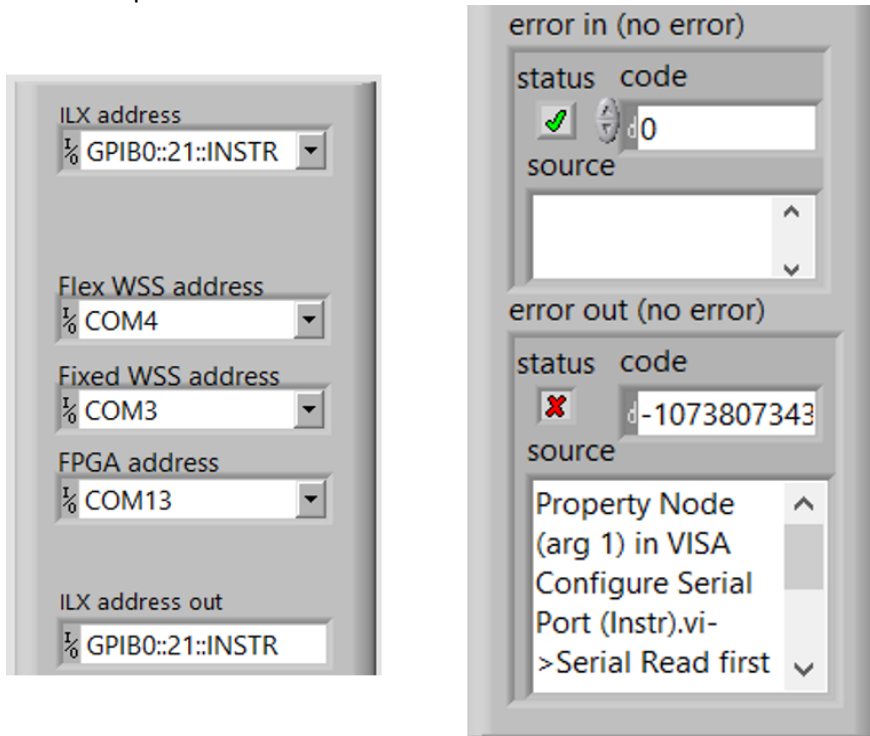
Η πρόσοψη του ανεπτυγμένου λογισμικού του SDO agent απεικονίζεται στην εικόνα 4.62. Παρέχει διαφορετικά παράθυρα για την παρακολούθηση και την αναφορά κατάστασης σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας των ευέλικτων μονάδων καθώς και για την κατάσταση λειτουργίας των στοιχείων WSS. Επιπρόσθετα, ένα πεδίο επιλογής της κατάστασης του FPGA έχει προστεθεί στο σχεδιασμό ώστε να επιλέγεται το επιθυμητό σενάριο λειτουργίας. Παράλληλα, συγκεκριμένα πεδία επιτρέπουν στο χρήστη να εισάγει προσαρμοσμένες τιμές, για παράδειγμα, για τον καθορισμό του μήκους κύματος του κατάλληλου ITU καναλιού των πηγών λέιζερ καθώς και για τη μικρο-ρύθμιση των ρευμάτων των οπτικών δομών ώστε να κλειδώσουν το μήκος κύματος του λέιζερ στο σωστό ITU κανάλι. Λεπτομερής περιγραφή της διεπαφής SDO agent δίνεται στις επόμενες παραγράφους.



Εικόνα 4.62: Πρόσοψη του ανεπτυγμένου SDO agent σε περιβάλλον LabVIEW.

Επιλογή εξοπλισμού και αναφορά λαθών

Αυτό το παράθυρο διαλόγου χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει τη θύρα επικοινωνίας του SDO agent με τον εξοπλισμό που καλείται να ελέγξει. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ευέλικτο καθεστώς λειτουργίας του προτεινόμενου πομπού 3 με βάση τις πρόδρομες μονάδες 0 ελέγχεται μέσω της κεντρικής μονάδας ILX και των 16 πηγών ρεύματος. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.63, ο SDO agent συνδέεται με την κεντρική μονάδα ILX μέσω της διεύθυνσης GBIB0::21::INSTR και με τα δύο στοιχεία WSS μέσω των θυρών επικοινωνίας COM3 και COM4 ενώ με το FPGA μέσω της θύρας COM13. Ο εξοπλισμός που συνδέεται με τον agent αναγνωρίζεται και είναι διαθέσιμος για επιλογή χρησιμοποιώντας ένα παράθυρο επιλογής σε μορφή λίστας (drop-down). Τα υπόλοιπα πεδία χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση λαθών και την υποβολή αναφορών σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας του εξοπλισμού. Σε περίπτωση που παρουσιαστεί κάποιο σφάλμα κατά την εκτέλεση μιας εντολής, ο SDO agent αναφέρεται στον χρήστη μέσα από αυτό το πλαίσιο διαλόγου.



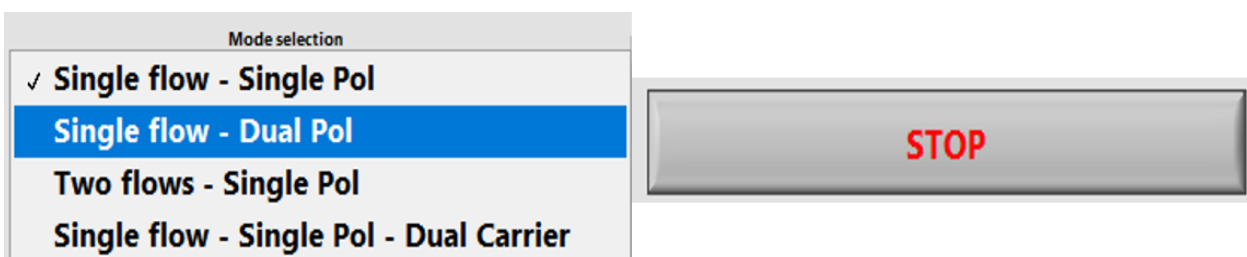
Εικόνα 4.63: Πρόσωση διεπαφής SDO agent: Επιλογή εξοπλισμού (αριστερά) και το παράθυρο διαλόγου αναφοράς λαθών (δεξιά).

Καταστάσεις ευέλικτης λειτουργίας

Μέσα από αυτό το πλαίσιο επιλογής, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το καθεστώς λειτουργίας για τις ευέλικτες συσκευές χρησιμοποιώντας μια drop-down λίστα που περιέχει τις τέσσερις περιπτώσεις λειτουργίας 1-4:

1. Μία οπτική ροή - Μονή πόλωση - Ένα οπτικό φέρον (Άνω IQ-MZM ή Κάτω IQ-MZM)
2. Μία οπτική ροή - Διπλή πόλωση - Ένα οπτικό φέρον
3. Δύο οπτικές ροές - Μονή πόλωση – Ένα οπτικό φέρον ανά ροή
4. Μία οπτική ροή - μονή πόλωση – Δύο οπτικά φέροντα

Το κουμπί STOP σταματάει τη λειτουργία του μέσου και εξέρχεται από το πρόγραμμα.

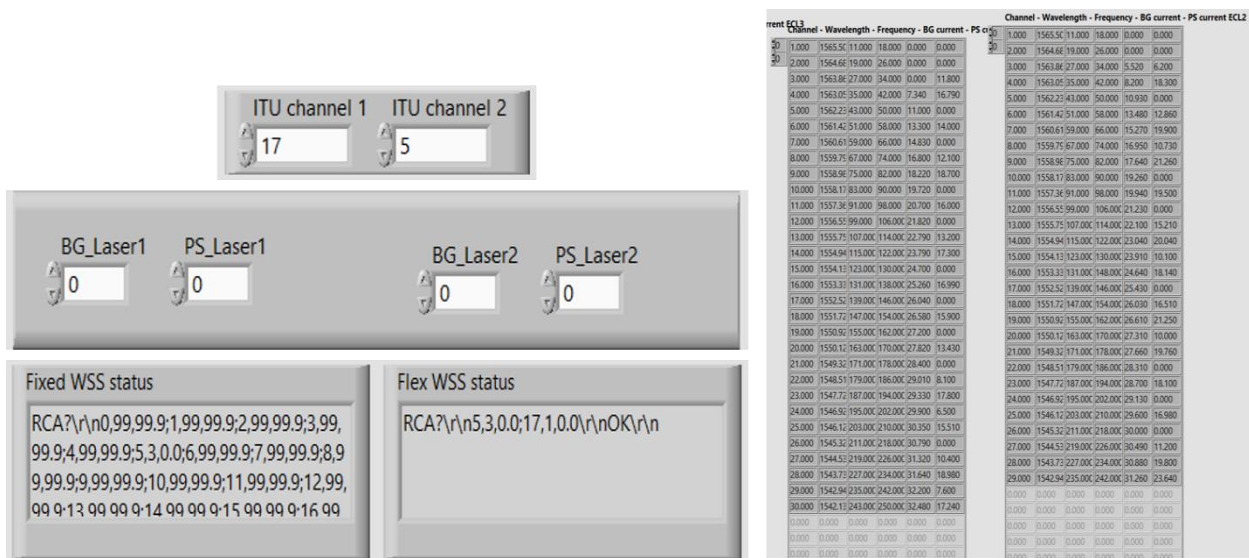


Εικόνα 4.64: Πρόσωση διεπαφής SDO agent: Πλαίσιο επιλογής καθεστώτος λειτουργίας.

Επιλογή καναλιού ITU και αναφορά κατάστασης WSS

Μέσα από το παράθυρο επιλογής του καναλιού ITU, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το κανάλι ITU που θα καθορίσει την τιμή (ή τιμές) του μήκος κύματος του φέροντος για την πηγή (ή πηγές) λέιζερ που βρίσκεται σε λειτουργία. Όπως φαίνεται στην αριστερή πλευρά της εικόνας 4.65, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα από 29 κανάλια ITU που εκτείνονται σε 23 nm στο εσωτερικό της C μάντας. Σε περίπτωση που το καθεστώς λειτουργίας απαιτεί τη χρήση ενός ενιαίου φέροντος μόνο (περιπτώσεις 1, 2, 4), το μήκος κύματος του ελέγχεται μέσω του παράθυρου επιλογής «κανάλι ITU» και το παράθυρο «κανάλι ITU 2» είναι απενεργοποιημένο. Σε περίπτωση που το καθεστώς λειτουργίας απαιτεί τη χρήση δύο οπτικών φερόντων (περίπτωση 3), και τα δύο παράθυρα επιλογής «κανάλι ITU 1» και «κανάλι ITU 2» είναι ενεργοποιημένα, όπως φαίνεται στην αριστερή πάνω πλευρά της εικόνας 4.65. Ειδικά για την περίπτωση 3 (μονή οπτική ροή-λειτουργία δύο φερόντων) η τιμή του μήκους κύματος του «καναλιού ITU 2» ρυθμίζεται αυτόματα για να καταλάβει ένα παρακείμενο κανάλι ITU με αυτό που έχει επιλεγεί για το «κανάλι ITU 1».

Η αλλαγή της τιμής του καναλιού ITU επιφέρει αλλαγές στις τιμές των ρευμάτων των ηλεκτροδίων των φραγμάτων περίθλασης Bragg και των ηλεκτροδίων της οπτικής φάσης των πηγών λέιζερ ώστε να μεταβούν στις προκαθορισμένες τιμές ρεύματος με βάση τη χαρτογράφηση για κάθε ένα μήκος κύματος των λέιζερ και τα WSS να ξεμπλοκάρουν τα νέα κανάλια μετά το μπλοκάρισμα των προηγούμενων. Παράλληλα, λόγω της απουσίας συσκευής κλειδώματος σε μήκη κύματος ανά 100 GHz υλοποιήθηκαν δυο νέα παράθυρα για την μικρο-ρύθμιση των ρευμάτων των φραγμάτων περίθλασης Bragg και της οπτικής φάσης κάθε λειτουργικού λέιζερ με απώτερο σκοπό την προσαρμογή στην επιθυμητή τιμή του ζητούμενου μήκους κύματος. Το καθεστώς σχετικά με ποιο κανάλι (κανάλια) είναι αποδεσμευμένα και σε ποια θύρα (θύρες) εξόδου των WSSs εκχωρούνται, δίνεται στο παράθυρο της κατάστασης αναφοράς των WSS, που απεικονίζεται στο αριστερό κάτω μέρος της εικόνας 4.65, όπου και τα δύο WSSs του κόμβου ελέγχονται με βάση τα προκαθορισμένα σενάρια χρήσης.



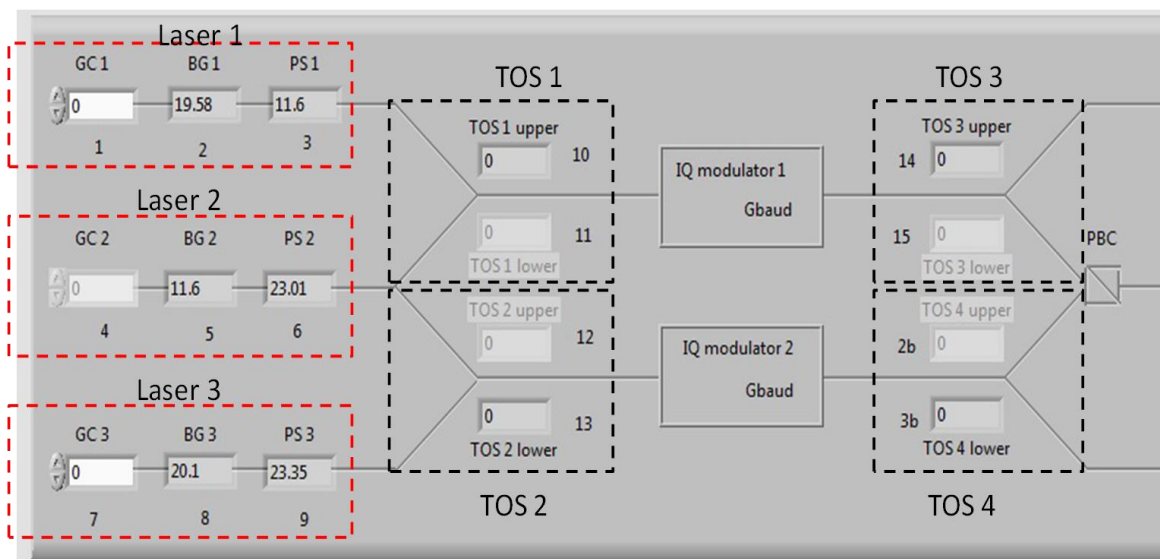
Εικόνα 4.65: Πρόσοψη διεπαφής SDO agent: (Αριστερά) πλαίσια επιλογής καναλιού ITU μαζί με παράθυρα μικρο-ρύθμισης ρευμάτων Bragg και οπτικής φάσης και πλαίσιο αναφοράς κατάστασης WSS. (Δεξιά) Πίνακες χαρτογράφησης των ρευμάτων, των καναλιών και των μηκών κύματος των δύο λέιζερ με επιλεξιμότητα ως προς το μήκος κύματος.

Έλεγχος ευέλικτων προτεινόμενων συσκευών

Το παράθυρο διαλόγου της ευέλικτης υπό αξιολόγηση μονάδας πομπού περιλαμβάνει μια γραφική αναπαράσταση της διάταξης της προτεινόμενης συσκευής 3. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.66, η διάταξη της μονάδας διαιρείται σε επτά υποενότητες οι οποίες ελέγχουν την λειτουργία των τριών πηγών λέιζερ (Laser 1, 2 και 3) και τη λειτουργία των τεσσάρων θερμο-οπτικών διακοπών (TOS 1, 2, 3 και 4). Κάθε τμήμα του Laser αποτελείται από τρία πεδία που αντιστοιχούν στις τιμές ρεύματος των chip κέρδους InP (GC), το του φράγματος περίθλασης Bragg (BG) και του ηλεκτροδίου της οπτικής φάσης (PS), αντίστοιχα. Κάθε τμήμα του TOS περιλαμβάνει δύο υποενότητες που αντιστοιχούν στα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος του κάθε διακόπτη (άνω και κάτω) για τον έλεγχο της κατάστασης λειτουργίας.

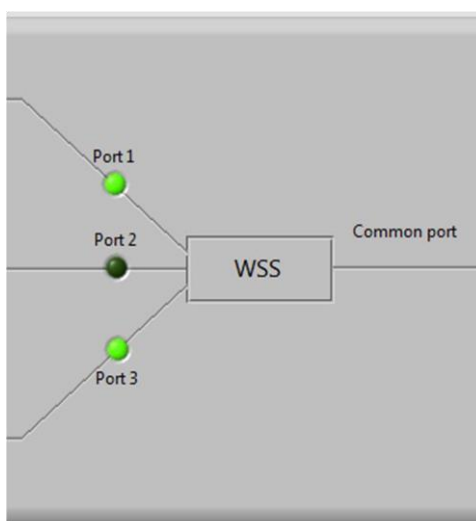
Τα τμήματα λέιζερ και TOS ενεργοποιούνται ανάλογα με το επιλεγμένο καθεστώς λειτουργίας μέσω του παραθύρου επιλογής του τρόπου λειτουργίας. Για λόγους ασφαλείας, στα chips κέρδους δεν πρέπει

να εφαρμόζεται απευθείας η τιμή του ρεύματος και ζητείται από το χρήστη να εισάγει την επιθυμητή τιμή του ρεύματος του λέιζερ στο κατάλληλο πεδίο. Η επιλογή του καναλιού ITU μέσω του παραθύρου διαλόγου «κανάλι ITU 1, 2» θέτει αυτόματα τις τιμές των ρευμάτων για τα ηλεκτρόδια BG και PS με τη χρήση ενός πίνακα χαρτογράφησης καναλιού BG/PS→ITU (βλέπε αριστερή πλευρά εικόνας 4.65). Οι τιμές ρεύματος για τα άνω και κάτω ηλεκτρόδια των TOS ρυθμίζονται αυτόματα με την επιλογή του καθεστώτος λειτουργίας μέσω του παραθύρου επιλογής της κατάστασης λειτουργίας. Η κατάσταση ON του TOS αντιστοιχεί σε 32 mA ρεύματος και παρέχει μια αναλογία σύζευξης 70/30. Η κατάσταση OFF του TOS αντιστοιχεί σε 0 mA ρεύματος. Ο TOS ενεργοποιεί το κατώτερο ηλεκτρόδιο στην κατάσταση ON προκειμένου να επιτραπεί η μέγιστη οπτική ισχύ που περνάει από μέσα του (70%) να εξέλθει από την άνω είσοδο του και ο TOS ενεργοποιεί το άνω ηλεκτρόδιο στην κατάσταση ON προκειμένου να επιτραπεί η μέγιστη ισχύς εξόδου που περνά από μέσα του (70%) να εξέλθει από το χαμηλότερο εισερχόμενο μονοπάτι του, αντίστοιχα.



Εικόνα 4.66: Πρόσωση διεπαφής SDO agent: αναπαράσταση εύελικτου οπτικού πομπού 3.

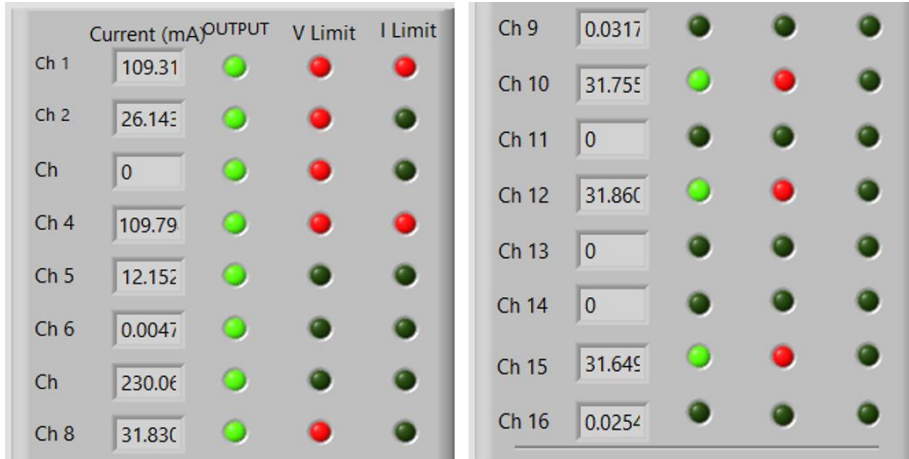
Οι θύρες εξόδου της μονάδας 3 συνδέονται με τρεις θύρες I/O (εισόδου/εξόδου) του 1x9 FlexGrid WSS, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.67. Οι αντίστοιχες θύρες I/O WSS ενεργοποιούνται (το επίπεδο εξασθένησης των θυρών έχουν οριστεί στο μηδέν), ανάλογα με την επιλογή του καθεστώτος λειτουργίας μέσω του παραθύρου διαλόγου τρόπος λειτουργίας με ένα προκαθορισμένο τρόπο. Στη συνέχεια, η ζώνη διέλευσης του διαμορφώνεται από την κεντρική επιλεγμένη συχνότητα του καναλιού ITU. Όλα τα υπόλοιπα κανάλια ITU αποκλείονται σε αυτή τη θύρα I/O. Κατά παρόμοιο τρόπο, ο SDO agent ελέγχει τις θύρες I/O του 1x4WSS για την αποστολή των παραγόμενων ρών εξόδου στο δίκτυο.



Εικόνα 4.67: Πρόσωση διεπαφής SDO agent: Λυχνίες ένδειξης ενεργοποιημένων θυρών των στοιχείων WSS στις εξόδους του προτεινόμενου πομπού 3.

Αναφορά κατάστασης της κεντρικής μονάδας ILX

Ο SDO agent διαβάζει τις τιμές από τις πηγές ρεύματος του ILX και την κατάσταση λειτουργίας τους και αναφέρει αυτές τις τιμές πίσω στον χρήστη μέσα από το παράθυρο διαλόγου, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.68. Αυτό βοηθά το χρήστη να έχει άμεση εικόνα της κατάστασης λειτουργίας των πηγών ρεύματος. Εάν ένα κανάλι είναι ενεργό, το λαμπάκι «OUTPUT» δίπλα σε αυτό θα ανάψει με πράσινο χρώμα και θα δοθεί η τρέχουσα τιμή ρεύματος. Εάν μια τάση ή ένα ρεύμα έχει φτάσει σε οριακή τιμή για το συγκεκριμένο κανάλι, επιπρόσθετα, τα λαμπάκια ορίων V και I (V, I limit) θα ανάβουν με κόκκινο χρώμα.

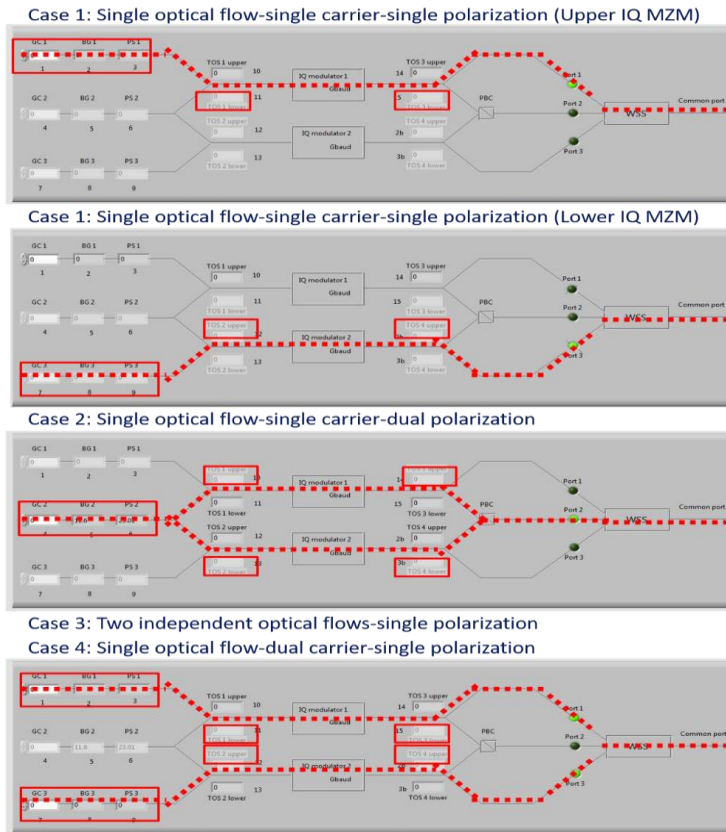


Εικόνα 4.68: Πρόσωση διεπαφής SDO agent: Αναφορά κατάστασης της κεντρικής μονάδας ILX.

Στη συνέχεια, η εικόνα 4.69 που ακολουθεί, απεικονίζει τη διάρθρωση της διεπαφής του SDO agent για τα τέσσερα καθεστώτα λειτουργίας υποστηριζόμενων από την προτεινόμενη συσκευή ευέλικτου πομπού 3. Κατ' επέκταση, οι δύο εφικτές επιλογές του σεναρίου 1 διαχωρίζονται με βάση την παραγόμενη οπτική ροή, μονής πόλωσης που προκύπτει από τον άνω ή κάτω διαμορφωτή IQ, από τα αντίστοιχα λέιζερ (λέιζερ 1 και 3) και την αντίστοιχη έξοδο του πρώτου WSS που ενεργοποιείται. Κατ' αναλογία στην πρώτη περίπτωση του σεναρίου 1 ενεργοποιείται το άνω οπτικό μονοπάτι με τους TOS 1 lower και TOS3 lower να διαρρέονται από ρεύμα και το οπτικό φέρον που μεταδίδεται στον άνω IQ να εισέρχεται στην θύρα 1 του WSS. Συνεπώς, στην δεύτερη περίπτωση του σεναρίου 1 ακολουθείται η αντίθετη οπτική διαδρομή από το λέιζερ 3 και η οπτική διαμορφωμένη ροή μεταδιδόμενη από τον διαμορφωτή IQ 2 εισέρχεται στην είσοδο 3 του WSS. Στο σενάριο 2, χρησιμοποιείται μόνο το λέιζερ 2 και παράγεται μια οπτική ροή με χρήση των TOS1 upper, TOS 2 lower, TOS 3 upper και TOS 4 lower προς τα δύο οπτικά μονοπάτια. Ακολούθως, αυτή η ροή διατρέχει τον άνω και κάτω διαμορφωτή IQ και ακολούθως αφού πολυπλεχτεί στο πεδίο της πόλωσης εισέρχεται στην είσοδο 2 του οπτικού κόμβου (μέσω του πρώτου WSS) ως μονή οπτική ροή διπλής πόλωσης, όπως υποδεικνύει και το ενεργοποιημένο λαμπάκι ένδειξης της χρησιμοποιούμενης θύρας. Αντίθετα, στο σενάριο 3 και 4 ενεργοποιούνται ταυτόχρονα τα λέιζερ 1 και 3 μαζί με την εφαρμογή του κατάλληλου ρεύματος στους TOS 1 lower, TOS 2 upper, TOS 3 lower, και TOS 4 upper, τα οποία εξέρχονται από τους δύο διαμορφωτές IQ και καταλήγουν στις εισόδους 1 και 3 του πρώτου WSS. Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να επισημανθεί ότι παρόλη την όμοια ρύθμιση στα σενάρια 3 και 4, στο πρώτο από αυτά τα δύο τελευταία σενάρια δημιουργούνται στην έξοδο του οπτικού κόμβου δύο ανεξάρτητες διαμορφωμένες οπτικές ροές σε διαφορετικά μήκη κύματος τα οποία ταξιδεύουν προς διαφορετικές κατευθύνσεις μέσα στο οπτικό δίκτυο ενώ αντίθετα στο σενάριο 4 στην έξοδο του οπτικού κόμβου δημιουργείται μια οπτική ροή υπερ-κανάλι μέσω δύο οπτικών φορέων με απόσταση καναλιού 100 GHz προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση με βάση τη ζήτηση του δικτύου.

Επικοινωνία SDO agent και επιλογή ανώτερου σχήματος διαμόρφωσης και ρυθμού μετάδοσης καθοριζόμενα από την πλακέτα FPGA

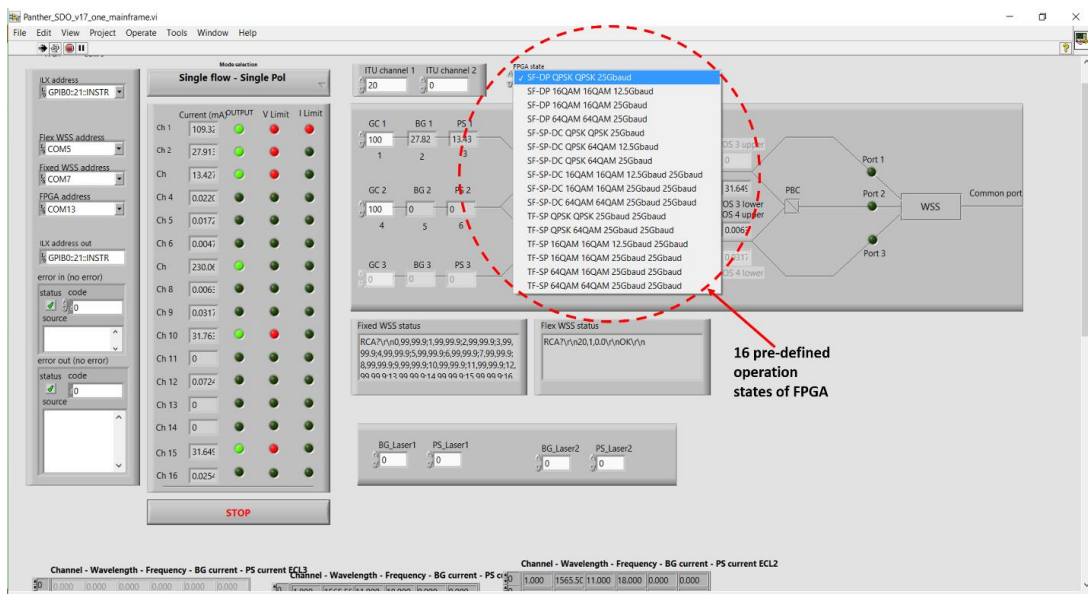
Τελευταία ιδιότητα που έχει αποδοθεί στον SDO agent αφορά, όπως περιεγράφηκε παραπάνω, την δυνατότητα επικοινωνίας και αποστολής δεδομένων ελέγχου σε πλήρη συμφωνία με τον πίνακα 22 σε μορφή ASCII από τον υπολογιστή που φιλοξενεί τον SDO agent προς τον δέκτη της διεπαφής UART πάνω στη πλακέτα FPGA μέσω σειριακού πρωτοκόλλου επικοινωνίας αναπτυγμένο στη Verilog και ενσωματωμένο στο συνολικό design της ενότητας 4.25. Κατά αυτό τον τρόπο το μοναδικό σήμα ελέγχου που αντιστοιχεί σε κάθε ένα σενάριο λειτουργίας αποστέλλεται αφού επιλεγεί από το χρήστη η αντίστοιχη



Εικόνα 4.69: Απεικονιστική αναπαράσταση λειτουργίας του SDO με βάση το προτεινόμενο πομπό 3 για τα τέσσερα καθεστώτα λειτουργίας.

κατάσταση λειτουργίας, στην πλακέτα FPGA ενεργοποιώντας συγκεκριμένο αριθμό ηλεκτρικών πομπών και συγκεκριμένου ρυθμού μετάδοσης, όπως έχει καθοριστεί στο ανεπτυγμένο design της προηγούμενης ενότητας.

Κατά συνέπεια, αφού οι ηλεκτρικές γραμμές των πομπών του FPGA είναι συνδεδεμένες στις εισόδους των 3-bit SPDACs, αποδόθηκε κατά αυτό τον τρόπο η δυνατότητα επιλογής του οπτικού σχήματος διαμόρφωσης μεταξύ QPSK, 16QAM και 64QAM καθώς και δύο ρυθμών μετάδοσης συμβόλων μεταξύ 12.5 και 25 Gbaud των εξερχόμενων οπτικών ροών, ελέγχοντας 16 δυνατές καταστάσεις λειτουργίας της πλακέτας FPGA, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.70. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μέγιστη δυνατή χωρητικότητα με βάση τις 16 προκαθορισμένες καταστάσεις λειτουργίας αγγίζει 300 Gb/s, που αντιστοιχεί στην περίπτωση της μονής οπτικής ροής διπλής πόλωσης με σχήμα διαμόρφωσης 64QAM.



Εικόνα 4.70: Πρόσωση διεπαφής SDO agent: πλαίσιο επιλογής 16 δυνατών καταστάσεων λειτουργίας του FPGA σχετικά με το σχήμα διαμόρφωσης και το ρυθμό μετάδοσης των παραγόμενων οπτικών ροών του πομπό 3.

Σύνοψη & συμπεράσματα Κεφαλαίου 4

Στα πλαίσια των δικτύων αναφοράς των προηγούμενων κεφαλαίων, οι αρχιτεκτονικές δικτύων που περιεγράφηκαν σε αυτό το κεφάλαιο λαμβάνουν υπόψη την τρέχουσα κατάσταση και συνάμα παρατέθηκε η περιγραφή της μελλοντικής τους εξέλιξης σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα δέκα ετών. Τα δίκτυα κορμού (Backbone core) και τα μητροπολιτικά δίκτυα αποτελούν τα πιθανότερα πεδία εφαρμογής των προτεινόμενων υψίρρυθμων ευέλικτων οπτικών πομποδεκτών πολλαπλών ροών, συμπεριλαμβανομένου των δικτύων υπολογιστικών κέντρων δεδομένων. Ως βάση της μελέτης ελήφθησαν τα δίκτυα μεταφοράς και τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων της Telecom Italia καθώς αποτελούν παράδειγμα τυπικών ευρωπαϊκών αρχιτεκτονικών δικτύου, συμπεριλαμβανομένου των κατάλληλων γενικεύσεων. Η αρχιτεκτονική του δικτύου μεταφοράς του εσωτερικού δικτύου της Telecom Italia, με ιδιαίτερη έμφαση στο οπτικό στρώμα (optical layer), παρουσιάστηκε όπως έχει δομηθεί σήμερα. Επίσης, έγινε αναφορά σχετικά με την πιθανή εξέλιξή τους στο μεσοπρόθεσμο διάστημα, ώστε να μπορούν να λογιστούν ως ευέλικτα οπτικά δίκτυα. Ο στόχος αυτών των περιπτώσεων χρήσης ήταν να περιγραφεί η πιθανή εξέλιξη των υπό εξέταση δικτύων από την σκοπιά του εξοπλισμού και το χειρισμό των οπτικών ροών κυκλοφορίας. Ένας άλλος στόχος ήταν να συγκριθούν, από τεχνικής άποψης, λύσεις που αξιοποιούν τους προτεινόμενους πομποδέκτες πολλαπλών ροών με αυτές που χρησιμοποιούν τυποποιημένες συσκευές μιας οπτικής ροής με σταθερό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Παράλληλα, λήφθηκε υπόψη η εξέλιξη του δικτύου και της κυκλοφορίας: πτυχές, όπως η ικανότητα να χειριστεί δυναμικά την κίνηση στο οπτικό στρώμα (τόσο να ενεργοποιήσει όσο και να απενεργοποιήσει συνδέσεις και το χειρισμό των διακυμάνσεων του εύρους ζώνης εντός της ίδιας σύνδεσης κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής της). Παράλληλα, μια άλλη πτυχή αφορά την εισαγωγή της έννοιας των ευφυών προγραμματιζόμενων δικτύων (SDN) στο επίπεδο ελέγχου εντός δικτύων μεταφοράς και θα μπορούσαν - έχοντας υψηλή πιθανότητα- να αποτελούν τη γραμμή ανάπτυξης των μελλοντικών φωτονικών δικτύων κορμού (backbone).

Από τη φύση τους οι πομποδέκτες, όπως αυτοί που παρουσιάζονται σε αυτή τη διδακτορική διατριβή, οι οποίοι περιλαμβάνουν πολλούς οπτικούς διαμορφωτές και φωτοανιχνευτές παράλληλα προσδιορίζονται ως οι καταλληλότεροι για την εφαρμογή της ιδέας του superchannel καθώς και της ευελιξίας σε ευέλικτα οπτικά δίκτυα επειδή μπορούν άμεσα να εκπέμπουν και να λαμβάνουν ταυτόχρονα αρκετές από τα υποφέροντα (subcarriers) που απαρτίζουν αυτό το superchannel και να αναπροσαρμόζουν ανάλογα με τη ζήτηση της κυκλοφορίας τις οπτικές παραμέτρους τους. Ωστόσο, εάν η εφαρμογή πολλαπλών ροών δεν υποστηρίζεται από το σχετιζόμενο ευέλικτο ως προς το εύρος ζώνης πομποδέκτη ή από το αναλογικό σε ψηφιακό κύκλωμα (analog to digital, A/D), αυτό εγείρει νέα ζητήματα όπως το ποιο είναι το βολικό μέγεθος του ευέλικτου πομποδέκτη όσον αφορά τον αριθμό των ολοκληρωμένων διαμορφωτών/δεκτών που θα πρέπει να ενσωματωθούν. Είναι επίσης πιθανό ότι τα superchannels με τη συγκέντρωση μεγάλου αριθμού οπτικών υποφερόντων δεν θα χρειάζονται να έχουν καθορισμένη χωρητικότητα με διακριτικότητα λίγων Gb/s. Αυτή η παράμετρος ελήφθη υπόψη κατά το σχεδιασμό των ευέλικτων πομποδεκτών που θα χρησιμοποιηθούν ως διεπαφές για την επόμενη γενιά ηλεκτρικών πολλαπλών διασυνδέσεων (electrical cross-connects) αντιπροσωπεύοντας τα ODU-flex.

Έχοντας ως βάση τις προδιαγραφές και τις δυνατότητες των προτεινόμενων οπτικών πομποδεκτών, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι τρέχουσες ανάγκες, τα πρότυπα και οι προδιαγραφές των ευέλικτων οπτικών δικτύων, καθώς και οι προβλέψεις για αυτές τις μελλοντικές ανάγκες. Αυτός ο πρώτος ορισμός έχει πραγματοποιηθεί με βάση τις εκτιμήσεις για τις εφικτές επιδόσεις των επιμέρους στοιχείων και τις προϋποθέσεις, ώστε να μπορέσουν οι ολοκληρωμένες μονάδες να έχουν την απαιτούμενη απόδοση του συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια εκτενής ανάλυση στην υλοποίηση των πομποδεκτών πολλαπλών οπτικών ροών με ενισχυμένη ευελιξία και συνολική χωρητικότητα έως 1.5 Tb/s. Οι πομποδέκτες αυτοί βασίζονται στην ανάπτυξη και την ολοκλήρωση επίπεδων παθητικών πολυμερικών κυκλωμάτων με συστοιχίες υψίρρυθμων οπτικών διαμορφωτών IQ, ηλεκτρονικών SPDACs με χρήση της τεχνολογίας InP-DHBT και συνδυάζονται με ηλεκτρονικούς αναμεταδότες βασισμένους σε FPGA. Στη συνέχεια, έγινε παρουσίαση των ευέλικτων οπτικών φίλτρων τόσο των WSSs όσο και των MCSs συμπεριλαμβανομένου των δυνατοτήτων τους, καθώς και αναλύθηκε εκτενώς η σχεδίαση του οπτικού κόμβου στηριζόμενου στα WSSs σταθερού και ευέλικτου πλέγματος με απευθείας σύνδεση στους προτεινόμενους πομποδέκτες. Με βάση τα WSSs, αξιοποιώντας τις δυνατότητες αναισθησίας στο μήκος κύματος (colorless) και στην κατεύθυνση διάδοσης (directionless) παρουσιάστηκε η καταλληλότερη

αρχιτεκτονική κόμβου δημιουργώντας μια μονάδα οπτικής διανομής πολλαπλών ροών για τη δρομολόγηση όλων των δυνατών των οπτικών ροών με συνολική δυνατή χωρητικότητα έως 1,5 Tb/s, παραγόμενες από τους προτεινόμενους πομποδέκτες.

Παράλληλα, αποδόθηκε η έννοια του OTN με στόχο την πλήρη αξιοποίηση της ικανότητας διαμοιρασμού του φάσματος των προτεινόμενων πομποδεκτών στα νέα πρότυπα μεταφοράς της ηλεκτρονικής πληροφορίας προερχόμενης από τα ανωτέρα στρώματα του δικτύου. Αναλυτικότερα, οι απαιτήσεις κυκλοφορίας συνδέονται με τις μονάδες μεταφοράς OTN που εντοπίζονται στις ηλεκτρικές διεπαφές εισόδου των προτεινόμενων πομποδεκτών. Σε αυτό το σημείο τα δεδομένα πελάτη συμπύσσονται μέσω ενθυλάκωσης σε ενός γενικού τύπου πλαίσιο σε συνδυασμό με όλα τα επιπρόσθετα απαραίτητα πεδία (FEC, overhead, κτλ.) ώστε να χαρτογραφηθούν αυτά τα δεδομένα και να πραγματοποιηθούν οι λειτουργίες της συνάθροισης και του διαμερισμού δυναμικά της συνολικής απόδοσης σε πολλαπλές διασυνδέσεις OTN με στόχο να διαμορφωθούν στη συνέχεια στις κατάλληλες οπτικές φέροντες και να αποσταλούν στους ζητούμενους προορισμούς. Επιπλέον, αναπτύχθηκε μια πλατφόρμα προσομοίωσης βασισμένη στην διεπαφή κοινής προσομοίωσης Matlab-VPI για επικύρωση των αναπτυγμένων λειτουργιών του OTN. Αυτή η πλατφόρμα χρησιμοποιήθηκε περαιτέρω για μελέτες πολλαπλών ροών που βασίζονται στον προτεινόμενο πομπό 3 μέσω μιας ζητούμενης διεπαφής από το χρήστη και παράλληλα σχεδιάστηκαν διαφορετικά σενάρια λειτουργίας για την μετάδοση 400GbE κυκλοφορίας πελάτη.

Τέλος, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε ακόμα η ανάπτυξη ενός λεπτού στρώματος λογισμικού διεπαφής (νότια διεπαφή SDO), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να διαμορφώσει το καθεστώς λειτουργίας των προτεινόμενων ευέλικτων μονάδων μέσω των παραγόμενων οπτικών ροών εξόδου και των χαρακτηριστικών μετάδοσής τους, με ευέλικτο τρόπο, όπως υπαγορεύεται από τις απαιτήσεις του δικτύου. Η διασύνδεση SDO αποτελείται από δύο κύρια δομικά στοιχεία: α) τη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων και β) τον SDO agent. Η εργαλειοθήκη επεξεργασίας δεδομένων αναπτύχθηκε για τη χαρτογράφηση και την ενθυλάκωση των δεδομένων πελάτη σε πλαίσια OTN και για την κατάλληλη οργάνωση τους ώστε να παράγουν τις ροές δεδομένων πελάτη με βάση το επιλεγμένο σχήμα διαμόρφωσης mQAM, το επιλεγμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και τον αριθμό των οπτικών ροών που πρόκειται να παραχθούν στην έξοδο των διαμορφωτών IQ. Οι αντίστοιχες ροές δεδομένων πελάτη πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή των ηλεκτρικών ροών δεδομένων στον επιλεγμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέσω των ηλεκτρικών πομποδεκτών του FPGA.

Πιο συγκεκριμένα, ο SDO agent διαμορφώνει τον εξοπλισμό οπτικής μεταφοράς (τους ευέλικτους οπτικούς πομπούς, τα στοιχεία WSS και τους ηλεκτρικούς πομπούς του FPGA) μέσω του σειριακού και GPIB πρωτοκόλλου χρησιμοποιώντας το LabVIEW. Επομένως, ο SDO agent είναι προγραμματισμένος να ελέγχει το μήκος κύματος των ολοκληρωμένων πηγών λέιζερ και την κατάσταση λειτουργίας των συντονισμών θερμο-οπτικών διακοπών πάνω στα παθητικά polyboards, ως εκ τούτου, επιλέγοντας μεταξύ μονής ή διπλής λειτουργίας πολλαπλών ροών και καθορίζοντας τη φασματική θέση των οπτικών φερόντων. Επιπλέον, ο SDO agent έχει προγραμματιστεί να ρυθμίζει τα χαρακτηριστικά μεταγωγής των ευέλικτων WSSs στον προτεινόμενο κόμβο του δικτύου και επιλέγει τις οπτικές θύρες εισόδου/εξόδου και της ζώνης διέλευσης πλάτους τους, σύμφωνα με τη διαδρομή εντός δικτύου της οπτικής ροής και με το εύρος ζώνης, αντίστοιχα.

Παράλληλα, αναλύθηκε εκτενώς ο τρόπος υλοποίησης της αναπροσαρμογής σε πραγματικό χρόνο των λειτουργιών πολλαπλού σχήματος διαμόρφωσης και πολλαπλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων σε γλώσσα Verilog των ηλεκτρικών πομπών του FPGA σε συνδυασμό με τα κυκλώματα 3-bit SPDACs καθώς και ο τρόπος επικοινωνίας, ελέγχου και η ενσωμάτωση αυτών των λειτουργιών στον SDO agent.

Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 4

- [209] <https://www.smartoptics.com/article/coarse-dense-wavelength-division-multiplexing/>
- [210] <https://www.itu.int/en/pages/default.aspx>
- [211] ITU-T, G.694.1, SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, Transmission media and optical systems characteristics – Characteristics of optical systems, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, 02/2012
- [212] <https://www.itu.int/en/ITU-T/about/groups/Pages/sg15.aspx>
- [213] P. Colbourne, "ROADM switching technologies," 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, CA, 2011, pp. 1-3.
- [214] F. R. Kschischang and B. P. Smith, "Forward error correction (FEC) in optical communication," CLEO/QELS: 2010 Laser Science to Photonic Applications, San Jose, CA, 2010, pp. 1-2.
- [215] R. Schmogrow et al., "Pulse-Shaping With Digital, Electrical, and Optical Filters—A Comparison," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 15, pp. 2570-2577, Aug.1, 2013.
- [216] M. Jinno, H. Takara, Y. Sone, K. Yonenaga, and A. Hirano, "Multiflow optical transponder for efficient multilayer optical networking," *Comm. Mag.*, vol.50, no. 5, pp. 56–65, 2012
- [217] Jinno, M., B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance-adaptive Spectrum Resource Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Path Network", "[Topics in Optical Communications]." *IEEE Communications Magazine* 48 (8): 138–145, 2010.
- [218] C. G. Gruber, "CAPEX and OPEX in Aggregation and Core Networks," 2009 Conference on Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, San Diego, CA, 2009, pp. 1-3.
- [219] N. Benzaoui, Y. Pointurier, T. Bonald, Q. Wei and M. Lott, "Optical Slot Switching Latency in Mobile Backhaul Networks," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 8, pp. 1491-1499, April15, 15 2015.
- [220] Devarajan, A., K. Sandesha, R. Gowrishankar, B.S. Kishore, G. Prasanna, R. Johnson, and P. Voruganti, "Colorless, Directionless and Contentionless Multi-degree ROADM Architecture for Mesh Optical Networks", in 2nd International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), pp. 1–10, 2010.
- [221] Q. Wang and Y. Gao, "OTN for the Future Transmission Network," 2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics, Shanghai, 2012, pp. 1-4.
- [222] L. Velasco, M. Klinkowski, M. Ruiz, V. Lopez, and G. Junyent, "Elastic spectrum allocation for variable traffic in flexible-grid optical networks," in *Proc. OFC*, Los Angeles, USA, 2012.
- [223] C. Behrens, R. Hülsermann, M. Jäger and C. Raack, "On the optimum topology of a nationwide aggregation and core network," 2015 20th European Conference on Networks and Optical Communications - (NOC), London, 2015, pp. 1-5.
- [224] An Vu Tran, Wen De Zhong, R. C. Tucker and R. Lauder, "Optical add-drop multiplexers with low crosstalk," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 6, pp. 582-584, June 2001.
- [225] T. Duthel, P. Hermann, T. Winkler von Mohrenfels, J.E. Whiteaway, T. Kupfer, "Challenges with Pluggable Optical Modules for Coherent Optical Communication Systems" OFC 2014 W3K.2
- [226] M.L. Mashanovitch "Integrated Photonic Coherent Receivers", OFC 2014 W11.4
- [227] G. Raybon "Single-carrier and dual-carrier 400-Gb/s and 1-Tb/s transmission systems" OFC 2014 Th4F.1
- [228] A. Konczykowska, J. Y. Dupuy, F. Jorge, M. Riet, V. Nodjiadjim and H. Mardoyan, "Extreme Speed Power-DAC: Leveraging InP DHBT for Ultimate Capacity Single-Carrier Optical Transmissions," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 2, pp. 401-407, Jan.15, 15 2018.
- [229] J. Y. Dupuy, F. Jorge, M. Riet, V. Nodjiadjim, H. Aubry and A. Konczykowska, "59-dBΩ 68-GHz Variable Gain-Bandwidth Differential Linear TIA in 0.7-μm InP DHBT for 400-Gb/s Optical Communication Systems," 2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), New Orleans, LA, 2015, pp. 1-4.
- [230] A. Nestic et al., "Hybrid 2D/3D Photonic Integration for Non-Planar Circuit Topologies," ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication, Dusseldorf, Germany, 2016, pp. 1-3.
- [231] https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/nexus-5000-series-switches/white_paper_c11-522337.html
- [232] E. Pincemin et al., "Towards 400G/1T flexible optical transport networks," *Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2013 15th International Conference, pp.1-13, 23-27 June 2013
- [233] J. Wu, S. Subramaniam and H. Hasegawa, "Comparison of OXC Node Architectures for WDM and Flex-Grid Optical Networks," 2015 24th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), Las Vegas, NV, 2015, pp. 1-8.
- [234] A. Devarajan et al., "Colorless, Directionless and Contentionless multi-degree ROADM architecture for mesh optical networks," 2010 Second International Conference on COMMunication Systems and NETWORKS (COMSNETS 2010), Bangalore, 2010, pp. 1-10.
- [235] T. A. Strasser and J. L. Wagener, "Wavelength-Selective Switches for ROADM Applications," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, no. 5, pp. 1150-1157, Sept.-Oct. 2010.

- [236] S. Frisken, G. Baxter, D. Abakoumov, Hao Zhou, I. Clarke and S. Poole, "Flexible and grid-less wavelength selective switch using LCOS technology," 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, CA, 2011, pp. 1-3.
- [237] M. Takahashi, S. Yamasaki, Y. Uchida and J. Hasegawa, "Compact and Low-Loss ZrO₂-SiO₂ PLC-Based 8 × 8 Multicast Switch for CDC-ROADM Application," in Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 8, pp. 1712-1716, April 15, 2016.
- [238] <http://www.ict-idealist.eu/>
- [239] www.ict-panther.eu/
- [240] <https://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com15/otn/OTNtutorial.pdf>
- [241] <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/optical/synchronous-optical-network-sonet/16180-sonet-sdh.html>
- [242] <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.709/en>
- [243] N. McKeown et al., "OpenFlow: enabling innovation in campus networks." ACM SIGCOMM Computer Communication Review 38, no. 2 (2008): 69-74.
- [244] "Software-Defined Networking: The New Norm for Networks." Open Networking Foundation White paper, April 13, 2012.
- [245] <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [246] <http://www.vpiphotonics.com/index.php>
- [247] <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/ck-v7-vc7222-g.html>
- [248] <https://www.xilinx.com/products/design-tools/vivado.html>
- [249] IEEE Standard for Verilog Hardware Description Language," in IEEE Std 1364-2005 (Revision of IEEE Std 1364-2001), vol., no., pp.0_1-560, 2006
- [250] https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp888_7Series_DynamicRecon.pdf
- [251] https://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug470_7Series_Config.pdf
- [252] <http://www.ni.com/en-us/shop/labview.html>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αξιολόγηση Υψηλών Ρυθμών Οπτικής Μετάδοσης Δεδομένων με Σχήματα Διαμόρφωσης Ανώτερης Τάξης με χρήση Οπτικών Πομπών Πολλαπλών Ροών βασισμένοι σε Παθητική Πολυμερική Πλατφόρμα για Ευέλικτα Οπτικά Δίκτυα Κορμού

5.1 Εισαγωγή

Βασιζόμενοι στην υβριδική ολοκλήρωση της τεχνολογίας InP με παθητικές δομές αναπτυγμένες στην παθητική πολυμερική πλατφόρμα ολοκλήρωσης χαμηλών απωλειών (PolyBoard), η οποία αναλύθηκε εκτενώς στο πρώτο κεφάλαιο αυτής της διατριβής παρουσιάζεται σε αυτό το πέμπτο κεφάλαιο η ανάπτυξη και αξιολόγηση ευέλικτων οπτικών πομποδεκτών με χρήση του υλοποιημένου λογισμικού SDO του πέμπτου κεφαλαίου, οι οποίοι μπορούν να παράγουν πολλαπλές οπτικές ροές ταυτόχρονα. Πιο συγκεκριμένα, κάθε τέτοια οπτική ροή μπορεί να μεταφέρει πληροφορία σε μεταβλητό μήκος κύματος και τύπο διαμόρφωσης (m-QAM) ανάλογα με την απόσταση μετάδοσης και τον όγκο των δεδομένων του σήματος, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τη συνολική χωρητικότητα μέσω επιλεκτικότητας στην πόλωση.

Αναλυτικότερα, με βάση τις τεχνολογικές εξελίξεις που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και στοχεύοντας στην περεταίρω διεύρυνση της απόδοσης των οπτικών πομπών και των οπτικών ροών με σχήματα ανώτερης τάξης με παράλληλη εξέταση της καταλληλότητας τους για τη μετάδοση υψίρρυθμων οπτικών καναλιών στα ευέλικτα οπτικά δίκτυα κορμού, παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο οι ολοκληρωμένες ευέλικτες οπτικές εμπρόσθιες και οπίσθιες συσκευές 0, οι χαρακτηρισμοί τους καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα μετάδοσης και αξιολόγησής τους σε συνδυασμό με εξωτερικούς οπτικούς διαμορφωτές IQ προσομοιώνοντας τον ολοκληρωμένο ευέλικτο οπτικό πομπό 3. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν μεμονωμένα οι πειραματικοί χαρακτηρισμοί των οπτικών μονάδων 0 τόσο στο επίπεδο των ρυθμιζόμενων λέιζερ της οπίσθιας μονάδας 0 στο φάσμα μέσω της αλλαγής του ρεύματος στα φράγματα περίθλασης Bragg όσο και των σύνθετων δικτύων μεταγωγών στο οπίσθιο και εμπρόσθιο τμήμα της μονάδας 0, τα οποία υλοποιούν έναν οπτικό δρομολογητή με κυματοδήγηση του φωτός σε περισσότερες από μια εξόδους-διευθύνσεις.

Στηριζόμενοι στις οπτικές μονάδες 0, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε σε πρώτη φάση μια προκαταρκτική πειραματική διάταξη με χρήση εξωτερικού 3-bit SPDAC με στόχο την επίτευξη της ορθής λειτουργίας του συστήματος ως προς την ευελιξία στο σχήμα διαμόρφωσης m-QAM και το ρυθμό μετάδοσης των ροών δεδομένων. Σε δεύτερη φάση, υλοποιήθηκε η τελική πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση του ευέλικτου οπτικού πομπού πολλαπλών ροών με βάση τις οπτικές μονάδες 0. Πιο συγκεκριμένα, το υπό αξιολόγηση πολύπλοκο φωτονικό σύστημα ευέλικτου πομπού υλοποιήθηκε με χρήση των μονάδων 0 σε συνδυασμό με εξωτερικούς IQ διαμορφωτές σε LiNbO_3 και του υλοποιημένου ευέλικτου οπτικού κόμβου στηριζόμενου στα WSSs, επιτρέποντας την συγκέντρωση της χωρητικότητας σε μια μεμονωμένη οπτική ροή βασισμένη σε πολυπλεξία στην πόλωση ή την αναδιαμόρφωσή του για την υποστήριξη της παραγωγής έως 2 οπτικών ροών που είναι ανεξάρτητες όσον αφορά το σχήμα διαμόρφωσης, το ρυθμό μετάδοσης και την κατανομή του μήκους κύματος.

Το σύστημα του οπτικού πομπού περιλάμβανε επίσης έναν αναμεταδότη βασισμένο σε πλακέτα αξιολόγησης FPGA για την παραγωγή των ροών δεδομένων, τον έλεγχο των δεδομένων διαμόρφωσης, το σχήμα διαμόρφωσης, και το ρυθμό μετάδοσης των συμβόλων. Αναλυτικότερα, για την αξιολόγηση του ευέλικτου πομπού χρησιμοποιήθηκε ανώτερο σχήμα διαμόρφωσης QPSK εντός του οπτικού κόμβου αποτελούμενο από WSSs για τέσσερα διαφορετικά δικτυακά σενάρια. Τα σενάρια που θα παρουσιαστούν, αφορούν τη δημιουργία μονής οπτικής ροής με δύο οπτικά φέροντα ή μονής οπτικής ροής διπλής πόλωσης με σχήμα διαμόρφωση QPSK 28 Gbaud, και δύο οπτικών ροών που βασίζονται σε δύο ανεξάρτητα οπτικά διαμορφωμένα σήματα QPSK 28 Gbaud μετά από μετάδοση 100 km.

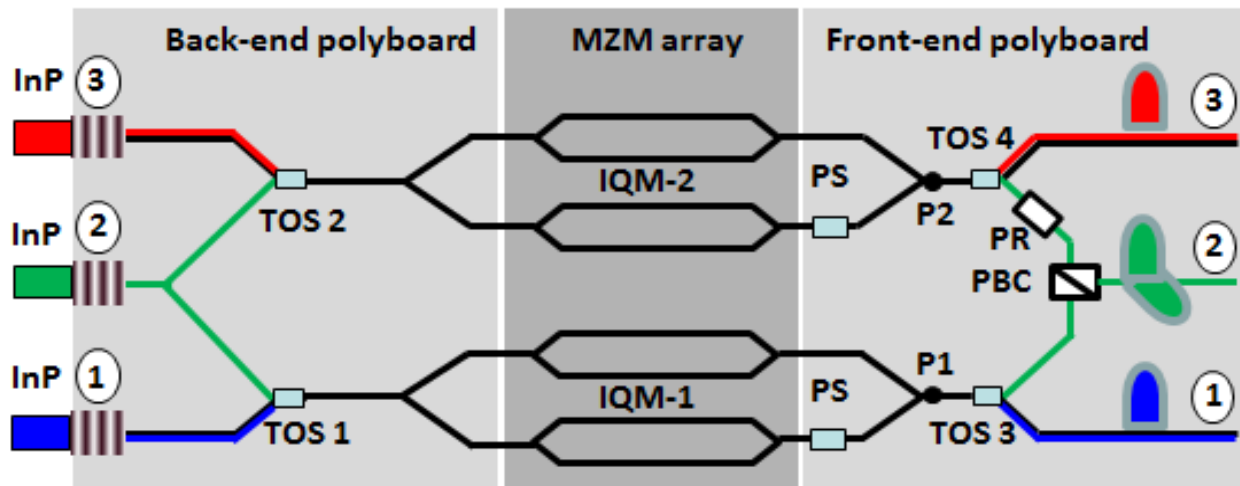
Το πλήρες φάσμα της ευελιξίας καθώς και όλες οι παράμετροι αυτού του πολύπλοκου φωτονικού συστήματος (τα ρυθμιζόμενα λέιζερ και τους θερμο-οπτικούς μεταγωγείς πάνω στην οπτική παθητική πολυμερική πλατφόρμα των μονάδων 0) ελέγχεται από το λογισμικό ελέγχου SDO, το οποίο αποτελεί ένα επίπεδο καθορισμένης οπτικής πλατφόρμας λογισμικού που σχετίζεται με προγραμματιζόμενες οπτικές συσκευές και τους αναμεταδότες FPGA, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι πειραματικές δραστηριότητες που αναφέρονται στις παρακάτω υποενότητες έλαβαν χώρα στις εργαστηριακές εγκαταστάσεις του ΕΦΕ ως τμήμα των δραστηριοτήτων της ερευνητικής ευρωπαϊκής συνεργασίας

PANTHER. Το αποτέλεσμα αυτών των πειραματικών δραστηριοτήτων οδηγούν σε ορθή λειτουργία του προτεινόμενου ευέλικτου πομπού πολλαπλών ροών ακόμα και μετά από μετάδοση 100 km.

5.2 Ευέλικτοι Οπτικοί Πομποδέκτες Πολλαπλών Ροών με Βάση τις Οπτικές Μονάδες 0

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο επιδεικνύεται η πειραματική προσέγγιση για τους ευέλικτους οπτικούς πομπούς πολλαπλών ροών, επιτρέποντας την πλήρη ανεξαρτησία στην επιλογή των παραμέτρων της κάθε ροής, απλούστερη σχεδίαση στην ολοκλήρωση των συσκευών και την επεκτασιμότητα σε μεγαλύτερο αριθμό υποστηριζόμενων ροών.

Με βάση την εικόνα 5.1 παρουσιάζεται η διάταξη του προτεινόμενου οπτικού πομπού, η οποία βασίστηκε στο συνδυασμό δύο εμπορικών IQ διαμορφωτών στην πλατφόρμα ολοκλήρωσης LiNbO₃ με ένα οπτικό κύκλωμα για την παραγωγή των οπτικών φερόντων, την οδήγηση των φερόντων αυτών στους IQMs, καθώς και την δρομολόγηση και τον χειρισμό της πόλωσης των διαμορφωμένων οπτικών σημάτων μέσω δεύτερου οπτικού κυκλώματος. Η δυνατότητα για λειτουργία με δύο ροές ή μια ενιαία ροή σχετίζεται με τη δυνατότητα να λειτουργούν ανεξάρτητα οι δύο IQMs ή να συνδυάζουν τις εξόδους τους σε μια ενιαία οπτική ροή. Στη λειτουργία δυο οπτικών ροών, τα οπτικά φέροντα από τα λέιζερ 1 και 3 οδηγούνται στις οπτικές εισόδους των IQM-1 και IQM-2, και τα διαμορφωμένα παράγωγα στα σημεία P1 και P2 εμφανίζονται ως ανεξάρτητα οπτικά σήματα, μονού οπτικού φέροντος και μονής πόλωσης στις θύρες εξόδου 1 και 3. Ανάλογα με τους ψηφιακούς σε αναλογικούς μετατροπείς του συστήματος, τα προϊόντα αυτά μπορούν να αντιστοιχούν σε απλά QPSK ή διαμορφωμένα σήματα ανώτερης τάξης όπως 16 ή 64-QAM. Κατά τη λειτουργία μονής ροής, τα οπτικά προϊόντα στα σημεία P1 και P2 συνδυάζονται είτε εκτός του κυκλώματος ως ένα σήμα διπλού οπτικού φέροντος ή πάνω στο κύκλωμα ως ένα σήμα διπλής πόλωσης. Στην πρώτη περίπτωση, τα οπτικά φέροντα παράγονται από τα λέιζερ 1 και 3 με συσχετιζόμενα μήκη κύματος αλλά ασυσχέτιστες φάσεις, και τα προϊόντα διαμόρφωσης που λαμβάνονται από τη θύρα 1 και 3, και συνδυάζονται εξωτερικά. Στη δεύτερη περίπτωση, ένα μόνο οπτικό φέρον παράγεται από το λέιζερ 2 και τα προϊόντα είναι πολυπλεγμένα στο πεδίο της πόλωσης και λαμβάνεται ως ένα σήμα DP από τη θύρα 2. Σημειώνεται εδώ ότι η διάταξη της εικόνας 5.1 αντιστοιχεί σε μια ιδανική, πλήρως ολοκληρωμένη έκδοση του πομπού (μονάδα 3 κεφαλαίου 4). Τα οπτικά κυκλώματα πριν και μετά τους IQMs βασίζονταν σε οπτικές δομές πάνω στην φωτονική παθητική πολυμερική πλατφόρμα. Οι δύο δομές (PolyBoards) περιλαμβάνουν τα τρία λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας (External Cavity Lasers, ECLs), τους τέσσερις θερμο-οπτικούς συζεύκτες (TOSs), τα στοιχεία πόλωσης και τους κυματοδηγούς για την ολοκλήρωση μαζί με τις δομές των MZMs.

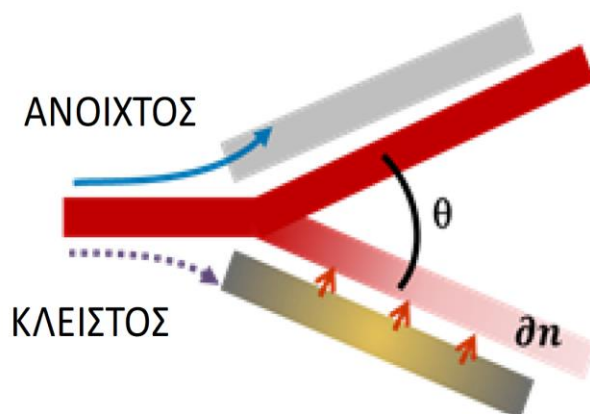


Εικόνα 5.1: Σχηματική απεικόνιση του πομπού πολλαπλών οπτικών ροών βασισμένος σε δύο οπτικά chips (οπίσθια και εμπρόσθια μονάδα 0) κατασκευασμένα στην παθητική πολυμερική πλατφόρμα για την δημιουργία, τη δρομολόγηση και το χειρισμό της πόλωσης των οπτικών ροών. Η διάταξη αντιστοιχεί σε μια ολοκληρωμένη έκδοχή του πομπού, όπου μια τετραπλή συστοιχία MZM τοποθετείται μεταξύ των πολυμερικών δομών για να σχηματίσουν δύο IQ διαμορφωτές.

Κατ' αρχήν, μια συστοιχία MZMs βασισμένη στην ηλεκτροπτική πολυμερική πλατφόρμα, InP ή οποιαδήποτε άλλη κατάλληλη τεχνολογία διαμορφωτών μπορεί να ενσωματωθεί μεταξύ των δύο παθητικών πολυμερικών δομών. Η επιλογή για την χρήση των PolyBoards βασίστηκε σε μια σειρά ελκυστικών χαρακτηριστικών αυτής της πλατφόρμας, συμπεριλαμβανομένης της χαμηλής απώλειας διάδοσης, το εύρος των υποστηριζόμενων λειτουργιών, της ευκολίας ολοκλήρωσης με ενεργές InP δομές, της αποτελεσματικότητας των θερμο-οπτικών δομών, της υψηλής απόδοσης των στοιχείων πόλωσης και της ευελιξίας στο σχεδιασμό των κυματοδηγών για τη διασύνδεση με άλλες πλατφόρμες.

5.3 Χαρακτηρισμός Πολυμερικών Θερμο-οπτικών Μεταγωγών στην Παθητική Πολυμερική Πλατφόρμα PolyBoard

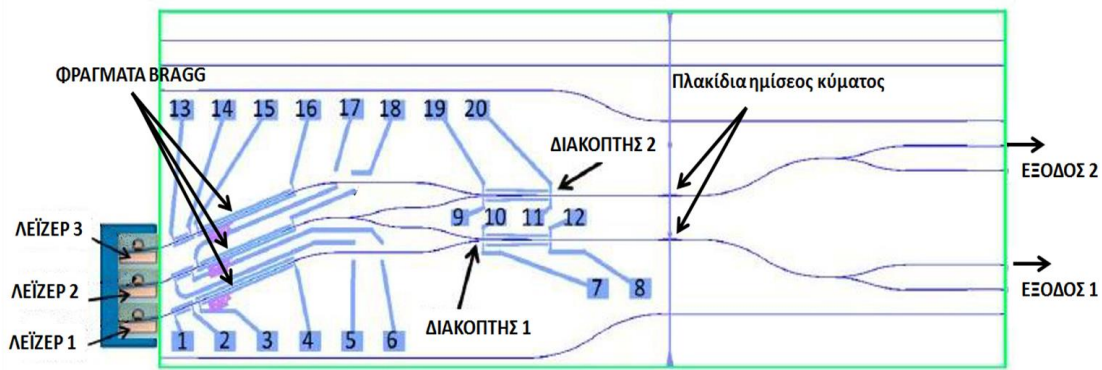
Ο υπό εξέταση ευέλικτος οπτικός πομπός για τη δημιουργία πολλαπλών οπτικών ροών, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.1 βασίζεται σε ένα οπτικό δίκτυο δρομολογητών χάρη στην ανάπτυξη δύο ολοκληρωμένων οπτικών συσκευών στην παθητική πολυμερική πλατφόρμα ολοκλήρωσης του ΗΗΙ. Η αρχή λειτουργίας αυτών των συσκευών που χαρακτηρίστηκε στους σταθμούς εργασίας οι οποίοι υλοποιήθηκαν στο ΕΦΕ για τη διαδικασία χαρακτηρισμού των πολυμερικών διακοπών αφορά ένα δίκτυο πολυμερικών θερμο-οπτικών μεταγωγών (TOS), δηλαδή μεταγωγών βασισμένων στο θερμο-οπτικό φαινόμενο. Βασικό δομικό στοιχείο των συσκευών είναι μια δομή διακλαδωτή (Y-branch), όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2. Ωμικά στοιχεία (ηλεκτρόδια) έχουν τοποθετηθεί πλησίον κάθε κλάδου και προκαλούν μείωση στη διαφορά των δεικτών διάθλασης του κλάδου (refractive index contrast), όταν τα διαπεράσει ρεύμα και θερμανθούν, δυσκολεύοντας έτσι την κυματοδηγηση του φωτός. Με αυτό τον τρόπο το φως θα οδηγηθεί στον αντίθετο κλάδο. Όταν κανένα από τα ηλεκτρόδια δεν διαρρέεται από ρεύμα, το φως κυματοδηγείται εξίσου και από τους δυο κλάδους. Τα ηλεκτρόδια βρίσκονται θαμμένα στο μανδύα της δομής, σε ασφαλή απόσταση από τους κυματοδηγούς για αποφυγή διαρροών, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη προστασία και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.



Εικόνα 5.2: Πολυμερικός θερμο-οπτικός μεταγωγέας. Όταν δεν διαρρέεται από ρεύμα (ΚΛΕΙΣΤΟ), το φως κυματοδηγείται εξίσου και από τους δυο κλάδους. Όταν ένας κλάδος διαρρέεται από ρεύμα (ΑΝΟΙΧΤΟ), το φως κυματοδηγείται από τον αντίθετο κλάδο.

Ο κυματοδηγός είναι βασισμένος στην παθητική πολυμερική τεχνολογία polyboard του ΗΗΙ, έχει διαστάσεις πυρήνα (προφίλ) $3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$, είναι μονορυθμικός στα $1550 \mu\text{m}$ και έχει πολύ χαμηλές απώλειες κυματοδηγησης $<0.8 \text{ dB/cm}$. Η δομή διακλαδωτή που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο πολυμερικό μεταγωγέα έχει μήκος $550 \mu\text{m}$, γωνία διακλάδωσης 1° και απώλειες 0.2 dB . Με αυτή τη δομή ο επιτυγχανόμενος λόγος σβέσης της οπτικής ισχύος (ER) μεταξύ των δυο κλάδων σε κατάσταση λειτουργίας και για 25 mW καταναλισκόμενης ισχύος σε ένα ηλεκτρόδιο, μπορεί να φτάσει τα 10 dB .

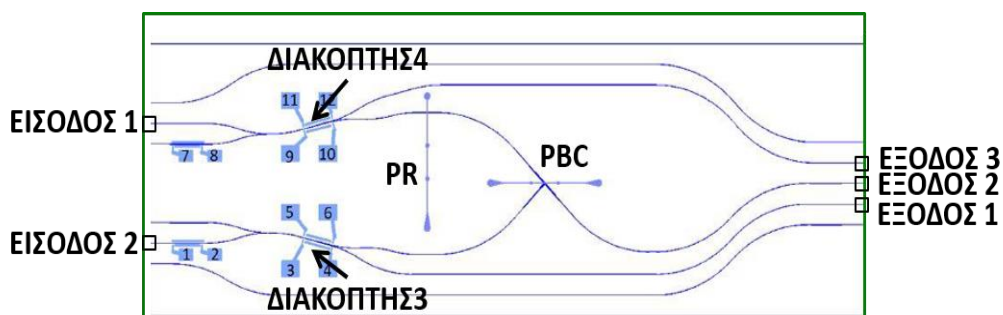
Χρησιμοποιώντας σαν βασικό δομικό στοιχείο τον πολυμερικό μεταγωγέα, είναι δυνατόν να κατασκευαστούν πιο σύνθετα δίκτυα μεταγωγών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη κατασκευή δρομολογητών για τη δρομολόγηση οπτικών σημάτων σε περισσότερες από μια εξόδους-διευθύνσεις. Μια τέτοια συσκευή (back-end PolyBoard) είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε και χαρακτηρίστηκε από το ΕΦΕ με τη διάταξή της να παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3.



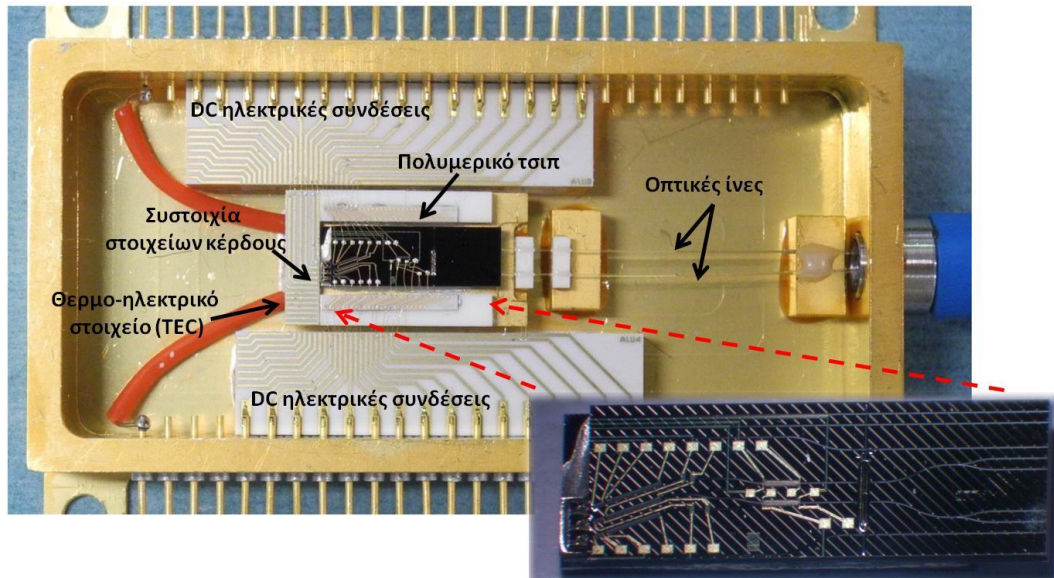
Εικόνα 5.3: Διάταξη οπτικού δρομολογητή βασισμένου σε πολυμερικούς θερμο-οπτικούς μεταγωγείς (οπίσθια μονάδα 0 - back-end PolyBoard).

Πρόκειται για μια συστοιχία λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας μαζί με δίκτυο πολυμερικών μεταγωγών. Τα λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας υλοποιούνται συνδυάζοντας InP στοιχεία κέρδους με περιθλαστικά φράγματα Bragg (Bragg gratings). Τα στοιχεία κέρδους της εικόνας 5.3 είναι τα λέιζερ 1 έως 3 και συζευγνύονται με τους κυματοδηγούς εισόδου της πολυμερικής πλατφόρμας δια μέσου in-plane σύζευξης. Τα στοιχεία κέρδους δίνουν φως με ευρύ φασματικό περιεχόμενο (>80 nm) και έχουν ανακλαστική επιφάνεια μόνο στην μια έδρα τους (την πίσω). Το ρόλο της άλλης (επιλεκτικής) ανακλαστικής επιφάνειας παίζει το περιθλαστικό φράγμα Bragg, το οποίο είναι μονολιθικά ολοκληρωμένο στην πολυμερική πλατφόρμα μαζί με τους θερμο-οπτικούς διακόπτες. Τα φράγματα Bragg μπορούν, με τη βοήθεια ηλεκτροδίων (θερμο-οπτικό φαινόμενο) να αλλάξουν το μήκος κύματος του φωτός που ανακλούν και κατά συνέπεια το μήκος κύματος που θα συντονίζει η κοιλότητα και θα εκπέμπει το λέιζερ. Το εύρος συντονισμού αγγίζει τα 23 nm καλύπτοντας αρκετά κανάλια στο 100 GHz ITU πλέγμα. Σε αυτό βοηθάει ένα έξτρα ηλεκτρόδιο (ηλεκτρόδιο φάσης) που μικρο-ρυθμίζει, πάλι με θερμο-οπτικό τρόπο, το μήκος της κοιλότητας για το επιθυμητό μήκος κύματος. Τα πλακίδια ημίσεως κύματος (half-wave plates) είναι βασισμένα σε λεπτά φιλμ από πολυμερές και έχουν σκοπό να στρέψουν την πόλωση 90°, από TE που εκπέμπουν τα στοιχεία κέρδους σε TM για συγκεκριμένες εφαρμογές (π.χ. TM πολυμερικούς ΕΟ διαμορφωτές).

Από την μπροστινή πλευρά του προτεινόμενου οπτικού πομπού βρίσκεται η ολοκληρωμένη οπτική συσκευή (front-end PolyBoard) βασισμένη και αυτή στην παθητική πολυμερική πλατφόρμα, η οποία έχει σαν δομικό συστατικό της δύο θερμο-οπτικούς μεταγωγείς και σχηματίζει το σύνθετο οπτικό δρομολογητή υπεύθυνο για την δημιουργία σημάτων μονής ή διπλής πόλωσης. Όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 5.4, η συγκεκριμένη διάταξη δεν συμπεριλαμβάνει στοιχεία κέρδους άλλα έχει δύο ίνες εισόδου για να δεχτεί δύο οπτικά διαμορφωμένα σήματα μονής πόλωσης και στηρίζει τη λειτουργία της όπως ειπώθηκε προηγουμένως σε δύο θερμο-οπτικούς μεταγωγείς (μεταγωγέας 3 και 4), σε ένα PR και έναν συζεύκτη πολυπλεξίας πόλωσης (PBC). Οι μεταγωγείς 3 και 4 με τη σειρά τους καθορίζουν αν τα διαμορφωμένα σήματα της εισόδου θα εξέρχονται από αυτή τη διάταξη ως σήματα μονής πόλωσης από τις θύρες 1 και 3, ή εάν διερχόμενα από τον PBC θα πολυπλέκονται στην πόλωση και θα αφήνουν το chip ως ένα οπτικό σήμα διπλής πόλωσης. Ο PBC υλοποιήθηκε ως μία λεπτή μεμβράνη στο εσωτερικό μιας σχισμής πάνω στο πολυμερικό chip, όπου τα τμήματα των τυχαίων πεδίων των οπτικών σημάτων σε κάθε πλευρά της μεμβράνης που δεν έχουν τη σωστή πόλωση αποκόπτονται χωρίς να μεταδίδονται.



Εικόνα 5.4: Διάταξη μπροστινού μέρους οπτικού δρομολογητή παραγωγής οπτικών σημάτων μονής ή διπλής πόλωσης βασισμένου σε πολυμερικούς θερμο-οπτικούς μεταγωγείς (εμπρόσθια μονάδα 0 - front-end PolyBoard).

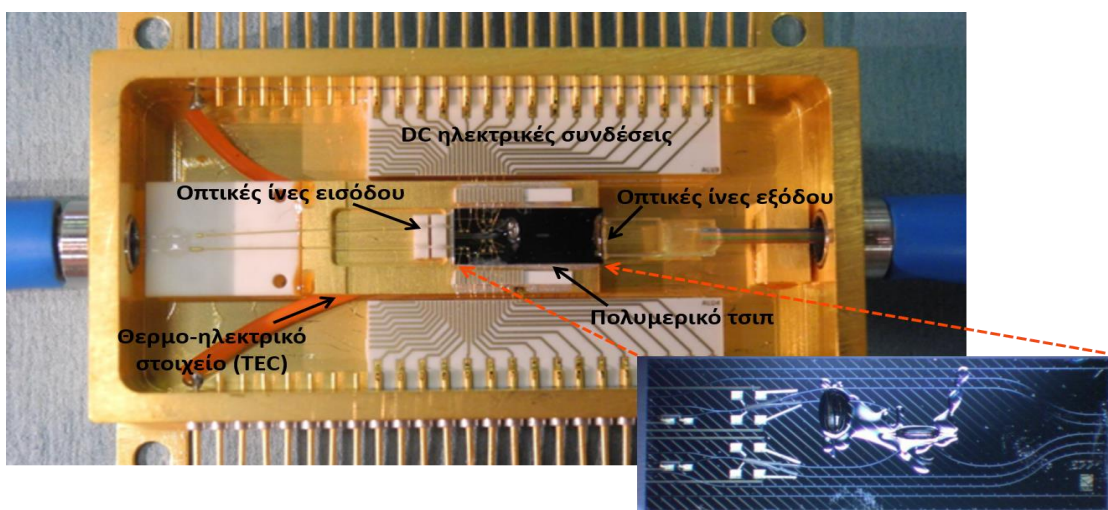


Εικόνα 5.5: Φωτογραφία συσκευής (back-end PolyBoard) χωρίς το κάλυμμα της και κοντινή φωτογραφία του πολυμερικού chip. Τα επιμέρους στοιχεία φαίνονται με τα βέλη.

Στην εικόνα 5.5 φαίνεται μια φωτογραφία της πραγματικής συσκευής εγκλεισμένης μέσα στο μεταλλικό κουτί της. Καθώς η συσκευή περιέχει ενεργά στοιχεία που παράγουν θερμότητα, έχει ληφθεί μέριμνα για την απαγωγή θερμότητας και τον έλεγχο της θερμοκρασίας λειτουργίας μέσω θερμο-ηλεκτρικού στοιχείου (peltier-TEC) και αισθητήρων θερμοκρασίας (thermistor). Το peltier, όπως και τα thermistor βρίσκονται κάτω από το πολυμερικό chip. Τα δυο κόκκινα καλώδια που φαίνονται στην εικόνα 5.5, τροφοδοτούν το TEC με το απαραίτητο ρεύμα. Στην ίδια εικόνα φαίνεται επίσης μια κοντινή φωτογραφία του πολυμερικού chip.

Από την άλλη, η εικόνα 5.6 παρουσιάζει μια φωτογραφία της μπροστινής συσκευής (front-end polyboard) μέσα στο μεταλλικό κουτί της. Στην αριστερή πλευρά φαίνονται οι δύο οπτικές ίνες εισόδου και στην δεξιά πλευρά βρίσκονται οι τρεις ίνες εξόδου. Η συσκευή αυτή επειδή χρησιμοποιεί τους ενεργούς θερμο-οπτικούς διακόπτες για την δρομολόγηση των οπτικών σημάτων και καθώς καταναλώνουν ρεύμα ώστε να λειτουργούν ορθά, κρίθηκε απαραίτητο για να προστατευθεί η συσκευή και να αυξηθεί ο χρόνος ζωής της να χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την περίπτωση κάτω από το οπτικό chip ένα κύκλωμα για την απαγωγή θερμότητας και τον έλεγχο της θερμοκρασίας όπως και στο back-end polyboard της εικόνας 5.5.

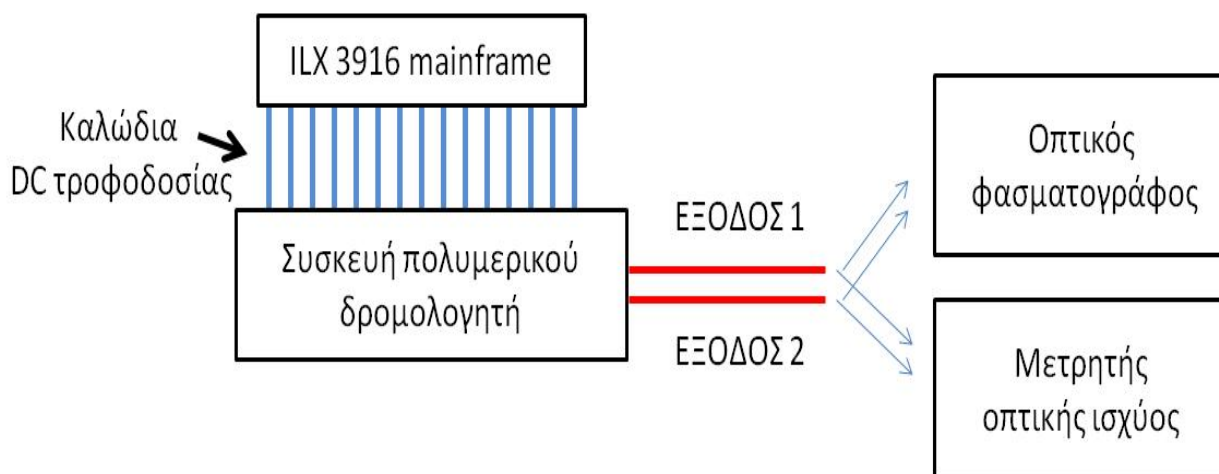
Στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία και τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού των δύο συσκευών που έγινε στο ΕΦΕ καθώς πάνω στις συγκεκριμένες οπτικές συσκευές βασίστηκε το πείραμα και η αξιολόγηση των σεναρίων των πολλαπλών οπτικών ροών.



Εικόνα 2.6: Φωτογραφία συσκευής (front-end PolyBoard) χωρίς το κάλυμμα της και κοντινή φωτογραφία του πολυμερικού chip. Τα επιμέρους στοιχεία φαίνονται με τα βέλη.

5.4 Χαρακτηρισμός Πολυμερικών Διατάξεων Δρομολόγησης βασισμένη σε Θερμο-οπτικούς Μεταγωγείς

Οι συγκεκριμένες πολυμερικές συσκευές είναι μέσα σε μεταλλικά κουτιά, γεγονός που διευκολύνει την πειραματική διαδικασία χαρακτηρισμού. Οι ηλεκτρικές συνδέσεις των λέιζερ και των θερμο-οπτικών μεταγωγέων είναι συγκολλημένες με λεπτά καλώδια (ενσύρματες συνδέσεις-wirebonds) σε DC γραμμές πάνω σε αλουμινένια υποστρώματα που καταλήγουν σε ακροδέκτες στο κουτί (package) της συσκευής. Για την back-end συσκευή αρκούσε η κόλληση ενός καλωδίου σε κάθε ακροδέκτη και η σύνδεση του με μια πηγή ρεύματος. Για την τροφοδοσία με ρεύμα χρησιμοποιήθηκε το ILX 3916 mainframe [253], το οποίο φέρει πολλές πηγές ρεύματος (current drivers) σε μορφή κάρτας, με δυνατότητα τροφοδοσίας έως 500 mA ανά κάρτα και μεγάλη ακρίβεια στη ρύθμιση (10 uA). Η πειραματική διάταξη φαίνεται στην εικόνα 5.7.



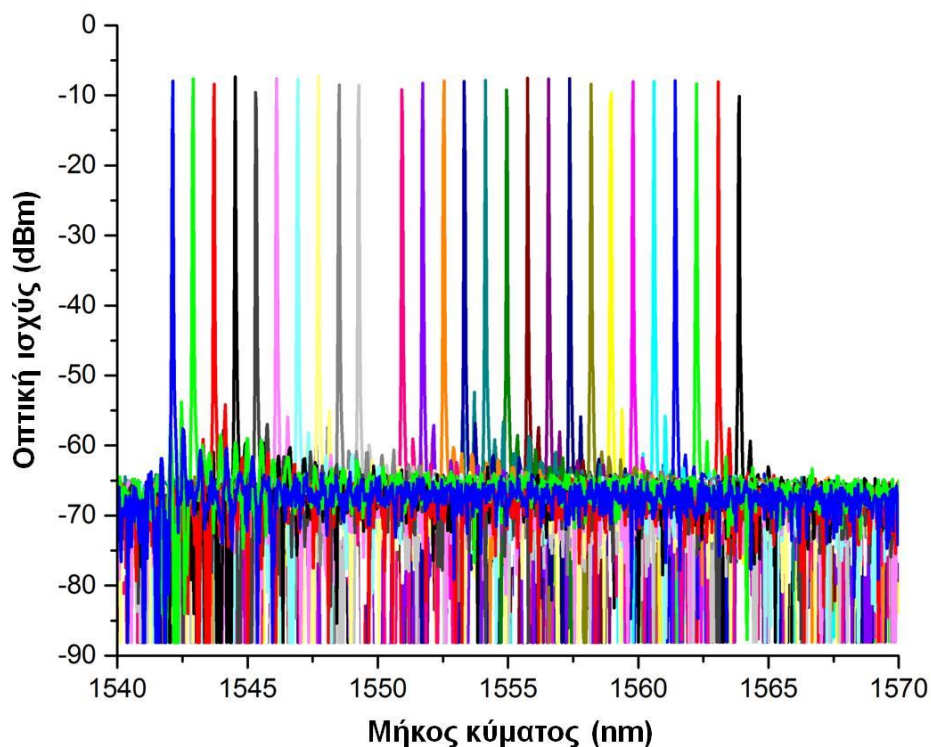
Εικόνα 5.7: Πειραματική διάταξη για το χαρακτηρισμό του πολυμερικού δρομολογητή.

Οι ονομαστικές τιμές τροφοδοσίας σε τάση και ρεύμα των επιμέρους στοιχείων του πολυμερικού δρομολογητή παρουσιάζονται στον πίνακα 25.

Πίνακας 23: Τιμές τάσης και ρεύματος για τα ενεργά στοιχεία του πολυμερικού δρομολογητή.

Στοιχείο	Τάση (Volts)	Ρεύμα (mA) max	Ισχύς (mW)
InP στοιχείο κέρδους	2	100	200
Ηλεκτρόδιο φράγματος Bragg	1.4	32	44.8
Ηλεκτρόδιο φάσης	0.8	32	25.6
Ηλεκτρόδιο θερμο-οπτικού μεταγωγέα	0.8	32	25.6

Ο χαρακτηρισμός ξεκίνησε από το λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας No.3 της συσκευής (βλ. εικόνα 5.3) ως προς την ποιότητα σήματος, την ικανότητα ρύθμισης του μήκους κύματος και την διαθέσιμη οπτική ισχύ εξόδου. Συνεχίστηκε μελετώντας την ικανότητα των θερμο-οπτικών μεταγωγέων να ελέγχουν τη κυματοδηγηση του φωτός. Αρχικά κανένας TOS δεν τροφοδοτούνταν με ρεύμα, δηλαδή ήταν όλοι στην κατάσταση «ΚΛΕΙΣΤΟ». Το στοιχείο κέρδους ρυθμίστηκε στα 100 mA και πραγματοποιήθηκε σάρωση στο ρεύμα των ηλεκτροδίων του φράγματος Bragg και της φάσης ώστε να επιτυγχάνονται μήκη κύματος με αποστάσεις μεταξύ τους 100 GHz που συμπίπτουν με το ITU πλέγμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 5.8, η οποία παρουσιάζει σε ένα γράφημα τα φάσματα εξόδου που επιτεύχθηκαν με το λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας και καταγράφηκαν από ένα οπτικό φασματογράφο με ανάλυση 0.01 nm. Από τα φάσματα φαίνεται το καλής ποιότητας σήμα, με λόγο καταστολής παραπλήσιων ρυθμών (side mode suppression ratio, SMSR) >40 dB και άριστη ικανότητα ρύθμισης του μήκους κύματος με το επιθυμητό βήμα 100 GHz. Αντίστοιχος χαρακτηρισμός έγινε και για τα λέιζερ No.2 και No.3.



Εικόνα 5.8: Φάσματα εξόδου για διαφορετικά μήκη κύματος σε πλέγμα 100 GHz.

Στη συνέχεια έχοντας ρυθμισμένο το λέιζερ No.3 στα 100 mA ρεύμα και σε ένα μήκος κύματος, κρατώντας σταθερά τα ρεύματα των ηλεκτροδίων του φράγματος Bragg και της φάσης, διοχετεύτηκε ρεύμα στα ηλεκτρόδια του θερμο-οπτικού μεταγωγέα 2 αλλάζοντας την κατάσταση λειτουργίας των κλάδων του και μετρήθηκε η ισχύς στη έξοδο της συσκευής με ένα μετρητή οπτικής ισχύος Hewlett Packard 8153A. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τον χαρακτηρισμό του θερμο-οπτικού μεταγωγέα 1, χρησιμοποιώντας αντίστοιχα το λέιζερ No.1. Τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού των θερμο-οπτικών μεταγωγέων 2 και 1 συνοψίζονται στους πίνακες 26 και 27 αντίστοιχα.

Πίνακας 24: Χαρακτηρισμός θερμο-οπτικού μεταγωγέα 2.

Θερμο-οπτικός μεταγωγέας - κλάδος	Ρεύμα (mA)	Οπτική ισχύς στην έξοδο (dBm)
2 - άνω	0	-1.75
2 - κάτω	0	
2 - άνω	32	-4.61
2 - κάτω	0	
2 - άνω	0	-0.7
2 - κάτω	32	
2 - άνω	0	-1.85
2 - κάτω	16	

Πίνακας 25: Χαρακτηρισμός θερμο-οπτικού μεταγωγέα 1.

Θερμο-οπτικός μεταγωγέας - κλάδος	Ρεύμα (mA)	Οπτική ισχύς στην έξοδο (dBm)
1 - άνω	0	-5.26
1 - κάτω	0	
1 - άνω	32	

1 - κάτω	0	-3.85
1 - άνω	0	-7.68
1 - κάτω	32	
1 - άνω	16	-4.9
1 - κάτω	0	

Για το λέιζερ No.2, που συνδέεται στον άνω κλάδο του θερμο-οπτικού μεταγωγέα 2 υπάρχει μια διαφορά ~4 dB μεταξύ των ισχύων που μετρούνται στην έξοδο της συσκευής για τις δυο καταστάσεις του διακόπτη (άνω κλάδος ανοιχτός/κάτω κλάδος ανοιχτός). Αυτό αντιστοιχεί σε λόγο διαχωρισμού 70:30 (70% της ισχύος περνάει όταν ο άνω κλάδος είναι ανοιχτός). Αυτό μπορεί να υποθετηθεί ότι οφείλεται στην μη ιδανική απόδοση του ηλεκτροδίου που θερμαίνει τον άνω κλάδο του μεταγωγέα. Η ισχύς στην έξοδο του μεταγωγέα όταν κανένας από τους κλάδους δεν θερμαίνεται (-1.85 dBm) είναι πολύ κοντά στην ιδανική για 50:50 λόγο διαίρεσης (3dB splitting ratio) του διακλαδωτή, καθώς η ισχύς εξόδου του λέιζερ 2 στα 100 mA είναι +5 dBm, οι απώλειες λόγω σύζευξης του στοιχείου κέρδους με τον πολυμερικό κυματοδηγό είναι 3.5 – 4 dB, οπότε φτάνουν ~1.5 dBm στον διακλαδωτή. Υπολογίζοντας και τα 3 dB του διακλαδωτή, φτάνει κανείς πολύ κοντά στη μετρούμενη τιμή. Σχεδιάζοντας καλύτερα τα ηλεκτρόδια του διακόπτη και την γωνία του διακλαδωτή μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν τέλεια επιλογή κατεύθυνσης και δρομολόγησης του φωτός.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για το χαρακτηρισμό της front-end συσκευής όπως παρουσιάστηκε στην εικόνα 5.7 με την μόνη διαφορά ότι οι τρεις εξοδοί μετρήθηκαν με τη χρήση μετρητή οπτικής ισχύος. Και σε αυτή την περίπτωση κάθε καλώδιο αντιστοιχούσε σε κάθε ακροδέκτη της θετικής και αρνητικής πλευράς των ηλεκτροδίων των θερμο-οπτικών μεταγωγέων, οι οποίοι συνδέθηκαν σε πηγή ρεύματος τοποθετημένη στο ILX 3916 mainframe. Σαν οπτικά σήματα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν δύο CW, όπου μετρήθηκε η οπτική ισχύς σε κάθε έξοδο της συσκευής και για κάθε κατάσταση των τεσσάρων κλάδων των θερμο-οπτικών μεταγωγέων τόσο σε λειτουργία «ΚΛΕΙΣΤΟ» όσο και σε «ΑΝΟΙΧΤΟ».

Πίνακας 26: Χαρακτηρισμός θερμο-οπτικών διακοπών 3 και 4 της front-end συσκευής.

Είσοδος οπτικής διάταξης	Οπτική ισχύς εισόδου (dBm)	Θερμο-οπτικός μεταγωγέας - κλάδος	Ρεύμα (mA)	Οπτική ισχύς εξόδου 1 (dBm)	Οπτική ισχύς εξόδου 2 (dBm)	Οπτική ισχύς εξόδου 3 (dBm)
2	0.41	3 - άνω	0	-13.66	-17.7	-
		3 - κάτω	0			
1	0.41	4 - άνω	0	-	-17.7	-13.5
		4 - κάτω	0			
2	0.41	3 - άνω	32	-12.6	-16.7	-
		3 - κάτω	0			
1	0.41	4 - άνω	32	-	-20.3	-16.2
		4 - κάτω	0			
2	0.41	3 - άνω	0	-15.09	-20	-
		3 - κάτω	32			
1	0.41	4 - άνω	0	-	-20	-15.09
		4 - κάτω	32			

Με βάση τον παραπάνω πίνακα 28 και τις τιμές ισχύος που μετρήθηκαν, γίνεται κατανοητό ότι η οπτική απώλεια της συσκευής αυτής για τα μονοπάτια που οδηγούν στις εξόδους 1 και 3 είναι ~14 dB. Αυτή η απώλεια προσδιορίστηκε όταν όλοι οι κλάδοι των θερμο-οπτικών μεταγωγέων ήταν σε κατάσταση «ΚΛΕΙΣΤΟ» και ουσιαστικά δεν διαρρέονταν από ρεύμα τα ηλεκτρόδια τους. Αυτή η τιμή οφείλεται στις απώλειες λόγω του μήκους των κυματοδηγών, στις απώλειες που εισάγονται από τους θερμο-οπτικούς

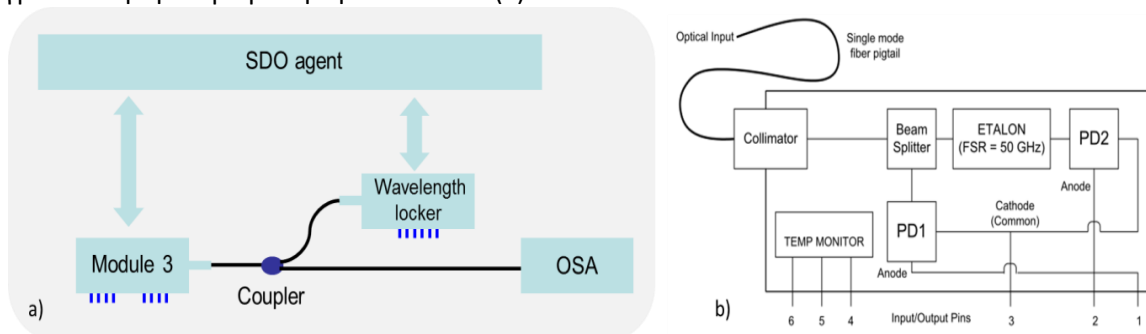
μεταγωγείς και στις απώλειες σύζευξης μεταξύ των οπτικών ινών εισόδου και εξόδου με τους πολυμερικούς κυματοδηγούς. Όσον αφορά την έξοδο 2, και στις δύο διαδρομές αυτής υπάρχουν τα πολωτικά στοιχεία (PR και PBC), τα οποία όντας παθητικά στοιχεία εισάγουν και αυτά με τη σειρά τους απώλειες, και μεγαλύτεροι S-bend κυματοδηγοί δικαιολογώντας τη μεγαλύτερη οπτική απώλεια σε σχέση με τις εξόδους 1 και 3, η οποία υπολογίστηκε ~18 dB. Σε κάθε περίπτωση υπήρξε βελτιστοποίηση της πόλωσης των οπτικών σημάτων CW στις εισόδους 1 και 2 με χρήση ελεγκτή πόλωσης πριν από κάθε μέτρηση καθώς έπρεπε το οπτικό σήμα να βρίσκεται στην TM ή TE πόλωση ώστε να διαδοθεί μέσα από τα πολωτικά στοιχεία εντός της συσκευής. Σε διαφορετική περίπτωση αν τα οπτικά σήματα ήταν σε τυχαία σημεία της πόλωσης είτε δεν θα διαδίδονταν καθόλου είτε θα μετρούνταν πολύ χαμηλή οπτική ισχύς στην έξοδο 2.

5.5 Δοκιμές Λειτουργίας της Ευελιξίας των Ευέλικτων Οπτικών Πομπών

Με βασικό συστατικό την οπτική δομή των θερμο-οπτικών μεταγωγέων και τις δύο οπτικές συσκευές που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη υποενότητα, έχει σχεδιαστεί η μονάδα του οπτικού πομπού για εφαρμογή σε ευφυή προγραμματιζόμενα δίκτυα στα οποία οι οπτικές παράμετροι μετάδοσης, όπως το μήκος κύματος του οπτικού φέροντος, το σχήμα οπτικής διαμόρφωσης και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μπορούν να προσαρμοστούν ευέλικτα ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση και τη διαθεσιμότητα των πόρων του δικτύου για την αποτελεσματική αξιοποίηση του εύρους ζώνης, την ποιότητα των υπηρεσιών και την απόδοση. Ως εκ τούτου, η ευελιξία και η επιλογή των αντίστοιχων παραμέτρων καθορίζεται ενεργά μέσω του λογισμικού καθορισμένης οπτικής (SDO). Στις ακόλουθες παραγράφους περιγράφονται αντιπροσωπευτικές δοκιμές της ευελιξία αυτής σε σχέση με το μήκος κύματος του οπτικού φέροντος, το σχήμα διαμόρφωσης και του ρυθμού μετάδοσης βάση των πομποδεκτών που σχεδιάστηκαν στα πλαίσια της ευρωπαϊκής ερευνητικής δραστηριότητας PANTHER καθώς και δοκιμές ευελιξίας στην λειτουργία ευέλικτων οπτικών φίλτρων (WSS).

Δοκιμές της μέγιστης μετατόπισης του μήκους κύματος των λέιζερ του πομπού

Η μετατόπιση του μήκους κύματος (wavelength tunability) των οπτικών πομπών βασίζεται στην ολοκλήρωση των εξωτερικών λέιζερ κοιλότητας με βάση το ημιαγώγιμο υλικό InP χρησιμοποιώντας ρυθμιζόμενα φράγματα περίθλασης Bragg στην παθητική πολυμερική πλατφόρμα ολοκλήρωσης. Τα λέιζερ επιδείξαν μετατόπιση του μήκους κύματος μεγαλύτερη από 23 nm στη C μπάντα όπως παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην προηγούμενη υποενότητα. Οι δοκιμές για την μέγιστη μετατόπιση του μήκους κύματος πραγματοποιήθηκαν με βάση την εικόνα 5.9 (a).



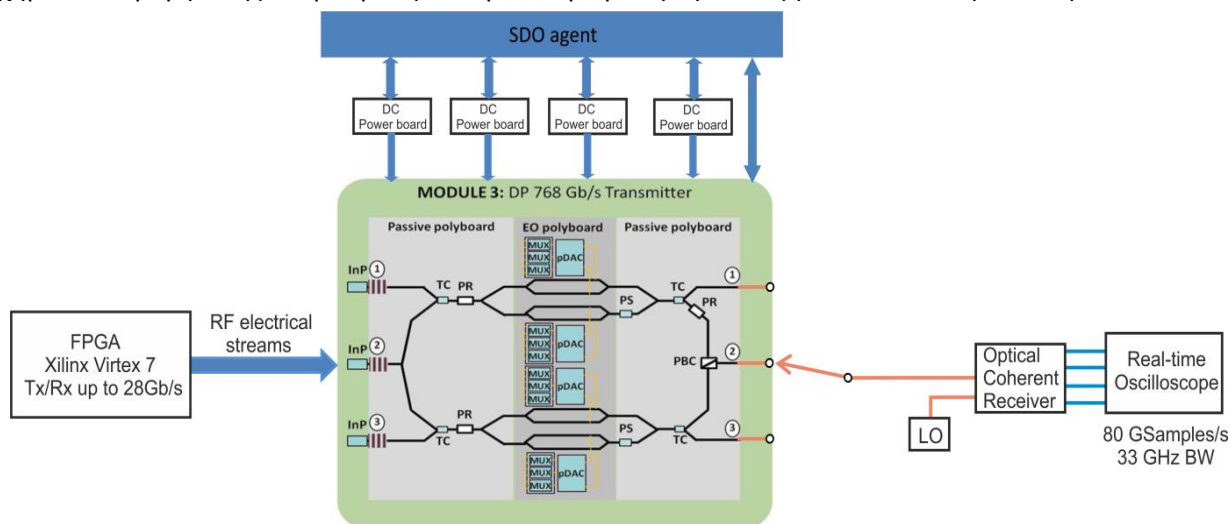
Εικόνα 5.9: (a) Πειραματική διάταξη για την δοκιμή της μετατόπισης του μήκους κύματος των λέιζερ των οπτικών πομπών, και (b) η διάταξη σχεδίασης του wavelength locker.

Το ρεύμα στο θερμικό ηλεκτρόδιο του φράγματος περίθλασης Bragg ελέγχεται από το λογισμικό ως μέρος της πλατφόρμας SDO και βασίζεται σε ένα πίνακα χαρτογράφησης που αφορά το ρεύμα σε σχέση με μήκος κύματος. Από την άλλη, ο wavelength locker της διάταξης της εικόνας 5.9 βασίζεται σε ένα μη θερμικό φίλτρο Fabry-Perot με ελεύθερη φασματική εμβέλεια 50 GHz (Free Spectral Range, FSR), το οποίο χρησιμοποιείται στην έξοδο του πομπού μέσω ενός οπτικού συζεύκτη αναλογίας 99:1 προκειμένου να παρακολουθεί το μήκος κύματος του οπτικού φέροντος. Οι τιμές του etalon φωτορεύματος PD2 και η απεικόνιση του φωτορεύματος PD1 πρέπει να παραμένουν ίσες με σκοπό να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του μήκους κύματος. Από την άλλη πλευρά, ο SDO agent παρέχει το αναγκαίο ρεύμα με στόχο την προσαρμογή του θερμικού ηλεκτροδίου Bragg στην αλλαγή του μήκους κύματος του λέιζερ. Τέλος, τα φάσματα εξόδου του πομπού καταγράφονται με την χρήση οπτικού φασματογράφου (Optical Spectrum Analyzer, OSA) για όλο το φάσμα λειτουργίας του θερμικού ηλεκτροδίου Bragg, προκειμένου να καταγραφεί όλο το εύρος λειτουργίας του μήκους κύματος της μονάδας του οπτικού πομπού.

Η δοκιμή της μετατόπισης του μήκος κύματος πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για κάθε ολοκληρωμένη πηγή λέιζερ του οπτικού πομπού. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, οι τιμές των ολοκληρωμένων ρυθμιζόμενων οπτικών συζευκτών (TOS) και των μετασχηματιστών φάσης (PS) της μονάδας του πομπού ελέγχονται από τη πλατφόρμα SDO έτσι ώστε το σήμα εξόδου του συνεχούς κύματος (Continuous Wave, CW) από το ενσωματωμένο λέιζερ 1 να μεταδίδεται στην έξοδο 1 του πομπού, η έξοδος του λέιζερ 2 στην έξοδο 2 και η έξοδος του λέιζερ 3 στην έξοδο 3.

Ευελιξία Σχήματος Διαμόρφωσης και του Ρυθμό Μετάδοσης Δεδομένων

Στη συνέχεια, η επόμενη δοκιμή αφορά την αξιολόγηση της ευελιξίας των πομπών σε διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης και ρυθμούς δεδομένων με βάση τη διάταξη που απεικονίζεται στην εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.10: Διάταξη για την δοκιμή της ευελιξίας στο πεδίο του σχήματος διαμόρφωσης και του ρυθμού μετάδοσης των οπτικών πομπών πολλαπλών ροών με βάση τη μονάδα πομπού 3.

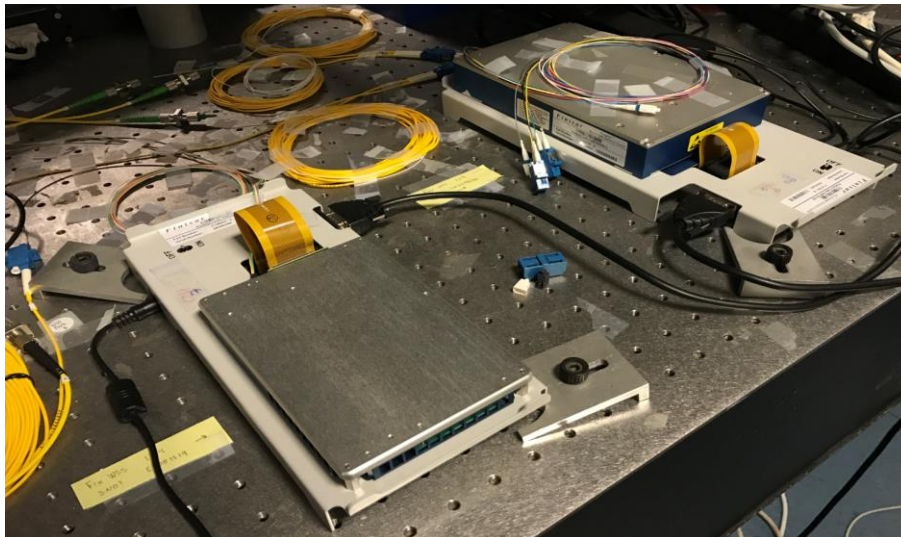
Το FPGA χρησιμοποιείται για την παραγωγή των ηλεκτρικών σημάτων δεδομένων που τροφοδοτούν τους 3-bit SPDACs που οδηγούν τα RF ηλεκτρόδια των οπτικών διαμορφωτών. Το επίπεδο πλάτους της κάθε ροής δεδομένων πρέπει να οριστεί ξεχωριστά με τη χρήση μιας ειδικά σχεδιασμένης κάρτας τροφοδοσία DC που είναι αποκλειστικά αφιερωμένη σε κάθε 3-bit SPDAC. Κατά τη διάρκεια των αρχικών δοκιμών, η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης βασιζόταν σε χειροκίνητη επιλογή των ροών δεδομένων από τις εξόδους του FPGA στις εισόδους των 3-bit SPDACs.

Πιο συγκεκριμένα, οι οπτικοί πομποί δοκιμάστηκαν σε οπτικά σήματα μονής και διπλής πόλωσης έως 64-QAM. Η μονάδα πομπού δοκιμάστηκε για σχήματα διαμόρφωσης QPSK, 16-QAM και 64-QAM σε μονή πόλωση ή δύο ορθογώνιες πολώσεις δημιουργώντας μέχρι δύο ανεξάρτητες οπτικές ροές τροφοδοτώντας μια, δύο και τις τρεις εισόδους των 3-bit SPDACs αντίστοιχα με ροές δεδομένων μέχρι 12.5 Gb/s που παράγονται από το FPGA. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι λόγω του ηλεκτρονικού πολυπλέκτη που ενσωματώνει το 3-bit SPDACs ο αρχικός ρυθμός των εισαγόμενων ροών δεδομένων που παρήχθησαν ήταν μέχρι 12.5 Gb/s με αποτέλεσμα την δημιουργία στην έξοδο του 3-bit SPDACs ηλεκτρικών πολυεπίπεδων σημάτων (PAM2, PAM4, και PAM8) μέχρι 25 Gbaud (διπλασιασμός του ρυθμού δεδομένων των ηλεκτρικών σημάτων εισόδου) ανάλογα με τον αριθμό των ροών δεδομένων που χρησιμοποιούνταν στην είσοδο. Οι λειτουργικοί ρυθμοί μετάδοσης ελέγχονταν από την επιλογή της συχνότητας του ρολογιού και του ρυθμού μετάδοσης των πομπών του FPGA μέσω του δικού του λογισμικού. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε πρώτη φάση στα 28 Gbaud.

Ευελιξία των Οπτικών Ροών και Εξομοίωση του Οπτικού Κόμβου Βασισμένου σε WSS

Εκτός από το μήκος κύματος, το σχήμα διαμόρφωσης και το ρυθμό μετάδοσης, οι πομποί σχεδιάστηκαν με γνώμονα την παραγωγή πολλαπλών οπτικών ροών και τη δυνατότητα να επιλέγουν ανάμεσα σε μια ή πολλαπλές οπτικές ροές για τη μετάδοση των δεδομένων στο δίκτυο κορμού. Αυτή η λειτουργία εξαρτάται από την ανεξάρτητη διαμόρφωση των ρυθμιζόμενων οπτικών συζευκτών, τα ηλεκτρόδια μετατόπισης φάσης των διαμορφωτών IQ και από επαναρυθμιζόμενες ως προς το μήκος κύματος πηγές λέιζερ των πομπών. Επιπλέον, η λειτουργία πολλαπλών οπτικών ροών διευκολύνεται από τη χρήση ενός ευέλικτου οπτικού φίλτρου (WSS) στον κόμβο του δικτύου που είναι ικανό να ρυθμίζει τις θύρες εισόδου/εξόδου του με βάση τη συχνότητα του καναλιού και το πλάτος της ζώνης διέλευσης ανάλογα με τον αριθμό των οπτικών

ρών που απαιτείται να εξυπηρετήσει, τα ανακατανομημένα μήκη κύματος και τις απαιτήσεις της ζώνης διέλευσής τους ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης και τον αντίστοιχο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Στα παρακάτω πειράματα που διεξήχθησαν στο ΕΦΕ χρησιμοποιήθηκαν ένα WSS Fixedgrid 100 GHz 1x4 [254] με συνολικά 5 θύρες και ένα WSS Flexgrid 1x9 [254] με συνολικά 10 θύρες όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 5.11. Οι πειραματικές δοκιμές για την παραγωγή πολλαπλών οπτικών ρών βασίζονταν στην προαναφερθείσα οπτική μονάδα πομπού 3 (σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η υβριδική μορφή του ευέλικτου οπτικού πομπού 3 με χρήση των οπτικών μονάδων 0) σε συνδυασμό με δύο εξωτερικούς IQMs, η οποία είναι ικανή να παράγει ένα και/ή δύο μονές οπτικές ροές σε μία κατάσταση πόλωσης ή μια μόνο οπτική ροή και στις δύο πολώσεις, οι οποίες θα αναλυθούν εκτενέστερα στην παρακάτω υποενότητα.



Εικόνα 5.11: (Αριστερά) Ευέλικτο οπτικό φίλτρο (WSS) Fixgrid 100GHz 1x4 και (δεξιά) WSS Flexgrid 1x9.

Χρήση Οπτικών Ρών Μέσα σε Δικτυακό Σενάριο

Οι ακόλουθες πέντε βασικές λειτουργίες δοκιμάστηκαν για την παραγωγή οπτικών ρών με βάση την προηγούμενη ενότητα:

1. Μία οπτική ροή - Ενιαία πόλωση - Ένα οπτικό φέρον (Άνω IQ-MZM)
2. Μία οπτική ροή - Ενιαία πόλωση - Ένα οπτικό φέρον (Κάτω IQ-MZM)
3. Μία οπτική ροή - Διπλή πόλωση - Ένα οπτικό φέρον
4. Μία οπτική ροή - Ενιαία πόλωση - Δύο οπτικά φέροντα
5. Δύο οπτικές ροές - Ενιαία πόλωση - Ένα οπτικό φέρον ανά ροή

Για την περίπτωση 1, μια οπτική ροή παράγεται βάσει του ελέγχου του ρεύματος έκχυσης στο chip κέρδους InP και του ρεύματος του φράγματος περίθλασης Bragg για την πηγή λέιζερ 1, τους ρυθμιζόμενους οπτικούς συζεύκτες TOS1 και TOS3 και τα ηλεκτρόδια μετατόπισης φάσης του άνω IQ-MZM μέσω της υλοποιημένης SDO πλατφόρμας. Ο SDO agent είναι επίσης υπεύθυνος για τη ρύθμιση της θύρας του WSS (θύρα #1), της ζώνης διέλευσης πλάτους του, το αντίστοιχο κανάλι ITU με βάση το μήκος κύματος της οπτικής ροής και το αντίστοιχο επίπεδο εξασθένησης (μηδενική εξασθένηση αντιστοιχεί σε πλήρως επιτρεπτή μετάδοση της παραγομένης οπτικής ροής). Το πλάτος ζώνης διέλευσης ορίζεται με βάση τον αριθμό των μικρότερων επιτρεπτών διαστημάτων συχνότητας πλάτους 12.5 GHz με τουλάχιστον 4 συνεχόμενα διαστήματα που ορίζουν ένα κανάλι πλάτους 50 GHz.

Για την περίπτωση 2, μια παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε για τον έλεγχο του ρεύματος του chip κέρδους InP και του ρεύματος που ελέγχει τη λειτουργία του φράγματος περίθλασης Bragg για την πηγή λέιζερ 3, των ρυθμιζόμενων οπτικών συζευκτών TOS2 και TOS4 και τα ηλεκτρόδια μετατόπισης φάσης για τον IQ-MZM που βρίσκεται στην κάτω πλευρά του πομπού. Κατά τον ίδιο τρόπο, η διαμόρφωση των θυρών εισόδου/εξόδου του WSS αφορούσε την έξοδο 3 της μονάδας του πομπού, η οποία συνδεόταν με τη θύρα #3 του WSS, ρυθμιζόμενη μέσω της διεπαφής SDO.

Για την περίπτωση 3, ο SDO agent ρύθμιζε το απαιτούμενο ρεύμα για το chip κέρδους InP 2 και τα αντίστοιχα ρεύματα για το φράγμα περίθλασης Bragg, τους ρυθμιζόμενους συζεύκτες TOS1, TOS2, TOS3 και TOS4 και τα ηλεκτρόδια φάσης τόσο του άνω όσο και του κάτω IQ-MZMs. Η οπτική ροή διπλής πόλωσης

μεταδόθηκε από την έξοδο 2 της μονάδας του πομπού και λειτουργούσε ως σήμα εισόδου της θύρας #2 του WSS.

Για την περίπτωση 4, ο SDO agent ρύθμιζε τις πηγές λέιζερ 1 και 3, τους ρυθμιζόμενους συζεύκτες TOS1-TOS4 και τα ηλεκτρόδια μετατόπισης φάσης τόσο για τον άνω και τον κάτω IQ-MZMs. Οι δύο οπτικές ροές παράγονταν στην έξοδο 1 και έξοδος 3 της μονάδας πομπού και τροφοδοτούσαν τις θύρες #1 και #3 του WSS, οι οποίες καθοριζόταν κατάλληλα μέσω του SDO διεπαφής. Στην περίπτωση αυτή, η παραγόμενη οπτική ροή μεταδίδονταν με τη μορφή ενός υπερ-καναλιού.

Οι παράμετροι της περίπτωση 5 είναι παρόμοιοι με την περίπτωση 4 με τη διαφορά όμως ότι οι δύο οπτικές ροές που ήταν παρούσες στις εξόδους 1 και 3 του πομπού μεταδόθηκαν ως δύο ανεξάρτητες οπτικές ροές.

Ανίχνευση Οπτικής Ροής Μέσα σε Δικτυακό Σενάριο με Χρήση Οπτικού Κόμβου Βασισμένου σε WSSs

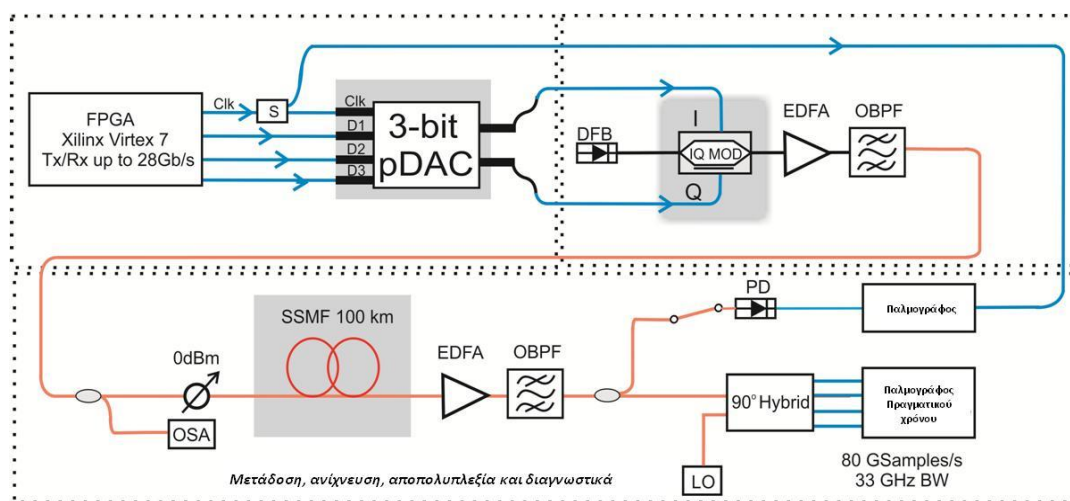
Σε αυτό το σενάριο οι θύρες εισόδου/εξόδου του WSS ήταν συνδεδεμένες με το σύμφωνο οπτικό δέκτη, ο οποίος είχε τη δυνατότητα να λάβει μια οπτική ροή σε μονή ή διπλή πόλωση. Ο SDO agent χρησιμοποιήθηκε για να ρυθμίσει το επίπεδο των ρευμάτων του chip κέρδους InP και του φράγματος περίθλασης Bragg για το συγχρονισμό του μήκος κύματος του τοπικού ταλαντωτή με το μήκος κύματος του οπτικού φέροντος της οπτικής ροής που ανίχνευε.

5.6 Προκαταρκτική Πειραματική Διάταξη με FPGA μέχρι 28 Gbaud

Ειδικότερα στις εγκαταστάσεις του ΕΦΕ μελετήθηκε και υλοποιήθηκε προκαταρκτική πειραματική διάταξη βασισμένη στη χρήση μεταβλητού αριθμού ηλεκτρικών πομπών του FPGA με ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 28 Gbaud για τη δημιουργία οπτικών ανώτερων σχημάτων διαμόρφωσης (QPSK, 16QAM) , η τοπολογία του οποίου παρουσιάζεται στην εικόνα 5.12.

Αναλυτικότερα, η διάταξη της παραπάνω εικόνας περιλαμβάνει έναν αναμεταδότη (transponder) βασισμένο σε FPGA, ο οποίος χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων τα οποία μπορούν να τροφοδοτούν πολυμερικούς διαμορφωτές IQ είτε διαμορφωτές βασισμένους σε άλλες πλατφόρμες όπως InP ή LiNbO₃, με σκοπό τη μετατροπή των εισερχόμενων ηλεκτρικών δεδομένων σε διαμορφωμένο οπτικό σήμα. Το χρησιμοποιούμενο FPGA παράγει τα κατάλληλα ηλεκτρικά σήματα τα οποία οδηγούν ένα ψηφιακό-αναλογικό μετατροπέα 3-bit (3-bit DAC). Ως γνωστό, κάθε 3-bit DAC απαιτεί τρεις ροές δεδομένων ημίσεος ρυθμού λειτουργίας από τον τελικό ρυθμό και ένα σήμα ηλεκτρικού ρολογιού ημίσεος συχνότητας αντίστοιχα. Στην περίπτωση του υπό εξέταση συστήματος η ταχύτητα μετάδοσης ελέγχεται από το λογισμικό του FPGA.

Αρχικά, προκαθοριζόταν το σχήμα διαμόρφωσης ούτως ώστε να παραχθούν οι απαραίτητες ροές δεδομένων (data streams) μέσω της φυσικής διασύνδεσης του FPGA προς τις εισόδους του 3-bit DAC. Οι πομποδέκτες του FPGA διαθέτουν μεγάλη ευελιξία ρυθμίσεων λειτουργίας και είναι στενά συνδεδεμένοι με τους πόρους προγραμματιζόμενης λογικής της τελευταίας, επιτρέποντας έτσι στο χρήστη τη σχεδίαση διαδρομών RF ικανών να μεταφέρουν σχήματα ψευδοτυχαίων δυαδικών ακολουθιών μήκους μέχρι $2^{31}-1$, ή κωδικογραφημένων (scrambled) σχημάτων ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η ενθυλάκωση (encapsulation)

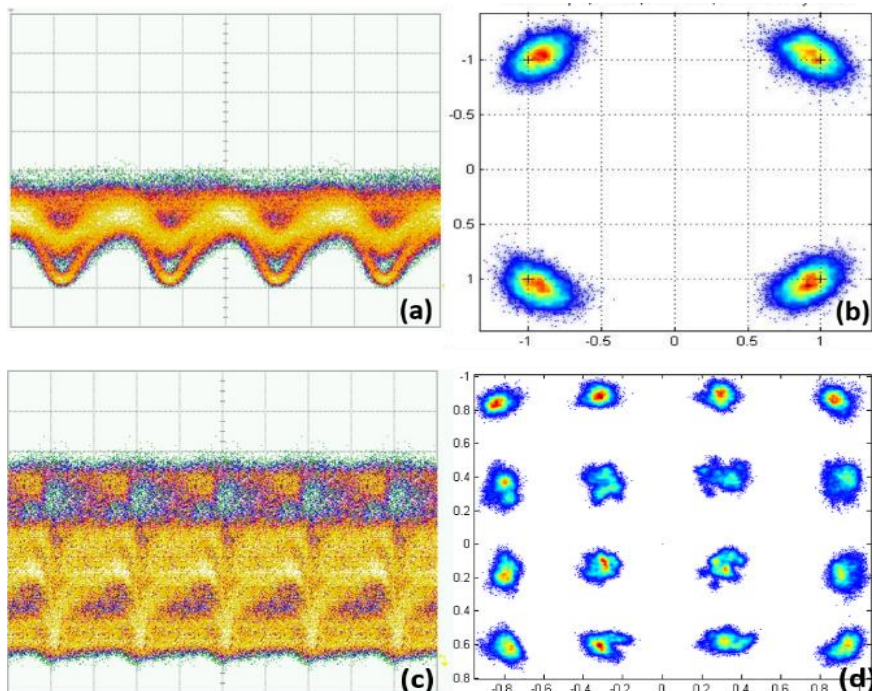


Εικόνα 5.12: Πειραματική οπτική διάταξη για την αξιολόγηση οπτικών συσκευών μετάδοσης που υποστηρίζουν προηγμένα σχήματα διαμόρφωσης μέχρι 28 Gbaud.

στα πλαίσια πακέτου Ethernet ή άλλου τύπου. Οι πρώτες δοκιμές των πομποδεκτών της FPGA έγιναν μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού της Xilinx φτάνοντας σε ταχύτητες μετάδοσης μέχρι 28.05 Gb/s, χρησιμοποιώντας 3 πομποδέκτες τύπου GTZ για τη μεταφορά μιας ακολουθίας PRBS.

Με την παραγωγή των ηλεκτρικών πολυεπίπεδων σημάτων από τον 3-bit DAC και την διαμόρφωση του οπτικού φέροντος, η έξοδος από διαμορφωτή IQ ενισχυόταν μέσω οπτικού ενισχυτή EDFA και διαδίδεται μέσω μονορυθμικής ίνας. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν 4 καρούλια μονότροπης ίνας των 25 km το καθένα δημιουργώντας μια συνολική απόσταση μετάδοσης του οπτικού σήματος της τάξης των 100 km. Στην έξοδο της οπτικής ίνας το οπτικό σήμα ξανά ενισχύόταν και αποστέλλονταν για αξιολόγηση σε ένα σύμφωνο οπτικό δέκτη με δυνατότητα αποπολυπλεξίας πόλωσης. Το μήκος κύματος του λέιζερ του τοπικού ταλαντωτή ήταν κατά το δυνατόν εγγύτερα στο μήκος κύματος του οπτικού φέροντος του μεταδιδόμενου σήματος. Τα λαμβανόμενα σήματα I και Q στην έξοδο του σύμφωνου οπτικού δέκτη καταγράφονταν με χρήση ενός παλμογράφου πραγματικού χρόνου (real time oscilloscope 80 GSa/s και εύρους ζώνης 33 GHz [255]), ενώ τα αντίστοιχα διαγράμματα οφθαλμού των ληφθέντων δεδομένων καταγράφηκαν από έναν παλμογράφο ψηφιακής δειγματοληψίας (digital storage oscilloscope, DSO) της Agilent με εύρος ζώνης 70 GHz. Τα οπτικά φάσματα στην είσοδο και στην έξοδο της οπτικής ίνας καταγράφηκαν από έναν οπτικό αναλυτή φάσματος (OSA).

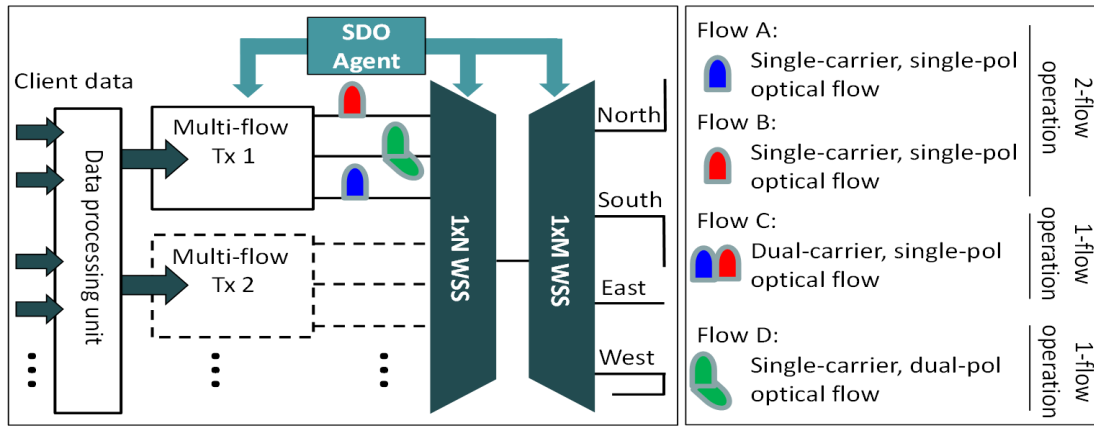
Για την ανάλυση του ληφθέντος οπτικού σήματος απαιτείται η χρήση αλγορίθμων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP) μη πραγματικού χρόνου (offline) μέσω της πλατφόρμας που αναπτύχθηκε στο ΕΦΕ. Η πλατφόρμα DPS αποτελείται από 4 ενότητες: αντιστάθμιση διασποράς, ανάκτηση χρόνου, ανάκτηση φέροντος και ανίχνευση συμβόλων. Η διαθέσιμη βιβλιοθήκη DSP είναι κατάλληλη για οπτικά σχήματα διαμόρφωσης QPSK, και 16-QAM με δυνατότητα επεξεργασίας σημάτων τόσο με μονή όσο και με διπλή πόλωση. Τέλος τα λαμβανόμενα σήματα αξιολογούνται αναφορικά με το μέγεθος του διανύσματος σφάλματος (error vector magnitude, EVM) και το ρυθμό σφάλματος ψηφίου (BER). Στην εικόνα 5.13 παρουσιάζεται τα διαγράμματα οφθαλμού για οπτικά σήματα QPSK και 16QAM 28 GBaud και τα αντίστοιχα διαγράμματα αστερισμού (constellation) μετά την ψηφιακή επεξεργασία σήματος.



Εικόνα 5.13: (a, c) Διάγραμμα οφθαλμού οπτικού σήματος QPSK και 16QAM 28 Gbaud και (b) τα αντίστοιχα διαγράμματα αστερισμού μετά από ψηφιακή επεξεργασία σήματος.

5.7 Πειραματική Αξιολόγηση Ευέλικτων Οπτικών Πομπών με Σχήματα Διαμόρφωση m-QAM

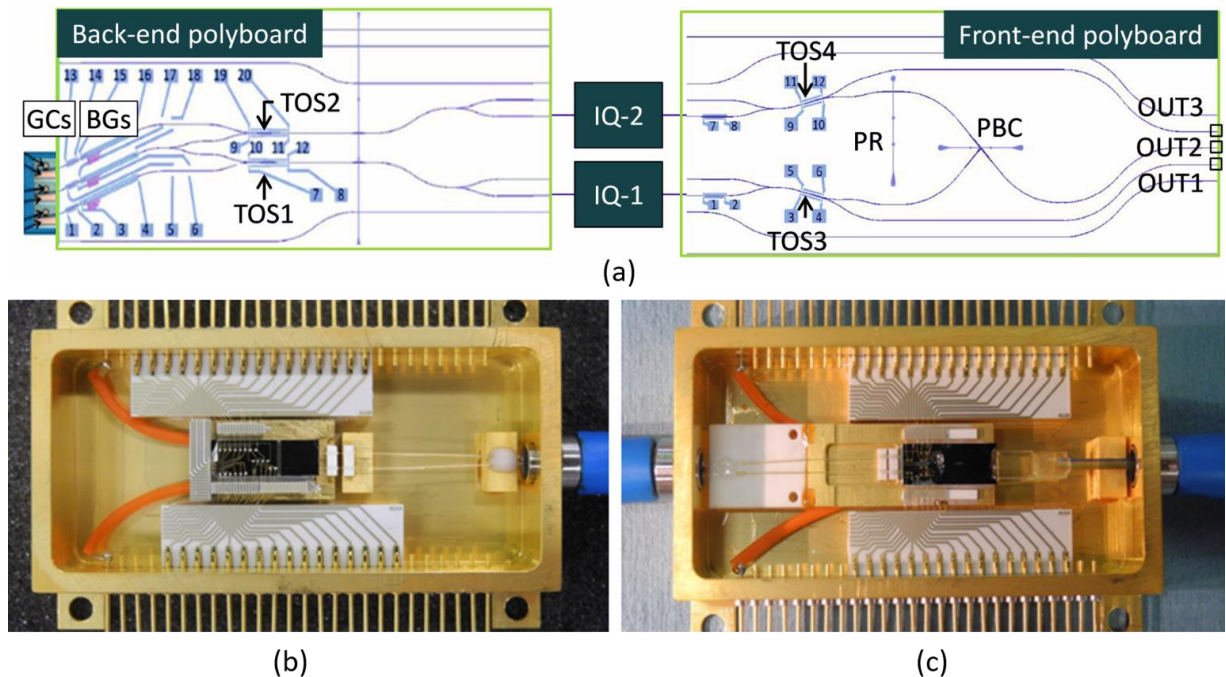
Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα σενάρια και τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των ευέλικτων λειτουργιών των υπό μελέτη πομπών σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζεται και αξιολογείται η προτεινόμενη ιδέα για οπτικούς πομπούς πολλαπλών ροών μέσα σε οπτικό κόμβο βασισμένο στη χρήση WSSs.



Εικόνα 5.14: Πομποί πολλαπλών ροών μέσα σε οπτικό κόμβο συνδεδεμένοι με διεπαφές δεδομένων στην ψηφιακή πλευρά και τα δύο WSSs στο οπτικό κομμάτι. Κάθε πομπός μπορεί να υποστηρίξει λειτουργία είτε ενός ή δύο οπτικών ροών. Ο SDO agent ελέγχει τον αριθμό, τον τύπο, το μήκος κύματος και την κατεύθυνση των ροών ελέγχοντας τις παραμέτρους του πομπού και των δύο μονάδων WSS.

Πιο συγκεκριμένα, η εικόνα 5.14 αναφέρεται στην έννοια της δικτύωσης που δείχνει την πιθανή θέση του πομπού μέσα σε ένα κόμβο του δικτύου, την πιθανή διασύνδεση του με ένα ψηφιακό διακόπτη και με ένα ζεύγος μεταγωγέων επιλεκτικού μήκους κύματος (WSSs). Στο ψηφιακό κομμάτι, τα δεδομένα οργανώνονται σε ροές δεδομένων που αντιστοιχούν σε ανεξάρτητες συνδέσεις από σημείο σε σημείο και τροφοδοτούν τα κυκλώματα οδήγησης κάθε πομπού μετά από κατάλληλη κωδικοποίηση. Στην οπτική πλευρά, οι θύρες εξόδου του κάθε πομπού συνδέονται σε ένα WSS, το οποίο συνδέεται περαιτέρω σε ένα δεύτερο WSS για την τελική δρομολόγηση.

Όταν ο πομπός λειτουργεί με δύο οπτικές ροές (Flow A και B), οι ροές εισέρχονται στο πρώτο WSS από διαφορετικές θύρες και ταξιδεύουν ανεξάρτητα σε διαφορετικές διευθύνσεις μέσω του δεύτερου WSS. Από την άλλη πλευρά, όταν ο πομπός λειτουργεί με μία ροή δύο οπτικών φερόντων (Flow C), τα δύο διαμορφωμένα προϊόντα εισάγονται στο πρώτο WSS από διαφορετικές θύρες, αλλά εξέρχονται αργότερα ως μια ενιαία οντότητα από το δεύτερο WSS. Τέλος, όταν ο πομπός λειτουργεί με μια οπτική ροή διπλής πόλωσης (Flow D), η ροή αυτή εισέρχεται στο WSS από μία μόνο θύρα και μετακινείται ξανά προς οποιαδήποτε κατεύθυνση από τη δεύτερη μονάδα WSS.

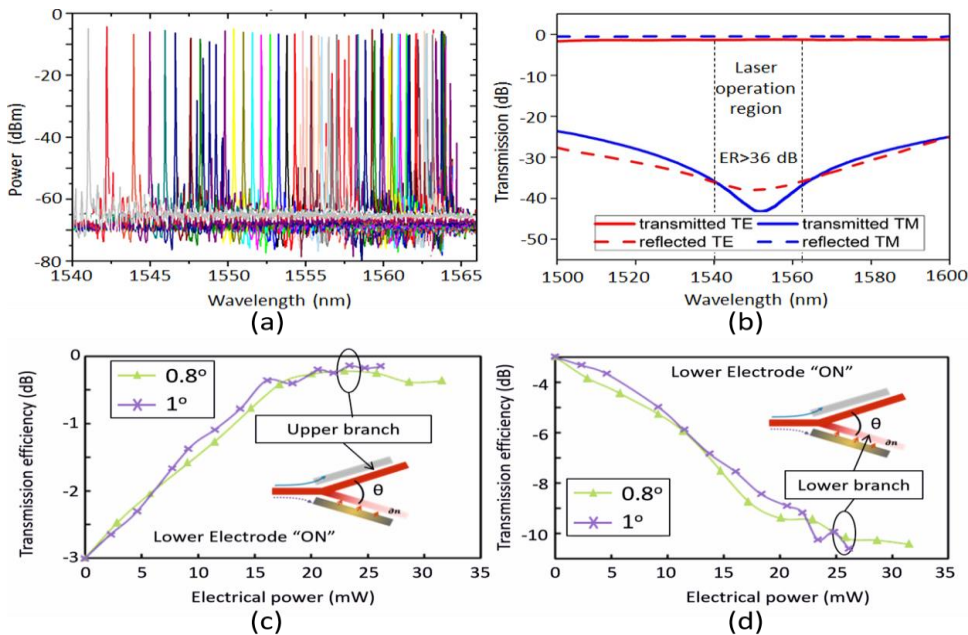


Εικόνα 5.15: (a) Διάταξη μάσκας του οπίσθιου (back-end) και μπροστινού (front-end) polyboard και η διασύνδεση μεταξύ των αντίστοιχων συσκευών μέσω δύο εμπορικών IQMs. Συσκευασμένες διατάξεις για την περίπτωση: (b) back-end, και (c) front-end PolyBoards.

Ο SDO agent που βρίσκεται στο πάνω μέρος προσδιορίζει τον αριθμό, τον τύπο, την τιμή του μήκους κύματος και την κατεύθυνση αλλαγής των οπτικών ροών με ταυτόχρονο έλεγχο του πομπού πολλαπλών ροών και των δύο WSSs. Επιπλέον χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και του ρυθμού των δεδομένων για κάθε IQM αναπτύχθηκαν και ενσωματώθηκαν στον SDO agent.

Η εικόνα 5.15 (a) δείχνει τη διάταξη της ημι-ολοκληρωμένης έκδοσης του πομπού και βασίζεται στην ολοκλήρωση και τη συσκευασία των back-end και front-end PolyBoards του πομπού ως συσκευές με οπτικές ίνες εισόδου και εξόδου (pigtailed), και στην εξωτερική χρήση των δύο εμπορικών LiNbO₃ IQMs. Στην εικόνα 5.15 (b) και (c) απεικονίζονται οι δύο συσκευασμένες διατάξεις με τα αντίστοιχα polyboards που είναι τοποθετημένα μέσα στα μεταλλικά κουτιά. Αναλυτικότερα, το back-end PolyBoard είναι ένα υβριδικό φωτονικό κύκλωμα με δύο οπτικές ίνες οριζόντια τοποθετημένες στον πυρήνα των πολυμερικών κυματοδηγών εξόδου που ενσωματώνει τρία ρυθμιζόμενα λέιζερ ως προς το μήκος κύματος, δύο TCs, ένα στροφέα πόλωσης 90° (PR) και μια σειρά απλούστερων Υ-συζευκτών και μονότροπους κυματοδηγούς. Κάθε λέιζερ κατασκευάζεται ως ένα ECL που περιλαμβάνει ένα υβριδικά ολοκληρωμένο chip κέρδους InP (GC) [207] και ένα μονολιθικά ολοκληρωμένο φράγμα περίθλασης Bragg (BG) [207]. Μέσα στην κοιλότητα του λέιζερ που εκτείνεται κατά μήκος των δύο υλικών, το πολυμερικό BG χρησιμεύει ως ημι-διαφανής καθρέπτης και παρέχει τη δυνατότητα να συντονίζει το μήκος κύματος εκπομπής εντός της C μπάντας με ακρίβεια μεγαλύτερη από ± 2.5 GHz. Οι TOS-1 και TOS-2 ελέγχουν τη διάδοση των οπτικών φερόντων από τα τρία λέιζερ προς τους IQM-1 και IQM-2 επιτρέποντας ελάχιστη οπτική απώλεια. Τέλος, το PR βασίζεται σε ένα στοιχείο λεπτής μεμβράνης που εισάγεται μέσα σε μια σχισμή της πολυμερικής πλατφόρμας και περιστρέφει την πόλωση των οπτικών φορέων κατά 90° μετατρέποντας τη λειτουργία των λέιζερ από εγκάρσια ηλεκτρική (TE) σε εγκάρσια μαγνητική (TM). Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το στοιχείο PR θα ήταν αναγκαίο σε μια πλήρως ολοκληρωμένη εφαρμογή αν οι MZMs μπορούν να διαμορφώσουν μόνο την πόλωση TM, όπως είναι η περίπτωση των ηλεκτρο-οπτικών πολυμερικών MZMs [113].

Το front-end PolyBoard έχει δύο ίνες εισόδου και τρεις εξόδου, και φιλοξενεί δύο TOSs, ένα PR και έναν συζεύκτη πολυπλεξίας πόλωσης (PBC). Οι TOS-3 και TOS-4 καθορίζουν αν τα διαμορφωμένα σήματα αφήνουν το polyboard ως σήματα μονής πόλωσης από τις θύρες 1 και 3, ή εάν κατευθύνονται προς το PBC για πολυπλεξία στην πόλωση. Κάθε TOS έχει σχεδιαστεί ως ένα Υ-συζεύκτης με ένα θερμικό ηλεκτρόδιο κατά μήκος κάθε κλάδου. Όταν δεν εφαρμόζεται ρεύμα σε κανένα ηλεκτρόδιο, ο Υ-συζεύκτης λειτουργεί σαν ένα τυπικός 3-dB διαχωριστής. Στην αντίθετη περίπτωση, η ροή ρεύματος μέσω του άνω ή κάτω ηλεκτροδίου οδηγεί σε μια αλλαγή του δείκτη διάθλασης του πολυμερικού υλικού PolyBoard, το οποίο με

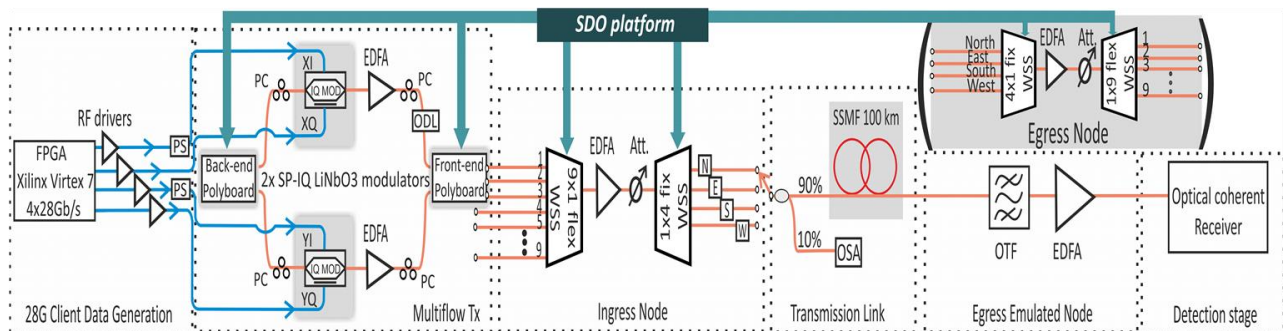


Εικόνα 5.16: (a) Φάσμα συντονισμού του ECL. (b) Συνάρτηση μεταφοράς στη θύρα μετάδοσης και ανάκλασης του PBS για το front-end polyboard για ρυθμούς TE και TM. Μετάδοση στα 1550 nm στο (c) άνω, και (d) το κάτω σκέλος του Υ-συζεύκτη ως συνάρτηση της ηλεκτρικής ισχύος στο κάτω ηλεκτρόδιο.

τη σειρά του συνεπάγεται μία αλλαγή στην αναλογία σύζευξης του Υ-συζεύκτη με τη μέγιστη οπτική ισχύ να μεταφέρεται στον αντίθετο κλάδο της δομής. Τέλος, το PBC πραγματοποιείται επίσης ως μία λεπτή μεμβράνη στο εσωτερικό μιας σχισμής. Ιδανικά, οι TM και TE ρυθμοί προσπίπτουν στην άνω και στην κάτω πλευρά της λεπτής ταινίας, αντιστοίχως, και πολυπλέκονται. Τα τμήματα των τυχαίων πεδίων σε κάθε πλευρά της ταινίας που δεν έχουν τη σωστή πόλωση απομονώνονταν και δεν διαδίδονται από το PBC.

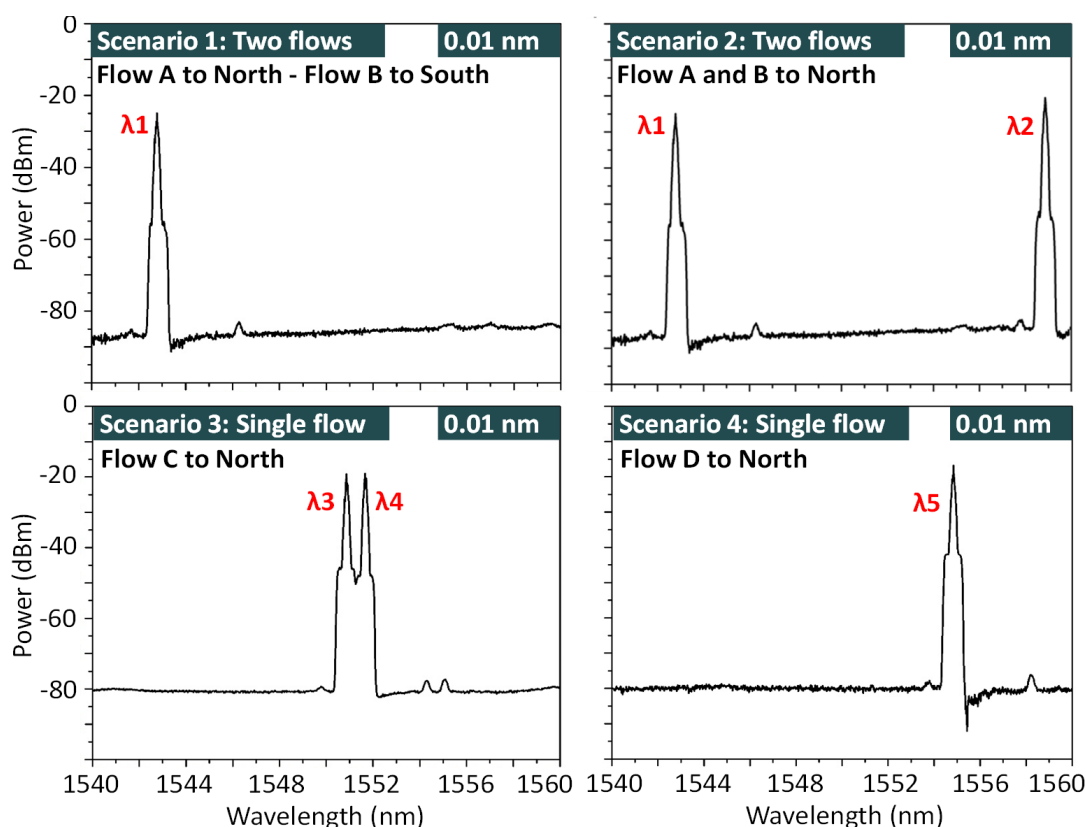
Στην εικόνα 5.16 (α) παρουσιάζεται το φασματικό εύρος των ECLs στο back-end PolyBoard το οποίο καλύπτει 23 nm στο εσωτερικό της C μπάντας (1541-1563 nm). Η ισχύς εξόδου του κάθε ECL είναι υψηλότερη από 0 dBm, ενώ ο λόγος καταπίεσης πλευρικού ρυθμού υπερβαίνει τα 40 dB και το πλάτος φασματικής γραμμής (linewidth) είναι λιγότερο από 300 kHz [256]. Στην εικόνα 5.16 (b) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον ολοκληρωμένο PBC που επιδεικνύει τη συνάρτηση μεταφοράς εξόδου για την περίπτωση μετάδοσης και ανάκλασης για τις εισόδους με TE και TM πόλωση. Το διάγραμμα δείχνει ότι ο PBC μπορεί να λειτουργήσει με χαμηλή απώλεια (<1.5 dB) και μπορεί να προσφέρει επιτυγχανόμενο λόγο σβέση μεταξύ των δύο πολώσεων (polarization extinction ratio, PER) άνω των 36 dB εντός του εύρους λειτουργίας των ECLs. Τέλος, οι εικόνες 5.16 (c) και (d) παρουσιάζουν την αποδοτικότητα μετάδοσης στον άνω και κάτω κλάδο ενός TOS ως συνάρτηση της ηλεκτρικής ισχύος στο κάτω θερμικό ηλεκτρόδιο. Τα αποτελέσματα δίνονται για δύο διαφορετικές σχεδιάσεις Υ-συζευκτών με γωνία κυματοδηγού 0.8° και 1° και μήκος ηλεκτροδίου 550 μm. Και για τις δύο περιπτώσεις, το TOS σταματά να λειτουργεί ως διαχωριστής 3-dB και δρομολογεί το φως στον άνω κλάδο για αυξανόμενες τιμές της εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Στα 25 mW οι TOS εναλλάσσουν την κατάστασή τους από ON/OFF επιδεικνύοντας μέγιστη μετάδοση στον άνω κλάδο σχεδόν -0.3 dB. Ταυτόχρονα, η μετάδοση στο χαμηλότερο κλάδο είναι μικρότερη από -10 dB που αντιστοιχεί σε 10 dB λόγου σβέσης. Συμμετρική λειτουργία παρατηρείται όταν εφαρμοζόταν θέρμανση στο άνω ηλεκτρόδιο.

Η πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση του συστήματος του ευέλικτου οπτικού πομπού πολλαπλών ροών στα 28 Gbaud φαίνεται στην εικόνα 5.17. Τέσσερις αποσυσχετισμένες $2^{31}-1$ ψευδοτυχαίες δυαδικές ακολουθίες (PRBS) παράγονται στα 28 Gb/s μέσω μια πλακέτας FPGA (Xilinx σειρά Virtex 7), και χρησιμεύουν μετά από ενίσχυση ως οι I και Q εισοδοί των δύο IQMs επιτρέποντας ταυτόχρονη διαμόρφωση QPSK. Οι ελεγκτές πόλωσης (polarization controllers, PC) πριν και μετά τους IQMs βελτιστοποιούν τη διαμόρφωση και το χειρισμό της πόλωσης των διαμορφωμένων προϊόντων από το front-end PolyBoard, ενώ η γραμμή οπτικής καθυστέρησης (ODL) μετά τον IQM-1 επιτρέπει το συγχρονισμό σε επίπεδο συμβόλου μεταξύ των δύο διαμορφωμένων προϊόντων. Οι τρεις θύρες εξόδου του πομπού συνδέονται με ένα 1x9 Flexgrid WSS, το οποίο συνδέεται περαιτέρω με ένα fixed 100 GHz 1x4 WSS για την υλοποίηση του ευέλικτου κόμβου εισόδου 4 κατευθύνσεων. Οι ροές υπό αξιολόγηση μεταδίδονται προς τα βόρεια, και προσπίπτουν σε ένα κόμβο εξόδου μετά από 100 km SSMF. Δεδομένου ότι το επίκεντρο αυτής της εργασίας αφορά την επίδειξη της ιδέας πολλαπλών-ροών και όχι στη λεπτομερή μελέτη της απόδοσης της μετάδοσης του πομπού, η απόσταση μεταξύ των κόμβων επιλέχθηκε σύντομη ώστε να αποφευχθεί η χρήση ενός βρόχου επανάληψης. Σημειώνεται, ωστόσο, ότι η επιτεύξιμη μετάδοση των σημάτων QPSK αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερη (δηλαδή της τάξης των αρκετών χιλιάδων χιλιομέτρων). Ο κόμβος εξόδου εξομοιώνεται με τη χρήση ενός οπτικού φίλτρου με μεταβλητό πλάτος της ζώνης διέλευσης. Η ανίχνευση των οπτικών ροών γίνεται off-line χρησιμοποιώντας ένα σύμφωνο δέκτη με την δυνατότητα ανίχνευσης διπλής πόλωσης και 45 GHz bandwidth, σε παλμογράφο πραγματικού χρόνου και μέσω τυπικών αλγορίθμων επεξεργασίας ψηφιακού σήματος.



Εικόνα 5.17: Πειραματική διάταξη 28 Gbaud για την επίδειξη της προτεινόμενης υλοποίησης του πομπού πολλαπλών ροών εντός τεσσάρων διαφορετικών δικτυακών σεναρίων.

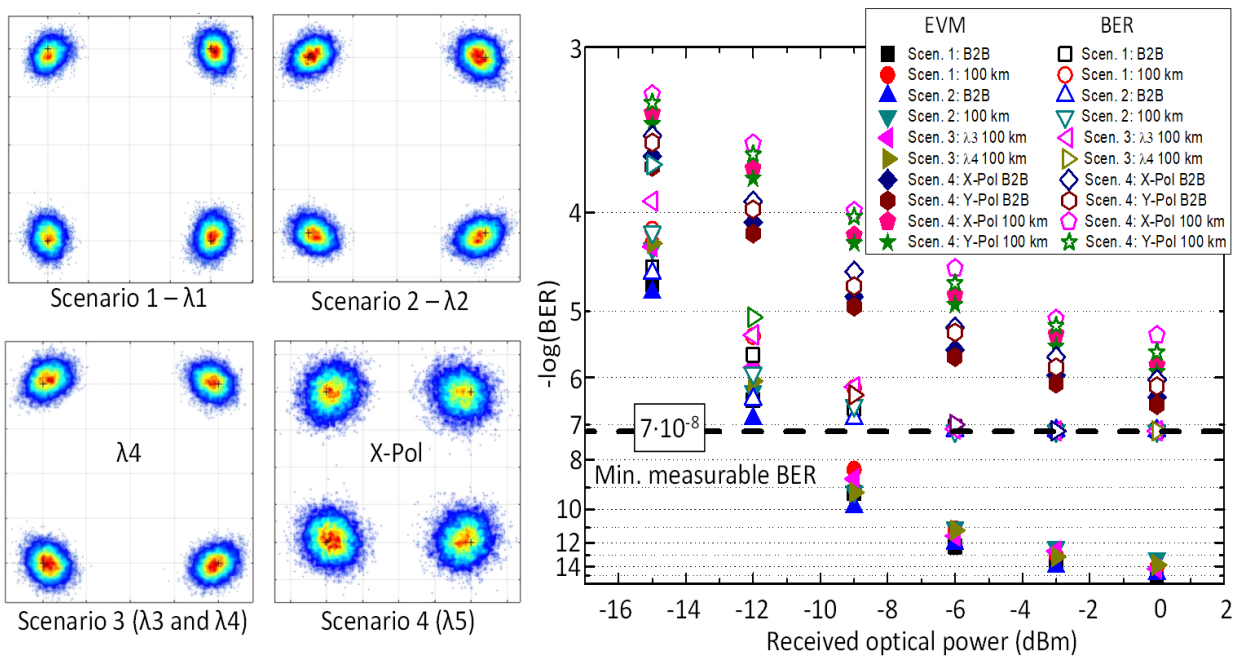
Η πλατφόρμα SDO ρυθμίζει αυτόματα τον πομπό πολλαπλών ροών και τα WSSs στον κόμβο είσοδο επιδεικνύοντας τέσσερα σενάρια πολλαπλών ροών. Η πρώτη περιλαμβάνει τη λειτουργία δύο ροών με δύο σήματα QPSK με την οπτική ροή A (Flow A) σε λ_1 (1.542.75 nm) να κατευθύνεται προς τα βόρεια και τη ροή B (Flow B) σε λ_2 (1.558.87 nm) προς στο νότο. Στο δεύτερο σενάριο, η ροή B (Flow B) κατευθύνεται επίσης προς βορρά, μαζί με τη ροή A (Flow A) ενώ το τρίτο σενάριο περιλαμβάνει τη λειτουργία μονής ροής με ένα σήμα QPSK δύο οπτικών φερόντων δηλαδή τη ροή C (Flow C) σε λ_3 (1550.85 nm) και σε λ_4 (1551.65 nm), κατευθυνόμενο προς τα βόρεια. Τέλος, το τέταρτος σενάριο περιλαμβάνει τη λειτουργία μονής ροής με ένα σήμα DP-QPSK (Flow D) σε λ_5 (1554.83 nm) που κατευθύνεται επίσης προς τα βόρεια. Η μετάβαση μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων ελέγχεται από τον SDO agent και λαμβάνει χώρα εντός 50-100 ms περιοριζόμενο από το χρόνο ανταπόκριση των θερμο-οπτικών στοιχείων πάνω στα PolyBoards και από το χρόνο αναδιαμόρφωσης των WSSs.



Εικόνα 5.18: Οπτικά φάσματα στην έξοδο του πομπού για τα υπό εξέταση σενάρια 1-4.

Η εικόνα 5.18 παρουσιάζει το οπτικό φάσμα στην έξοδο του WSS 1x4 στο βορρά για κάθε υπό μελέτη σενάριο. Το αριστερό μέρος της εικόνας 5.19 δείχνει τα αντίστοιχα διαγράμματα αστερισμού μετά από 100 km μετάδοσης. Τα διαγράμματα δείχνουν ότι τα σήματα έχουν παρόμοια ποιότητα στην περίπτωση των ροών A, B και C, αλλά χαμηλότερη ποιότητα στην περίπτωση της ροής D. Ο κύριος λόγος για αυτό ήταν η υψηλότερη οπτική απώλεια (περίπου 4 dB) στο front-end polyboard λόγω της διάδοσης των σημάτων μέσω του PR και του PBC, η οποία οδηγεί σε χαμηλότερη αναλογία οπτικού σήματος προς το θόρυβο. Το δεξί σκέλος της εικόνας 5.19 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των πραγματικών μετρήσεων BER για τα σήματα των τεσσάρων σεναρίων, μαζί με τις εκτιμήσεις BER με βάση το δείκτη σφαλμάτων μεγέθους (EVM) των αντίστοιχων διαγραμμάτων αστερισμού. Όπως παρατηρείται, το BER είναι πρακτικά το ίδιο για όλα τα σήματα στα σενάρια 1, 2 και 3, και παραμένει πολύ κοντά στο BER των αντίστοιχων back-to-back (B2B) σημάτων. Αντιθέτως, το σήμα DP-QPSK διαθέτει και στις δύο πολώσεις ποινή ισχύος περίπου 6 dB σε επίπεδο BER της τάξεως $5 \cdot 10^{-5}$ σε σύγκριση με τα άλλα σήματα.

Με αυτό τον τρόπο αποδόθηκε μια νέα έννοια για πομπούς πολλαπλών ροών που βασίζεται στην επιλογή λειτουργίας μεταξύ μονής και διπλής πόλωσης και λειτουργίας μεταξύ μονών και πολλαπλών οπτικών φερόντων. Χρησιμοποιώντας τον πομπό μέσα σε ένα οπτικό κόμβο και χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα SDO ελέγχθηκαν οι βασικές παράμετροι λειτουργίας του πομπού, αποδείχθηκαν με επιτυχία τέσσερα ευέλικτα σενάρια που αφορούν τη λειτουργία μονών και διπλών ροών με βάση σήματα QPSK 28 Gbaud και τη σύμφωνη μετάδοση πάνω από 100 km. Η συγκεκριμένη πειραματική εργασία δημοσιεύτηκε στο έγκριτο επιστημονικό περιοδικό της IEE Photonics Technology Letters [257].



Εικόνα 5.19: (Αριστερά) Διαγράμματα αστερισμού μετά από μετάδοση 100 km που αντιστοιχούν στα υπό μελέτη σενάρια 1-4. (Δεξιά) Πραγματικές μετρήσεις BER και εκτιμήσεις BER βασισμένες στο EVM για σήματα B2B και για μεταδιδόμενα σήματα (100 km).

Σύνοψη & Συμπεράσματα Κεφαλαίου 5

Σε αυτό το πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο πειραματικός χαρακτηρισμός των ευέλικτων οπτικών πομπών πολλαπλών ροών με χρήση των μονάδων 0 του προηγούμενου κεφαλαίου και δύο εξωτερικών διαμορφωτών IQ βασισμένοι στην υλική πλατφόρμα LiNbO_3 και σχήματος διαμόρφωσης QPSK μονής και διπλής πόλωσης στα 28 Gbaud. Με βάση αυτή την σχεδίαση προσομοιώθηκε πειραματικά η ευέλικτη οπτική μονάδα πομπού 3 του προηγούμενου κεφαλαίου, ικανού να παράξει μέχρι δύο ανεξάρτητες ή μιας οπτικής ροής διπλής πόλωσης, εκμεταλλευόμενοι τον σχεδιασμένο ευέλικτο οπτικό κόμβο με χρήση των WSSs.

Αναλυτικότερα, δόθηκε μια εκτενής ανάλυση του χαρακτηρισμού των πολυμερικών θερμο-οπτικών μεταγωγών, οι οποίοι στηρίχθηκαν στη δομή ενός διακλαδωτή σε συνδυασμό με την χρήση ηλεκτροδίων θαμμένων κάτω από τους κυματοδηγούς της διάταξης με αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς των δεικτών διάθλασης του κάθε κλάδου κατά την εφαρμογή ρεύματος. Αυτή η διαδικασία είχε σαν αποτέλεσμα την θέρμανση των κλάδων δυσχεραίνοντας κατά αυτό τον τρόπο την κυματοδότηση του φωτός, οδηγώντας το στον αντίθετο κλάδο από αυτόν που τροφοδοτήθηκε με ρεύμα. Με βάση τον τρόπο λειτουργίας του πολυμερικού διακόπτη κατασκευάστηκε ένα σύνθετο δίκτυο μεταγωγών, το οποίο σχημάτιζε έναν οπτικό δρομολογητή οδηγώντας το φως σε περισσότερες από μια εξόδους-διευθύνσεις. Σε συνδυασμό αυτών των δομών με μια συστοιχία τριών υβριδικά ολοκληρωμένων chip κέρδους από υλικό InP, δημιουργώντας έτσι λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας μετά από τη διάδοση του φωτός μέσα από περιθλαστικά φράγματα Bragg, κατασκευάστηκε οπτική συσκευή δημιουργίας έως και 2 ανεξάρτητων οπτικών ροών. Η ολοκληρωμένη συσκευή μετά το χαρακτηρισμό της παρουσίασε για κάθε οπτική ροή ευρύ φασματικό περιεχόμενο με εύρος συντονισμού μέχρι 23 nm εντός της C μπάντας ελάχιστης οπτικής ισχύς εξόδου -3.85 dBm και για τις δύο εξόδους κατά την εφαρμογή ρεύματος στους αντίστοιχους κλάδους την διακλαδωτών.

Με βάση τις συγκεκριμένες συσκευές και τον υλοποιημένο SDO agent του προηγούμενου κεφαλαίου σε συνδυασμό με εξωτερικούς IQ διαμορφωτές παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι χαρακτηρισμού καθώς και τα αποτελέσματά τους με χρήση οπτικού αναλυτή φάσματος και οπτικού μετρητή ισχύος. Οι χαρακτηρισμοί αυτοί αφορούσαν την ευελιξία στο σχήμα διαμόρφωσης και το ρυθμό μετάδοσης των ροών δεδομένων με χρήση του υλοποιημένου αλγορίθμου του προηγούμενου κεφαλαίου, ο οποίος φορτώθηκε στην πλακέτα αξιολόγησης FPGA. Αυτοί οι χαρακτηρισμοί αφορούσαν ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης μέχρι 16QAM με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 28 Gbaud και χρήση των εξωτερικών 3-bit PDACs με αρχικό ρυθμό των εισαγόμενων ροών δεδομένων έως 28 Gb/s από τους πομπούς του FPGA. Παράλληλα, στην συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάστηκε και η εξομοίωση του οπτικού κόμβου βασισμένου σε WSSs σε συνδυασμό με την υλοποίηση του ευέλικτου προτεινόμενου οπτικού πομπού μέσω των πέντε βασικών λειτουργιών για

την παραγωγή οπτικών ροών μέχρι δύο ανεξάρτητων ή μιας οπτικής ροής διπλής πόλωσης, τα οποία συνοδεύτηκαν με προκαταρκτική πειραματική διάταξη όπου πιστοποιήθηκε η δημιουργία οπτικών ανωτέρων σχημάτων διαμόρφωσης με χρήση του FPGA για την γέννηση των ηλεκτρικών σημάτων δεδομένων καθώς και η λειτουργικότητα των αλγορίθμων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος στον δέκτη. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την ορθή λειτουργία της διάταξης για ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης και παρουσιάστηκαν οπτικά διαγράμματα οφθαλμού και διαγράμματα αστερισμού για QPSK και 16QAM στα 28 Gbaud.

Τέλος, με βάση τα προαναφερθέντα υλοποιήθηκε πείραμα απόδειξης της ορθής λειτουργίας οπτικού πομπού πολλαπλών οπτικών ροών με χρήση των ολοκληρωμένων οπτικών συσκευών βασισμένων στις παθητικές πολυμερικές δομές δρομολόγησης και εξωτερικών IQ διαμορφωτών με ανώτερο σχήμα διαμόρφωσης QPSK εντός οπτικού κόμβου αποτελούμενο από WSSs για τέσσερα διαφορετικά δικτυακά σενάρια. Τα σενάρια αυτά αφορούσαν τη δημιουργία μονής οπτικής ροής με δύο οπτικά φέροντα ή μονής οπτικής ροής διπλής πόλωσης με σχήμα διαμόρφωση QPSK 28 Gbaud, και δύο οπτικών ροών που βασίζονται σε δύο ανεξάρτητα οπτικά διαμορφωμένα σήματα QPSK 28 Gbaud. Όλες οι παράμετροι του συστήματος τόσο του ευέλικτου οπτικού πομπού όσο και των WSSs ελέγχονταν από τον SDO agent και τροποποιούνταν ανάλογα με το υπό εξέταση σενάριο, καταλήγοντας και για τα τέσσερα σενάρια σε αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος χωρίς λάθη με σχήμα διαμόρφωσης QPSK 28 Gbaud ακόμα και μετά από μετάδοση 100 km.

Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 5

[253] <https://www.newport.com/f/16-channel-modular-laser-diode-controller>

[254] <https://www.finisar.com/roadms-wavelength-management/10wsaaxfll>

[255] <https://www.keysight.com/en/pd-1819784-pn-DSAX93204A/infiniium-high-performance-oscilloscope-33-ghz?cc=GR&lc=eng>

[256] Ziyang Zhang, Norbert Keil, "Thermo-optic devices on polymer platform," Optics Communications, Volume 362, 2016, Pages 101-114

[257] V. Katopodis et al., "Multi-Flow Transmitter Based on Polarization and Optical Carrier Management on Optical Polymers," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 28, no. 11, pp. 1169-1172, June 1, 2016.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σύνοψη Διατριβής και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

6.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήθηκαν και αναπτύχθηκαν ολοκληρωμένες οπτικές διατάξεις που προορίζονται για την υλοποίηση υψίρρυθμων και ευέλικτων οπτικών διασυνδέσεων με ρυθμούς μετάδοσης άνω των 100 Gb/s ανά οπτικό κανάλι, αξιοποιώντας στο έπακρο την οπτική πολυμερική τεχνολογία. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα διατριβή εστίασε στην ανάπτυξη και σχεδίαση υψίρρυθμων οπτικών διασυνδέσεων εντός υπολογιστικών κέντρων δεδομένων για αποστάσεις < 2km με χρήση οπτικών πομπών βασισμένων σε οπτικά πολυμερή καθώς και αντίστοιχων ευέλικτων για οπτικές διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων μέσω της σχεδίασης οπτικών κόμβων ικανών να υποστηρίξουν τέτοιους πομπούς για την κάλυψη των αναγκών στα σύγχρονα ευέλικτα οπτικά δίκτυα μετάδοσης κορμού. Αυτές οι οπτικές διασυνδέσεις αποσκοπούν στη παραγωγή οπτικών καναλιών με σχήματα διαμόρφωσης πλάτους (NRZ-OOK) με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 100 Gb/s καθώς και ανώτερης τάξης (m-QAM) σε υψίρρυθμους ρυθμούς μετάδοσης και με αυξημένη φασματική αποδοτικότητα, στοχεύοντας σε συνολική χωρητικότητα δεδομένων έως 1 Tb/s. Ως εκ τούτου, στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής διατριβής επιδείχθηκε πειραματικά η αξιολόγηση των ολοκληρωμένων οπτικών πομπών με ρυθμούς μετάδοσης έως 100 Gb/s σε εργαστηριακές συνθήκες καθώς και η αξιολόγηση ευέλικτων πομπών πολλαπλών ροών μετά από μετάδοση 100 km με χρήση ανώτερων σχημάτων διαμόρφωσης (m-QAM), παρουσιάζοντας λειτουργία χωρίς λάθη, με αποτέλεσμα να καθίστανται ικανοί να εξυπηρετήσουν τις απαιτήσεις των διασυνδέσεων μεταξύ μελλοντικών υπολογιστικών κέντρων.

6.2 Πολυμερική Τεχνολογία Διαμορφωτών και Σχεδίαση Οπτικών Κόμβων για Υψίρρυθμες και Ευέλικτες Οπτικές Διασυνδέσεις Εντός και Μεταξύ Υπολογιστικών Κέντρων

Στο πρώτο κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάστηκε με αναλυτικό τρόπο η ανάγκη για την προσέγγιση των οπτικών διασυνδέσεων τόσο εντός όσο και μεταξύ υπολογιστικών κέντρων καλύπτοντας ένα ευρύ βιβλιογραφικό φάσμα. Παράλληλα, αναλύθηκαν οι παράγοντες που εμποδίζουν σήμερα την ανάπτυξη οπτικών διασυνδέσεων υπερ-υψηλών ταχυτήτων καθώς και των ευέλικτων οπτικών διασυνδέσεων, οι οποίοι εγείρονται από την απουσία ενός ευέλικτου συνδυασμού πλατφορμών ολοκλήρωσης που μπορεί να κάνει διαθέσιμα υψηλής απόδοσης φωτονικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα για λειτουργία υπερ-υψηλής ταχύτητας με χωρητικότητα gigabit και terabit. Η πολυμερική τεχνολογία έρχεται να καλύψει αυτό το κενό και αποτελεί μια τηλεπικοινωνιακή πλατφόρμα υψηλών επιδόσεων, η οποία εκμεταλλεύεται τις πολλά υποσχόμενες ιδιότητες των πολυμερών για εξαιρετικά ταχεία διαμόρφωση οπτικών σημάτων και συγκεκριμένα της δυνατότητας των υλικών αυτών να παρέχουν εξαιρετικά ταχεία ηλεκτροπτική απόκριση (EO-response) αλλά και να επιδεικνύουν υψηλούς ηλεκτρο-οπτικούς συντελεστές. Στη γραμμή αυτή, προτάθηκε η ανάπτυξη ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή τύπου Mach-Zehnder με αναλογικό εύρος ζώνης > 65 GHz, καθώς επίσης διερευνήθηκε ο συνδυασμός ενός τέτοιου διαμορφωτή μαζί με άλλες βασικές παθητικές δομές όπως συζεύκτες MMI και φράγματα περίθλασης Bragg σε μία ενιαία ηλεκτρο-οπτική πολυμερική πλατφόρμα μέσω μονολιθικής ολοκλήρωσης, με στόχο τη δημιουργία μιας φωτονικής πλατφόρμας πολλαπλών λειτουργικοτήτων για εφαρμογές σε οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα υψηλών επιδόσεων. Με βάση τα οπτικά πολυμερή, παρουσιάστηκε εκτενώς και μια δεύτερη πολυμερική παθητική πλατφόρμα φωτονικής ολοκλήρωσης μονορυθμικής λειτουργίας με χαμηλή απώλεια διάδοση (0.5 dB/cm στα 1550 nm) και χαμηλό κόστος, η οποία επιδεικνύει μια μεγάλη ποικιλία μονολιθικά ολοκληρωμένων δομών (όπως φράγματα περίθλασης Bragg, θερμο-οπτικούς διακόπτες, μεταβλητούς οπτικούς εξασθενητές). Με τη συγκεκριμένη πλατφόρμα επιτεύχθηκε με ευκολία υβριδική ολοκλήρωση δομών InP, όπως τα chip κέρδους και οι φωτοδίοδοι (PDs). Εκμεταλλευόμενοι αυτές τις δυνατότητες, παρουσιάστηκε η κατασκευή οπτικών δομών για την ανάπτυξη υψίρρυθμων ευέλικτων οπτικών πομπών πολλαπλών ροών για εφαρμογή σε ευέλικτα οπτικά δίκτυα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια εκτενής ανάλυση σχετικά με την ανάγκη για χρήση υψίρρυθμων οπτικών πομποδεκτών λόγω των αυξημένων απαιτήσεων της κίνησης δεδομένων παγκοσμίως, αναγκάζοντας τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων να καλύψουν όλη αυτή τη ζήτηση. Με

στόχο την κάλυψη αυτών των αναγκών, οι οπτικές διασυνδέσεις χωρίστηκαν σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την απόσταση μετάδοσης. Η πρώτη αφορούσε τις διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων με απόσταση μετάδοσης μέχρι 4 km, ενώ η δεύτερη σχετίζεται με τις διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων για αποστάσεις που μπορούν να αγγίζουν τα 5000 km ή ακόμα περισσότερο. Κατ' αυτό τον τρόπο έγινε σαφές ότι αυτές οι δύο κατηγορίες διαφέρουν τόσο στην τεχνολογία όσο και στο είδος της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται για την κάλυψη της ζήτησης. Συνεπώς, παρουσιάστηκαν τα είδη των εμπορικά διαθέσιμων οπτικών πομποδεκτών καθώς και οι αρχιτεκτονικές δικτύωσης στις οποίες βρίσκουν εφαρμογή.

Το τρίτο κεφάλαιο εστίασε στην κατασκευή και την αξιολόγηση ολοκληρωμένων πολυμερικών οπτικών πομπών υπερ-υψηλών ταχυτήτων βασισμένων σε οπτικό σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK για διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων εντός υπολογιστικών κέντρων για αποστάσεις μέχρι 2 km. Με βάση την πολυμερική συμβολομετρική διάταξη τύπου Mach-Zehnder και την κόλληση μιας ενεργής δομής DFB λέιζερ σε υλικό InP και μήκος κύματος εκπομπής στα 1550 nm ανεστραμμένη κατά 90 μοίρες μέσω της τεχνικής ολοκλήρωσης butt-coupling, υλοποιήθηκε ένας ολοκληρωμένος οπτικός πομπός σε συνδυασμό με την χρήση ηλεκτρονικού κυκλώματος πολυπλεξίας 2:1 και ενίσχυσης δυαδικών σημάτων τελικού παραγόμενου ρυθμού 100 Gb/s κατασκευασμένου στην πλατφόρμα InP-DHBT. Αυτός ο ολοκληρωμένος πομπός αξιολογήθηκε μέσω εργαστηριακών πειραμάτων επίδειξης στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK παρουσιάζοντας επιτυχή λειτουργία χωρίς λάθη για ρυθμούς μετάδοσης 80, 90 και 100 Gb/s. Παράλληλα, παρουσιάστηκαν οι δύο πειραματικές διατάξεις που υλοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του οπτικού πομπού 100 Gb/s. Τέλος, έγινε μια αναφορά στο πεδίο εφαρμογής του συγκεκριμένου πομπού 100 Gb/s για διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων αποτελώντας κατάλληλες συσκευές για τοπολογίες δακτυλίου με οπτικά κυκλώματα μεταγωγής για διασυνδέσεις PODs μέχρι 2 km.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύθηκε εκτενώς η έννοια των ευέλικτων οπτικών πομποδεκτών καθώς και το πεδίο εφαρμογής τους, παρουσιάζοντας τον ορισμό του ευέλικτου οπτικού δικτύου. Με βάση αυτό το νέο τύπο δικτύου, έγινε αναφορά στις τοπολογίες του μητροπολιτικού δικτύου, δικτύου κορμού και των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, καθώς σε αυτά τα δίκτυα εμφανίζεται η απαίτηση για αυτοματοποιημένο έλεγχο και συνολικούς ρυθμούς δεδομένων που να ξεπερνούν το 1 Tb/s. Σε τέτοιου είδους δίκτυα είναι απαραίτητη η χρήση των προτεινόμενων οπτικών πομποδεκτών πολλαπλών ροών, πράγμα που συνεπάγεται τη χρήση αρχιτεκτονικών κόμβων με δυνατότητα ευελιξίας και ελέγχου. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκαν επιλεκτικοί μεταγωγείς μήκους κύματος (WSS) και προτάθηκε η κατάλληλη σχεδίαση που αναδεικνύει στο μέγιστο βαθμό τις δυνατότητες των προτεινόμενων ευέλικτων οπτικών πομποδεκτών πολλαπλών ροών, παρουσιάζοντας αναισθησία στο μήκος κύματος (άχρωμη-colorless) και στην κατεύθυνση (directionless). Παράλληλα, αναλύθηκαν οι τρόποι διασύνδεσης και μεταφοράς των ηλεκτρικών ροών δεδομένων του δικτύου μέσω ενθυλάκωσης αυτών σε OTN, το οποίο αποτελεί το βασικό πρωτόκολλο μεταφοράς των δεδομένων στα νέα οπτικά δίκτυα. Καθότι αυτοσκοπός των μελλοντικών οπτικών δικτύων αποτελεί η ευελιξία καθώς και ο απομακρυσμένος έλεγχος πέραν από τις χωρητικότητες terabit, παρουσιάστηκε μια τοπολογία ελέγχου τόσο των ευέλικτων πομποδεκτών όσο και της αρχιτεκτονικής του ευέλικτου κόμβου, βασισμένη στη γραφική γλώσσα προγραμματισμού Labview, με το οποίο ελέγχονταν τόσο οι οπτικές όσο και οι ηλεκτρικές παράμετροι του εν λόγω προτεινόμενου συστήματος, αποδίδοντας τις δυνατότητες των πολλαπλών οπτικών ροών, των πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης και των πολλαπλών σχημάτων διαμόρφωσης ανώτερης τάξης m-QAM. Ο έλεγχος των ηλεκτρικών παραμέτρων επιτυγχάνονταν μέσω του προγραμματισμού μιας πλακέτας αξιολόγησης FPGA με χρήση της γλώσσας Verilog, αποδίδοντας κατά αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα αναπροσαρμογής σε πραγματικό χρόνο των λειτουργιών των ηλεκτρικών πομπών οδήγησης (του παραγόμενου ρυθμού δεδομένων όσο και του αριθμού των ενεργών πομπών) σε συνδυασμό με εξωτερικούς υψίρρυθμους ψηφιακούς σε αναλογικούς μετατροπείς τριών bits κατασκευασμένα στην πλατφόρμα InP-DHBT για την δημιουργία πολυεπίπεδων ηλεκτρικών σημάτων μέχρι οκτώ σταθμών σε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 25 Gbaud, οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν εξωτερικούς ηλεκτρο-οπτικούς διαμορφωτές ορθογωνιότητας (IQ-MZM) στους ευέλικτους οπτικούς πομπούς πολλαπλών ροών.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τόσο οι πειραματικοί χαρακτηρισμοί των οπτικών κυκλωμάτων στην παθητική πολυμερική πλατφόρμα όσο και τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν τους ευέλικτους οπτικούς πομποδέκτες, οι οποίοι μπορούσαν να παράγουν πολλαπλές οπτικές ροές ταυτόχρονα. Αυτοί οι ευέλικτοι οπτικοί πομποί βασίστηκαν στην υβριδική ολοκλήρωση της τεχνολογίας InP (δομές λέιζερ) με παθητικές δομές δρομολόγησης του φωτός αναπτυγμένες στην παθητική πολυμερική

πλατφόρμα ολοκλήρωσης χαμηλών απωλειών καθώς και στην χρήση εξωτερικών ηλεκτροπτικών διαμορφωτών IQ. Κάθε οπτική ροή μπορούσε να μεταφέρει πληροφορία σε μεταβλητό μήκος κύματος και τύπο διαμόρφωσης (m-QAM) ανάλογα με την απόσταση μετάδοσης και τον όγκο των δεδομένων του σήματος, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τη συνολική χωρητικότητα μέσω επιλεκτικότητας στην πόλωση. Για πρώτη φορά δόθηκε η δυνατότητα της επιλογής του είδους της πόλωσης (μονής ή διπλής) από ένα ολοκληρωμένο πομποδέκτη καθώς η επικρατούσα τάση προσέγγισης αφορά τη χρήση υπερ-καναλιών (superchannels) σε ολοκληρωμένα οπτικά κυκλώματα ενώ τελευταία παρουσιάστηκε η χρήση ευέλικτων (μεταβλητό σχήμα διαμόρφωσης αλλά σταθερό μήκος κύματος) superchannels χωρίς να γινόταν ιδιαίτερη αναφορά για την ιδιότητα των πολλαπλών ροών με πραγματική ευελιξία σε όλες τις οπτικές (φυσικό στρώμα) παραμέτρους όπως το μήκος κύματος, το σχήμα διαμόρφωσης, ο αριθμός των οπτικών φερόντων, η επιλεκτικότητα στην πόλωση. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα και η δημιουργία μέσω ενός πρωτότυπου ευέλικτου οπτικού πομποδέκτη μέχρι δύο οπτικών ροών δεδομένων με αλλαγή του τύπου διαμόρφωσης από διαμόρφωση κατά φάση QPSK στα 28 Gbaud σε ένα οπτικό φέρων και δύο ορθογώνιες πολώσεις (1-carrier DP-QPSK) σε QPSK μιας πόλωσης και 2 οπτικές φέρουσες (2-carrier QPSK) με χρήση του ανεπτυγμένου λογισμικού SDO σε labview και FPGA παρουσιάζοντας αξιόπιστη λειτουργία χωρίς λάθη μέσα από μετάδοση σε μονότροπη οπτική ίνα 100 km, χρησιμοποιώντας τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP) για την ορθή ανάκτηση των δεδομένων στη μεριά του σύμφωνου δέκτη.

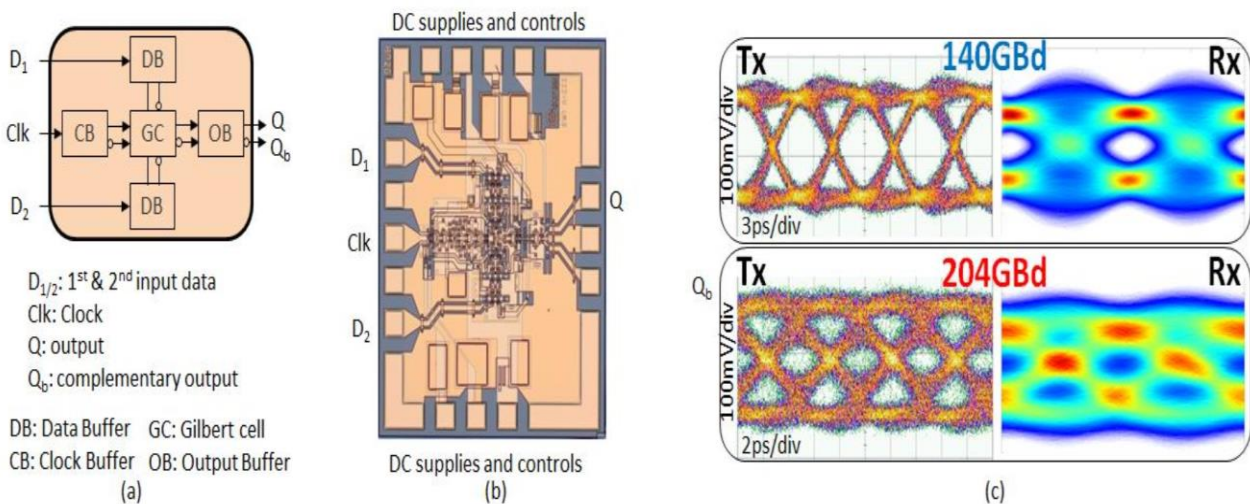
Συμπερασματικά, στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάστηκε αρχικά η μελέτη, ο σχεδιασμός και η επιτυχής υλοποίηση υψίρρυθμων οπτικών διασυνδέσεων με χρήση οπτικών πομπών βασισμένων σε οπτικά πολυμερή εντός υπολογιστικών κέντρων. Συνοδεύθηκε από τη μελέτη και πειραματικές μετρήσεις που επιδεικνύουν την επιτυχή λειτουργία της πολυμερικής ηλεκτρο-οπτικής πλατφόρμας με απώλειες διάδοσης 1 dB/cm για την κατασκευή MZM ικανών να διαμορφώσουν οπτικά σήματα εισόδου με TM πολωτικό ρυθμό μέχρι τα 100 Gb/s, καθώς επιδεικνύει εξαιρετικά ταχεία ηλεκτροπτική απόκριση με αναλογικό εύρος ζώνης > 65 GHz. Οι δομικές μονάδες του ολοκληρωμένου πομπού σχετίζονταν με τον υψίρρυθμο ηλεκτρονικό πολυπλέκτη 2:1 κατασκευασμένο στην πλατφόρμα InP-DHBT που παρήγαγε το ηλεκτρικό σήμα 100 Gb/s και με την οπτική υποδιάταξη, η οποία αποτελούνταν από τον ηλεκτροπτικό πολυμερικό MZ διαμορφωτή μαζί με ένα 1550 nm DFB λέιζερ με απώλειες σύζευξης 1.2 dB σχηματίζοντας ένα υβριδικό οπτικό chip μέσω της τεχνικής ολοκλήρωσης butt-coupling. Αυτός ο ολοκληρωμένος πομπός αξιολογήθηκε μέσω εργαστηριακών πειραμάτων επίδειξης παρουσιάζοντας επιτυχή λειτουργία χωρίς λάθη για ρυθμούς μετάδοσης 80, 90 και 100 Gb/s με σχήμα διαμόρφωσης NRZ-OOK.

Η μελέτη της απόδοσης ευέλικτων οπτικών διασυνδέσεων μεταξύ υπολογιστικών κέντρων παρουσιάστηκε στη συνέχεια μέσα από την επιτυχή αξιολόγηση ευέλικτων οπτικών πομπών, οι οποίες στηρίχθηκαν στη παθητική πολυμερική πλατφόρμα ολοκλήρωσης με απώλειες διάδοσης 0.5 dB/cm, που ολοκληρώθηκε υβριδικά με την τεχνολογία InP με απώλειες σύζευξης 0.8 dB. Παράλληλα, σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε ευέλικτος οπτικός κόμβος με αναισθησία στο μήκος κύματος (colorless) και στην κατεύθυνση (directionless) ικανός να εκμεταλλευτεί πλήρως τις δυνατότητες των ευέλικτων οπτικών πομπών, ο οποίος υλοποιήθηκε με χρήση των επιλεκτικών μεταγωγών μήκους κύματος (WSS). Αναλυτικότερα, επιδείχθηκε η ορθή λειτουργία του οπτικού πομπού πολλαπλών οπτικών ροών με χρήση των ολοκληρωμένων οπτικών συσκευών βασισμένων στις παθητικές πολυμερικές δομές δρομολόγησης και εξωτερικών IQ διαμορφωτών με ανώτερο σχήμα διαμόρφωσης QPSK εντός του ευέλικτου οπτικού κόμβου για τέσσερα διαφορετικά δικτυακά σενάρια. Τα σενάρια αυτά αφορούσαν τη δημιουργία μονής οπτικής ροής με δύο οπτικά φέροντα ή μονής οπτικής ροής διπλής πόλωσης με σχήμα διαμόρφωσης QPSK 28 Gbaud, και δύο οπτικών ροών που βασίζονται σε δύο ανεξάρτητα οπτικά διαμορφωμένα σήματα QPSK 28 Gbaud. Όλες οι παράμετροι του συστήματος τόσο του ευέλικτου οπτικού πομπού όσο και των WSSs ελέγχονταν από τον SDO agent και τροποποιούνταν ανάλογα με το υπό εξέταση σενάριο, καταλήγοντας και για τα τέσσερα σενάρια σε αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος χωρίς λάθη με σχήμα διαμόρφωσης QPSK 28 Gbaud ακόμα και μετά από μετάδοση 100 km.

Η χρήση των οπτικών πομπών 100 Gb/s που παρουσιάστηκαν στην διδακτορική διατριβή προορίζεται για τα δίκτυα εντός υπολογιστικών κέντρων και πιο συγκεκριμένα για τοπολογίες δακτυλίου με οπτικά κυκλώματα μεταγωγής για διασυνδέσεις PODs μέχρι 2 km, ενώ οι ευέλικτοι οπτικοί πομποί πολλαπλών ροών βρίσκουν εφαρμογή στα μελλοντικά οπτικά δίκτυα κορμού μεγάλων αποστάσεων μετάδοσης, όπου οι υψηλοί ρυθμοί διαμόρφωσης σε συνδυασμό με την αξιοπιστία και την ευελιξία λειτουργίας των πομποδεκτών αποτελούν κομβικό σημείο σχεδίασης του συνολικού δικτύου.

6.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Ερεύνα για τις Οπτικές Διασυνδέσεις Εντός και Μεταξύ Υπολογιστικών Κέντρων

Είναι σαφές ότι τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων δεν είναι έτοιμα σήμερα για να προχωρήσουν σε εξωτερικές λύσεις οπτικών διασυνδέσεων τόσο εντός και μεταξύ αυτών, λόγω της έλλειψης ωριμότητας, της αβεβαιότητας ως προς το κόστος και της απαίτησης μιας ριζοσπαστικής αλλαγής του συνόλου της υποδομής των κέντρων δεδομένων. Παρόλα αυτά, τα κέντρα δεδομένων συνεχίζουν να αυξάνουν την χωρητικότητά τους εκμεταλλευόμενα τις διεπαφές υψηλότερης ταχύτητας και τους ηλεκτρικούς μεταγωγείς που εμφανίζονται στην αγορά. Είναι βέβαιο, ότι γραμμές με ρυθμούς μετάδοσης 50 Gb/s θα εμφανιστούν σύντομα στην εμπορική αγορά, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή διασυνδέσεων 400 Gb/s (8 γραμμών) με χρήση σχήματος διαμόρφωσης PAM-4 για το διπλασιασμό του τελικού ρυθμού μετάδοσης, συμβαδίζοντας με τα πρότυπα του 400G Ethernet, όπως παρουσιάστηκαν το Δεκέμβριο του 2017 [258]. Εντούτοις, ακολουθώντας την πρόταση της παρούσας διατριβής για χρήση της οπτικής πολυμερικής τεχνολογίας που επιτρέπει τη διαμόρφωση σημάτων 100 Gb/s σε συνδυασμό με την υβριδική ολοκλήρωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων InP-DHBT που επιτρέπουν πλέον ηλεκτρικούς ρυθμούς μετάδοσης έως 200 Gb/s όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 6.1 [259], θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια προσέγγιση τετραπλής γραμμής για την κατασκευή διασυνδέσεων 400 Gb/s εντός υπολογιστικών κέντρων.



Εικόνα 6.1: InP-DHBT 2:1-επιλογέας: (a) διάγραμμα κυκλώματος, (b) μικροφωτογραφία chip 1.2x1.5-mm², (c) τα διαγράμματα οφθαλμού εξόδου NRZ-OOK στα 140 και 204 Gb/s μετρούμενα με τις άκρες του δοκιμαστικού ακροδέκτη στο κύκλωμα (Tx) και με τα ανακτώμενα σήματα μετά την εξισορρόπηση από BtB (Rx).

Συνεπώς, για τη δημιουργία 4 ανεξάρτητων καναλιών οπτικής πληροφορίας, οι ηλεκτρο-οπτικοί πολυμερικοί MZMs κατασκευασμένοι σε συστοιχίες τεσσάρων ή ακόμα περισσότερων δομών θα μπορούσαν να ολοκληρωθούν με συντονίσιμα λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας, αποδίδοντας εύρος συντονισμού που να αγγίζει τα 23 nm καλύπτοντας αρκετά κανάλια στο 100 GHz ITU πλέγμα. Αυτά τα λέιζερ μπορούν και υλοποιούνται συνδυάζοντας στοιχεία κέρδους InP με περιθλαστικά φράγματα Bragg βασισμένα στην παθητική πολυμερική πλατφόρμα ολοκλήρωσης, όπως περιεγράφηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 6, καταλήγοντας στο συνδυασμό των πλεονεκτημάτων των δύο πολυμερικών πλατφορμών αυτής της διατριβής σε μια μόνο υβριδικά ολοκληρωμένη οπτική συσκευή. Πέρα από αυτό, οι διεπαφές με χωρητικότητες 800 Gb/s και πέραν του 1 Tb/s βρίσκονται σε αρχικό στάδιο έρευνας και θα πρέπει να ευθυγραμμιστούν με τις βασικές προσδοκίες του Ethernet (βλέπε εικόνα 6.2) για την εξέλιξη των προτύπων πέραν των 400 GbE. Σύμφωνα με αυτή, το επόμενο φυσικό βήμα είναι η ανάπτυξη του προτύπου 800 GbE ως βήμα για την επόμενη στα 1.6 Tb/s λίγο περαιτέρω στο μέλλον [260]. Παρόλο που άλλες εκτιμήσεις προβλέπουν την ανάπτυξη προτύπων 1TbE ή 1.2 TbE βασισμένων σε ποικίλους ρυθμούς δεδομένων ανά λωρίδα, η επιλογή των προτύπων 800 GbE και 1.6 TbE θεωρείται σήμερα ως η πλέον πιθανή.

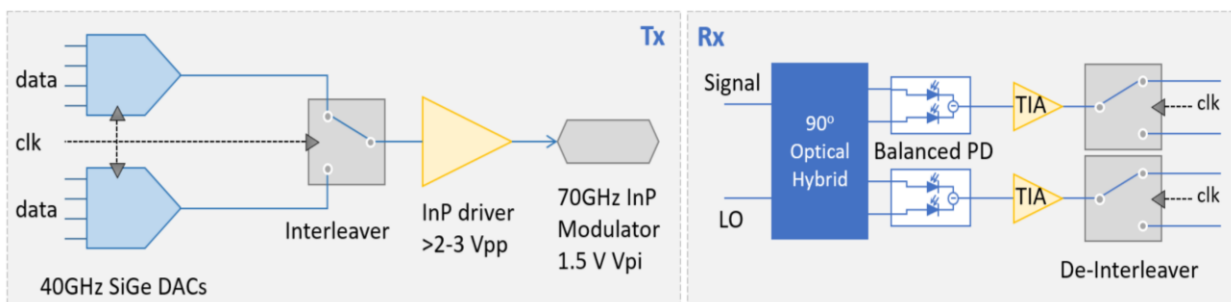
Τα οφέλη από την ελαστική δικτύωση (elastic networking) είναι καλά καθιερωμένα μέχρι τώρα [3], ενώ το software-defined networking (SDN) κερδίζει συνεχώς το ενδιαφέρον, στοχεύοντας προς την παροχή πόρων και την παράδοση νέων υπηρεσιών. Παρόλο που αυτές οι έννοιες έθεσαν τα θεμέλια των προγραμματιζόμενων οπτικών δικτύων, υπάρχει ακόμη πολύς δρόμος προς την κατεύθυνση μιας πλήρως αυτοματοποιημένης και αποτελεσματικής δικτύωσης. Οι πάροχοι έχουν στρέψει την προσοχή τους σε αυτό που είναι αναμφισβήτητο το επόμενο εξελικτικό βήμα στον προγραμματισμό του δικτύου: Η ικανότητα διαμοιρασμού του φάσματος (sliceability) και οι πολλαπλές ροές (multiflow) που παρουσιάστηκαν σε αυτή τη διατριβή μπορούν να οδηγήσουν σε περαιτέρω μειώσεις των CAPEX και OPEX, υπερβαίνοντας κατά πολύ το 30% [262,263]. Και αυτό συμβαίνει, γιατί οι προτεινόμενοι αναμεταδότες μπορούν να χειριστούν πολλαπλές ροές και να δημιουργήσουν συνδέσεις σημείου προς πολλαπλά σημεία, βελτιστοποιώντας τη χρήση των πόρων του υλικού και επεκτείνοντας τη χρήση της οπτικής μεταγωγής πέρα των δαπανηρών και ενεργοβόρων ηλεκτρονικών μεταγωγών, στοχεύοντας παράλληλα στο πλαίσιο που θα διευκολύνει τον προγραμματισμό τους σε περιβάλλον SDN.

Επιπλέον, για την αντιμετώπιση των αναδυόμενων αναγκών στο δίκτυο 5G backhaul και της διασύνδεσης υπολογιστικών κέντρων μέσω δικτύων πρόσβασης, όπου η δυναμική είναι ζωτικής σημασίας, ο συνδυασμός των ευέλικτων πομποδεκτών πολλαπλών ροών με τον υλοποιημένο οπτικό κόμβο καθίσταται απαραίτητος. Βέβαια, η χρήση ενός ολοκληρωμένου flex-grid 1x4 WSS μαζί με τον ευέλικτο πομποδέκτη με χρόνο μεταγωγής σε κλίμακα νανοδευτερολέπτων, και κλιμακούμενη σε μεγάλους αριθμούς καναλιών (δηλαδή πλήρης κάλυψη της C μπάντας) θα μπορούσε να αποδώσει ακόμα μεγαλύτερες δυνατότητες, επιτρέποντας εξοικονόμηση στο αποτύπωμα του κυκλώματος, της κατανάλωσης ενέργειας και του κόστους.

Επίσης, γεφυρώνοντας το χάσμα του εύρους ζώνης με την αναλογική διεμπλοκή (interleaving) σήματος, η περεταίρω αύξηση της ταχύτητας των ευέλικτων πομποδεκτών πέραν των 64 Gbaud σκοντάφτει στην τεράστια διαφορά μεταξύ του εύρους ζώνης των φωτονικών κυκλωμάτων και του εύρους ζώνης των διασυνδεδεμένων ψηφιακών ηλεκτρονικών, ιδιαίτερα των DACs. Αν και τα φωτονικά κυκλώματα με απόκριση 3-dB υπερβαίνουν τα 40 GHz και είναι ήδη διαθέσιμα [264], οι CMOS DAC που χρησιμοποιούνται συνήθως σε αναμεταδότες δεσμεύονται με μέτρια εύρη ζώνης αρκετά κάτω από τα 30 GHz [265], ενώ οι εναλλακτικές τεχνολογίες παρουσιάζουν περιορισμένο ενδιαφέρον για την εφαρμογή λόγω της εξαιρετικά υψηλής κατανάλωσής τους.

Για να αντιμετωπιστεί το χάσμα εύρους ζώνης μεταξύ της φωτονικής και της ηλεκτρονικής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια έννοια interleaving αναλογικού σήματος. Αυτή η προσέγγιση θα επιτρέψει τη διεμπλοκή (interleaving) των εξόδων δύο DACs υψηλής ταχύτητας όπως αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή στο κεφάλαιο 5 σε ένα αναλογικό σήμα πολύ υψηλής ταχύτητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη τροφοδοσία των φωτονικών κυκλωμάτων, αποσυσχετίζοντας έτσι το εύρος ζώνης του DAC με εκείνο της φωτονικής. Η ίδια αρχή θα ακολουθείται και από την πλευρά του δέκτη, αλλά αντίστροφα: Το αναλογικό σήμα υψηλής ταχύτητας που λαμβάνεται στον φωτοανιχνευτή αποδιαμορφώνεται σε χαμηλές γραμμές εύρους ζώνης, οι οποίες μπορούν να ψηφιοποιηθούν από ADCs με μικρότερο εύρος ζώνης. Η ιδέα παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 6.3.

Η ανάμιξη αναλογικού σήματος μπορεί να επιτευχθεί με 3 διαφορετικές προσεγγίσεις [266]: (i) Time Interleaving, όπου οι έξοδοι των δύο DACs προστίθενται σε έναν παθητικό συνδυαστή με μια κατάλληλη χρονική μετατόπιση, επιτυγχάνοντας υψηλότερος συνολικός ρυθμός δειγματοληψίας. Ωστόσο, το αναλογικό εύρος ζώνης παραμένει το ίδιο. Η δεύτερη προσέγγιση αφορά (ii) DAC με κύκλωμα πολυπλεξίας στο χρόνο, το οποίο αντικαθιστά τον παθητικό συνδυαστή, ενώ η τρίτη σχετίζεται (iii) με αναλογικό πολυπλέκτη υψηλής ταχύτητας (analog multiplexer, A-MUX) [267], εναλλάσσοντας μεταξύ των σημάτων εξόδου των πολλαπλών DACs.



Εικόνα 6.3: Προσέγγιση για τη (α) δημιουργία (Tx) και την (β) ανίχνευση (Rx) ρυθμών συμβόλων 128 Gbaud.

Κατ' επέκταση, οι προτεινόμενοι ευέλικτοι πομποδέκτες πολλαπλών ροών στη μορφή ολοκληρωμένων συσκευών θα μπορούσαν να αποτελέσουν το μέλλον στις οπτικές διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων καθώς με χρήση της παραπάνω πρότασης θα μπορούσαν να αυξήσουν τους ηλεκτρικούς ρυθμούς συμβόλων από 64 σε 128 Gbaud αγγίζοντας συνολική χωρητικότητα 3 Tb/s. Βέβαια, για να γίνει πραγματικότητα μια τέτοια πολύπλοκη ευέλικτη συσκευή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί από την πλευρά της φωτονικής, ο συνδυασμός της παθητικής πολυμερικής πλατφόρμας για την δημιουργία των οπτικών ροών μαζί με την ηλεκτρο-οπτική πολυμερική τεχνολογία ή την τεχνολογία InP για την κατασκευή συστοιχιών διαμορφωτών IQ, καθώς οι τελευταίες αποτελούν τα μοναδικά παγιωμένα υλικά συστήματα που μπορούν να επιτύχουν εξαιρετικά υψηλό ηλεκτρο-οπτικό εύρος ζώνης. Από την πλευρά των ηλεκτρονικών, θα πρέπει να ακολουθηθεί ένας συνδυασμός SiGe BiCMOS [268] με InP-DHBT [111], προσφέροντας έναν βέλτιστο συνδυασμό μεγάλου εύρους ζώνης, υψηλής συνολικής απόδοσης και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Παράλληλα, για να καταστεί λειτουργικός ένας τέτοιος πομποδέκτης και να συμβαδίσει με τις μελλοντικές απαιτήσεις των δικτύων θα πρέπει ο SDO agent να ενσωματωθεί και να ακολουθήσει τις αρχές του SDN, επεκτείνοντας τις λειτουργίες του και το δίαυλο επικοινωνίας στις νέες απαιτήσεις του προγραμματιστικού περιβάλλοντος των μελλοντικών ευέλικτων δικτύων μέσω του ενοποιημένου επίπεδου ελέγχου όλης της υποδομής.

Αναφορές Εισαγωγής και Κεφαλαίου 6

[258] <http://www.ieee802.org/3/bs/>

[259] H. Mardoyan, et al., "204-GBaud On-Off Keying Transmitter for Inter-Data Center Communications," in Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2018), paper Th4A.4.

[260] <https://ethernetalliance.org/the-2018-ethernet-roadmap/>

[261] OFC2017, "A Market Overview", 2017

[262] Víctor López et. al., J. Opt. Commun. Netw. 6, 476-485 (2014)

[263] Juan Pedro Fernandez-Palacios et. al., in proc. ECOC 2014, paper Mo.4.2.1.

[264] V. Katopodis, et al., "Optical terabit transmitter and receiver based on passive polymer and InP technology for high-speed optical connectivity between datacenters," Proc. SPIE 10561, Next-Generation Optical Communication: Components, Sub-Systems, and Systems VII, 1056107 (29 January 2018)

[265] Yasuyuki Miyamoto, EICE Electronics Express Vol. 13, No 18 (2016).

[266] C. Schmidt, C. Kottke, V. Jungnickel and R. Freund, "Enhancing the Bandwidth of DACs by Analog Bandwidth Interleaving," Broadband Coverage in Germany; 10. ITG-Symposium, Berlin, Germany, 2016, pp. 1-8.

[267] M. Nagatani et al., "A 50-GHz-bandwidth InP-HBT analog-MUX module for high-symbol-rate optical communications systems," 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), San Francisco, CA, 2016, pp. 1-4.

[268] K. Schuh et. al., "100 GSa/s BiCMOS DAC Supporting 400 Gb/s Dual Channel Transmission", ECOC 2016

Λίστα Επιστημονικών Δημοσιεύσεων

- 1) **Katopodis, V.**, Spyropoulou, M., Tsokos, C., (...), Kouloumentas, C., Avramopoulos, H., "Polarization-, carrier-, and format-selectable optical flow generation based on a multi-flow transmitter using passive polymers", International Conference on Transparent Optical Networks 2016-August, 7550583 (invited).
- 2) **Katopodis, V.**, Felipe, D., Tsokos, C., (...), Avramopoulos, H., Kouloumentas, C., "Multi-Flow Transmitter Based on Polarization and Optical Carrier Management on Optical Polymers", IEEE Photonics Technology Letters 2016, 28 (11), 7416636, pp. 1169-1172.
- 3) **Katopodis, V.**, Groumas, P., Zhang, Z., (...), Avramopoulos, H., Kouloumentas, Ch., "Polymer enabled 100 Gbaud connectivity for datacom applications", Optics Communications 2016, 362, pp. 13-21 (invited).
- 4) Groumas, P., Zhang, Z., **Katopodis, V.**, (...), Avramopoulos, H., Kouloumentas, Ch., "Tunable 100 Gbaud Transmitter Based on Hybrid Polymer-to-Polymer Integration for Flexible Optical Interconnects", IEEE Journal of Lightwave Technology 2016, 34 (2), 7185328, pp. 407-418 (invited).
- 5) Gounaridis, L., Groumas, P., Schreuder, E., (...), **Katopodis, V.**, Kouloumentas, C., Avramopoulos, H., "Design of grating couplers and MMI couplers on the TriPleX platform enabling ultra-compact photonic-based biosensors", Sensors and Actuators, B: Chemical, 2015, 209, pp. 1057-1063.
- 6) Groumas, P., **Katopodis, V.**, Choi, J.H., (...), Avramopoulos, H., Kouloumentas, C., "Multi-100 GbE and 400 GbE interfaces for intra-data center networks based on arrayed transceivers with serial 100 Gb/s operation", Journal of Lightwave Technology 2015, 33 (4), 6924715, pp. 943-954.
- 7) **Katopodis, V.**, Zhang, Z., Groumas, P., (...), Avramopoulos, H., Kouloumentas, C., "Tunable transmitter for serial 100 Gb/s connectivity inside flexible data centers using hybrid polymer integration", Optical Fiber Communication Conference, OFC 2015.
- 8) Zhang, Z., **Katopodis, V.**, Groumas, P., (...), Avramopoulos, H., Kouloumentas, C., "Passive and electro-optic polymer photonics and InP electronics integration", Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2015, 9516, 951603 (invited).
- 9) **Katopodis, V.**, Groumas, P., Zhang, Z., (...), Kouloumentas, C., Avramopoulos, H., "2×100-Gb/s NRZ-OOK integrated transmitter for intradata center connectivity", IEEE Photonics Technology Letters 2014, 26 (20), 6877630, pp. 2078-2081.
- 10) Lazarou, I., Spatharakis, C., **Katopodis, V.**, (...), Schrenk, B., Avramopoulos, H., "Experimental demonstration of high spectral-efficiency transmission with a novel non-interferometric vector modulator and custom DSP algorithms for coherent PON architectures", DOI: 10.1117/12.2038473 Conference: SPIE WEST 2014, At <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1828262>.
- 11) Yiannopoulos, K., Varvarigos, E., **Katopodis, V.**, (...), Dimos, P., Heliotis, G., "Coverage capabilities of a multi-wavelength passive optical network architecture", 2014 IEEE 19th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks, CAMAD 2014 7033204, pp. 51-55.
- 12) Avramopoulos, H., **Katopodis, V.**, Groumas, P., (...), Pagano, A., Kouloumentas, C., "Passive and electro-optic polymer photonics and InP electronics integration for multi-flow terabit transceivers at edge SDN switches and data-center gateways", International Conference on Transparent Optical Networks 2015 (invited).
- 13) Brahmi, H., Giannoulis, G., Menif, M., **Katopodis, V.**, (...), Avramopoulos, H., Erasme, D., "On the fly all-optical packet switching based on hybrid WDM/OCDMA labeling scheme", Optics Communications 2014, 312, pp. 175-184
- 14) Schrenk, B., **Katopodis, V.**, Bauwelinck, J., (...), Qiu, X.Z., Avramopoulos, H., "Flexible WDM/FTDM passive optical network with RZ-seeded all-optical sub-wavelength grid engine", Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, Volume: JTh2A.71.
- 15) **Katopodis, V.**, Kouloumentas, C., Konczykowska, A., (...), Vannucci, A., Avramopoulos, H., "Serial 100 Gb/s connectivity based on polymer photonics and InP-DHBT electronics", Optics Express 2012, 20 (27), pp. 28538-28543 (invited-postdeadline paper).
- 16) Verbrugge, J., Schrenk, B., Bauwelinck, J., **Katopodis, V.**, (...), Bakopoulos, P., Avramopoulos, H., "Quaternary TDM-PAM as upgrade path of access PON beyond 10Gb/s", Optics Express 2012, 20 (26), pp. B15-B20.
- 17) Dris, S., Bauwelinck, J., Yin, X., **Katopodis, V.**, (...), Verbrugge, J., Avramopoulos, H., "Quaternary TDM-PAM and its implications for TDMA equipment", European Conference on Optical Communication, ECOC 2012, 6706165.

- 18) Groumas, P., Zhang, Z., De Felipe, D., **Katopodis, V.**, (...), Avramopoulos, H., Grote, N., "Novel photonic integration platform based on electro-optic polymers", European Conference on Optical Communication, ECOC 2012.
- 19) **Katopodis, V.**, Kouloumentas, C.H., Konczykowska, A., (...), Vannucci, A., Avramopoulos, H., "Integrated transmitter for 100 Gb/s OOK connectivity based on polymer photonics and InP-DHBT electronics", European Conference and Exhibition on Optical Communication, ECEOC 2012, Post-deadline paper.
- 20) Groumas, P., Zhang, Z., **Katopodis, V.**, (...), Avramopoulos, H., Grote, N., "Complex monolithic and InP hybrid integration on high bandwidth electro-optic polymer platform", Optics Letters 2012, 37 (16), pp. 3465-3467.
- 21) P. Groumas, **V. Katopodis**, C. Kouloumentas, M. Bougioukos, and H. Avramopoulos, "All-Optical RZ-to-NRZ Conversion of Advanced Modulated Signals", IEEE Photonics Technology Letters 01/2012; 24:179 -181. DOI: 10.1109/LPT.2011.2174783.
- 22) M. Bougioukos, T. Richter, C. Kouloumentas, **V. Katopodis**, R. Harmon, D. Rogers, J. Harrison, A. Poustie, G. Maxwell, C. Schubert, H. Avramopoulos, "Phase-Incoherent DQPSK Wavelength Conversion Using a Photonic Integrated Circuit", IEEE Photonics Technology Letters 12/2011; DOI: 10.1109/LPT.2011.2164903.
- 23) **V. Katopodis** & C. Psychalinos (2011) Multiple-loop feedback filters using current feedback amplifiers, International Journal of Electronics, 98:7, 833-846.
- 24) H. Brahmi, G. Giannoulis, M. Menif, **V. Katopodis**, D. Kalavrouziotis, C. Stamatidis, C. Kouloumentas, H. Avramopoulos, D. Erasme, "Experimental Demonstration of an Elastic Packet Routing Node Based on OCDMA Label Coding", IEEE Photonics Technology Letters 01/2012; 24(9):721. DOI: 10.1109/LPT.2012.2187047.
- 25) Z. Zhang, D. Felipe, **V. Katopodis**, (...), Keil N., Schell M., "Hybrid Photonic Integration on a Polymer Platform", MDPI, Photonics 2015, 2(3), 1005-1026; doi:10.3390/photonics2031005 (Review paper).
- 26) A. Pagano, M. Quagliotti, D. Roccatò, **V. Katopodis**, (...), Ch. Kouloumentas, "Passive and Electro-Optic Polymer Photonics and InP Electronics Integration for Multi-Flow Terabit Transceivers", FOTONICA 2015-the 17th Italian National Conference on Photonic Technologies, Turin, 6-8 May 2015, paper A6.2.
- 27) M. Quagliotti, A. Pagano, D. Roccatò, **V. Katopodis**, (...), H. Avramopoulos, "Power and cost savings in metro and data center networks using optical transceivers based on a polymer substrate", accepted for oral presentation at FOTONICA 2017 AEIT, 19th Italian National Conference on Photonic Technologies, Padova, 3-5 May 2017.
- 28) P. Groumas, C. Tsokos, M. Kleinert, D. Marchenko, **V. Katopodis**, M. Dekkers, M. Falcucci, R. B. Timens, L. Gounaridis, C. G. Roeloffzen, A. Vannucci, R. G. Heideman, N. Keil, Ch. Kouloumentas, and H. Avramopoulos, "Photonic integration technology for the interface between the optical and wireless part in 5G networks: the H2020-ICT-HAMLET approach", paper ME4.1, session Integrated Photonics for 5G, 2017 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series, 10 - 12 July 2017, Puerto Rico (invited).
- 29) C. Tsokos, P. Groumas, **V. Katopodis**, H. Avramopoulos, and Ch. Kouloumentas, "Enabling Photonic Integration Technology for Microwave Photonics in 5G Systems", invited paper Tu.C5.4, session MWP I, International Conference on Transparent Optical Networks 2017 (invited).
- 30) **V. Katopodis**, et al., "Optical terabit transmitter and receiver based on passive polymer and InP technology for high-speed optical connectivity between datacenters", Proc. SPIE 10561, Next-Generation Optical Communication: Components, Sub-Systems, and Systems VII, 1056107 (29 January 2018)
- 31) C. Tsokos, E. Mylonas, P. Groumas, **V. Katopodis**, (...), C. Kouloumentas, "Analysis of a Multibeam Optical Beamforming Network Based on Blass Matrix Architecture," in Journal of Lightwave Technology, vol. 36, no. 16, pp. 3354-3372, Aug.15, 15 2018, doi: 10.1109/JLT.2018.2841861
- 32) **V. Katopodis**, H. Mardoyan, (...), N. Keil, H. Avramopoulos, and Ch. Kouloumentas, "Multi-Flow Transmitter with Full Format and Rate Flexibility for Next Generation Networks," in Journal of Lightwave Technology, vol. 36, no. 17, pp. 3785-3793, 1 Sept.1, 2018.

Παράρτημα Α – Κώδικες σε γλώσσα Verilog

```
module gt_drp_16_states_pdac2_v2
(
  // These signals are controlled by user logic interface and are covered
  // in more detail within the XAPP888.
  input [3:0] STATE,
  input SCLK,
  input RST,
  output reg SRDY,
  input SEN,
  input [15:0] DO,
  input DRDY,
  input QPLL_LOCKED, // provided by QPLLLOCK (output) of gthe2_common_i module
  input CPLL_LOCKED, // provided by CPLLLOCK (output) of gt_gth215_i (port CPLLLOCK)
  output DRP_BUSY,
  output reg DWE,
  output reg DEN,
  output reg [8:0] DADDR, // DADDR is the address of the QPLL attribute.
  output reg [15:0] DI,
  output DCLK,
  output reg RST_GT
);

// 100 ps delay for behavioral simulations
localparam TCQ = 100;

// Make sure the memory is implemented as distributed
(* rom_style = "distributed" *)
reg [39:0] rom [63:0]; // 40 bit word 128 words deep
reg [5:0] rom_addr;
reg [39:0] rom_do;
reg next_srdy;

reg [5:0] next_rom_addr; // 6 bits are enough for representing decimal 45 (the total number of ROMs for the
16 states) as 45 -> 00101101
reg [8:0] next_daddr;
reg next_dwe;
reg next_den;
reg next_rst_gt = 1'b1;
reg [15:0] next_di;

reg SEN_i; // = 1'b0;

// Integer used to initialize remainder of unused ROM
integer ii;
// Pass SCLK to DCLK for the GT
assign DCLK = SCLK;

initial begin

  rom[0] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 0 QPSK at 25 Gbaud //
For 2-> 1 TXRATE = 3'b000 for D=1
  rom[3] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_001_0_000}; //STATE 1 16QAM at 12.5 Gbaud
// For 8-> 011 TXRATE = 3'b000 for D=2

  rom[6] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 2 16QAM at 25
Gbaud // For 2-> 1 (16QAM at 12.5 Gbaud)
  rom[9] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 3 64QAM at 25 Gbaud
// For 8-> 011
```

```

rom[12] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 4 QPSK at 25
Gbaud // For 2-> 1 (16QAM at 25 Gbaud)
rom[15] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_001_0_000}; //STATE 5 QPSK at 12.5 Gbaud
// For 8-> 011

rom[18] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 6 QPSK at 25
Gbaud // For 2-> 1 (64QAM at 25 Gbaud)
rom[21] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_001_0_000}; //STATE 7 16QAM at 12.5
Gbaud // For 8-> 011

rom[24] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 8 16QAM at 25
Gbaud // For 2-> 1 (QPSK at 25 Gbaud)
rom[27] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 9 64QAM at 25 Gbaud
// For 8-> 011

rom[30] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 10 QPSK at 25
Gbaud // For 2-> 1 (QPSK at 12.5 Gbaud)
rom[33] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 11 QPSK at 25 Gbaud
// For 8-> 011

rom[36] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_001_0_000}; //STATE 12 16QAM at
12.5 Gbaud // For 2-> 1 (QPSK at 25 Gbaud)
rom[39] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 13 16QAM at 25 Gbaud
// For 8-> 011

rom[42] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 14 64QAM at 25
Gbaud // For 2-> 1 (16QAM at 12.5 Gbaud)
rom[45] = {9'h88, 16'b11111111_000_1_111, 16'b00000000_010_0_000}; //STATE 15 64QAM at 25 Gbaud
// For 8-> 011

// 033 15:11 QPLL_REFCLK_DIV 4:0 5'b10110 5'b10110
rom[1] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 0 QPSK at 25 Gbaud //
rom[4] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 2 -> should be 0 (00000)
//STATE 1 16QAM at 12.5 Gbaud

rom[7] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 2 16QAM at 25 Gbaud
rom[10] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 3 64QAM at 25 Gbaud

rom[13] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 4 QPSK at 25 Gbaud
rom[16] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 2 -> should be 0
(00000) //STATE 5 QPSK at 12.5 Gbaud

rom[19] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 6 QPSK at 25 Gbaud
rom[22] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 2 -> should be 0
(00000) //STATE 7 16QAM at 12.5 Gbaud

rom[25] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 8 16QAM at 25 Gbaud
rom[28] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 9 64QAM at 25 Gbaud

rom[31] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 10 QPSK at 25 Gbaud

```

```

rom[34] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 11 QPSK at 25 Gbaud

rom[37] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 2 -> should be 0
(00000) //STATE 12 16QAM at 12.5 Gbaud
rom[40] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 13 16QAM at 25 Gbaud

rom[43] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 14 64QAM at 25 Gbaud
rom[46] = {9'h33, 16'b00000_1111111111, 16'b00000_00000000000}; // For 1 -> should be 16
(10000) //STATE 15 64QAM at 25 Gbaud

// 036 9:0 QPLL_FBDIV 9:0 16'b000000_0011100000 16'b000000_0010000000
rom[2] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000
rom[5] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000

rom[8] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000
rom[11] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000

rom[14] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000
rom[17] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000

rom[20] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000
rom[23] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000

rom[26] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000
rom[29] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000

rom[32] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000
rom[35] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000

rom[38] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000
rom[41] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000

rom[44] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000
rom[47] = {9'h36, 16'b111111_0000000000, 16'b000000_0101110000}; // For 100 -> 0101110000

// Initialize the rest of the ROM
for(ii = 48; ii < 64; ii = ii +1) begin
rom[ii] = 0;
end
end

// Output the initialized rom value based on rom_addr each clock cycle
always @(posedge SCLK) begin
rom_do<= #TCQ rom[rom_addr];
end

//*****
// Everything below is associated with the state machine that is used to
// Read/Modify/Write to the GTH or QPLL.
//*****

// State Definitions - state encoding
localparam RESTART = 4'h1;
localparam WAIT_LOCK = 4'h2;
localparam WAIT_SEN = 4'h3;
localparam ADDRESS = 4'h4;

```

```

localparam WAIT_A_DRDY = 4'h5;
localparam BITMASK    = 4'h6;
localparam BITSET     = 4'h7;
localparam WRITE      = 4'h8;
localparam WAIT_DRDY  = 4'h9;
localparam GT_RST     = 4'ha;

// State sync
reg [3:0] current_state = RESTART; // the number of bits are defined from previous state definitions -
encoding. So 4 bits (as the bit length of the localparam)
reg [3:0] next_state    = RESTART; // the number of bits are defined from previous state definitions -encoding.
So 4 bits

// These variables are used to keep track of the number of iterations that
// each state takes to reconfigure.
// STATE_COUNT_CONST is used to reset the counters and should match the
// number of registers necessary to reconfigure each state.
localparam STATE_COUNT_CONST = 16; // it depends on the number of the usable ROMs. In our case we
want at each state--> 3 ROMs
reg [3:0] state_count      = STATE_COUNT_CONST; // vkat: it could be also four bits [3:0] as we have 45 ROMs
so -> 95 = 00101101 (initial value [4:0])
reg [3:0] next_state_count = STATE_COUNT_CONST; // vkat: it could be also four bits [3:0] as we have 45
ROMs so -> 95 = 00101101 (initial value [4:0])
reg flag = 1'b1;
reg [3:0] SADDR_s; // vkat: initial value reg SADDR_s. This bit length should be same as the STATE variable.
This mean reg[1:0]
reg [3:0] SADDR_ss; // vkat: initial value reg SADDR_ss. This bit length should be same as the STATE variable.
This mean reg[1:0]
wire [3:0] SADDR_trans; // vkat: initial value reg SADDR_trans. This bit length should be same as the STATE
variable. This mean reg[1:0]

// This block assigns the next register value from the state machine below
always @(posedge SCLK) begin
  DADDR    <= #TCQ next_daddr;
  DWE      <= #TCQ next_dwe;
  DEN      <= #TCQ next_den;
  RST_GT   <= #TCQ next_rst_gt;
  DI       <= #TCQ next_di;

  SRDY     <= #TCQ next_srdy;

  rom_addr <= #TCQ next_rom_addr;
  state_count <= #TCQ next_state_count;
end

// This block assigns the next state, reset is synchronous.
always @(posedge SCLK) begin // always as first action is to implement the reset!!!
  if(RST) begin
    current_state <= #TCQ RESTART;
  end else begin
    current_state <= #TCQ next_state;
  end
end

always @(posedge SCLK)
begin
  if (RST)
    SEN_j <= SEN; // 1'b0;
  else if((current_state == WAIT_SEN) &&( SADDR_trans == 1'b1))
    SEN_j <= SEN; // 1'b1;
end

```

```

else
    SEN_i <= SEN;    // 1'b0;
end

always @(posedge SCLK)
begin
    if(RST)
        flag <= 1'b1;
    else if( current_state==WAIT_SEN && SEN_i== SEN)
        flag <= 1'b0;
    else if(current_state==GT_RST)
        flag <= 1'b1;
    end

always @(posedge SCLK) begin
SADDR_s <= STATE; // initial value <= SADDR
SADDR_ss <= SADDR_s;
end

assign SADDR_trans = (STATE ^ SADDR_ss) & flag ; // initial value (SADDR ^
assign DRP_BUSY  = !flag;

always @ (*) begin
    // Setup the default values
    next_srdy      = 1'b0;
    next_daddr     = DADDR;
    next_dwe       = 1'b0;
    next_den       = 1'b0;
    next_rst_gt    = RST_GT;
    next_di        = DI;
    next_rom_addr  = rom_addr;
    next_state_count = state_count;

case (current_state)
    // If RST is asserted reset the machine
    RESTART: begin
        next_daddr  = 9'h000; //htan 8'h
        next_di     = 16'h0000;
        next_rom_addr = 6'h00; // 4'h00
        next_rst_gt  = 1'b1;

        next_state  = WAIT_LOCK;
    end

    // Waits for the GT to assert LOCKED - once it does asserts SRDY
    WAIT_LOCK: begin
        // Make sure reset is de-asserted
        next_rst_gt  = 1'b0;
        //DRP_BUSY    = 1'b1;
        // Reset the number of registers left to write for the next
        // reconfiguration event.
        next_state_count = STATE_COUNT_CONST;

        if((STATE && CPLL_LOCKED) || (!STATE && QPLL_LOCKED)) begin // initial value SADDR &&
            // GT is locked, go on to wait for the SEN signal
            next_state = WAIT_SEN;
            // Assert SRDY to indicate that the reconfiguration module is
            // ready
            next_srdy  = 1'b1;
        end else begin

```

```

// Keep waiting, locked has not asserted yet
next_state = WAIT_LOCK;
end
end

// Wait for the next SEN pulse and set the ROM addr appropriately
// based on SADDR
WAIT_SEN: begin
// if ((SEN&SADDR>drp_op_done) || (SEN&!SADDR)) begin // (SEN&SADDR>drp_op_done): bitwise
and between SEN, SADDR, drp_op_done the result then logical or with (SEN&!SADDR): SEN bitwise and of logical
not of SADDR
if (SEN_i) begin
// SEN was asserted
// DRP_BUSY = 1'b1;
if (STATE == 4'b0000) begin // QPSK at 25 Gbaud. I0 = 250MHz
// Reconfigure with the first (0) state
next_rom_addr = 6'h00;
end else if (STATE == 4'b0001) begin // 16QAM at 12.5 Gbaud. I1 = 500MHz
// Reconfigure with the second (1) state
next_rom_addr = 6'h03;
end else if (STATE == 4'b0010) begin // 16QAM at 25 Gbaud. I0 = 250MHz
// Reconfigure with the third (0) state
next_rom_addr = 6'h06;
end else if (STATE == 4'b0011) begin // 64QAM at 25 Gbaud. I0 = 250MHz
// Reconfigure with the fourth (0) state
next_rom_addr = 6'h09;
end else if (STATE == 4'b0100) begin // QPSK at 25 Gbaud. I0 = 250MHz
// Reconfigure with the second (0) state
next_rom_addr = 6'h0C;
end else if (STATE == 4'b0101) begin // QPSK at 12.5 Gbaud. I1 = 500MHz
// Reconfigure with the second (1) state
next_rom_addr = 6'h0F;
end else if (STATE == 4'b0110) begin // QPSK at 25 Gbaud. I0 = 250MHz
// Reconfigure with the second (0) state
next_rom_addr = 6'h12;
end else if (STATE == 4'b0111) begin // 16QAM at 12.5 Gbaud. I1 = 500MHz
// Reconfigure with the second (1) state
next_rom_addr = 6'h15;
end else if (STATE == 4'b1000) begin // 16QAM at 25 Gbaud. I0 = 250MHz
// Reconfigure with the second (0) state
next_rom_addr = 6'h18;
end else if (STATE == 4'b1001) begin // 64QAM at 25 Gbaud. I0 = 250MHz
// Reconfigure with the second (0) state
next_rom_addr = 6'h1B;
end else if (STATE == 4'b1010) begin // QPSK at 25 Gbaud. I0 = 250MHz
// Reconfigure with the second (0) state
next_rom_addr = 6'h1E;
end else if (STATE == 4'b1011) begin // QPSK at 25 Gbaud. I0 = 250MHz
// Reconfigure with the second (0) state
next_rom_addr = 6'h21;
end else if (STATE == 4'b1100) begin // 16QAM at 12.5 Gbaud. I1 = 500MHz
// Reconfigure with the second (1) state
next_rom_addr = 6'h24;
end else if (STATE == 4'b1101) begin // 16QAM at 25 Gbaud. I0 = 250MHz
// Reconfigure with the second (0) state
next_rom_addr = 6'h27;
end else if (STATE == 4'b1110) begin // 64QAM at 25 Gbaud. I0 = 250MHz
// Reconfigure with the second (0) state
next_rom_addr = 6'h2A;
end else if (STATE == 4'b1111) begin // 64QAM at 25 Gbaud. I0 = 250MHz

```



```

// Reconfigure with the second (0) state
next_rom_addr = 6'h2D;
                                end
// Go on to address the GT
next_state = ADDRESS;
end else begin
// Keep waiting for SEN to be asserted
next_state = WAIT_SEN;
end
end

// Set the address on the GT and assert DEN to read the value
ADDRESS: begin
// // Reset the DCM through the reconfiguration
// next_rst_gt = 1'b1;
// Enable a read from the GT and set the GT address
next_den = 1'b1;
next_daddr = rom_do[39:32];

// Wait for the data to be ready
next_state = WAIT_A_DRDY;
end

// Wait for DRDY to assert after addressing the GT
WAIT_A_DRDY: begin
if (DRDY) begin
// Data is ready, mask out the bits to save
next_state = BITMASK;
end else begin
// Keep waiting till data is ready
next_state = WAIT_A_DRDY;
end
end

// Zero out the bits that are not set in the mask stored in rom
BITMASK: begin
// Do the mask
next_di = rom_do[31:16] & DO;
// Go on to set the bits
next_state = BITSET;
end

// After the input is masked, OR the bits with calculated value in rom
BITSET: begin
// Set the bits that need to be assigned
next_di = rom_do[15:0] | DI;
// Set the next address to read from ROM
if (rom_addr == (STATE_COUNT_CONST*3)-1) begin // (48-1) = 47. the number of roms. probably here
should be changed. initial value -> (STATE_COUNT_CONST*2)-1)
next_rom_addr = 6'h00;
end else begin
next_rom_addr = rom_addr + 1'b1;
end
// Go on to write the data to the GT
next_state = WRITE;
end

// DI is setup so assert DWE, DEN, and RST_GT. Subtract one from the
// state count and go to wait for DRDY.
WRITE: begin

```

```

// Set WE and EN on GT
next_dwe    = 1'b1;
next_den    = 1'b1;

// Decrement the number of registers left to write
next_state_count = state_count - 1'b1;
// Wait for the write to complete
next_state   = WAIT_DRDY;
end

// Wait for DRDY to assert from the GT. If the state count is not 0
// jump to ADDRESS (continue reconfiguration). If state count is
// 0 wait for lock.
WAIT_DRDY: begin
if(DRDY) begin
// Write is complete
if(state_count > 0) begin
// If there are more registers to write keep going
next_state = ADDRESS;
end else begin
// There are no more registers to write so reset the GT
next_state = GT_RST;
end
end else begin
// Keep waiting for write to complete
next_state = WAIT_DRDY;
end
end

GT_RST: begin
// Reset the GT after the reconfiguration
next_rst_gt = 1'b1;
// DRP_BUSY = 1'b0;
// Go on to wait for the GT to lock
// next_state = WAIT_LOCK;
next_state = RESTART;
end

// If in an unknown state reset the machine
default: begin
next_state = RESTART;
end
endcase
end
endmodule

```

```

module txout_div_pdac2
(
input [3:0] operation,
input clk_in,
output reg [2:0] tx1y0_txrate,
output reg [2:0] tx1y1_txrate,
output reg [2:0] tx1y2_txrate,
output reg [2:0] tx1y3_txrate,
output reg [2:0] tx1y4_txrate,
output reg [2:0] tx1y5_txrate,
output reg [2:0] tx1y6_txrate
);

```

```

reg [3:0] operation_r;

always @(posedge clk_in) // 25 Gbaud ----> two streams at input of pdac2 (D=1--> 3'b001)
    // 12.5 Gbaud ----> four streams at input of pdac1 (D=2--> 3'b010)
begin

operation_r<=operation;

case (operation_r)

4'b0000: begin // QPSK at 25 Gbaud

    tx1y0_txrate = 3'b001;
    tx1y1_txrate = 3'b001;
    tx1y2_txrate = 3'b001;
    tx1y3_txrate = 3'b001;
    tx1y4_txrate = 3'b001;
    tx1y5_txrate = 3'b001;
    tx1y6_txrate = 3'b001;

end

4'b0001: begin // 16QAM at 12.5 Gbaud

    tx1y0_txrate = 3'b010;
    tx1y1_txrate = 3'b010;
    tx1y2_txrate = 3'b010;
    tx1y3_txrate = 3'b010;
    tx1y4_txrate = 3'b010;
    tx1y5_txrate = 3'b010;
    tx1y6_txrate = 3'b010;

end

4'b0010: begin // 16QAM at 25 Gbaud

    tx1y0_txrate = 3'b001;
    tx1y1_txrate = 3'b001;
    tx1y2_txrate = 3'b001;
    tx1y3_txrate = 3'b001;
    tx1y4_txrate = 3'b001;
    tx1y5_txrate = 3'b001;
    tx1y6_txrate = 3'b001;

end

4'b0011: begin // 64QAM at 25 Gbaud

    tx1y0_txrate = 3'b001;
    tx1y1_txrate = 3'b001;
    tx1y2_txrate = 3'b001;
    tx1y3_txrate = 3'b001;
    tx1y4_txrate = 3'b001;
    tx1y5_txrate = 3'b001;
    tx1y6_txrate = 3'b001;

end

4'b0100: begin // QPSK at 25 Gbaud

```

```

tx1y0_txrate = 3'b001;
tx1y1_txrate = 3'b001;
tx1y3_txrate = 3'b001;
tx1y5_txrate = 3'b001;

end

4'b0101: begin // 64QAM at 12.5 Gbaud

tx1y0_txrate = 3'b010;
tx1y1_txrate = 3'b010;
tx1y3_txrate = 3'b010;
tx1y5_txrate = 3'b010;

end

4'b0110: begin // 64QAM at 25 Gbaud

tx1y0_txrate = 3'b001;
tx1y1_txrate = 3'b001;
tx1y3_txrate = 3'b001;
tx1y5_txrate = 3'b001;

end

4'b0111: begin // 16QAM at 25 Gbaud

tx1y0_txrate = 3'b001;
tx1y1_txrate = 3'b001;
tx1y3_txrate = 3'b001;
tx1y5_txrate = 3'b001;

end

4'b1000: begin // 16QAM at 25 Gbaud

tx1y0_txrate = 3'b001;
tx1y1_txrate = 3'b001;
tx1y3_txrate = 3'b001;
tx1y5_txrate = 3'b001;

end

4'b1001: begin // 64QAM at 25 Gbaud

```

```

tx1y0_txrate = 3'b001;
tx1y1_txrate = 3'b001;

tx1y3_txrate = 3'b001;

tx1y5_txrate = 3'b001;

end

4'b1010: begin // QPSK at 25 Gbaud

tx1y0_txrate = 3'b001;
tx1y1_txrate = 3'b001;

tx1y3_txrate = 3'b001;

tx1y5_txrate = 3'b001;

end

4'b1011: begin /// 64QAM at 25 Gbaud

tx1y0_txrate = 3'b001;
tx1y1_txrate = 3'b001;

tx1y3_txrate = 3'b001;

tx1y5_txrate = 3'b001;

end

4'b1100: begin // 16QAM at 25 Gbaud

tx1y0_txrate = 3'b001;
tx1y1_txrate = 3'b001;

tx1y3_txrate = 3'b001;

tx1y5_txrate = 3'b001;

end

4'b1101: begin // 16QAM at 25 Gbaud

tx1y0_txrate = 3'b001;
tx1y1_txrate = 3'b001;

tx1y3_txrate = 3'b001;

tx1y5_txrate = 3'b001;

end

4'b1110: begin // 16QAM at 25 Gbaud

```

```

    tx1y0_txrate = 3'b001;
    tx1y1_txrate = 3'b001;
    tx1y2_txrate = 3'b001;
    tx1y3_txrate = 3'b001;
    tx1y4_txrate = 3'b001;
    tx1y5_txrate = 3'b001;
    tx1y6_txrate = 3'b001;

    end

    4'b1111: begin // 64QAM at 25 Gbaud

    tx1y0_txrate = 3'b001;
    tx1y1_txrate = 3'b001;
    tx1y2_txrate = 3'b001;
    tx1y3_txrate = 3'b001;
    tx1y4_txrate = 3'b001;
    tx1y5_txrate = 3'b001;
    tx1y6_txrate = 3'b001;

    end
endcase

end

endmodule

```

```

module txpd_pdac2 (
    input [3:0] operation,
    input clk_in,
    input txs_off,
    output reg [1:0] tx1y0,
    output reg [1:0] tx1y1,
    output reg [1:0] tx1y2,
    output reg [1:0] tx1y3,
    output reg [1:0] tx1y4,
    output reg [1:0] tx1y5,
    output reg [1:0] tx1y6
);

    assign ground_i = 0; // Normal mode. Tx are on
    assign vcc_i = 1; // Power-down mode. Tx are off

    reg [3:0] operation_r;
    reg txs_off_r;

    always @(posedge clk_in) begin

        operation_r<=operation;
        txs_off_r<=txs_off;

        if (txs_off_r == 1) begin

            tx1y0 = vcc_i;
            tx1y1 = vcc_i;
            tx1y2 = vcc_i;
            tx1y3 = vcc_i;
            tx1y4 = vcc_i;

```

```

tx1y5 = vcc_i;
tx1y6 = vcc_i;

end

else begin

case (operation_r)

4'b0000: begin // QPSK at 25 Gbaud ----> two streams at input of pdac2

                                tx1y0 = ground_i;

tx1y1 = ground_i;              tx1y2 = vcc_i;

tx1y3 = vcc_i;                 tx1y4 = vcc_i;

tx1y5 = vcc_i;
tx1y6 = ground_i;

                                end

4'b0001: begin // 16QAM at 12.5 Gbaud ----> four streams at input of pdac2

                                tx1y0 = ground_i;

tx1y1 = ground_i;              tx1y2 = vcc_i;

tx1y3 = vcc_i;                 tx1y4 = ground_i;

tx1y5 = ground_i;
tx1y6 = ground_i;
                                end

4'b0010: begin // 16QAM at 25 Gbaud ----> four streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;
tx1y2 = vcc_i;
tx1y3 = vcc_i;
tx1y4 = ground_i;
tx1y5 = ground_i;
tx1y6 = ground_i;
end

4'b0011: begin // 64QAM at 25 Gbaud ----> six streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;

                                tx1y2 = ground_i;

tx1y3 = ground_i;              tx1y4 = ground_i;

tx1y5 = ground_i;
tx1y6 = ground_i;

                                end

4'b0100: begin // QPSK at 25 Gbaud ----> two streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;

                                tx1y2 = vcc_i;

```

```

tx1y3 = vcc_i;
                                tx1y4 = vcc_i;

tx1y5 = vcc_i;
tx1y6 = ground_i;

end

4'b0101: begin // 64QAM at 12.5 Gbaud ----> six streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;
                                tx1y2 = ground_i;

tx1y3 = ground_i;
                                tx1y4 = ground_i;

tx1y5 = ground_i;
tx1y6 = ground_i;

end

4'b0110: begin // 64QAM at 25 Gbaud ----> six streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;
                                tx1y2 = ground_i;

tx1y3 = ground_i;
                                tx1y4 = ground_i;

tx1y5 = ground_i;
tx1y6 = ground_i;

end

4'b0111: begin // 16QAM at 25 Gbaud ----> four streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;
tx1y2 = vcc_i;
tx1y3 = vcc_i;
tx1y4 = ground_i;
tx1y5 = ground_i;
tx1y6 = ground_i;

end

4'b1000: begin // 16QAM at 25 Gbaud ----> four streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;
tx1y2 = vcc_i;
tx1y3 = vcc_i;
tx1y4 = ground_i;
tx1y5 = ground_i;
tx1y6 = ground_i;

end

4'b1001: begin // 64QAM at 25 Gbaud ----> six streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;
                                tx1y2 = ground_i;

```



```

tx1y3 = ground_i;
                                tx1y4 = ground_i;

tx1y5 = ground_i;
tx1y6 = ground_i;

end

4'b1010: begin // QPSK at 25 Gbaud ----> two streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;
                                tx1y2 = vcc_i;

tx1y3 = vcc_i;
                                tx1y4 = vcc_i;

tx1y5 = vcc_i;
tx1y6 = ground_i;

end

4'b1011: begin // 64QAM at 25 Gbaud ----> six streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;
                                tx1y2 = ground_i;

tx1y3 = ground_i;
                                tx1y4 = ground_i;

tx1y5 = ground_i;
tx1y6 = ground_i;

end

4'b1100: begin // 16QAM at 25 Gbaud ----> four streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;
tx1y2 = vcc_i;
tx1y3 = vcc_i;
tx1y4 = ground_i;
tx1y5 = ground_i;
tx1y6 = ground_i;

end

4'b1101: begin // 16QAM at 25 Gbaud ----> four streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;
tx1y2 = vcc_i;
tx1y3 = vcc_i;
tx1y4 = ground_i;
tx1y5 = ground_i;
tx1y6 = ground_i;

end

4'b1110: begin // 16QAM at 25 Gbaud ----> four streams at input of pdac2

tx1y0 = ground_i;
tx1y1 = ground_i;
tx1y2 = vcc_i;

```

```

        tx1y3 = vcc_i;
        tx1y4 = ground_i;
        tx1y5 = ground_i;
        tx1y6 = ground_i;

        end

4'b1111: begin // 64QAM at 25 Gbaud ----> six streams at input of pdac2

        tx1y0 = ground_i;
        tx1y1 = ground_i;
                                tx1y2 = ground_i;

        tx1y3 = ground_i;
                                tx1y4 = ground_i;

        tx1y5 = ground_i;
        tx1y6 = ground_i;

        end
    endcase

end

end

endmodule

```

```

module state_machine (sys_clk, TxD_par, TxD_ready, leds
);

input sys_clk;
input [7:0] TxD_par;
input TxD_ready;
output reg [3:0] leds;
reg [3:0] buffer = 4'b0;
reg [3:0] buffer0 = 4'b0;
reg [6:0] state=7'b0;

always @(posedge sys_clk) begin
    if(TxD_ready) begin
        state[6:0]<=7'b0;
        case (state)
//*****state 0 *****
7'b000000:    // state 0/ ascii 0/ hex 30/ b 00110000
            begin
                if ( TxD_par[7:0] == 8'b00110000) begin
                    buffer[3:0]<=4'b0000;    // all leds off
                    state[6:0]<=7'b1000000;    // byte found go to exit state
                end
            else begin state[6:0]<= 7'b0000001;    // byte not found go to state 1
                end
            end
//*****state 1 *****
7'b0000001:    //state 1 /ascii 1/ hex 31/ 00110001
            begin
                if ( TxD_par[7:0] == 8'b00110001) begin
                    buffer[3:0]<=4'b0001;    // leds: 0 0 0 1
                    state[6:0]<=7'b1000000;    // byte found go to exit state
                end
            end

```

```

else begin state[6:0] <= 7'b0000010; // byte not found go to state 2
end
end
end
//*****state 2 *****
7'b0000010: //state 2/ ascii 2 /hex 32/ b 00110010
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b00110010) begin
buffer[3:0] <= 4'b0010; // leds: 0 0 1 0
state[6:0] <= 7'b1000000; // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0] <= 7'b0000011; // byte not found go to state 3
end
end
//*****state 3 *****
7'b0000011: //state 3 /ascii 3/ hex 33/ b 00110011
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b00110011) begin
buffer[3:0] <= 4'b0011; // leds: 0 0 1 1
state[6:0] <= 7'b1000000; // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0] <= 7'b0000100; // byte not found go to state 4
end
end
//*****state 4 *****
7'b0000100: //state 4 /ascii 4/ hex 34 / b 00110100
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b00110100) begin
buffer[3:0] <= 4'b0100; // leds: 0 1 0 0
state[6:0] <= 7'b1000000; // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0] <= 7'b0000101; // byte not found go to state 5
end
end
//*****state 5 *****
7'b0000101: //state 5 /ascii 5/ hex 35 / b 00110101
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b00110101) begin
buffer[3:0] <= 4'b0101; // leds: 0 1 0 1
state[6:0] <= 7'b1000000; // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0] <= 7'b0000110; // byte not found go to state 6
end
end
//*****state 6 *****
7'b0000110: //state 6 /ascii 6/ hex 36 / b 00110110
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b00110110) begin
buffer[3:0] <= 4'b0110; // leds: 0 1 1 0
state[6:0] <= 7'b1000000; // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0] <= 7'b0000111; // byte not found go to state 7
end
end
//*****state 7 *****
7'b0000111: //state 7 /ascii 7/ hex 37 / b 00110111
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b00110111) begin
buffer[3:0] <= 4'b0111; // leds: 0 1 1 1
state[6:0] <= 7'b1000000; // byte found go to exit state
end
end

```

```

else begin state[6:0]<= 7'b0001000;    // byte not found go to state 8
end
end
//*****state 8 *****
7'b0001000:    //state 8 /ascii 8/ hex 38 / b 00111000
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b00111000) begin
buffer[3:0]<=4'b1000;    // leds: 1 0 0 0
state[6:0]<=7'b1000000;    // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0]<= 7'b0001001;    // byte not found go to state 9
end
end
//*****state 9 *****
7'b0001001:    //state 9 /ascii 9/ hex 39 / b 00111001
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b00111001) begin
buffer[3:0]<=4'b1001;    // leds: 1 0 0 1
state[6:0]<=7'b1000000;    // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0]<= 7'b0001010;    // byte not found go to state 10
end
end
//*****state 10 *****
7'b0001010:    //state 10 /ascii a/ hex 61 / b 01100001
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b01100001) begin
buffer[3:0]<=4'b1010;    // leds: 1 0 1 0
state[6:0]<=7'b1000000;    // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0]<= 7'b0001011;    // byte not found go to state 11
end
end
//*****state 11 *****
7'b0001011:    //state 11 /ascii b/ hex 62 / b 01100010
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b01100010) begin
buffer[3:0]<=4'b1011;    // leds: 1 0 1 1
state[6:0]<=7'b1000000;    // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0]<= 7'b0001100;    // byte not found go to state 12
end
end
//*****state 12 *****
7'b0001100:    //state 12 /ascii c/ hex 63 / b 01100011
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b01100011) begin
buffer[3:0]<=4'b1100;    // leds: 1 1 0 0
state[6:0]<=7'b1000000;    // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0]<= 7'b0001101;    // byte not found go to state 13
end
end
//*****state 13 *****
7'b0001101:    //state 13 /ascii d/ hex 64 / b 01100100
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b01100100) begin
buffer[3:0]<=4'b1101;    // leds: 1 1 0 1
state[6:0]<=7'b1000000;    // byte found go to exit state
end
end

```

```

else begin state[6:0] <= 7'b0001110; // byte not found go to state 14
end
end
end
//*****state 14 *****
7'b0001110: //state 14 /ascii e/ hex 65 / b 01100101
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b01100101 ) begin
buffer[3:0] <= 4'b1110; // leds: 1 1 1 0
state[6:0] <= 7'b1000000; // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0] <= 7'b0001111; // byte not found go to state 15
end
end
//*****state 15 *****
7'b0001111: //state 15 /ascii f/ hex 66 / b 01100110
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b01100110 ) begin
buffer[3:0] <= 4'b1111; // leds: 1 1 1 1
state[6:0] <= 7'b1000000; // byte found go to exit state
end
else begin state[6:0] <= 7'b0010000; // byte not found go to state 16
end
end
//*****state 16 *****
7'b0010000: //state 16 {ascii CR} / b 00001101
begin
if (TxD_par[7:0] == 8'b10110000)

buffer[3:0] <= buffer0;

end
//*****state EXIT *****
7'b1000000: //state EXIT
begin
leds[3:0] <= buffer;
buffer0[3:0] <= buffer;
end

default: state[6:0] <= 7'b0000000;

endcase
end
else begin leds[3:0] <= buffer0; end
end

endmodule

```