



University of Macedonia
Master in Information Systems
Network Technologies
Professors: A.A. Economides & A. Pomportsis

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ

ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: Measures and Metrics for Optical Networks(QoS)

ΖΑΦΕΙΡΗΣ ΖΑΠΑΡΤΑΣ, Θεσσαλονίκη 2005

**University of Macedonia
Master Information Systems
Network Technologies
Professors: A. A. Economides &
A. Pomportsis**

**PROJECT: MEASURES AND METRICS FOR OPTICAL
NETWORKS (QoS)**

ZAFEIRIS ZAPARTAS

FEBRUARY 2005

Πανεπιστήμιο Μακεδονίας
ΠΜΣ Πληροφοριακά Συστήματα
Τεχνολογίες Τηλεπικοινωνιών &
Δικτύων
Καθηγητές : Α.Α. Οικονομίδης &
Α. Πομπόρτσης

**ΕΡΓΑΣΙΑ: MEASURES AND METRICS FOR OPTICAL
NETWORKS(QoS)**

ΖΑΦΕΙΡΗΣ ΖΑΠΑΡΤΑΣ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2005

TABLE OF CONTENTS

Preface	page 6
Chapter 1⁰	
<u>1.1 Abstract</u>	page 7
<u>1.2 Introduction</u>	»
<u>1.3 An Overview of OBS</u>	»
<u>1.4 The JET Protocol And Its Variations</u>	» 9
<u>1.5 The Use of Offset Time</u>	» 10
<u>1.6 QoS Support</u>	» 11
Chapter 2⁰	
<u>2.1 Abstract</u>	» 12
<u>2.2 Introduction</u>	» 12
<u>2.3 Static Traffic Grooming Context</u>	» 13
<u>2.4 Dynamic Traffic Grooming</u>	» 15
<u>2.5 An ILP Formulation For the Static Traffic Grooming Problem</u>	» 16
<u>2.6 An ILP Formulation For a Dynamic Traffic Grooming Problem</u>	» 18
Chapter 3⁰	
<u>3.1 Introduction</u>	» 20
<u>3.2 Optical Performance Monitoring</u>	» 21
<u>3.3 Subcarrier Signals For Monitoring</u>	» 23
<u>3.4 SCM Generation and Detection</u>	» 24
<u>3.5 Channel Identification And Power Monitor</u>	» 25
<u>3.6 Optical And Electrical Signal To Noide Ratio Monitor</u>	» 26
<u>3.7 Chromatic Dispersion Monitor</u>	» 29
<u>Conclusions</u>	» 31
Bibliography	» 33

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	σελ.6
Κεφάλαιο 1⁰	
<u>1.1 Περίληψη</u>	σελ.7
<u>1.2 Εισαγωγή</u>	» 8
<u>1.3 Μία συνοπτική θεώρηση του OBS</u>	» 8
<u>1.4 Το πρωτόκολλο JET και οι διαφοροποιήσεις του</u>	» 9
<u>1.5 Η χρήση του χρόνου μετατόπισης</u>	» 10
<u>1.6 Υποστήριξη QoS</u>	» 11
Κεφάλαιο 2⁰	
<u>2.1 Περίληψη</u>	» 12
<u>2.2 Εισαγωγή</u>	» 12
<u>2.3 Στοιχεία στατικού κυκλοφοριακού καλλωπισμού</u>	» 13
<u>2.4 Δυναμική διευθέτηση(grooming) κυκλοφορίας</u>	» 15
<u>2.5 Μία επίλυση ILP για το πρόβλημα του στατικού καλλωπισμού κυκλοφορίας</u>	» 16
<u>2.6 Μία επίλυση ILP για το πρόβλημα του δυναμικού καλλωπισμού κυκλοφορίας</u>	» 18
Κεφάλαιο 3⁰	
<u>3.1 Εισαγωγή</u>	» 20
<u>3.2 Έλεγχος οπτικής απόδοσης</u>	» 21
<u>3.3 Σήματα υπομεταφορέων για παρακολούθηση</u>	» 23
<u>3.4 Παραγωγή και ανίχνευση SCM</u>	» 24
<u>3.5 Προσδιορισμός καναλιών και παρακολούθηση ισχύος</u>	» 25
<u>3.6 Οπτική και ηλεκτρική παρακολούθηση του λόγου σήματος προς θόρυβο</u>	» 26
<u>3.7 Έλεγχος χρωματικής διασποράς</u>	» 29
<u>Συμπεράσματα</u>	» 31
Βιβλιογραφία	» 33

Preface

This assignment was worked out for the *Network Technologies* class and includes 3 chapters. Each chapter is self-existent as it involves its own abstract as well as a full growth of the individual subject. In first chapter a report is made in OBS and the JET protocol and it is completed with some elements about the Quality of Service(QoS). The static and dynamic traffic grooming in optical networks is the main interest of the 2nd chapter. The reader may also find equations for the ILP formulation of either static or dynamic traffic grooming problem. Finally, the project comes to an end by measuring and determining in detail report those features of the optical networks which are critical for their performance. The study of issues like signal to noise ratio and dispersion is also of interest.

This paper was based in specific sources of reference which can be found in Internet and are mentioned in the last pages of the project.

Πρόλογος

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος *Τεχνολογίες Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων* και περιλαμβάνει 3 κεφάλαια. Το κάθε κεφάλαιο είναι αυτοτελές καθώς περιέχει την δική του εισαγωγή-περίληψη καθώς και την πλήρη ανάπτυξη του επιμέρους θέματος. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο OBS και στο πρωτόκολλο JET και ολοκληρώνεται με την παράθεση στοιχείων ποιότητας υπηρεσίας(QoS). Η δυναμική και η στατική διευθέτηση κυκλοφορίας στα οπτικά δίκτυα αποτελούν το θέμα του 2^{ου} κεφαλαίου. Στο ίδιο κεφάλαιο ο αναγνώστης θα βρει και εξισώσεις οι οποίες χρησιμεύουν στην μαθηματική επίλυση ILP των υπό εξέταση θεμάτων. Τέλος, η εργασία κλείνει με λεπτομερή αναφορά στην μέτρηση και στον προσδιορισμό εκείνων των χαρακτηριστικών των οπτικών δικτύων τα οποία επηρεάζουν την απόδοσή τους και μελετώνται θέματα λόγου σήματος προς θόρυβο καθώς και θέματα διασποράς.

Η εργασία βασίστηκε σε συγκεκριμένες βιβλιογραφικές αναφορές, οι οποίες αντλήθηκαν από το διαδίκτυο(www) και αναφέρονται στις τελευταίες σελίδες της παρούσας.

1.Μεταγωγή Οπτικού Καταιγισμού(OBS)

1.1 Περίληψη

Για να υποστηρίξουμε αποδοτικά την αυξανόμενη με καταιγιστικούς ρυθμούς κυκλοφορία στο Διαδίκτυο(και ειδικά στο www),η οπτική καταιγιστική μεταγωγή(Optical Burst Switching OBS) προτείνεται σαν ένας τρόπος για να βελτιώσουμε τόσο το πρωτόκολλο όσο και την κυκλωματική υλοποίηση κατά τον σχεδιασμό της μελλοντικής γενιάς του οπτικού διαδικτύου.Θέτοντας ως κινητήριο μοχλό τις ελκυστικές δυνατότητες των οπτικών τηλεπικοινωνιών και ταυτοχρόνως λαμβάνοντας υπόψη τους σχετικούς περιορισμούς,το OBS συνδυάζει το καλύτερο της οπτικής μεταγωγής κυκλωμάτων και της μεταγωγής πακέτου/κυψέλης.Στις πρώτες επόμενες παραγράφους γίνεται μία σύντομη εισαγωγή,αναφέρεται το γενικό πλαίσιο του πρωτόκολλου OBS και ειδικά αυτό βασισμένο πάνω στο Just-Enough-Time(JET),καθώς και η υποστήριξη για Quality of Service.

1.2 Εισαγωγή

Η εμφάνιση Terabit διακοπών/δρομολογητών με ταχύτητες που προσεγγίζουν τα 2,5Gb/sec και σύντομα θα αγγίξουν τα 10Gb/sec καθιστούν φυσική απαίτηση την παροχή απευθείας Wavelength Division Multiplexing(WDM) διασυνδέσεων μεταξύ των δρομολογητών και διακοπών οδηγώντας στην δημιουργία του όπως αποκαλείται «Οπτικό Διαδίκτυο» και IP πάνω από SONET.Αυτά τα δίκτυα μπορούν να θεωρηθούν σαν πρώτης γενιάς Οπτικό Διαδίκτυο όπου ο χειρισμός των διακοπών πραγματοποιείται στον ηλεκτρονικό χώρο.Λαμβάνοντας υπόψη την αναμενόμενη,σημαντική πρόοδο,θεωρούμε πως τα μελλοντικά 2^{ης} γενιάς οπτικά δίκτυα δεν θα είναι επιθυμητά μόνο ως ένα μέσο για να επιτύχουμε υψηλότερο βαθμό διαφάνειας δεδομένων προς όφελος συγκεκριμένων εφαρμογών αλλά και εφικτά στο βραχυπρόθεσμο μέλλον.

Προκειμένου ένα WDM οπτικό στρώμα να παρέχει διαφοροποιημένες υπηρεσίες κατά έναν αποτελεσματικό και εφικτό τρόπο προτείνεται μία αρχιτεκτονική πλαισίου εργασίας η οποία επιτρέπει αρκετά εικονικά δίκτυα-Virtual Optical Networks(VON).Κάτω από μια τέτοια θεώρηση σε κάθε VON κατανέμονται κατάλληλοι πόροι(π.χ. ένα υποσύνολο από μήκη κύματος) και εφαρμόζεται είτε στατικός ή δυναμικός έλεγχος ανάλογα με το ποιος είναι καταλληλότερος.Για παράδειγμα.ένα VON ίσως υιοθετήσει on demand επαναδιαμόρφωση για να υποστηρίξει καταιγιστική κυκλοφορία και shot-lived διασύνδεση,ενώ ένα άλλο VON πιθανώς να υιοθετήσει self επαναδιαμόρφωση για να υποστηρίξει σταθερή κυκλοφορία και long-lived διασύνδεση.Το πρώτο,που καλείται δυναμικό VON,δύναται να χρησιμοποιήσει μικρούς,αλλά γρήγορους διακόπτες(π.χ.Lithium Niobate κατευθυντικούς ζεύκτες) καθώς επίσης και μετατροπείς κύματος.Το δεύτερο,που καλείται στατικό VON,χρησιμοποιεί μεγάλους,αλλά αργούς διακόπτες(π.χ. οπτικο-μηχανικούς διακόπτες) χωρίς την ικανότητα της μετατροπής του μήκους κύματος.Εμείς θα εστιάσουμε την προσοχή μας στα δυναμικά VONs,τα οποία αποκαλούνται και «καταιγιστικά»(bursty) VONs και τα οποία επιτρέπουν την εφαρμογή IP κατευθείαν πάνω από WDM.

Υπάρχουν δυο σημαντικοί λόγοι για την θεώρηση των οπτικών δικτύων.Το ένα είναι ο καταιγισμός στην κυκλοφορία των δεδομένων που παρατηρείται στο διαδίκτυο και ειδικά στο www το οποίο είναι bursty από την φύση του.Ο άλλος είναι η επιθυμία των χρηστών καθώς και οι ευκαιρίες που διαφαίνονται από την ανάπτυξη της WDM οπτικής,διαδικτυακής τεχνολογίας που «απογείωσαν» τόσο το λογισμικό(π.χ. πρωτόκολλα σηματοδότησης ATM) όσο και το υλικό(π.χ. εξοπλισμός SONET) για να μειωθούν το κόστος και η καθυστέρηση.

Το OBS συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της μεταγωγής πακέτου και της μεταγωγής κυκλώματος και,επομένως, διαχειρίζεται ικανοποιητικά την υψηλή κυκλοφορία στα ανώτερα επίπεδα πρωτοκόλλων ή τελικών εφαρμογών χρήστη.

1.3 Μία συνοπτική θεώρηση του OBS

Στο OBS ένα πακέτο ελέγχου στέλνεται πρώτα για να εγκαταστήσει μία σύνδεση(εξασφαλίζοντας το κατάλληλο ποσό εύρους ζώνης και διαμορφώνοντας τους διακόπτες κατά μήκος του μονοπατιού) ακολουθούμενο από ένα καταιγισμό δεδομένων χωρίς να αναμένει κάποια επιβεβαίωση για την πραγματοποίηση της σύνδεσης.Με άλλα λόγια,το OBS χρησιμοποιεί ενός δρόμου πρωτόκολλο κράτησης παρόμοιο με το tell-n-go(TAG) επίσης γνωστό στα ATM σαν fast reservation protocol(FRP) ή μεταφορά μπλοκ ATM με ενδιάμεση μετάδοση(ABT-IT).Αυτό διαχωρίζει το OBS από το κύκλωμα-διακόπτη καθώς επίσης και από άλλες προσεγγίσεις μεταγωγής-καταιγισμού που χρησιμοποιούν πρωτόκολλα όπως το reservation/scheduling με Just-In-Time μεταγωγή και tell-and-wait(TAW),επίσης γνωστό στα ATM σαν ABT-DT(Delayed Transmission),όλα εκ των οποίων είναι πρωτόκολλα κράτησης δύο δρόμων.

Το OBS,επίσης,διαφέρει από οπτική ή πακέτο/κυψέλη μεταγωγή κυρίως στο ότι το πρώτο μπορεί να διακόπτει ένα καταιγισμό δεδομένων-του οποίου το μήκος μπορεί να ποικίλλει από ένα σε αρκετά πακέτα-σε ένα σύντομο χρησιμοποιώντας ένα πακέτο ελέγχου.Πετυχαίνουμε έτσι λιγότερο έλεγχο υπερφόρτωσης ανά μονάδα δεδομένων.

Επιπρόσθετα,το OBS χρησιμοποιεί σηματοδοσία εκτός του εύρους ζώνης αλλά πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι το πακέτο ελέγχου και ο καταιγισμός των δεδομένων είναι πιο χαλαρά συζευγμένα στο χρόνο από ότι στην μεταγωγή πακέτου/κυψέλης.Στην πραγματικότητα μπορούν να διαχωριστούν τόσο στην πηγή όσο και σε μεταγενέστερους,ενδιάμεσους πόλους με έναν χρόνο μετατόπισης όπως στο Just-Enough-Time(JET) πρωτόκολλο.Επιλέγοντας ο χρόνος μετατόπισης στην πηγή να είναι μεγαλύτερος του συνολικού χρόνου επεξεργασίας του πακέτου ελέγχου κατά μήκος του καναλιού,μπορεί κάποιος να εξαλείψει την ανάγκη ένας καταιγισμός δεδομένων να απομονωθεί σε κάποιο ενδιάμεσο κόμβο μόνο για να περιμένει το πακέτο ελέγχου να υποστεί επεξεργασία.

Εναλλακτικά,ένα OBS πρωτόκολλο μπορεί να επιλέξει να μην χρησιμοποιήσει χρόνο μετατόπισης στην πηγή αλλά να απαιτήσει ότι ο καταιγισμός των δεδομένων θα περάσει από κάθε ενδιάμεσο κόμβο με σταθερή καθυστέρηση και όχι μικρότερη του μέγιστου χρόνου που απαιτείται για την επεξεργασία του πακέτου ελέγχου στον ενδιάμεσο κόμβο.Τέτοια OBS πρωτόκολλα θα αναφέρονται σαν βασισμένα στο TAG καθώς οι βασικές τους αρχές ταυτίζονται με αυτές του TAG.

Ένας τρόπος για να υποστηρίξουμε το πρωτόκολλο IP πάνω από το WDM χρησιμοποιώντας την OBS είναι να «τρέξουμε» λογισμικό IP μαζί με άλλο λογισμικό ελέγχου σαν μέρος της διασύνδεσης μεταξύ του επιπέδου δικτύου και του επιπέδου WDM στην κορυφή κάθε οπτικού (WDM) διακόπτη.Στο στρώμα WDM χρησιμοποιείται ένας αποκλειστικός έλεγχος μήκους κύματος για να παρέχει «στατικούς/φυσικούς» συνδέσμους μεταξύ των IP οντοτήτων.Συγκεκριμένα,χρησιμοποιείται προκειμένου να υποστηρίξουμε την μεταγωγή πακέτου ανάμεσα σε (φυσικά) παρακείμενες IP οντότητες οι οποίες διατηρούν την τοπολογία και τους πίνακες δρομολόγησης.Για την αποστολή δεδομένων ένα πακέτο ελέγχου δρομολογείται από την πηγή προς τον προορισμό του βάσει των IP διευθύνσεων τις οποίες τούτο μεταφέρει (ή μία ετικέτα εάν υποστηρίζεται MPLS) προκειμένου να εγκαταστήσει μία σύνδεση με το να «στήσει» κατάλληλα όλους τους οπτικούς διακόπτες κατά μήκος του μονοπατιού.Έπειτα,ένας καταιγισμός (π.χ. ένα ή περισσότερα πακέτα δεδομένων IP,ή ένα ολόκληρο μήνυμα) παραδίδεται χωρίς να περνάει από ενδιάμεσες IP οντότητες,επιτυγχάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο μείωση της καθυστέρησης καθώς επίσης και του φορτίου επεξεργασίας στο στρώμα IP.Σημειώστε ότι,λόγω της περιορισμένης αδιαφάνειας του πακέτου ελέγχου το OBS μπορεί να επιτύχει έναν υψηλό βαθμό προσαρμοστικότητας σε συμφορήσεις ή σφάλματα (π.χ. χρησιμοποιώντας δρομολόγηση-διόρθωση) και να υποστηρίξει δρομολόγηση προτεραιότητας όπως στην μεταγωγή πακέτου/κυψέλης.

Στο OBS το μήκος κύματος της σύνδεσης που χρησιμοποιήθηκε από τον καταιγισμό θα απελευθερωθεί μόλις ο καταιγισμός περάσει διαμέσου της σύνδεσης, είτε αυτόματα με την κράτηση που έγινε (όπως στο JET) ή μέσω ενός πακέτου απελευθέρωσης.Με αυτόν τον τρόπο καταιγισμοί από διαφορετικές πηγές προς διαφορετικούς προορισμούς μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά το εύρος ζώνης του ίδιου μήκους κύματος σε μία σύνδεση

κάνοντας στατιστική πολυπλεξία με χρονοθυρίδες. Σημειώστε ότι, στη περίπτωση που το πακέτο ελέγχου αποτύχει να εξασφαλίσει το εύρος ζώνης σε κάποιο ενδιάμεσο κόμβο, ο καταγισμός (ο οποίος θεωρείται χωρίς δυνατότητα όδευσης σε αυτό το σημείο) ίσως πρέπει να τερματιστεί. Το OBS μπορεί να υποστηρίξει είτε αξιόπιστες ή αναξιόπιστες μεταδόσεις καταγισμών στο οπτικό στρώμα. Στην πρώτη περίπτωση μία αρνητική επιβεβαίωση στέλνεται πίσω στον κόμβο της πηγής, ο οποίος με την σειρά του μεταδίδει ξανά το πακέτο ελέγχου και τον καταγισμό αργότερα. Μία τέτοια επαναμετάδοση ίσως να είναι χρήσιμη όταν το OBS πρόκειται να υποστηρίξει κάποια πρωτόκολλα εφαρμογών απευθείας, αλλά όχι όταν χρησιμοποιείται ένα ανώτερο στρώμα πρωτοκόλλου όπως το TCP το οποίο τελικά μεταδίδει πάλι τα χαμένα δεδομένα.

Σε κάθε περίπτωση, ένας απορριφθείσας καταγισμός σπαταλάει το εύρος ζώνης σε ένα μερικώς εγκατεστημένο μονοπάτι. Όμως, εφόσον ένα τέτοιο εύρος ζώνης έχει δεσμευτεί αποκλειστικά για τον καταγισμό τότε θα δεσμευόταν ακόμα και στην περίπτωση που δεν γινόταν εκπομπή του καταγισμού (όπως σε 2-δρόμων κράτηση). Παρόμοια επιχειρήματα ισχύουν και στην περίπτωση μεταγωγής οπτικού πακέτου. Προκειμένου να απαλείψουμε την πιθανότητα τέτοιας σπατάλης του εύρους ζώνης, ένας καταγισμός χωρίς δυνατότητα όδευσης (ή ένα οπτικό πακέτο) θα πρέπει να αποθηκευτεί σε μία ηλεκτρονική απομονωτική βαθμίδα (buffer) αφού υποστεί O/E μετατροπές και αργότερα (αφού υποστεί E/O μετατροπές) αναμεταδοθεί προς τον προορισμό του. Οι οπτικές ίνες καθυστέρησης γραμμής (Fiber Optical Delay Lines (FDLs)) οι οποίες παρέχουν περιορισμένες καθυστερήσεις σε ενδιάμεσους κόμβους, οι οποίες δεν είναι υποχρεωτικές στο OBS όταν χρησιμοποιείται το JET πρωτόκολλο, θα μπορούσαν να βοηθήσουν στο να ελαττωθεί η σπατάλη στο εύρος ζώνης καθώς και να βελτιώσουν την απόδοση στο OBS. Προσέξτε ότι, όταν γίνεται χρήση πρωτοκόλλων OBS τα οποία βασίζονται στο TAG (ή οπτική μεταγωγή πακέτου) οι FDLs (ή οπτικοί buffers) είναι απαιτούμενοι προκειμένου να καθυστερήσουμε καθένα οπτικό καταγισμό, όταν υφίσταται επεξεργασία το πακέτο ελέγχου (ή η επικεφαλίδα του πακέτου), αλλά δεν βοηθάνε στην βελτίωση της απόδοσης.

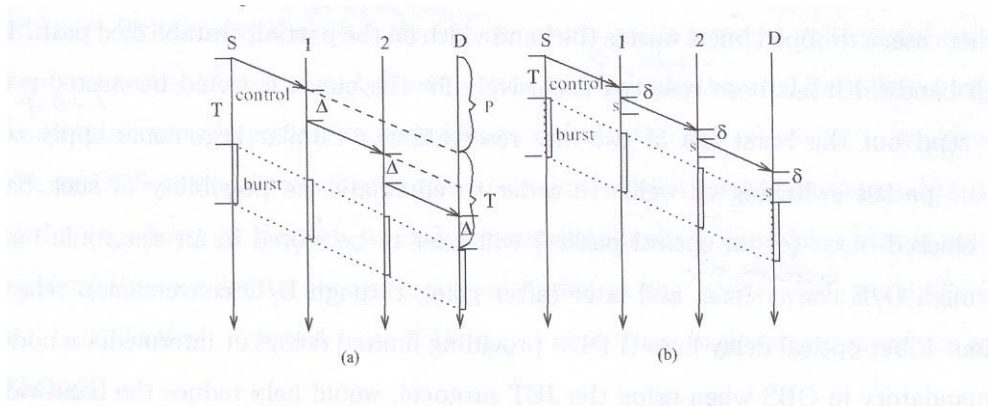
Συνοψίζοντας την παραπάνω συζήτηση, η οπτική μεταγωγή εκρήξεων επιτυγχάνει, ως ένα βαθμό, ισορροπία ανάμεσα στην μεταγωγή με «χονδρόκοκκους» οπτικούς διακόπτες και την μεταγωγή με λεπτές ίνες οπτικών πακέτων/κυψελίδων και συνδυάζει τα καλύτερα και των δύο, όπως απεικονίζεται στον πίνακα 1.

Οπτική Μεταγωγή	Αξιοποίηση Εύρους	Καθυστέρηση (set up)	Οπτικός Απομονωτής	Proc./Sync. Overhead	Προσαρμοστικότητα (κίνησης-σφάλματος)
Κύκλωμα	Χαμηλή	Υψηλή	Μη απαιτούμενος	Χαμηλή	Χαμηλή
Πακέτο/κυψέλη	Υψηλή	Χαμηλή	Απαιτούμενος	Υψηλή	Υψηλή
Καταγισμός	Υψηλή	Χαμηλή	Μη απαιτούμενος	Χαμηλή	Υψηλή

Πίνακας 1: Μία σύγκριση μεταξύ 3 οπτικών μεταγωγών

1.4 Το πρωτόκολλο JET και οι διαφοροποιήσεις του

Το προτεινόμενο πρωτόκολλο Just-Enough-Time (ή JET) για το OBS έχει δύο μοναδικά χαρακτηριστικά, ονομαστικά, την χρήση καθυστερημένης κράτησης (Delayed Reservation) και την ικανότητα να ολοκληρώσει το DR με την χρήση πολυπλεκτών απομονωμένων καταγισμών (Buffer Burst Multiplexers) βασισμένων στο FDL, τους οποίους θα περιγράψουμε σε αυτό το τμήμα. Αυτά τα χαρακτηριστικά κάνουν το JET και τις διαφοροποιήσεις του ιδιαίτερα κατάλληλες για το OBS, όταν συγκρίνεται με τα πρωτόκολλα του OBS τα οποία βασίζονται στο TAG καθώς και με άλλα μίας κατεύθυνσης κράτησης πρωτόκολλα του OBS τα οποία στερούνται είτε του ενός ή και των δύο χαρακτηριστικών.



Σχήμα 1: Το OBS με χρήση του πρωτοκόλλου JET

Το σχήμα 1 απεικονίζει την βασική ιδέα του JET. Όπως απεικονίζεται, ένας κόμβος-πηγή, ο οποίος έχει να μεταδώσει ένα κλαταιγισμό, πρώτα θα στείλει ένα πακέτο ελέγχου μέσω του καναλιού σηματοδότησης (το οποίο είναι ένα «αποκλειστικό» μήκος κύματος) προς τον κόμβο-προορισμό. Το εν λόγω πακέτο ελέγχου υφίσταται επεξεργασία σε καθένα ενδιάμεσο κόμβο προκειμένου να εγκατασταθεί ένα οπτικό μονοπάτι δεδομένων για τον επακόλουθο καταιγισμό. Για να βοηθήσουμε τον αναγνώστη να σχηματίσει μια σαφέστερη εικόνα θα αναφέρουμε ότι, βάσει της πληροφορίας που μεταφέρεται από το πακέτο ελέγχου, ο καθένας κόμβος επιλέγει ένα κατάλληλο μήκος κύματος για την γραμμή εξόδου, δεσμεύει το συγκεκριμένο εύρος ζώνης και «στήνει» τον οπτικό διακόπτη. Στο μεταξύ, η έκρηξη αναμένει στην πηγή του ηλεκτρονικού χώρου (electronic domain). Μετά από κάποιο χρόνο μετατόπισης (offset time) , T , του οποίου η τιμή καθορίζεται στην επόμενη παράγραφο, η έκρηξη αποστέλλεται με οπτικά σήματα βάσει του επιλεχθέντος μήκος κύματος (ας πούμε 2.5Gb/s).

1.5 Η χρήση του χρόνου μετατόπισης

Για απλότητα, ας υποθέσουμε ότι ο χρόνος για να επεξεργαστούμε το πακέτο ελέγχου, να δεσμεύσουμε το κατάλληλο εύρος ζώνης και να «στήσουμε» τον διακόπτη είναι Δ χρονικές μονάδες σε κάθε κόμβο και ας αγνοήσουμε τον χρόνο εκπομπής και λήψης για το πακέτο ελέγχου. Στο πρωτόκολλο OBS που βασίζεται στο TAG (ή οπτική μεταγωγή πακέτου) μία έκρηξη αποστέλλεται από την πηγή μαζί με το πακέτο ελέγχου χωρίς χρόνο μετατόπισης (π.χ. $T=0$ στο σχήμα 1). Επιπλέον, σε κάθε επόμενο, ενδιάμεσο κόμβο, ο καταιγισμός αναμένει έτσι ώστε το πακέτο ελέγχου να επεξεργασθεί και εν συνεχεία και τα δύο μεταδίδονται στον επόμενο κόμβο και χωρίς χρόνο μετατόπισης. Με αυτόν τον τρόπο τόσο το πακέτο ελέγχου όσο και ο καταιγισμός θα καθυστερήσουν για Δ μονάδες, οι οποίες θα αναφέρονται σαν ανά κόμβο καθυστέρηση ελέγχου. Ακολούθως, η ελάχιστη καθυστέρηση του καταιγισμού συμπεριλαμβανομένου και του συνολικού χρόνου μετάδοσης, ο οποίος δηλώνεται με P , αλλά εξαιρώντας τον χρόνο μετάδοσής της, είναι $P+\Delta*H$, όπου H είναι ο αριθμός των αναπηδήσεων κατά μήκος του μονοπατιού (π.χ. στο Σχήμα 1, $H=3$).

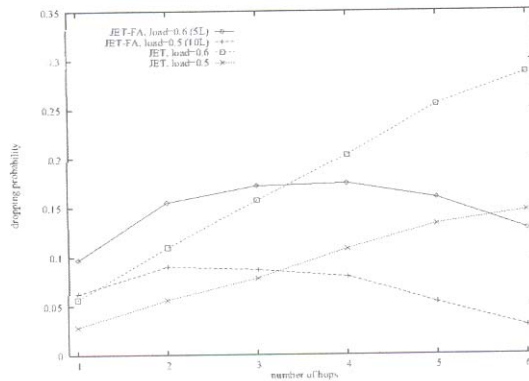
Στο JET μπορούμε να επιλέξουμε τον χρόνο μετατόπισης T να είναι $\Delta*H$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(a), έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε ότι υπάρχει αρκετός χώρος (headroom) σε κάθε κόμβο προκειμένου αυτός να ολοκληρώσει την επεξεργασία του πακέτου ελέγχου πριν ο καταιγισμός φθάσει. Με αυτόν τον τρόπο ο καταιγισμός δεν θα συναντήσει μία καθυστέρηση μεγαλύτερη αυτής στην περίπτωση πρωτοκόλλων του OBS βασισμένων στο TAG. Στην πραγματικότητα, μπορούμε να τεμαχίσουμε το Δ σε δύο κομμάτια: έστω δ ο χρόνος για να επεξεργαστούμε το πακέτο ελέγχου και να ορίσουμε άλλες προετοιμασίες όπως τη ρύθμιση του διακόπτη και $s=(\Delta-\delta)$ ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρώσουμε αυτές τις προετοιμασίες. Χρησιμοποιώντας το JET το πακέτο ελέγχου μπορεί να μεταδοθεί στον επόμενο κόμβο αμέσως μετά το «πέρασμα» δ χρονικών μονάδων σε κάθε

ενδιάμεσο κόμβο ή με άλλα λόγια s χρονικές μονάδες πριν τον καταγισμό. Αυτό επικαλύπτει αποτελεσματικά τον χρόνο ρύθμισης της μεταγωγής σε έναν κόμβο με τον χρόνο για το πακέτο ελέγχου να μεταδοθεί (και πιθανώς να υποστεί επεξεργασία) σε μεταγενέστερο κόμβο. Συνεπώς, ένας μπορεί να μειώσει τον χρόνο μετατόπισης σε $T' = \delta * H + s$ και την καθυστέρηση σε $P + T'$, όπου τα $s*(H-1)$ είναι μικρότερα από αυτά του OBS πρωτοκόλλου που βασίζονται στο TAG.

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι, ο καταγισμός μπορεί να μεταδοθεί χωρίς να πρέπει να περιμένει για επιβεβαίωση από τον παραλήπτη. Στα 2.5Gb/s, μία έκρηξη των 500 Kbytes (ή 4000 μεσαίου μεγέθους IP πακέτα) μπορούν να μεταδοθούν σε περίπου 1.6ms. Όμως, μία επιβεβαίωση θα χρειαζόταν 2.5ms μόνο να μεταδοθεί σε μία απόσταση σχεδόν 500km. Αυτό εξηγεί γιατί τα πρωτόκολλα κράτησης ενός δρόμου είναι γενικά καλύτερα από αυτά των δύο δρόμων για καταγιστική κυκλοφορία πάνω σε μία σχετικά μεγάλη απόσταση. Όταν ένας καταγισμός αποστέλλεται περνάει διαμέσου ενδιάμεσων κόμβων χωρίς να διέρχεται από κάποια βαθμίδα απομόνωσης με αποτέλεσμα η ονομαστική καθυστέρηση που συναντάει θα είναι η ίδια όπως εάν ο καταγισμός μεταδιδόταν μαζί με το πακέτο ελέγχου όπως στην μεταγωγή οπτικού πακέτου. Φυσικά, εάν ο καταγισμός είναι εξαιρετικά μικρή τότε κάποιος μπορεί να στείλει εξίσου καλά τα δεδομένα μαζί με την πληροφορία ελέγχου χρησιμοποιώντας την μεταγωγή πακέτου.

1.6 Υποστήριξη QoS

Σε αυτή την παράγραφο δείχνουμε πώς ένας πρόσθετος χρόνος μετατόπισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποστηρίξουμε προτεραιότητα και ποιότητα υπηρεσίας(QoS) χωρίς να απαιτηθεί η χρήση βαθμίδας απομόνωσης(buffer) σε ενδιάμεσους κόμβους. Η απόδοση του JET-FA πρωτοκόλλου θα εκτιμηθεί κάτω από ένα ελαφρώς διαφορετικό μοντέλο στο οποίο ένας καταγισμός χωρίς δυνατότητα όδευσης(blocked) θα ματαιώνεται (dropped) και δεν θα επαναμεταδίδεται. Το σχήμα 2 δείχνει την πιθανότητα μέσης ματαίωσης μίας έκρηξης σαν συνάρτηση της απόστασης ανάμεσα στην πηγή εκπομπής και στον παραλήπτη η οποία συμβολίζεται με H, όταν $k=8, b=c=0$, και το φορτίο κίνησης (σχετικό με την χωρητικότητα της σύνδεσης) είναι 0.5 και 0.6 αντίστοιχα. Προκειμένου να εκτιμήσουμε την απόδοση του JET και των διαφοροποιήσεών του, υποθέτουμε ότι οι καταγισμοί έχουν μία εκθετικά κατανομημένη διάρκεια με μία μέση τιμή L και ότι ο προορισμός του κάθε καταγισμού είναι ομαλά κατανομημένος μεταξύ όλων των κόμβων εκτός της πηγής του. Για ένα καταγισμό του οποίου η απόσταση πηγής-προορισμού(ή μήκος μονοπατιού) είναι H(αναπηδήσεις μήκους κύματος) ο ελάχιστος χρόνος μετατόπισης τίθεται ίσος με $\Delta * H$. Θα συμβολίσουμε με k τον αριθμό των καναλιών(π.χ. μήκη κύματος) ανά σύνδεση, με b τον λόγο του μέγιστου χρόνου απομόνωσης(buffering time) προς το L και c για τον λόγο του Δ προς L. Δύο βασικά JET-FA πρωτόκολλα τα οποία εκχωρούν ένα πρόσθετο χρόνο μετατόπισης ο οποίος είναι ένα πολλαπλάσιο του H(και του L) προσομοιώνονται. Συγκεκριμένα, στα JET-FA(5L) και JET-FA(10L), ένας καταγισμός ταξιδεύει H αναπηδήσεις μήκους κύματος και χρησιμοποιεί ένα πρόσθετο χρόνο μετατόπισης των $5L * H$ και $10L * H$, αντίστοιχα. Σημειώστε ότι, όταν $L=40\mu\text{sec}$ και $H=6$, ο πρόσθετος, μέγιστος χρόνος μετατόπισης θα είναι μόνο $6 * 10L$ ή 2.4msec, το οποίο είναι αρκετά αποδεκτό για καταγισμούς που έχουν να ταξιδέψουν 6 αναπηδήσεις με μία μέση απόσταση ανά αναπήδηση ίση έστω με 500 km. Όπως μπορεί να φανεί, η «δικαιοσύνη»(fairness) είναι βελτιωμένη συγκριτικά με το πρωτόκολλο JET. Όμως, η απόδοση(throughput) του JET-FA μπορεί να είναι ελαφρώς μικρότερη συγκριτικά με αυτή του JET. Παρόλαυτα, με ένα αρκετά μεγάλο k, το JET-FA μπορεί να επιτύχει την ίδια, κατά προσέγγιση, ρυθμοαπόδοση(throughput) με το JET.



Σχήμα 2: Βελτίωση του fairness με χρήση JET-FA πρωτοκόλλων

Παρατηρήστε ότι, μπορούμε να εφαρμόσουμε την ίδια ιδέα για να παρέχουμε διαφοροποιημένες υπηρεσίες χωρίς την χρήση βαθμίδας απομόνωσης (buffer) σε ένα δίκτυο WDM. Ειδικότερα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν πρόσθετο χρόνο μετατόπισης κατά την αποστολή κάθε καταγωγισμού που ανήκει σε μία κλάση υψηλής προτεραιότητας. Για παράδειγμα, υποθέσατε ότι οι διάρκειες κάποιων χαμηλής προτεραιότητας καταγωγισμών έχουν μία εκθετική κατανομή με μέση τιμή L . Εάν ο πρόσθετος χρόνος μετατόπισης είναι $5L$, ο οποίος είναι μεγαλύτερος αυτού του 99% των καταγωγισμών χαμηλής προτεραιότητας, τότε το πολύ 1% των χαμηλής προτεραιότητας καταγωγισμών θα σταματήσει (block) μία υψηλής προτεραιότητας έκρηξη. Σαν αποτέλεσμα [] η μέση πιθανότητα αποτυχίας (dropping) υψηλής προτεραιότητας καταγωγισμών θα είναι τουλάχιστον 10 φορές χαμηλότερη, όταν $k=8$, και αρκετές τάξεις μεγέθους χαμηλότερη όταν $k=32$ (αν και η μέση πιθανότητα αποτυχίας-blocking όλων των καταγωγισμών παραμένει αμετάβλητη).

2. Έρευνα στο Δυναμικό Καλλωπισμό Κυκλοφορίας στα Οπτικά Δίκτυα

2.1 Περίληψη

Ο «καλλωπισμός» (grooming) της κυκλοφορίας έχει αναδυθεί ως ένα ενδιαφέρον θέμα στην ευρεία περιοχή έρευνας για τα οπτικά δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος. Αυτή η περιοχή έρευνας αφορά το πρόβλημα της πολυπλεξίας χαμηλών κυκλοφοριακών απαιτήσεων σε κανάλια μήκους κύματος υψηλού εύρους ζώνης, έτσι ώστε να μειώσουμε το κόστος του εξοπλισμού δικτύου με την μεγιστοποίηση της οπτικής δρομολόγησης και την ελαχιστοποίηση της αντίστοιχης ηλεκτρονικής. Πρόσφατα, έχουν γίνει προσπάθειες να επεκτείνουμε τις μελέτες αυτού του είδους και στην δυναμική κυκλοφορία. Όμως, η περιοχή αυτή είναι συγκριτικά νέα και οι περισσότερες από τις προτεινόμενες προσεγγίσεις αγνοούν την πτυχή της μεγιστοποίησης της οπτικής δρομολόγησης λόγω του ότι απλά θεωρούν την πιθανότητα μπλοκαρίσματος. Στις επόμενες παραγράφους της εργασίας θα περιγράψουμε μία γκάμα προβλημάτων τα οποία εκτιμούμε ως κατάλληλα για μελέτη κάτω από την ομπρέλα του δυναμικού καλλωπισμού. Επίσης, παρέχουμε διατυπώσεις παραδειγμάτων τα οποία περιγράφουν μερικά από τα προβλήματα αυτά με ακρίβεια.

2.2 Εισαγωγή

Τα κατά μήκος κύματος-καθοδηγημένα οπτικά δίκτυα έχουν εδώ και καιρό αναγνωρισθεί σαν την ραχοκοκαλιά των δικτύων του μέλλοντος. Οι ελκυστικές ιδιότητες της οπτικής μετάδοσης, μαζί με την τεχνολογία της δρομολόγησης ξεχωριστών καναλιών μήκους κύματος χωρίς την ανάγκη για ενδιάμεση οπτο-ηλεκτρο-οπτικό μετατροπή, έχουν καταστήσει αυτήν την τεχνολογία ελκυστική για ένα μέλλον στο οποίο η ραχοκοκαλιά θα χαρακτηρίζεται από την ανάγκη για υψηλές ταχύτητες με αυστηρά προβλεπόμενη απόδοση. Η βιβλιογραφία

για τα προβλήματα του σχεδιασμού εικονικής τοπολογίας έχουν εστιαστεί στην πιθανότητα του σχηματισμού «φωτομονοπατιών»(lightpaths) ή καθαρά οπτικών καναλιών τα οποία εν συνεχεία μπορούν να θεωρηθούν σαν κυκλοφορία η οποία πρέπει να δρομολογηθεί και να της εκχωρηθούν μήκη κύματος πάνω στην φυσική τοπολογία ενός δικτύου.

Επειδή τα οπτικά δίκτυα έχουν προβλεφθεί να χρησιμοποιηθούν σε δίκτυα χωρίς πυρήνα(core networks) και επίσης επειδή-όταν τα προβλήματα εικονικής τοπολογίας είχαν εκτιμηθεί για πρώτη φορά δεν είχε γίνει αντιληπτό με ακρίβεια πόσο μεγάλο το εύρος ζώνης των οπτικών δικτύων θα ήταν-είχε γίνει η λογική υπόθεση από τους περισσότερους ερευνητές ότι οι ατομικές, κυκλοφοριακές απαιτήσεις θα συγκρινόντουσαν σε εύρος ζώνης με ολόκληρο μονοπάτι φωτός(lightpath(s)).Έχει συνεπώς γίνει σαφές ότι πρόκειται για θεωρητικά μικρότερα και τέτοια κυκλοφορία υπο-μήκους κύματος (sub-wavelength traffic) πρέπει να πολυπλεχθεί (χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικές μεθόδους TDM) σε ξεχωριστά κανάλια μήκους κύματος για να επιτύχουμε καλή αξιοποίηση του εύρους ζώνης του δικτύου.Αυτή η διαδικασία καλείται καλλωπισμός κυκλοφορίας(traffic grooming).

Η σχεδίαση δικτύου με απαιτήσεις κυκλοφορίας υπομήκους κύματος έχει αναπτυχθεί πάρα πολύ εξαιτίας αρκετών αιτιών.Τα οπτικά δίκτυα επεκτείνονται ολοένα και πιο κοντά στον τελικό χρήστη,όπου απαιτούνται περισσότερες διευκολύνσεις για εγκατάσταση και η ανάγκη να υπερπηδηθούν οι χαμηλές ταχύτητες κυκλοφορίας είναι εμφανή.Τα GMPLS-aware Optical Cross Connect(OXC) αναμένονται να εκχωρήσουν τα επερχόμενα LSPs σε μονοπάτια φωτός(lightpath) χρησιμοποιώντας κάποιο είδος αλγόριθμου καλλωπισμού της κυκλοφορίας.Ξανά,λόγω των αναδυόμενων οπτικών τεχνολογιών,το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε μονό μήκος κύματος αυξάνεται από τα 2.5 Gbits/s στα 10Gbits/s,πιθανόν ακόμα υψηλότερα στο μέλλον.Επιπλέον,αν και ο αριθμός των διαθέσιμων μηκών κύματος σε μία μονή ίνα με την χρήση της Πολύπλεξης Διαίρεσης Μήκους Κύματος αυξάνεται είναι ωστόσο ένας ακόμη περιορισμός στα οπτικά δίκτυα.Οι οπτικοί πολυπλέκτες άθροισης-απόρριψης(Optical Add-Drop Multiplexors) μπορούν επιλεκτικά να κάνουν αγωγή μερικά οπτικά κανάλια,ενώ άλλα τα κατευθύνουν σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό,αλλά μόνο κατά ολόκληρο το μήκος κύματος.Έτσι,εκχωρώντας ολόκληρα φωτομονοπάτια(lightpaths) σε μικρές κατά υπο-μήκος κύματος κυκλοφοριακές απαιτήσεις θα έχει σαν αποτέλεσμα την σοβαρή υπο-εκμετάλλευση των οπτικών ραχοκοκαλιών.

2.3 Στοιχεία στατικού κυκλοφοριακού καλλωπισμού

Μεγάλο μέρος της προσοχής της βιβλιογραφίας έχει έως τώρα εστιασθεί σε αυτό το πρόβλημα όταν οι από κόμβο σε κόμβο κυκλοφοριακές απαιτήσεις δεν διαφοροποιούνται σημαντικά με το πέρασμα του χρόνου,π.χ όταν παριστάνονται από έναν στατικό πίνακα των κυκλοφοριακών απαιτήσεων.Το στατικό πρόβλημα καλλωπισμού είναι ένα μεγάλο πρόβλημα βελτιστοποίησης.Δοθέντος του πίνακα κυκλοφορίας,ένα φυσικό δίκτυο και περιορισμοί όπως ο αριθμός μηκών κύματος ανά σύνδεση,ο στόχος του σχεδιασμού να ελαχιστοποιήσουμε το κόστος του εξοπλισμού για το δίκτυο OEO.Μιλώντας για το OEO,το λιγότερο δαπανηρό σχέδιο δικτύου είναι εκείνο στο οποίο κάθε κόμβος είναι αδιαφανής,που σημαίνει ότι όλα τα φωτομονοπάτια(lightpaths) διασχίζουν ένα φυσικό στρώμα και τερματίζονται σε κάθε κόμβο (έτσι κανένα οπτικό κανάλι δεν πρόκειται να περάσει μέσα από τον κόμβο).Ο στόχος του σχεδιασμού είναι να ελαττώσουμε τις OEO απαιτήσεις από αυτήν την εντελώς αδιαφανή περίπτωση.

Αρκετές διαφορετικές συναρτήσεις κόστους έχουν μελετηθεί.Στο [2] οι συγγραφείς μελέτησαν δακτυλίους SONET σε πολλαπλά μήκη κύματος και επιχειρηματολόγησαν ότι στόχος πρώτης τάξης για το πρόβλημα εκχώρησης μήκους κύματος(Wave Length Assignment) θα πρέπει να είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των SONET AMDs.Αυτός ο στόχος θα μπορούσε να γενικευθεί ώστε να εννοεί την ελαχιστοποίηση του αριθμού των απαιτούμενων γραμμών εξοπλισμού περάτωσης(Line Terminating Equipment) αθροϊζόμενες για όλους τους κόμβους του δικτύου-μία άμεση συνέπεια του κόστους εξοπλισμού OEO.Η μελέτη στο [2] απέδειξε ότι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των ADM-σε γενικές γραμμές-δεν είναι ισοδύναμη με την ελαχιστοποίηση του αριθμού των μηκών κύματος.Στο [3] προτάθηκαν heuristics για την ελαχιστοποίηση του αριθμού των AMD σε συνάρτηση με τον ελάχιστο αριθμό μηκών κύματος.

Ένας ακόμα υποψήφιος στόχος είναι η συνολική ηλεκτρονική δρομολόγηση που επιτυγχάνεται αθροισόμενη για όλους τους κόμβους δικτύου [4-6]. Αυτό το μοντέλο εστιάζει στο κόστος της πραγματικής ηλεκτρονικής επεξεργασίας η οποία εμπλέκεται στην δρομολόγηση ΟΕΟ. Ενώ δεν αντικατοπτρίζει αμέσως το κόστος του ΟΕΟ εξοπλισμού είναι ωστόσο ένα κομψό μέτρο της δρομολόγησης ΟΕΟ με την προϋπόθεση ότι δεν «τιμωρούμε» (penalize) την κυκλοφορία που προέρχεται ή τερματίζεται σε έναν κόμβο. Αυτό αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση (και άλλα πιθανά μειονεκτήματα της δρομολόγησης ΟΕΟ όπως την πιθανότητα σφάλματος ή την απώλεια λόγω υπερχείλισης της απομονωτικής βαθμίδας (buffer) κατά την διάρκεια ηλεκτρονικής επεξεργασίας) που επιφέρει η κυκλοφορία λόγω της πιο ακριβούς δρομολόγησης ΟΕΟ και ίσως είναι πιο χρήσιμη σε θέματα ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service (QoS)) σε ανώτερα στρώματα.

Ένας τρίτος στόχος είναι να ελαχιστοποιήσουμε τον μέγιστο αριθμό των lightpaths τα οποία ξεκινούν/τερματίζουν σε έναν κόμβο δικτύου, όπως στο [3]. Αυτός ο στόχος επίσης αφορά το LTE κόστος, και αντί να επιχειρήσει να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος για ολόκληρο το δίκτυο, επικεντρώνεται στον κόμβο στον οποίο το μεγαλύτερο μέρος ενός τέτοιου εξοπλισμού πρέπει να παραταχθεί. Η πρακτική αιτιολογία για αυτήν την περίπτωση είναι πως όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι συχνά τοποθετημένοι ιδανικά σε πραγματική παράταξη και όχι με τον τυπικό εξοπλισμό που θα έπρεπε να εκχωρηθεί σε καθένα κόμβο για να εφαρμόσουμε μια λύση βασισμένη στην ολική ελαχιστοποίηση LTE. Αυτό το είδος των προβλημάτων του μέγιστου-ελάχιστου έχουν μελετηθεί εκτενώς στα πλαίσια προβλημάτων κυκλοφοριακής ροής.

Πολλές άλλες μετρικές τεχνικές (metrics) της λειτουργίας των δικτύων είναι πρακτικού ενδιαφέροντος, όπως για παράδειγμα η απόδοση (throughput) του δικτύου ή ο ελάχιστος λόγος μπλοκαρίσματος [8]. Το πρόβλημα της μέγιστης απόδοσης (throughput) δικτύου καθώς και αυτό του ελάχιστου λόγου μπλοκαρίσματος δικτύου είναι dual προβλήματα τα οποία έχουν μελετηθεί εκτενώς στην περιοχή των δικτύων δεδομένων. Όσον αφορά την συζήτηση του «καλλωπισμού» της κυκλοφορίας στα Οπτικά Δίκτυα, αυτό το μοντέλο είναι σε αντιπαράθεση με το μοντέλο στατικής κυκλοφορίας, όπου είναι λογικό να υποθέσουμε ότι η διακύμανση που προκαλείται από διακριτές κυκλοφοριακές απαιτήσεις άφιξης ή αναχώρησης εξομαλύνεται και η συγκεντρωτική κυκλοφορία είναι ικανοποιητικά στατική. Ωστόσο, τέτοιες υποθέσεις είναι πολύ πιθανόν να γίνουν στο μέλλον όταν οι σκέψεις για τον «καλλωπισμό» της κυκλοφορίας θα χρειασθεί να επεκταθούν σε περιοχές όπου η κυκλοφορία επιδεικνύει περισσότερη διακύμανση σε σχέση με τον χρόνο. Αυτό είναι και το αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου. Ωστόσο, παραμένει σημαντικό να κρατήσουμε στο μυαλό μας ότι, το πρόβλημα της διευθέτησης (grooming) της κυκλοφορίας είναι ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης του ΟΕΟ κόστους, καθώς επίσης και ένα πρόβλημα πολυπλεξίας. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζουμε τα χαρακτηριστικά τα οποία ευνοούν την χρήση της δυναμικής διευθέτησης της κυκλοφορίας και κάνουμε μια σύντομη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας πάνω στο αντικείμενο. Οι παράγραφοι 2.5 και 2.6 περιέχουν εκτιμήσεις πάνω σε διαφορετικά ενδεχόμενα των προβλημάτων που εμφανίζονται στην συγκεκριμένη περιοχή, καθώς και ακριβείς διατυπώσεις για κάποια ειδικά προβλήματα.

Σε ότι ακολουθεί θα κάνουμε αναφορά σε αρκετά υπο-προβλήματα τα οποία ευρέως γίνονται αντιληπτά ως συστατικά μέρη του προβλήματος του κυκλοφοριακού καλλωπισμού. Είναι απαραίτητο να σημειώσουμε ότι, η πρακτική λύση σε ένα πρόβλημα κυκλοφοριακής διευθέτησης δεν θα αποτελείται απαραίτητα από ξεχωριστές λύσεις σε αυτά τα υποπροβλήματα, τα οποία αποτελούν αναγνωρίσιμα μέρη του ευρύτερου προβλήματος.

1. Σχεδιασμός εικονικής τοπολογίας ή αποφασίζοντας το σύνολο των μονοπατιών (lightpaths) προς εγκατάσταση. Μία εικονική τοπολογία είναι ένα δίγραμμα $G(V,A)$, όπου τα vertices ανταποκρίνονται σε δικτυακούς κόμβους με εξοπλισμούς όπως τα OADMs, OXCs, κ.λ.π., και υπάρχει μία άκρη (edge) ανάμεσα σε δυο vertices εάν υπάρχει κάποιο μονοπάτι εγκατεστημένο ανάμεσα στους αντίστοιχους κόμβους.

2. Δρομολόγηση μονοπατιού(lightpath) σε φυσικές συνδέσεις. Αυτή είναι μια εκδοχή του γενικού προβλήματος της δρομολόγησης το οποίο έχει μελετηθεί εκτενώς επί δεκαετιών. Όμως, σε αυτήν την περίπτωση, τα μονοπάτια αντιπροσωπεύουν κυκλοφοριακές απαιτήσεις. Πιθανόν να υπάρχουν πρόσθετοι, ειδικοί περιορισμοί για την δρομολόγηση μονοπατιών στα WDM δίκτυα: π.χ. φυσικές εξασθενήσεις όπως απώλεια, χρωματική διασπορά και μη γραμμικές επιδράσεις ίσως περιορίζουν τις φυσικές αναπηδήσεις σε ένα μονοπάτι. Σε γενικές γραμμές το πρόβλημα της δρομολόγησης υπό περιορισμούς είναι NP-Hard [9].

3. Εκχώρηση μήκους κύματος σε μονοπάτια υπακούοντας στον περιορισμό της συνέχειας μήκους κύματος και αποφεύγοντας κλαγγές(clashes) μήκους κύματος. Τα μήκη κύματος είναι ένας από τους κρίσιμους πόρους των οπτικών δικτύων. Ο αριθμός των μηκών κύματος τα οποία μπορούν να πολυπλεχθούν σε μία ίνα είναι περιορισμένος. Τα υψηλά κόστη της πυκνής διαίρεσης μήκους κύματος με πολυπλεξία(Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)) έχουν δώσει ώθηση σε Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM)). Στο [5] αποδείχθηκε ότι, το γενικό WLA πρόβλημα είναι NP-Complete μέσω μείωσης από το κλασικό πρόβλημα χρωματισμού γραφήματος.

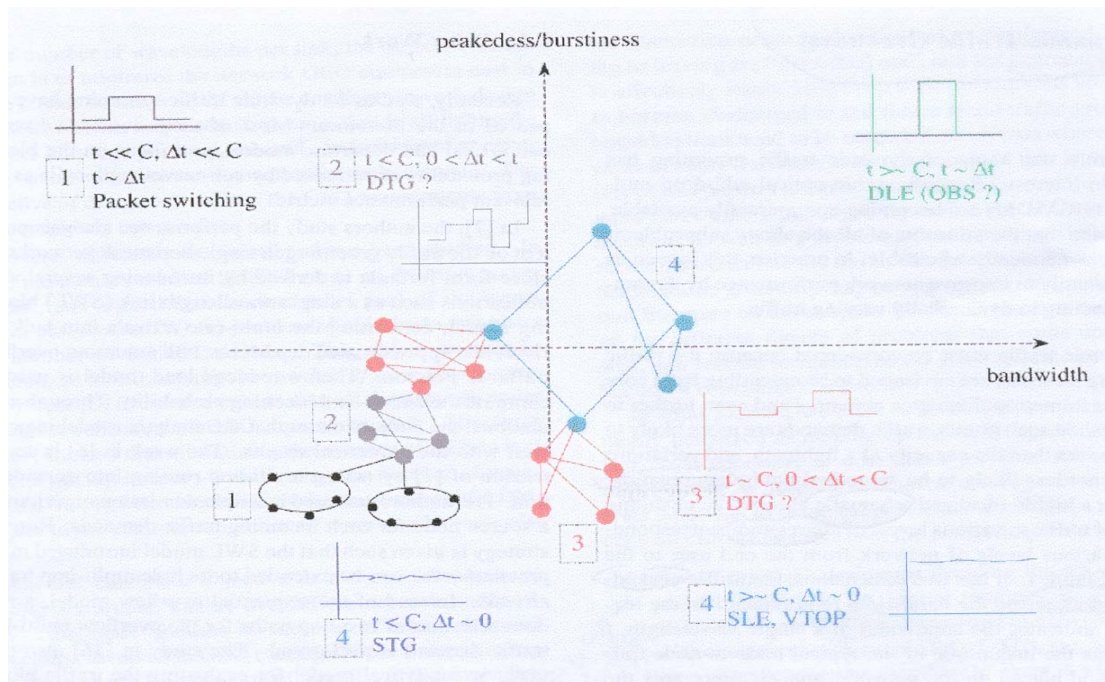
4. Δρομολόγηση κυκλοφορίας. Από την στιγμή που η εικονική τοπολογία έχει αποφασισθεί και υλοποιηθεί, η υφιστάμενη κυκλοφοριακή ροή από κόμβο σε κόμβο πρέπει να δρομολογηθεί μέσω των μονοπατιών. Αυτό είναι ξανά το γενικό πρόβλημα δρομολόγησης όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

2.4 Δυναμική διευθέτηση(grooming) κυκλοφορίας

Πρόσφατα, το θέμα της δυναμικής κυκλοφοριακής διευθέτησης έχει αποκτήσει ενδιαφέρον. Ανασυντιθέμενοι οπτικοί πολυπλέκτες(Reconfigurable optical add-drop multiplexors(ROADM)) έχουν γίνει εμπορικά διαθέσιμοι. Αυτό σημαίνει ότι, οι ανησυχίες για τα παραπάνω υποπροβλήματα μπορούν να γίνουν δυναμικά προσαρμόσιμες. Στην πράξη, αυτό μπορεί να εκληφθεί σαν μια ευκαιρία να βελτιώσουμε την συμπεριφορά του δικτύου με το να αντιδρούμε δυναμικά σε δυναμικά μεταβαλλόμενη κυκλοφορία.

Η δυναμική κυκλοφορία πρέπει να μελετηθεί γιατί οι τοποθεσίες για κυκλοφοριακή διευθέτηση προβλέπεται να επεκτείνονται από τα core networks σε περιοχές μητροπολιτικών δικτύων και ακόμα παραπέρα στους τελικούς χρήστες. Σε αυτά τα σημεία οι κυκλοφοριακές απαιτήσεις είναι πιθανόν να είναι αρκετά λιγότερες από την χωρητικότητα του μονοπατιού και μεταβολές σε αυτές είναι λιγότερο πιθανόν να εξομαλυνθούν με συγκεντρωτισμό. Προσφέρουμε μια πολύ ιδανική, σχηματική όψη της μεταβλητής φύσης της κυκλοφορίας στα διάφορα επίπεδα του συγκεντρωτισμού τα οποία αντιστοιχούν στα διάφορα επίπεδα του δικτύου από τον τελικό χρήστη στον πυρήνα στο Σχήμα 3. Έχει δύο διαστάσεις, την κυκλοφοριακή peakedness/burstiness και την απαίτηση εύρους ζώνης. Το C αντιπροσωπεύει το εύρος ζώνης ενός μονού μήκους κύματος, το t αντιπροσωπεύει το πλάτος της τυπικής από κόμβο σε κόμβο κυκλοφοριακής απαίτησης του δικτύου και το Δt συμβολίζει το πλάτος της τυπικής μεταβλητότητας της κυκλοφορίας σε ξεχωριστές χρονικές περιόδους αλλαγής της κυκλοφορίας. Παριστάνουμε μόνο τέσσερα επίπεδα του συγκεντρωτισμού για σκοπούς αποσαφήνισης. Στο χαμηλότερο επίπεδο παράγονται ατομικά πακέτα κυκλοφορίας και το εύρος ζώνης της κυκλοφορίας είναι πολύ χαμηλό ενώ ο καταγισμός είναι πολύ υψηλός. Γενικά, με διαδοχικά επίπεδα συγκεντρωτισμού της στοχαστικής πολυπλεξίας, προσδοκούμε ότι το κυκλοφοριακό εύρος ζώνης θα αυξηθεί, ενώ ο καταγισμός θα εξομαλυνθεί. Όταν η κυκλοφορία είναι ικανοποιητικώς στατική, όπως αναμένεται στο δίκτυο πυρήνα(core network) το πλάτος της κυκλοφορίας ίσως να είναι συγκρινόμενο με το εύρος ζώνης πλήρους μήκους κύματος. Σε αυτήν την περίπτωση ένα σχέδιο εικονικής τοπολογίας ή κάποια άλλη προσέγγιση στην εγκατάσταση στατικού μονοπατιού(Static Lightpath Establishment) είναι κατάλληλη. Από την άλλη μεριά, εάν το τυπικό εύρος κυκλοφορίας είναι ακόμα υπομήκος(sub-wavelength) κύματος, τότε στατική διευθέτηση(grooming) της κυκλοφορίας είναι η κατάλληλη απάντηση. Στα ενδιάμεσα επίπεδα

του συγκεντρωτισμού η μεταβολή στην κυκλοφορία είναι καθαρά υπομήκος κύματος, αλλά η κάθε μεταβολή είναι σημαντικά μικρότερη από το ολικό πλάτος της κυκλοφορίας. Προσέξτε πως από αυτά τα στάδια, η πολιτική του δικτύου ίσως να υπαγορεύσει burstization έτσι τεχνητά να ανυψώσει τόσο το κυκλοφοριακό πλάτος όσο και τον καταγισμό. Σε αυτήν την περίπτωση κάποιο εγκατάσταση δυναμικού μονοπατιού (Dynamic Lightpath Establishment (DLE)) θα ήταν κατάλληλη, πιθανόν και μεταγωγή οπτικού καταγισμού (Optical Burst Switching). Φυσικά, τέτοιες τεχνικές είναι επίσης κατάλληλες και σε άλλα δίκτυα στα οποία τέτοια χαρακτηριστικά προκύπτουν όχι λόγω συγκεντρωτισμού ακολουθούμενου από καταγισμό αλλά κάποιον άλλον μηχανισμό.



Σχήμα 3: Σχηματική αναπαράσταση διαφορετικών χαρακτηριστικών κίνησης

2.5 Μία επίλυση ILP για το πρόβλημα του στατικού καλλωπισμού κυκλοφορίας

Προκειμένου να δημιουργήσουμε την βάση για την επίλυση προβλημάτων δυναμικού καλλωπισμού, πρώτα επιλύουμε το στατικό πρόβλημα καλλωπισμού σαν αναφορά. ILPs για το στατικό πρόβλημα καλλωπισμού υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Ομως, επιλέγουμε να το επιλύσουμε πάλι γιατί η ακόλουθη επίλυση η οποία χρησιμοποιεί node-arc matrices είναι ιδιαίτερα εστιασμένη ώστε να επιτρέπει την γενίκευση σε δυναμικά προβλήματα.

Μας δίνουν ότι:

1. μία φυσική τοπολογία $P = \{p_{i,mn}\}$ όπου $p_{i,mn}$ είναι f_{mn} , ο αριθμός των ινών από τον κόμβο m στον n , εάν $i=m$, $-f_{mn}$ εάν $i=n$ και 0 σε κάθε άλλη περίπτωση. Υποθέτουμε ότι το f_{mn} ανήκει στο $\{0,1\}$,

2. C η χωρητικότητα κάθε μήκους κύματος,

3. ο αριθμός των μηκών κύματος ανά φυσική σύνδεση W ,

4. κυκλοφοριακές απαιτήσεις, $T = \{t_{i,sd}\}$, όπου $t_{i,sd}$ είναι t^{sd} , η κυκλοφοριακή απαίτηση από τον κόμβο s στον d , εάν $i=s$, $-t^{sd}$ εάν $i=d$ και 0 σε κάθε άλλη περίπτωση. Με απώλεια της γενικότητας υποθέτουμε ότι $t^{sd} < C$,

5. η συνάρτηση κόστους.

Πρέπει να βρούμε:

1.μια εικονική τοπολογία, $V = \{v_{i,l}\}$ όπου $v_{i,l}$ είναι 1 αν το μονοπάτι(lightpath) l αναχωρεί από τον κόμβο i , -1 εάν αυτό τερματίζεται στον κόμβο i , άλλως 0,

2.η εκχώρηση μήκους κύματος παριστάμενη από ένα σύνολο δυαδικών μεταβλητών: $U^w = \{u_{i,l}^w\}$, όπου $u_{i,l}^w = 1$ εάν το μονοπάτι l προέρχεται από τον κόμβο i και χρησιμοποιεί μήκος κύματος w , -1 εάν τερματίζεται στον κόμβο i και χρησιμοποιεί μήκος κύματος w , άλλως 0. Σημειώστε ότι, $U = \sum_w U^w$,

3.δρομολόγηση της εικονικής τοπολογίας, π.χ. ένας δρόμος για κάθε μονοπάτι της φυσικής τοπολογίας το οποίο αντιπροσωπεύεται με $B^w = \{b_{mn,l}^w\}$, $b_{mn,l}^w = 1$ αν το μονοπάτι l διασχίζει την φυσική γραμμή $\{mn\}$ και χρησιμοποιεί το μήκος κύματος w , άλλως 0.

4.την παράσταση(scheme) καλλωπισμού, έστω $F = \{f_{i,sd}\}$ η κυκλοφοριακή ροή από τον κόμβο s στον d χρησιμοποιώντας το μονοπάτι l .

Οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί είναι:

- για το πρόβλημα της εκχώρησης δρομολόγησης και μήκους κύματος (Routing and Wavelength Assignment) ισχύουν:

$$PB^w = U^w \text{ για κάθε } w \quad (1)$$

$$\sum_l b_{mn,l}^w \leq 1 \text{ για κάθε } w, mn \quad (2)$$

- για την δρομολόγηση της κυκλοφορίας στην εικονική τοπολογία ισχύει:

$$VF = T \quad (3)$$

- για το πρόβλημα καλλωπισμού ισχύει:

$$\sum_{sd} f_{i,sd} \leq C, \text{ για κάθε } l \quad (4)$$

- μη-αρνητικότητα και ακέραιοι περιορισμοί:

$$b_{mn,l}^w, u_{i,l}, u_{i,l}^w \text{ ανήκουν στο } \{0,1\}, \text{ για κάθε } l, mn, w \quad (5)$$

$$f_{i,sd} \text{ ανήκει } Z_+^0 \text{ για κάθε } l, sd \quad (6)$$

Ο περιορισμός (1) εγγυάται ότι σε κάθε μονοπάτι εκχωρείται ένα μήκος κύματος και δρομολογείται κατάλληλα (υποθέσατε καμία μετατροπή μήκους κύματος). Ο (2) εγγυάται πως σε δύο μονοπάτια τα οποία διασχίζουν την ίδια σύνδεση θα εκχωρηθούν δύο διαφορετικά μήκη κύματος. Ο περιορισμός (3) μας εξασφαλίζει ότι οι απαιτήσεις κυκλοφορίας δρομολογούνται σωστά στην εικονική τοπολογία και ο (4) είναι ο περιορισμός χωρητικότητας για κάθε μονοπάτι.

Ο στόχος μπορεί να παρασταθεί όπως μία γραμμική συνάρτηση όλων των μεταβλητών, χωρίς απώλεια της γενικότητας, π.χ.,

$$\min c'(\{b_{mn,l}^w\}, \{u_{i,l}^w\}, \{f_{i,sd}\}).$$

Παρατηρούμε ότι οι παραπάνω περιορισμοί για την δρομολόγηση εικονικής τοπολογίας και το υποπρόβλημα καλλωπισμού, π.χ. οι περιορισμοί (3) και (4) δεν αποκλείουν

την πιθανότητα κυκλοφοριακού bifurcation. Σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις είναι επιθυμητό να απαγορεύσουμε bifurcated δρομολόγηση και σε μία τέτοια περίπτωση μία εναλλακτική επίλυση χρησιμοποιώντας δείκτες ροής-μονοπατιού μπορεί να επιτευχθεί. Προσέξτε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και νέες μεταβλητές για την δημιουργία περιορισμών οι οποίοι θα απαγορεύουν κάθε στοιχείο κυκλοφορίας με το να περιγράφουν μία διαδρομή στην φυσική τοπολογία η οποία περικλείει έναν βρόχο. Αυτό δεν θα ήταν απαιτούμενο σε ένα παραδοσιακό πρόβλημα δρομολόγησης διότι μία τέτοια λύση δεν θα ήταν βέλτιστη. Όμως ίσως είναι κατάλληλο εδώ γιατί ένας βρόχος θα μπορούσε να σχηματισθεί μετά την δρομολόγηση ενός στοιχείου κυκλοφορίας σε δύο διαδοχικά μονοπάτια καθένα ξεχωριστά χωρίς βρόχο. Μία τέτοια λύση μπορεί να μην ήταν αυτομάτως υποβέλτιστη εάν το μετρητικό (metric) κόστος σχετιζόταν με το ΟΕΟ κόστος. Ωστόσο, λόγω θεμάτων διοίκησης δικτύου, μια τέτοια λύση ίσως να μην ήταν επιθυμητή. Δεν συζητάμε αυτές τις προεκτάσεις περισσότερο.

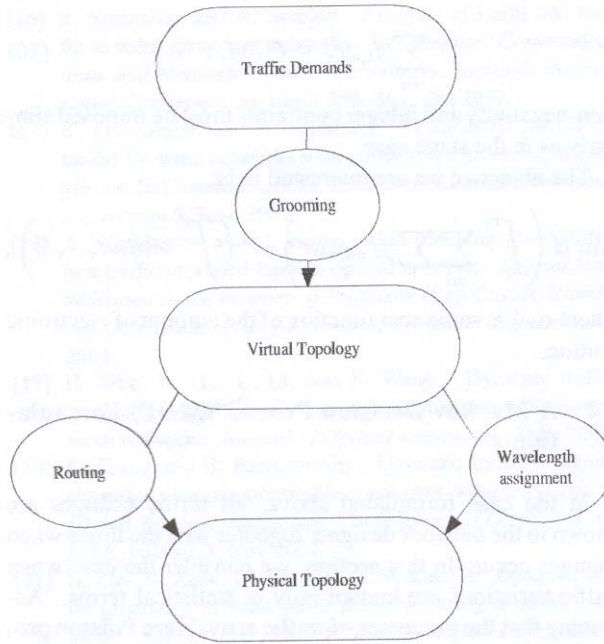
Προσέξτε ότι ο περιορισμός (3) είναι αποτέλεσμα δύο μεταβλητών έτσι ίσως εμφανισθεί ότι η γραμμικότητα έχει χαθεί σε αυτήν την επίλυση. Στην πραγματικότητα πρόκειται για έναν notational συμβιβασμό. Το $\sum U^w$ σε αυτόν τον περιορισμό μπορεί να αντικατασταθεί από μια πλήρη δικτυωτή εικονική τοπολογία με πολλαπλά τόξα, συμβολιζόμενη με U_c , και ο περιορισμός χωρητικότητας (4) θα εξακολουθούσε ακόμα να διασφαλίζει ότι η κυκλοφορία μπορεί να δρομολογηθεί σε μονοπάτια τα οποία είναι πραγματικά διαθέσιμα. Από την στιγμή που το U_c είναι μία σταθερά, η επίλυση δεν έχει χάσει την γραμμικότητά της.

Έστω ότι N είναι ο αριθμός των κόμβων, τότε ο αριθμός των μονοπατιών είναι στο $O(WN^2)$, ο αριθμός των φυσικών συνδέσεων στο $O(N^2)$, ο αριθμός των ζευγών S-D είναι στο $O(N^2)$. Έτσι, έχουμε $O(W^2N^3)$ nontrivial περιορισμούς. Ο αριθμός των μεταβλητών είναι στο $O(W^2N^4)$. Μπορούμε να μετατρέψουμε ροή τόξων σε ροή μονοπατιών που έχει αρκετά μικρότερο αριθμό περιορισμών και μεγαλύτερο αριθμό μεταβλητών. Εάν χρησιμοποιήσουμε τεχνική παραγωγής στηλών θα επιτύχουμε μία περισσότερο αποδοτική επίλυση.

2.6 Μία επίλυση ILP για το πρόβλημα του δυναμικού καλλωπισμού κυκλοφορίας

Από την ILP επίλυση είναι φανερό ότι, το πρόβλημα της διευθέτησης της κυκλοφορίας μπορεί να παρασταθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα. 4.

Τώρα, υποθέστε ότι οι απαιτήσεις κυκλοφορίας μεταβάλλονται ως συνάρτηση του χρόνου T . Έτσι, έχουμε $T_T = \{t_{i, sd, T}\}$. Έστω ότι αυτή η πληροφορία αφορά μία περίοδο χρόνου από την αρχική στιγμή T_i μέχρι τον τελικό χρόνο T_f . Θεωρούμε πως η φυσική τοπολογία P του δικτύου παραμένει σταθερή σε αυτήν την περίοδο. Από την άποψη της ανάλυσης ευαισθησίας, όταν το T_T αλλάζει σε T_T' η τρέχουσα λύση παραμένει εφικτή μέχρις του σημείου που οι περιορισμοί χωρητικότητας (4) γίνονται ενεργοί. Έτσι, προκειμένου να ικανοποιήσουμε τις μεταβαλλόμενες, κυκλοφοριακές matrices η επίλυση καλλωπισμού είναι επίσης συνάρτηση του χρόνου. Παριστάνουμε την λύση καλλωπισμού με $SO_T = \{u_{i,l,T}^w, b_{mn,l,T}^w, f_{i, sd, T}\}$ για κάθε sd, l, mn . Καθώς οι κυκλοφοριακές απαιτήσεις αλλάζουν, πιθανόν να θελήσουμε να αλλάξουμε την διευθέτηση είτε επειδή η υπάρχουσα επίλυση καλλωπισμού είναι ανέφικτη ή γιατί η αλλαγή δίνει πλεονέκτημα αργότερα. Ωστόσο, η αλλαγή του καλλωπισμού (grooming) δεν επιτυγχάνεται χωρίς κόστος.



Σχήμα 4: Παράσταση του προβλήματος καλλωπισμού κυκλοφορίας

Χωρίς απώλεια της γενικότητας, ορίστε την απόσταση μεταξύ δύο λύσεων καλλωπισμού σαν $dist_{T \rightarrow T'} = \|SO_T - SO_{T'}\|$ και υποθέστε ότι η συνάρτηση κόστους $\beta(\cdot)$ είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασης. Αυτό ενσωματώνει την ανάγκη να αποφύγουμε συχνές αλλαγές. Τελικά, ο γενικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του γενικού OEO κόστους το οποίο προέκυψε κατά την διάρκεια ολόκληρης της περιόδου για την οποία οι κυκλοφοριακές συνθήκες είναι σαφείς καθώς και του κόστους που προέκυψε λόγω των αλλαγών στον καλλωπισμό στην εν λόγω χρονική περίοδο.

Επανερχόμενοι στους προηγούμενους προβληματισμούς μας οδηγούμαστε στην παρακάτω διατύπωση:

$$PB_T^w = V_T^w \quad \text{για κάθε } w, T \quad (7)$$

$$\sum_l b_{mn,l,T}^w \leq 1 \quad \text{για κάθε } w, mn, T \quad (8)$$

$$V_T F_T = T_T \quad \text{για κάθε } w, T \quad (9)$$

$$\sum_{sd} f_{l,sd,T} \leq C \quad \text{για κάθε } l, T \quad (10)$$

Περιορισμοί μη αρνητικότητας και ακέραιοι πρέπει να επιβληθούν παρόμοια όπως και στην στατική περίπτωση.

Ο σκοπός για τον οποίο ενδιαφερόμαστε είναι ο ακόλουθος:

$$\min \alpha \left(\int_{T_i}^{T_f} \sum_{sd} \sum_l f_{l,sd,T} dt \right) + \beta \left(\int_{T_i}^{T_f} d(dist_{T \rightarrow T'}) \right),$$

όπου $\alpha(\cdot)$ είναι κάποια συνάρτηση κόστους του ποσού της ηλεκτρονικής δρομολόγησης.

3. Παρακολούθηση οπτικής συμπεριφοράς στα reconfigurable WDM οπτικά δίκτυα με την χρήση subcarrier πολυπλεξίας

3.1 Εισαγωγή

Η παρόρμηση για υψηλού εύρους ζώνης, διαφανή οπτικά δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν την πολύπλεξη διαίρεσης μήκους κύματος (Wave Division Multiplexing) έχει «κεντρίσει» την ανάγκη να αναπτύξουμε νέες τεχνικές για να παρακολουθήσουμε συμπεριφορά του καναλιού και την υποβάθμιση χωρίς να απαιτείται οπτοηλεκτρική-όπτο (OEO) μετατροπή στο μονοπάτι των δεδομένων. Η επίκαιρη παρακολούθηση της συμπεριφοράς των οπτικών δικτύων βασίζεται στα SONET τερματικά στοιχεία γραμμής (Line Terminating Elements) για να προσδιορίσει τον ρυθμό σφάλματος bit (BER) και τον παράγοντα Q τα interleaved bits μέσα στο πλαίσιο SONET ή την απλή απώλεια σήματος (Loss Of Signal) χρησιμοποιώντας παρακολούθηση ισχύος με fiber taps. Αίτια για την υποβάθμιση και διαστρέβλωση του σήματος-προς-θόρυβο υπολογίζονται με την μέτρηση των χαρακτηριστικών των ενεργών και παθητικών στοιχείων οπτικού δικτύου (π.χ. οπτικός ενισχυτής θορύβου, διαστρέβλωση ίνας). Όμως, τα οπτικά δίκτυα της επόμενης γενιάς θα είναι δυναμικά (π.χ. δυναμική δρομολόγηση μήκους κύματος) και τα σήματα θα διασχίζουν διαφορετικά, σύνθετα μονοπάτια αποτελούμενα από ίνες, ενισχυτές, οπτικούς add/drop πολυπλέκτες, οπτικές διασυνδέσεις, κλπ. Σε κάθε σημείο μέσα στο δίκτυο, καθένα κανάλι μήκους κύματος θα έχει μία διαφορετική ιστορία μεταφοράς συμπεριλαμβανομένων μονοπατιών και στοιχείων δικτύου τα οποία έχουν διασχιστεί. Καθώς τα μήκη κύματος προστίθενται και αφαιρούνται δυναμικά από το δίκτυο και διακόπτονται μεταξύ διαφορετικών ινών η ιστορία μεταφοράς θα αλλάζει δυναμικά. Αυτές οι δυναμικές αλλαγές θα προκαλέσουν επίσης την ανάγκη για τεχνικές προσαρμοστικής αντιστάθμισης για την εξισορρόπηση του κέρδους, την αντιστάθμιση χρωματικής διασποράς και την κατάσταση αντιστάθμισης πόλωσης διασποράς (Polarization Mode Dispersion). Παρακολούθηση της λειτουργίας η οποία παρέχει ανατροφοδότηση (feedback) για κλειστό έλεγχο βρόγχου των στοιχείων αντιστάθμισης θα είναι κρίσιμη. Επιπρόσθετα, τμηματική και υποβάθμιση ίνας καθώς και περιβαλλοντικές αλλαγές θα καταστήσουν πολύ δύσκολο τον χειρισμό αυτών των δικτύων βασισμένων σε στατιστικά χαρτογραφημένα στοιχεία δικτύου και ιδιότητες ίνας.

Η παρακολούθηση της οπτικής συμπεριφοράς (Optical Performance Monitoring) είναι μία προσέγγιση η οποία επιτρέπει την μέτρηση της «υγείας» του καναλιού και την υποβάθμιση χωρίς γνώση της προέλευσης ή της ιστορίας μεταφοράς των δεδομένων. Απευθείας μετρήσεις των, για παράδειγμα, BER είναι δύσκολες καθώς τα σχέδια (patterns) των δεδομένων δεν είναι πραγματικά τυχαία και μόνο ένα μικρό ποσοστό της οπτικής ισχύος μπορεί να παρακολουθηθεί χωρίς υποβάθμιση του διαπερνώντος σήματος. Ακόμη ικανοποιητική ισχύς πρέπει να είναι διαθέσιμη προκειμένου η παρακολούθηση να είναι ικανή να αποδώσει το ίδιο καλά στο τελικό σημείο-παραλήπτη για τον προσδιορισμό του BER. Μία εναλλακτική προσέγγιση είναι η παρακολούθηση διάφορων ιδιοτήτων των δεδομένων (π.χ. χρωματική διασπορά, PMD, crosstalk, jitter, λόγος εξάλειψης, ισχύς καναλιού, SNR) ενδεικτικών της υποβάθμισης του καναλιού. Ίσως, επίσης, είναι επιθυμητό να χαρακτηρίσουμε τις παραμέτρους ενός καναλιού δεδομένων για διορθωτικά μέτρα (π.χ. Dispersion compensation) ή για σκοπούς διαχείρισης δικτύου όπως να υποβιβάσουμε τον ρυθμό bits ενός καναλιού ή να αναφέρουμε την υποβάθμιση στο σύστημα διαχείρισης δικτύου (Network Management System) για αντιστοίχιση συναγερμών και λαθών.

Κατά την προσέγγιση OPM, η τεχνική παρακολούθησης πρέπει να δουλεύει πάνω σε ένα σήμα το οποίο έχει διασχίσει το οπτικό μονοπάτι δεδομένων του οποίου η «υγεία» πρέπει να προσδιορισθεί. Τα πολυπλεγμένα (SCM) σήματα με ρόλο υπομεταφορέα είναι ένας υποψήφιος υποσχόμενος να εκπληρώσει αυτήν την απαίτηση καθώς μπορούν να τοποθετηθούν κοντά σε κάθε οπτικό μεταφορέα (optical carrier) και ηλεκτρικά είτε εντός εύρους (in-band) ή εκτός εύρους (out of band). Χρησιμοποιώντας τεχνικές SCM το σήμα μπορεί να παρακολουθηθεί χωρίς την ανάγκη να ανιχνεύσουμε τα δεδομένα του βασικού εύρους και παράλληλα διατηρώντας ένα ισχυρό συσχετισμό με τους μηχανισμούς

υποβάθμισης μεταφοράς.Επιπλέον,το SCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεταφέρει πληροφορίες ελέγχου σε ένα δίκτυο με μεταστρεφόμενα(switched) κυκλώματα ή να δώσει πληροφορίες ετικέτας σε αρχιτεκτονικές πακέτου[11]-[13].

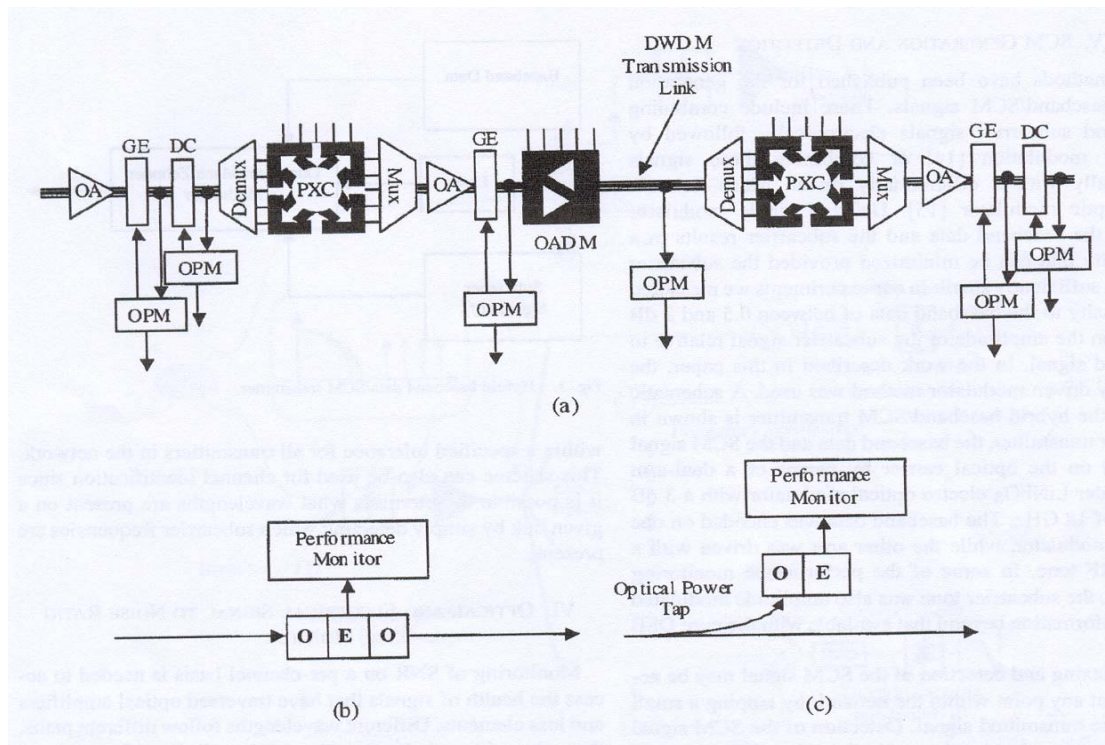
Άλλες τεχνικές για να μετρήσουμε και να ελέγξουμε πληροφορίες σε ένα WDM οπτικό δίκτυο έχουν μελετηθεί και υλοποιηθεί συμπεριλαμβανομένων της in-band[και out-of-band σηματοδότησης σε ξεχωριστό έλεγχο μήκους κύματος.Σε σύγκριση με την μετάδοση πληροφορίας σε ξεχωριστό μήκος κύματος,η προσέγγιση sub carrier μήκους κύματος υποστηρίζει καταναμημένο έλεγχο δικτύου με σύγχρονη επανάκτηση του προσδιορισμού του μήκους κύματος,της ισχύος του μήκους κύματος και του ελέγχου δεδομένων σε κοινό κύκλωμα.Οι μερίδες υπομεταφορέων των αναμεταδοτών και των δεκτών μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας χαμηλού κόστους μονολιθικά-μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα(Monolithic-Microwave Integrated Circuit (MMIC)) τα οποία έχουν σχεδιασθεί για ασύρματες τηλεπικοινωνίες ή απλές fiber-optic τεχνικές.Πιθανοί περιορισμοί στο OSCM περιλαμβάνουν μη-γραμμικότητες ίνας και διασπορά και ανιχνευτή κορεσμού.Ωστόσο,συνομιλία(crosstalk) λόγω τεσσάρων κυμάτων πολύπλεξης[15] είναι χαμηλή καθώς υπάρχει ένας μονό υπομεταφορέας ανά μήκος κύματος και η σχετική ισχύς του υπομεταφορέα είναι πολύ λιγότερη από του base band στοιχείου του οπτικού σήματος.Ακύρωση και εξασθένηση της σηματοδότησης λόγω της διασποράς μπορούν να υπερπηδηθούν με χρήση συμπιεσμένων δεκτών υπομεταφορέα όπως περιγράφεται στο [16] και στις τεχνικές διαμόρφωσης μονής πλευρικής συχνότητας subcarrier[17].Η παρακολούθηση πολλών καναλιών υπομεταφορέα με την χρήση μονού φωτοανιχνευτή μπορεί να επιτευχθεί με σχεδιασμό νέων.υψηλής ισχύος μήκους κύματος μετάδοσης φωτοανιχνευτών(photodetector) [18].

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφουμε αρκετές τεχνικές για την παρακολούθηση παραμέτρων-κλειδιών των οπτικών σημάτων χρησιμοποιώντας SCM σήματα.Ακόμα,παρουσιάζονται τεχνικές για την παρακολούθηση WDM καναλιών ισχύος,οπτικού SNR και διασποράς.Το περιεχόμενο αυτού του κεφαλαίου περιγράφει ένα σύνολο από οπτικές και μετρήσεις υπομεταφορέα οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της «υγείας» WDM εύρους ζώνης καναλιών.

3.2 Παρακολούθηση οπτικής απόδοσης

Τα μελλοντικά WDM οπτικά δίκτυα θα κάνουν χρήση της δρομολόγησης δυναμικού μήκους κύματος για να υλοποιήσουν μονοπάτια(lightpaths) [19],[20] μέσω οπτικών κόμβων χρησιμοποιώντας στοιχεία όπως φωτονικές(photonic) διασυνδέσεις(PXCs),οπτικούς add/drop πολυπλέκτες(OADMs),οπτικούς ενισχυτές(OA),προσαρμοζόμενους ισοσταθμιστές κέρδους(GEs),και στοιχεία αντιστάθμισης διασποράς,όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5(a).Είναι αναμενόμενο ότι η οπτική μετατροπή(switching) αυτών των μονοπατιών θα έχει θετική επίδραση στο κόστος,στην αξιοποίηση του δικτύου και στην διαχείριση του στρώματος δικτύου[21] με τον ίδιο τρόπο που είχαν οι erbium-doped fiber ενισχυτές(EDFAs) στην γενιά των γραμμών μετάδοσης.

Ένα σημαντικό θέμα στην διαχείριση και στην επιβιωσιμότητα(survivability) των δικτύων είναι η ικανότητα να μετρούμε την απόδοση λειτουργίας των οπτικών δεδομένων,να ανιχνεύουμε την υποβάθμιση και τις αποτυχίες και να παρέχουμε τα μέσα για τον εντοπισμό και την απομόνωση των λαθών.Η οπτική παρακολούθηση της απόδοσης(OPM) παρεκκλίνει από τις παραδοσιακές προσεγγίσεις σε αρκετούς τρόπους.Τώρα,οι παράμετροι γραμμής(π.χ.,διασπορά,απώλεια) ποσοτικοποιούνται σε μία βάση γραμμή-προσ-γραμμή,τυπικά κάτω από στατικές συνθήκες.Η προτεινόμενη OPM προσέγγιση μετράει την κατάσταση των σημάτων σε διάφορα σημεία μέσα στο δίκτυο χωρίς την λεπτομερή γνώση του μονοπατιού ή των δικτυακών στοιχείων και γραμμών τις οποίες διασχίζει σε ένα πραγματικού χρόνου δυναμικό περιβάλλον.Μόνο οι συνέπειες της υποβάθμισης και της διαστρέβλωσης του SNR μετρούνται και αξιοποιούνται για τον προσδιορισμό της απόδοσης λειτουργίας του καναλιού.Αυτή η προσέγγιση απεικονίζεται στο Σχήμα 5(a) όπου διάφορα OPM στοιχεία χρησιμοποιούνται για να μετρήσουμε σχετικές παραμέτρους για τα προσαρμοζόμενα δικτυακά στοιχεία και την ευρύτερη κατάσταση των DWDM σημάτων.



Σχήμα 5:(a)Απεικόνιση επανασχεδιασμένου(reconfigurable) οπτικού δικτύου με διάφορα στοιχεία και τοποθέτηση των OPM στοιχείων.Παρακολούθηση απόδοσης με χρήση (b) OEO επαναγέννηση(regeneration) και (c) οπτικού ενισχυτή «βρύσης»(tap).

Ιστορικά, η απαίτηση να ανακτησουμε bits σε κάθε δικτυακό στοιχείο έχει επηρεάσει ολοκληρωτικά την αρχιτεκτονική δικτύων. Παραδοσιακοί OEO αναγεννητές (regenerators), που απεικονίζονται στο Σχήμα 5(b), παρείχαν τα μέσα για να αναλύσουμε bits με διάφορα ανταλλαγές όσον αφορά το κόστος, την συνθετότητα, την εξελιξιμότητα και την αξιοπιστία των WDM σημείων επαναδημιουργίας (regeneration). Ο οπτικός, πολυκαναλικός ενισχυτής είναι ένα παράδειγμα DWDM δικτυακών στοιχείων ο οποίος παρέχει πλεονεκτήματα τα οποία υπερνικούν την ανάγκη να κοιτάζουμε τα bits. PXSs και OADMs θα χρησιμοποιηθούν για να καλλωπίσουμε (groom) μήκη κύματος και έχουν την δυνατότητα να απαλύνουν την ανάγκη το OEO να τερματίζει κάθε μονοπάτι σε κάθε δικτυακό στοιχείο. Η OPM προσέγγιση πιο στενά ακολουθεί την διάταξη στο Σχήμα 5(c), όπου ένα κομμάτι της οπτικής ισχύος μετακινείται από την ίνα και μετατρέπεται σε ηλεκτρονικό σήμα για την παρακολούθηση της λειτουργίας μετά την πιθανή επεξεργασία οπτικού σήματος. Το πρόβλημα το οποίο ανακύπτει, όταν προσπαθούμε να υλοποιήσουμε την προσέγγιση στο Σχήμα 5(c), προέρχεται από την ανάγκη να μετρήσουμε την απόδοση λειτουργίας με την ελάχιστη παρενόχληση στα σήματα μέσα στην ίνα. Η OE διεπαφή πρέπει να έχει καλύτερη ευαισθησία από έναν λήπτη που χρησιμοποιείται για να επανορθώσει την ροή σηματοδότησης. Αυτό είναι εφικτό εάν ο λήπτης είναι οπτικά προενισχυμένος και οι απώλειες ροής καθώς και η διαστρέβλωση είναι περιορισμένες.

Η παράμετρος BER του καναλιού είναι μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους προς μέτρηση και είναι γενικά η πιο δύσκολα μετρήσιμη απευθείας για ένα σήμα στην έξοδο μίας πηγής (tap) ισχύος. Άλλες ιδιότητες του σήματος-εκτός από την BER-οι οποίες μπορούν να μετρηθούν χρησιμοποιώντας την OPM είναι:

- παρακολούθηση SNR και του παράγοντα Q
- παρακολούθηση λόγου εξάλειψης
- παρακολούθηση ισχύος και απώλειας
- παρακολούθηση διασποράς (χρωματική και PMD)

- παρακολούθηση μη γραμμικής διαστρέβλωσης
- εξίσωση καναλιού
- παρακολούθηση λογομαχίας
- εγγραφή μηκών κύματος
- παρακολούθηση κατάστασης δικτύου
- παρακολούθηση ρολογιού σε 2R αναγεννητές
- παρακολούθηση ποσοστού bit(bit rate)

Μπορεί να γίνει υπολογισμός του BER από παραμέτρους όπως ο παράγοντας Q εάν η «περάτωση ματιών»(eye closure) οφείλεται σε Gaussian πηγές θορύβου μόνο[22]. Η παρουσία non-Gaussian πηγών θορύβου, λογομαχίας και μηχανισμών και μηχανισμών διαστρέβλωσης θα οδηγήσει σε σφάλματα στον υπολογισμό του BER χρησιμοποιώντας τον παράγοντα Q. Ίσως είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε άλλους παράγοντες υποβάθμισης SNR και διαστρέβλωσης σήματος για να υπολογίσουμε το BER, όπως δείχνεται στο Σχ.6. Το δεύτερο δεν είναι αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου

Οι κύριες αιτίες υποβάθμισης του BER οι οποίες μπορούν να παρακολουθηθούν χρησιμοποιώντας το OPM περιλαμβάνουν:

Θόρυβος: Οφειλόμενος σε τυχαίες διακυμάνσεις του σήματος ο οποίος μπορεί να αντιμετωπιστεί ως Gaussian διαδικασία και δύναται να είναι εξαρτώμενος του επιπέδου σήματος. Παραδείγματα αποτελούν ο οπτικός ενισχυτής θορύβου και ο laser θόρυβος.

Διαστρέβλωση: Προκαλούμενη από μη γραμμικότητες ή επιδράσεις διασποράς ίνας οι οποίες ίσως είναι εξαρτώμενες από το επίπεδο του σήματος και μπορούν να οδηγήσουν σε bursty σφάλματα και BER πατώματα(floors). Τέτοια παραδείγματα είναι ο laser, οπτικός ενισχυτής, οι μη γραμμικότητες ίνας, bit δίοδος laser εξαρτώμενης απόκρισης, παραλήπτης bit εξαρτώμενης απόκρισης, χρωματική διασπορά και διασπορά κατάστασης πόλωσης, in-band και out-band λογομαχία και προκαλούμενη φάση έντασης θορύβου.

Λογομαχία: Είναι σημαντικό να τονίσουμε πως interferometric και μη γραμμική λογομαχία είναι σχέδια επίδρασης bit που ίσως μπορούν ή δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν σαν θόρυβος. Αυτό εξαρτάται από τον αριθμό των interfering όρων και την φύση των interfering σημάτων. Άλλα θέματα τα οποία πρέπει να εξετασθούν αναφορικά με κάθε τεχνική παρακολούθησης της απόδοσης συμπεριλαμβάνουν αυτά που αναφέρονται παρακάτω.

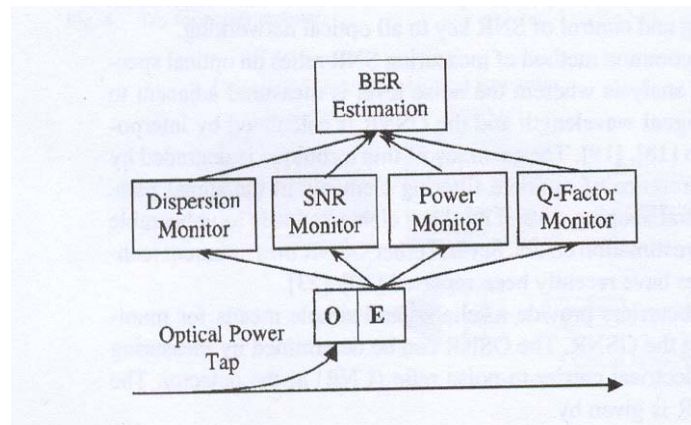
Ανίχνευση ισχύος: Τεχνικές για τον προσδιορισμό της απώλειας σήματος και των μεταβολών στην οπτική ισχύ για την εξισορρόπηση ισχύος. Η ανίχνευση ισχύος πρέπει να διακρίνει ανάμεσα στην απώλεια καναλιού και την μετάδοση μιας «σειράς από μηδενικά».

Παρακολούθηση συχνότητας: Στοιχεία εκλεκτικής συχνότητας και ευκίνητες πηγές συχνότητας πρέπει να είναι μέσα στο 1% του εύρους ζώνης του καναλιού. Αυτό το πρότυπο πρέπει να εφαρμοσθεί για σταθεροποίηση των εξαρτώμενων από την συχνότητα στοιχείων.

3.3 Σήματα υπομεταφορέων για παρακολούθηση

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρουμε αρκετές OPM τεχνικές που βασίζονται σε οπτικούς υπομεταφορείς πολλαπλασιασμού(multiplexing) ή OSCM. Η δύναμη αυτής της προσέγγισης έγκειται στην χρήση διπλής πλευρικής ζώνης σήματος μετάδοσης και στο γεγονός ότι αυτά τα σήματα ταξιδεύουν το ολοκληρωμένο οπτικό μονοπάτι με το προς μέτρηση σήμα ζωνών βάσης. Τα σήματα υπομεταφορέων μπορούν να ανακτηθούν χρησιμοποιώντας τεχνικές οι οποίες περιγράφονται παρακάτω που είναι «άνοσες»(immune) στην διασπορά ίνας προκληθείσας εξασθένησης. Επειδή μια μοναδική συχνότητα υπομεταφορέα μπορεί να διατεθεί σε κάθε μήκος κύματος, ένα ολοκληρωμένο σύνολο υπομεταφορέων πολλαπλασιασμένων σημάτων μπορεί να ανακτηθεί από ένα WDM οπτικό ρεύμα

χρησιμοποιώντας ένα μονό φωτοανιχνευτή. Η χρήση των υπομεταφορέων μπορεί να αντιπαρατεθεί άλλες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν χαμηλής συχνότητας πειραματικούς τόνους για την εγγραφή μήκους κύματος [23]. Ωστόσο, οι πειραματικοί τόνοι περιορίζουν το ποσό της πληροφορίας που μπορεί να μεταφερθεί σε αρκετές δεκάδες KHz, περιορίζει τον αριθμό των τόνων που μπορεί να τοποθετηθεί κάτω από ένα ψηφιακό σήμα καθώς και την ανάλυση με την οποία συγκεκριμένες παράμετροι όπως η διασπορά μπορούν να μετρηθούν.

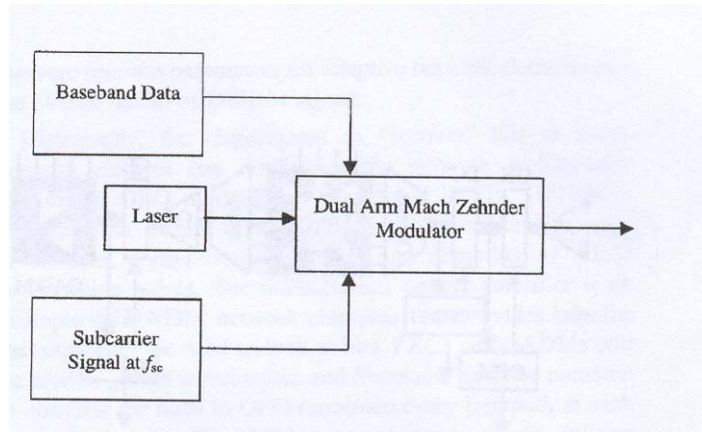


Σχήμα 6: Πιθανή χρησιμοποίηση διάφορων OPM metrics για τον υπολογισμό του BER

3.4 Παραγωγή και ανίχνευση SCM

Αρκετές μέθοδοι έχουν δημοσιευθεί για την παραγωγή SCM σημάτων υβριδικής ζώνης βάσης. Αυτές περιλαμβάνουν ηλεκτρονικό συνδυασμό ζώνης βάσης και σημάτων υπομεταφορέων ακολουθούμενα από διαμόρφωση laser [24] ή ηλεκτρο-οπτικό συνδυασμό αυτών των σημάτων από έναν διαφορικά οδηγούμενο Mach-Zahnder ολοκληρωμένο, οπτικό διαμορφωτή [25]. Χρησιμοποιώντας έναν μονό διαμορφωτή για να παράγουμε τα δεδομένα της ζώνης βάσης και έναν υπομεταφορέα έχει ως αποτέλεσμα μία ποινική ρήτρα ισχύος (power penalty) η οποία μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την προϋπόθεση ότι το εύρος του υπομεταφορέα είναι αρκετά μικρό. Κατά την διάρκεια των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης, που παρουσιάζεται σε αυτό το κομμάτι της εργασίας, μετρήθηκε ένα σφάλμα ισχύος (power penalty) στην ζώνη βάσης των δεδομένων ανάμεσα στα 0.5 και 2dB αναλόγως του εύρους του σήματος υπομεταφορέα σχετικά με το σήμα της ζώνης βάσης. Στα πλαίσια της εργασίας που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο έγινε χρήση της μεθόδου του διαφορικά οδηγούμενου διαμορφωτή. Ένα σχηματικό διάγραμμα του πομπού SCM/υβριδικής ζώνης βάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 7. Στην δική μας συσκευή αποστολής σημάτων, τα δεδομένα της ζώνης βάσης και το SCM σήμα κωδικοποιούνται στον οπτικό μεταφορέα με την βοήθεια ενός διπλού βραχίονα, ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή Mach-Zahnder με ένα 3dB εύρος ζώνης των 18GHz. Τα δεδομένα της ζώνης βάσης κωδικοποιήθηκαν στον ένα βραχίονα του διαμορφωτή, ενώ ο άλλος βραχίονας καθοδηγούταν από έναν 16.7GHz RF τόνο. Σε μερικά από τα πειράματα ελέγχου απόδοσης ο τόνος υπομεταφορέα ήταν επίσης διαμορφωμένος κατά πλάτος έτσι ώστε να παρέχει πληροφορίες πέρα από αυτές που είναι διαθέσιμες με έναν καθαρά DBM υπομεταφορέα.

Η αποδιαύλωση (demultiplexing) και η ανίχνευση του SCM σήματος μπορούν να επιτευχθούν σε κάθε σημείο μέσα στο δίκτυο με το να τρυπήσουμε (tapping) ένα μικρό κομμάτι του μεταδιδόμενου σήματος. Η ανίχνευση του SCM σήματος εμπεριέχει είτε ηλεκτρικό φιλτράρισμα bandpass μετά την φωτοανίχνευση ή οπτικό προ-φιλτράρισμα πριν την φωτοανίχνευση. Για την DSB μετάδοση υπομεταφορέα το οπτικό προ-φιλτράρισμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταστολή του μεταφορέα πριν την ανίχνευση



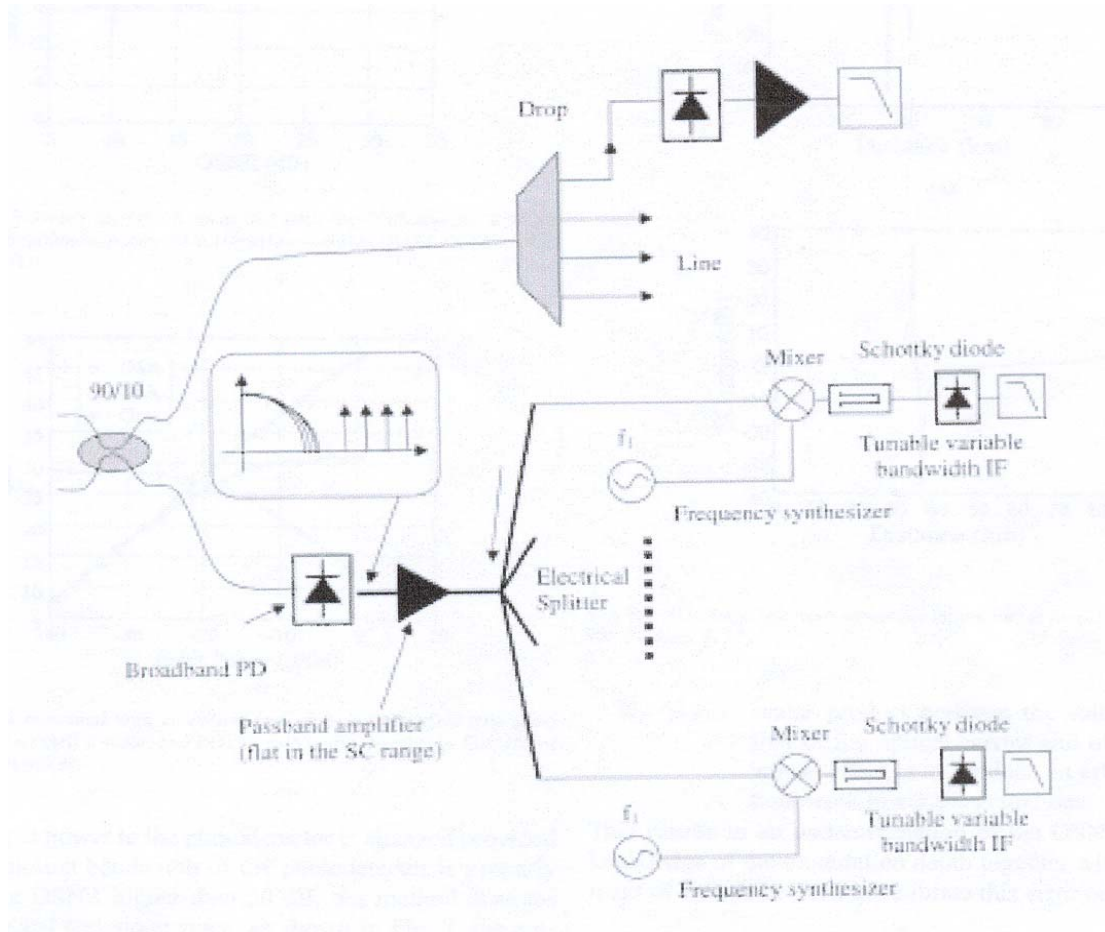
Σχήμα 7:Υβριδική ζώνη βάσης δεδομένων/SCM συσκευή αποστολής σημάτων

προκειμένου να υπερκεράσουμε την εξασθένιση του σήματος η οποία προκαλείται από την διασπορά ινών[26].

3.5 Προσδιορισμός καναλιών και παρακολούθηση ισχύος

Σημαντικές παράμετροι για τα οπτικά δίκτυα αποτελούν η γνώση εκείνων των μηκών κύματος που είναι πρόσφατα σε μία WDM σύνδεση καθώς και η γνώση της σχετικής τους ισχύος.Οι οπτικοί ενισχυτές τείνουν να ευνοούν κάποια κανάλια μηκών κύματος σε βάρος κάποιων άλλων με το να εισάγουν διαφορές ισχύος καθώς μικρές διαφορές στην ισχύ εισέρχονται σε ένα ενισχυτή για να μεγιστοποιηθούν στην συνέχεια,γιατί πολλοί ενισχυτές είναι συχνά συγκεντρωμένοι.Ακόμα και προσεκτικά σχεδιασμένες και ισιωμένες(flattened) συνδέσεις μηκών κύματος μπορούν να έχουν προβλήματα τα οποία οφείλονται σε γερασμένα στοιχεία.

Μία «βρύση»(tap) οργάνων ελέγχου και παρακολούθησης της οπτικής ισχύος [16] απεικονίζεται στο Σχήμα 8.Σε αυτό το σχήμα δείχνεται μια «βρύση»(tap) ικανή για την παρακολούθηση 4 μηκών κύματος ταυτόχρονα.Με αυτήν την προσέγγιση,κάθε μήκος κύματος μεταφέρει μαζί του ένα μοναδικό DSB υπομεταφορέα συχνότητας.Αυτό επιτρέπει την παρακολούθηση όλων των καναλιών ισχύος χωρίς την ανάγκη για αποδιαύλωση στον οπτικό χώρο και ξεχωριστούς ανιχνευτές για κάθε μήκος κύματος.Εφόσον η ισχύς του υπομεταφορέα σχετικά με την ισχύ του καναλιού είναι δεδομένη στην συσκευή αποστολής σημάτων, οι μεταβολές στη ισχύ του καναλιού-οι οποίες οφείλονται σε κέρδος ή απώλεια εξαρτώμενα από το μήκος κύματος-μπορούν να ανιχνευθούν άμεσα σαν μεταβολές στην ισχύ του υπομεταφορέα.Μία παρακολούθηση της ισχύος αυτού του τύπου έχει χρησιμοποιηθεί μέσα σε ένα βρόχο ανάδρασης με οπτικό-ακουστικό συντονιζόμενο(tunable) φίλτρο για να εξισορροπήσει την ισχύ ανά μήκος κύματος σε WDM πείραμα[28].Είναι απαραίτητο η σχέση ανάμεσα στην ισχύ του οπτικού σήματος και την RF ισχύ στο αντίστοιχο σήμα υπομεταφορέα να είναι δεδομένη μέσα σε ακριβή ανοχή για όλες τις συσκευές εκπομπής στο δίκτυο.Αυτό το σχέδιο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό καναλιών επειδή είναι δυνατόν να καθορίσουμε ποια μήκη κύματος είναι παρόντα σε μία δεδομένη σύνδεση με το να ανιχνεύσουμε απλά ποιες συχνότητες υπομεταφορέων είναι παρούσες.



Σχήμα 8: «Βρύση»(tap) για όργανο ελέγχου ισχύος

3.6 Οπτική και ηλεκτρική παρακολούθηση του λόγου σήματος προς θόρυβο

Η παρακολούθηση του λόγου σήματος προς θόρυβο(SNR) ανά κανάλι είναι απαραίτητη για να έχουμε πρόσβαση στην «υγεία» των σημάτων τα οποία έχουν περάσει μέσω οπτικών ενισχυτών και στοιχείων απώλειας. Διαφορετικά μήκη κύματος ακολουθούν διαφορετικά μονοπάτια μέσω διαφόρων στοιχείων με κέρδος ή απώλεια που εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Σαν συνέπεια το SNR ίσως να ποικίλλει από κανάλι σε κανάλι και από σημείο σε σημείο μέσα στο δίκτυο καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο την παρακολούθηση και τον έλεγχο του SNR παράγοντα κλειδί για όλα τα οπτικά δίκτυα.

Μία κοινή μέθοδος της μέτρησης του SNR βασίζεται στην οπτική ανάλυση φάσματος όπου το επίπεδο θορύβου θα μετρηθεί δίπλα στο μήκος κύματος του σήματος και το OSNR υπολογίζεται με παρεμβολή [29],[30]. Η ακρίβεια αυτής της τεχνικής υποβαθμίζεται από την παρουσία πολλαπλών στοιχείων φιλτραρίσματος στο μονοπάτι του καναλιού. Η φασματική διαμόρφωση που προκαλείται από αυτά τα στοιχεία οδηγεί σε αφόρητα λάθη υποτίμησης. Πρόσφατα, έχουν αναφερθεί και άλλες τεχνικές μέτρησης του OSNR [31]-[34].

Οι υπομεταφορείς παρέχουν ένα αξιόπιστο και απλό μέσο για την παρακολούθηση του OSNR. Το OSNR μπορεί να προσδιορισθεί εάν μετρήσουμε το λόγο του ηλεκτρικού μεταφορέα προς θόρυβο(carrier-to-noise ratio(CNR)) στον ανιχνευτή. Το OSNR δίνεται από την σχέση:

$$OSNR = (B_{ESA} * CNR)^{1/2} / (\Delta\nu * m^2)^{1/2} \quad (1)$$

,όπου

CNR λόγος μεταφορέα προς θόρυβο όπως μετρήθηκε με έναν ηλεκτρικό αναλυτή φάσματος με εύρος ζώνης ανάλυσης B_{ESA} ,

$\Delta\nu$ οπτικό εύρος ζώνης,

in το βάθος διαμόρφωσης του υπομεταφορέα.

Η εξίσωση (1) ισχύει όταν ο θόρυβος του φωτοανιχνευτή είναι αμελητέος και ο οπτικός θόρυβος «εξουσιάζεται» από τον «αυθόρμητο» ενισχυτή χτυπήματος θορύβου (amplifier spontaneous-spontaneous beat noise). Το εύρος ζώνης της ανάλυσης του αναλυτή φάσματος είναι πιθανό να ελαττωθεί προκειμένου να βελτιώσουμε την ακρίβεια και να μεγαλώσουμε την ευαισθησία της παρακολούθησης. Αυτό αυξάνει τον χρόνο της μέτρησης.

Όταν η ισχύς εισόδου είναι πολύ χαμηλή, ο ηλεκτρικός θόρυβος του φωτοανιχνευτή είναι σημαντικός και πρέπει να έχει βαθμολογηθεί-καλιμπραριστεί (calibrated). Με αυτό το καθεστώς η εξίσωση (1) είναι ακόμα έγκυρη αλλά το αποτελεσματικό (effective) CNR δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{CNR}_{\text{eff}} = [\text{CNR}^{-1} - (N_{\text{PD}} B_{\text{ESA}}) / P_{\text{SCM}}]^{-1} \quad (2)$$

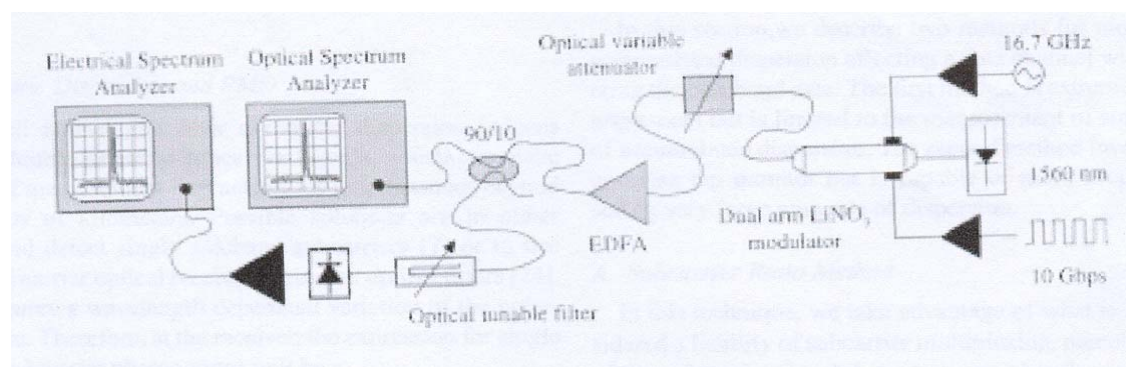
,όπου

N_{PD} είναι ο θόρυβος της φασματικής πυκνότητας ισχύος του φωτοανιχνευτή.

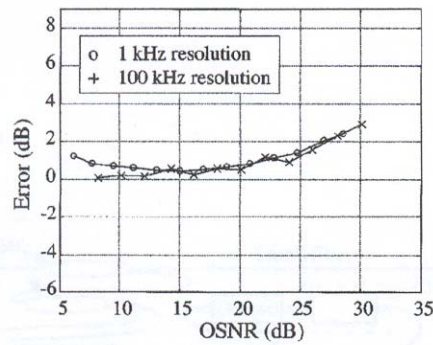
A. Πειραματικά αποτελέσματα

Η πειραματική συνδεσμολογία απεικονίζεται στο Σχήμα 9 και η αρχιτεκτονική της συσκευής αποστολής σημάτων που φαίνεται στο Σχήμα 8 χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του πολλαπλασιασμένου (multiplexed) DSB σήματος υπομεταφορέα. Ένας οπτικός, μεταβλητός εξασθενητής χρησιμοποιείται για να ελέγξουμε την ισχύ που εισέρχεται στο EDFA έτσι ώστε να ποικίλλει ο λόγος του σήματος εξόδου προς τον θόρυβο. Ένα μικρό κομμάτι της ισχύος του σήματος διοχετεύεται (tapped out) μέσω ενός 90/10 ζεύκτη και ένα φίλτρο (tunable) χρησιμοποιείται για να επιλέξουμε το σωστό κανάλι. Ένας φωτοανιχνευτής υψηλής ταχύτητας ευρείας ζώνης, συνοδευμένος από έναν front-end ενισχυτή, χρησιμοποιείται για οπτοηλεκτρονική μετατροπή. Τελικώς, ένας ηλεκτρικός αναλυτής φάσματος (ESA) χρησιμοποιείται για να μετρήσουμε το CNR. Το OSNR, επίσης, μετράται με έναν συμβατικό, οπτικό αναλυτή φάσματος.

Τα αποτελέσματα της μέτρησης αναφέρονται στο Σχήμα 10. Αυτή η τεχνική μπορεί να πετύχει πρόβλεψη για το OSNR με λιγότερο από 2dB σφάλμα για εύρος περίπου 25dB και λιγότερο από 1dB όπου το OSNR είναι λιγότερο από τα 20dB, μία κρίσιμη σειρά. Η μέτρηση είναι ακριβής ακόμα και αν η ισχύς εισόδου στον φωτοανιχνευτή αλλάζει με την προϋπόθεση ότι η ανάλυση του εύρους ζώνης του φωτοανιχνευτή είναι κατάλληλα προσαρμοσμένη. Εάν το OSNR είναι υψηλότερο από τα 30 dB τότε η μέθοδος μας αποκλίνει από την οπτική τεχνική γιατί, όπως δείχνεται στο Σχήμα 11, ο ενισχυτής αρχίζει να «διαποτίζει» (saturate) και η υπόθεση που στηρίζει την εξίσωση (1) δεν είναι πλέον έγκυρη.



Σχήμα 9: Εγκατάσταση (set-up) για έλεγχο OSNR



Σχήμα 10: Σφάλμα στην μέτρηση του OSNR με OSA και ESA.

B. Χρωματική διασπορά και PMD

Είναι γνωστό ότι η χρωματική διασπορά ίνας εισάγει εξασθένηση σε διπλής, πλευρικής ζώνης σήματα υπομεταφορέων, γεγονός το οποίο μπορεί να καταστήσει αυτόν τον τύπο της μέτρησης μη πρακτικό αποστάσεις σύνδεσης οι οποίες εκτείνονται σε αρκετές δεκάδες χιλιόμετρα. Πιθανές λύσεις είναι είτε το να μεταδώσουμε και να ανιχνεύσουμε μονής πλευρικής ζώνης υπομεταφορείς [17] ή να χρησιμοποιήσουμε κατασταλαμένους μεταφορείς οπτικών δεκτών βασισμένων σε οπτικά φίλτρα [35].

Το PMD προκαλεί μία μεταβολή της κατάστασης πόλωσης εξαρτώμενη από το μήκος κύματος. Επομένως, στον δέκτη, η έκφραση για μονής, πλευρικής ζώνης «φωτοπρόσφατο» (photocurrent) υπομεταφορέα θα είναι:

$$I_{SCM}(\vec{p}_0 * \vec{p}_{SCM}) m I_0 \cos(\omega_{SCM} t + \varphi) \quad (3)$$

,όπου

ω_{SCM}

η γωνιακή συχνότητα του υπομεταφορέα

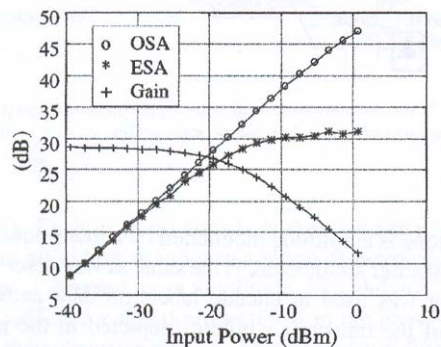
I_0

«φωτοτρέχων» (photocurrent) οπτικός μεταφορέας

$(\vec{p}_0 * \vec{p}_{SCM})$

το εσωτερικό γινόμενο ανάμεσα στις καταστάσεις πόλωσης του οπτικού μεταφορέα και του υπομεταφορέα του οποίου η επίδραση είναι να παράγει μια αποτελεσματική διαμόρφωση βάθους χαμηλότερου του πραγματικού.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια υποτίμηση του OSNR. Μία a priori γνώση του βάθους της διαμόρφωσης μαζί με την μέτρηση του I_0 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξομάλυνση αυτού του σφάλματος.



Σχήμα 11: Μέτρηση του OSNR με οπτικό και ηλεκτρικό αναλυτή φάσματος (αριστερή y κλίμακα) και EDFAs κέρδη (δεξιά y κλίμακα) ως συνάρτηση της ισχύς εισόδου EDFA.

3.7 Έλεγχος χρωματικής διασποράς

Σε αυτήν την παράγραφο θα περιγράψουμε δύο μεθόδους για την παρακολούθηση της συσσωρευμένης διασποράς που επηρεάζει ένα κανάλι δεδομένων χωρίς αποκατάσταση των δεδομένων βασικής ζώνης. Η πρώτη μέθοδος είναι εξαιρετικά απλή για να εφαρμοσθεί αλλά περιορίζεται στην μέτρηση μικρών ποσοτήτων συσσωρευμένης διασποράς. Η δεύτερη μέθοδος εμπλέκει μια πιο σύνθετη παρακολούθηση ελέγχου «βρύσης»(tap) αλλά είναι ικανή για πιο ακριβή μέτρηση πολύ μεγάλων ποσοτήτων διασποράς.

A. Μέθοδος αναλογίας(ratio) υπομεταφοράς

Μέσω αυτής της τεχνικής επωφελούμαστε αυτού που συνήθως θεωρείται ως ευθύνη του υπομεταφορέα πολλαπλασιασμού(multiplexing), δηλαδή την εξασθένιση του σήματος υπομεταφορέα η οποία συμβαίνει ως αποτέλεσμα της συσσωρευμένης διασποράς. Καθώς το σήμα του υπομεταφορέα περνάει μέσα από μια διασπορά σύνδεσης ινών, οι πλευρικές ζώνες του υπομεταφορέα υφίστανται μια σχετική φάση καθυστέρησης η οποία αυξάνει με την συσσωρευμένη διασπορά. Αυτή η καθυστέρηση φάσης μειώνει την λαμβανόμενη ισχύ του υπομεταφορέα όπως αυτή μετράται στον ανιχνευτή. Εάν οι πλευρικές ζώνες συσσωρεύουν μια συνολική καθυστέρηση φάσης τότε η μετρούμενη ισχύ στον ανιχνευτή μηδενίζεται. Σε μια απλή έκταση ινών, με απώλεια ανά μονάδα μήκους α , μήκος L και συντελεστή διασποράς D , ένα σήμα υπομεταφορέα με αρχική ισχύ A και συχνότητα f θα έχει μια ανιχνεύσιμη ισχύ ίση με

$$P = Ae^{-\alpha L} \cos^2(\pi DL \lambda^2 f^2 / c) \quad (4)$$

όπου A είναι μια άγνωστη σταθερά που υπολογίζεται για τα στοιχεία απώλειας και κέρδους που το σήμα υφίσταται.

Η λαμβανόμενη ισχύς θα γίνει μηδέν όταν

$$DL = C / (2\lambda^2 f^2) \quad (5)$$

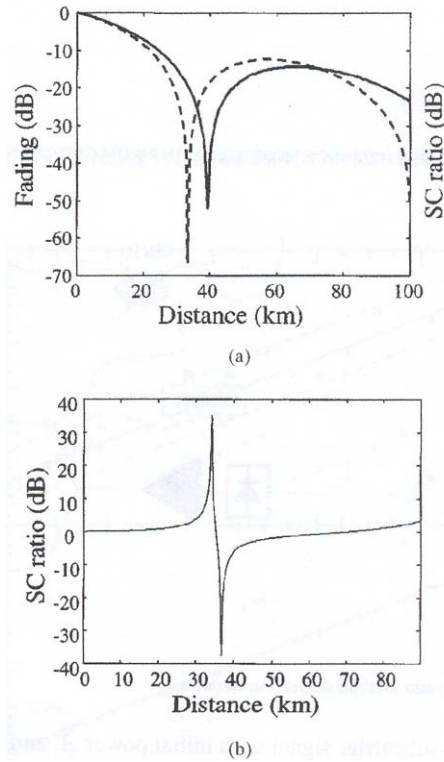
Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι, οι σχέσεις (4) και (5) είναι έγκυρες όταν το σήμα του υπομεταφορέα δεν είναι τερευτισμένο(chirped). Μετά την εξέταση της (5) βλέπουμε ότι σήματα υπομεταφορέων υψηλότερης συχνότητας εξασθενίζουν γρηγορότερα (με λιγότερη συσσωρευμένη διασπορά) από ότι τα σήματα χαμηλότερης συχνότητας. Για να επεξηγήσουμε αυτήν την επίδραση, η σχέση (4) παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 12(a) ως συνάρτηση του L για συχνότητες υπομεταφορέων των 9.6GHz και 10.4GHz. Αφήνουμε το $\lambda = 1550\text{nm}$, $D = 18\text{ps/nm*km}$ και $\alpha_{dB} = 0.2\text{km}^{-1}$.

Εάν κατασκευάσουμε ένα σήμα υπομεταφορέα στην συσκευή εκπομπής σημάτων το οποίο αποτελείται από δύο συχνότητες υπομεταφορέα f_1 και f_2 τότε είναι δυνατόν να μετρήσουμε την συσσωρευμένη διασπορά που αυτό το σήμα (καθώς και το σήμα δεδομένων ζώνης βάσης) υφίσταται με το να μετρήσουμε, απλά, τον λόγο της ηλεκτρικής ισχύος στην συχνότητα f_1 προς την ισχύ στην συχνότητα f_2 που λαμβάνονται στο σημείο ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε την εξάρτηση της μετρούμενης ισχύος από τον άγνωστο παράγοντα A .

Μια βρύση(tap) οργάνων ελέγχου διασποράς που εφαρμόζει αυτήν την τεχνική φαίνεται στο Σχήμα 13. Η έξοδος του οργάνου ελέγχου της διασποράς δίνεται παρακάτω:

$$R = [\cos^2(\pi DL \lambda^2 f_1^2 / c)] / [\cos^2(\pi DL \lambda^2 f_2^2 / c)], f_1 < f_2. \quad (6)$$

Η εξίσωση (6) παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 12(b) ως συνάρτηση του L με $\lambda = 1550\text{nm}$, $D = 18\text{ps/nm*km}$, $f_1 = 9.6\text{GHz}$ και $f_2 = 10.4\text{GHz}$. Η εξίσωση (6) προσδιορίζει μοναδικά την συσσωρευμένη διασπορά μέχρι το μέγιστο DL , που είναι το πηλίκο $C / (2\lambda^2 f^2)$.

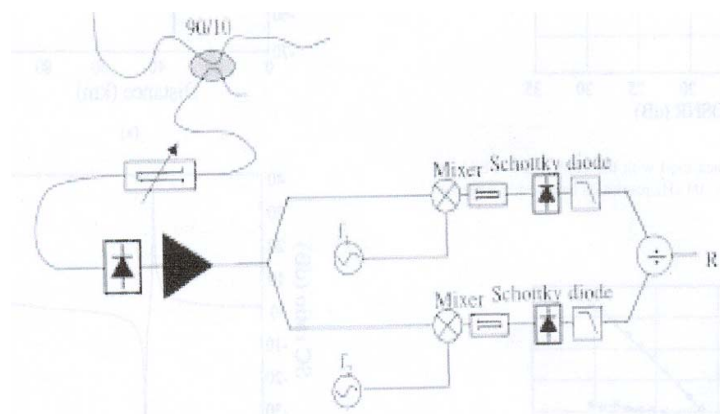


Σχήμα 12: Αποτελέσματα προσομοίωσης για (α) συχνότητες f_1 και f_2 και (β) η αναλογία f_1/f_2 .

B. Μέθοδος οπτικής καταστολής πλευρικών ζωνών συχνότητας

Με αυτήν την τεχνική ένα σήμα υπομεταφορέα DSB συνδυάζεται με τα δεδομένα της βασικής ζώνης στον εκπομπό, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5. Ο τόνος (tone) του υπομεταφορέα είναι διαμορφωμένος κατά πλάτος με την βοήθεια ενός σήματος χαμηλής συχνότητας. Η αρχιτεκτονική του πομπού μετάδοσης είναι η ίδια όπως περιγράφηκε στο [25], όπου χρησιμοποιήθηκε για να κωδικοποιηθεί ετικέτες σε πακέτα δεδομένων. Το φάσμα της εξόδου του πομπού (απεικονίζεται στο Σχ.3) δείχνει την φύση διπλής πλευρικής ζώνης του σήματος του υπομεταφορέα. Όταν το σήμα διαδίδεται μέσω ίνας διασποράς, η ίνα προκαλεί ένα συγγενικό (relative) χρόνο καθυστέρησης ανάμεσα στις πλευρικές ζώνες του υπομεταφορέα που προσδιορίζεται από την σχέση [35]

$$\Delta t = f_{sc}(\lambda^2/c)DL \quad (7)$$



Σχήμα 13: Μέθοδος ελέγχου του λόγου διασποράς του υπομεταφορέα.

Όταν μετρήσουμε την συγγενική καθυστέρηση φάσης ανάμεσα στις πλευρικές ζώνες τότε είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε το επίπεδο της διασποράς (γινόμενο DL) που το σήμα βασικής ζώνης έχει υποστεί.

Προκύπτει καθαρά από την εξίσωση (7) ότι εάν επιλέξουμε μια συχνότητα υπομεταφορέα που είναι μεγάλη συγκριτικά με τον ρυθμό bit των ελλοχευόντων(underlying) δεδομένων τότε είναι εφικτή μία πολύ ακριβής μέτρηση της συσσωρευμένης διασποράς. Δυστυχώς, μέτρηση μόνο της φάσης καθυστέρησης του υπομεταφορέα περιορίζει την μέγιστη διασπορά η οποία μπορεί να μετρηθεί στην περίοδο του σήματος του υπομεταφορέα. Είναι δυνατόν να υπερπηδήσουμε αυτό το όριο στην μέτρηση υψηλών τιμών διασποράς εάν μετρήσουμε την καθυστέρηση που προκαλείται από μία χαμηλής συχνότητας διαμόρφωση που εφαρμόζεται στο σήμα του υπομεταφορέα. Σε αυτήν την περίπτωση ο χρόνος καθυστέρησης ανάμεσα στην διαμόρφωση των ανώτερων και κατώτερων πλευρικών ζωνών δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση[35]

$$\Delta t = 2f_{sc}(\lambda^2/c)DL \quad (8)$$

Με αυτόν τον τρόπο το εύρος της μέτρησης επεκτείνεται σε καθυστερήσεις συγκρίσιμες με την περίοδο της διαμόρφωσης που εφαρμόζεται στο σήμα του υπομεταφορέα και μάλιστα πολύ περισσότερο από ότι στην προηγούμενη περίπτωση.

Η αρχιτεκτονική βρύσης(tap) που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο της συσσωρευμένης διασποράς συνδυάζει αυτές τις δύο τεχνικές προκειμένου να κάνουμε εφικτή την μέτρηση μίας πλατιάς γκάμας διασπορών με υψηλή ανάλυση. Ένα σχηματικό διάγραμμα αυτής της αρχιτεκτονικής φαίνεται στο Σχήμα 14. Συγκεκριμένα, ένα κομμάτι του οπτικού σήματος απομακρύνεται από την ίνα κορμών(trunk fiber), διαιρείται σε δύο και μεταδίδεται μέσω οπτικών φίλτρων τα οποία καταστέλλουν τις ανώτερες και κατώτερες πλευρικές ζώνες αντιστοίχως. Μετά το φιλτράρισμα αμφοτέρωτα τα σήματα ανιχνεύονται και τα δεδομένα της ζώνης βάσης απομακρύνονται χρησιμοποιώντας ηλεκτρικά, ζωνοδιαβατά(band pass) φίλτρα. Καθένα από αυτά τα σήματα διαιρείται περαιτέρω με την μία έξοδο να αποτελεί είσοδο σε έναν ανιχνευτή φάσης και την άλλη έξοδο να κατευθύνεται αποδιαμορφωτή πλάτους. Ο ανιχνευτής φάσης παράγει ένα σήμα ανάλογο προς την διαφορά φάσης ανάμεσα στα σήματα των υπομεταφορέων. Έτσι επιτυγχάνεται μία καλή μέτρηση της διασποράς, όπως εξηγήθηκε νωρίτερα, σύμφωνα με την εξίσωση (7). Οι έξοδοι των αποδιαμορφωτών πλάτους κατευθύνονται σε έναν δεύτερο ανιχνευτή φάσης, ο οποίος παρέχει μία «χονδροειδή» μέτρηση της διασποράς. Η «χονδροειδής» μέτρηση ίσως να χρησιμοποιηθεί για να επιλυθούν ασάφειες φάσης σε μία καλή μέτρηση. Ένα βήμα ανάκτησης ρολογιού είναι απαραίτητο όταν τα δεδομένα κωδικοποιούνται στον υπομεταφορέα. Σε αυτήν την περίπτωση το ανακτηθέν ρολόι αποτελεί την είσοδο σε έναν δεύτερο ανιχνευτή φάσης για να επιτύχουμε την «χονδροειδή» μέτρηση.

Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της εργασίας προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε το θέμα τόσο από την θεωρητική όσο και από την πρακτική του πλευρά. Είναι προφανές ότι τα οπτικά δίκτυα αποτελούν ένα δυναμικό κλάδο με ανεξάντλητες και ενδιαφέρουσες εφαρμογές. Η παράθεση τόσο των πινάκων όσο και των σχημάτων βοήθησε τον αναγνώστη να αντιληφθεί τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που έχουν να κάνουν με την μετάδοση της πληροφορίας στα οπτικά δίκτυα.

Προτείνουμε και καταδείξαμε την έννοια του οπτικού ελέγχου απόδοσης χρησιμοποιώντας οπτικούς υπομεταφορείς όπου η «υγεία»(health) των WDM καναλιών μπορεί να προσδιορισθεί χωρίς την προγενέστερη γνώση της δρομολόγησης των δεδομένων και των στοιχείων του δικτύου τα οποία ένα φωτομονοπάτι(lightpath) διαπερνά. Αυτή η προσέγγιση είναι κρίσιμη για τα επόμενης γενιάς WDM δυναμικώς reconfigurable δίκτυα όπου το ιστορικό της κυκλοφορίας στο οποιοδήποτε σημείο είναι άγνωστο και η εξάρτηση στους OEO αναγεννητές μειώνεται. Οι τεχνικές OPM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναφέρουμε υποβάθμιση και αποτυχίες σε συστήματα διαχείρισης δικτύων όσον αφορά την απομόνωση σφάλματος και την αποκατάσταση του δικτύου. Παρουσιάσαμε πειραματικά

δεδομένα για ένα σύνολο λειτουργιών OPM συμπεριλαμβανομένων του ελέγχου πολυκαναλικής ισχύος, του ελέγχου λόγου οπτικού σήματος προς θόρυβο καθώς και τον έλεγχο της χρωματικής διασποράς. Επίσης, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της παρακολούθησης OSNR με λιγότερο από τα 2dB σφάλμα σε δυναμικό εύρος 25dB. Τέλος, το κεφάλαιο έκλεισε με την παρουσίαση δύο τεχνικών για τον έλεγχο της χρωματικής διασποράς με την δυνατότητα να επιτυγχάνουν «χονδροειδείς» και ακριβείς μετρήσεις σε ένα δυναμικό εύρος των 250 ps.

Bibliography-Βιβλιογραφία

- [1] M.Yoo and C.Qiao.A new optical burst switching protocol for supporting quality of service.In SPIE Proceedings,All Optical Networking:Architecture,Control and Management Issues,volume 3531,pages 396-405,November 1998.
- [2] O.Gerstel,P.Lin,and G.Sasaki.Wavelength assignment on a WMD ring to minimize cost of embedded SONET rings.Proceedings of IEEE INFOCOM,pages 94-101,1998.
- [3] A.Chiou and E.Modiano.Traffic grooming algorithms for reducing electronic multiplexing costs in in WMD ring networks.*Journal of Lightwave Technology*, 18(1):2-12, Jan 2000.
- [4] R.Dutta,S.Huang and G.Rouskas.On optimal traffic grooming in elemental network topologies.In *Proceedings of OPTICOMM,Dallas,Texas*,pages 13-24,October 2003.
- [5] R.Dutta and G.Rouskas.Traffic grooming in WDM networks:Past and future.*IEEE Network(to appear)*.
- [6] R.Dutta and G.Rouskas.On optimal traffic grooming in WDM rings.*IEEE JOURNAL on Selected Areas In Communications*,20(1):110-122,2002.
- [7] B.Chen,G.Rouskas and R.Dutta.Traffic grooming in WDM unidirectional paths and rings with min-max cost objective.In *Proceedings of Networking 2004,Athens,Greece*,pages 174-185,May 2004.
- [8] K.Zhu and B.Mukherjee.Traffic grooming in an optical WDM mesh network.*IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(1):122-133, Jan 2002.
- [9] R.Ahuja,T.Magnanti and J.Orlin.*Network flows:theory,algorithms and applications*.Prentice-Hall,1993.
- [10] I.Chlamtac,A Ganz and G Karmi,Lightpath communications:An approach to high-bandwidth optical WANs.*IEEE Transactions on Communications*,pages 1320-1340,1992.
- [11] M.Cerisola,T.K.Fong,R.T.Hofmeister,L.G.Kazovskt,C.L.Lu,P.Poggiolini and D.J.M.Sabido,"CORD-A WDM optical network:Control Mechanism using subcarrier multiplexing and novel synchronization solutions," in *Proc.Int.Conf.Communications*,Seattle,WA,June 1995,pp.261-265
- [12] D.J.Blumenthal,J.Laskar,R.Gaudino,S.Han,M.D.Shell and M.D.Vaughn,"Fiber-optic links supporting baseband data and subcarrier-multiplexed control channels and the impact of MMIC photonic/microwave interfaces,"*IEEE Trans.Microwave Theory Tech.*,vol.45,pp.1443-1452,Aug.1997.
- [13] D.J.Blumenthal,A.Carena,L.Rau,V.Curri,and S.Humphries,"All-optical label swapping with wavelength conversion for WDM-IP networks with subcarrier multiplexed addressing," *IEEE Photon.Technol.Lett.*,vol 11,pp.1497-1499,Nov.1999.
- [14] G.K.Chang,G.Ellinas,J.K.Gamelin,M.Z.Iqbal and C.A.Brackett,"Multiwavelength reconfigurable WDM/ATM/SONET network testbed,"*J.Lightwave Technol.*,vol. 14,pp.1320-1340,June 1996.
- [15] A.R.Chraplyvy,"Limitation on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities," *J.Lightwave Technol.*,vol. 8,pp.1548-1557,Oct.1990.
- [16] G.Rossi,O.Jerphagnon,B.E.Olson,and D.J.Blumenthal,"Optical SCM data extraction using a fiber loop mirror for WDM network systems," in *Tech.Dig,OFC'2000,Baltimore,MD,USA,Mar.2000*,paper fd7,pp.74-76.
- [17] G.H.Smith and D.Novac,"Broad-band millimetre-wave (38 GHz) fiber-wireless transmission system using electrical and optical SSB modulation to overcome dispersion effects," *IEEE Photon.Technol.Lett.*, vol.10, pp.141-143, Jan.1998.
- [18] L.Y.Lin,M.C.Wu,T.Itoh,T.A.Vang,R.E.Muller,D.L.Sivco,and A.Y.Cho,"High-power high-speed photodetectors design,analysis,and experimental demonstration,"*IEEE Trans.Microwave Theory Tech.*,vol.45,pp.1320-1331,Aug.1997.
- [19] M.W.Chbat *et al.*,"Toward wide-scale all-optical transparent networking: The ACTS optical pan-european network (OPEN) project,"*IEEE J.Select.Areas.Commun.,Special Issue on High-Capacity Optical Transport Network*,vol.16,no.7,pp.1226-1244,Sept.1998.
- [20] K.Otsuka,T.Maki,Y.Sampey,Y.Tachikawa,N.Fukushima,and T.Chikama,"A high-performance optical spectrum monitor with high-speed measuring time for WDM optical networks," in *Proc.ECOC'97,Edinburgh,UK.,Sept.1997*,pp.147-150.

- [21] M.W.Meada,"Management and control of transparent optical networks,"*IEEE J.Select.Areas.Commun, Special Issue on High-Capacity Optical Transport Networks*,vol.16,no.7,pp.1008-1023,Sept.1998.
- [22] S.Ohteru and N.Takachio,"Optical signal quality monitor using direct Q-factor measurement," *IEEE Photon.Technol.Lett.*, vol.11, pp.1307-1309, Oct.1999.
- [23] F.Heisman *et al.*,"Signal tracking and performance monitoring in multiwavelength optical networks," in *22nd Eur.conf.Optical Communication (ECOC'96)*, vol.3, Oslo,Norway,Sept.1996,Paper WeB2.2,pp.47-50.
- [24] E.Park *et al.*,"Network demonstration of self-touring wavelength packets using an all-optical wavelength shifter and QPSK subcarrier routing control," in *Conf.Optical.Fiber Commun.(OFC'96)*,1996,pp.114-115.
- [25] R.Gaudino and D.J.Blumenthal,"A novel transmitter architecture for compined baseband data and subcarrier multiplexed control links using differential Mach-Zehnder external modulators,"*IEEE Photon.Technol.Lett.*,vol.19,pp.1397-1399,Oct.1997.
- [26] G.Rossi,O.Jerphagnon,B.E.Olson,and D.J.Blumenthal,"Optical SCM data extraction using a fiber loop mirror for WDM network systems," in *Tech.Dig,OFC'2000*,Baltimore,MD,USA,Mar.2000,paper fd7,pp.74-76.
- [27] R.Gaudino,M.Len,G.Desai,M.Shell and D.J.Blumenthal,"MOSAIC:A multiwavelength optical subcarrier multiplexed controlled network," *IEEE J.Select.Areas.Commun., Special Issue on High-Capacity Optical Transport Networks*,vol.16,no.7,pp.1270-1285,Sept.1998.
- [28] R.Gaudino and D.J.Blumenthal,"WDM channel equalization based on subcarrier signal monitoring," in *Tech.Dig.OFC'98*,San Jose,CA,Feb.1998,paper WJ6,pp.167-168.
- [29] L.D.Garrett *et al.*,"The MONET New Jersey demonstration," *IEEE J.Select.Areas.Commun., Special Issue on High-Capacity Optical Transport Networks*,vol.16,no.7,pp.1199-1219,Sept.1998.
- [30] K.Asahi,M.Yamashita,T.Hosoi,K.Nakaya,and C.Konoshi,"Optical performance monitor built into EDFA repeaters for WDM networks," in *Tech.Dig.OFC'98*,San Jose,CA,Feb.1998,paper ThO2,pp.318-319.
- [31] R.Wiesmann,O.Bleck,and H.Heppner,"Cost effective performance monitoring in WDM systems," in *Tech.Dig.OFC'2000*,Baltimore,MD,Mar.2000,paper WK2,pp.171-173.
- [32] S.K.Shin,K.J.Park,amd Y.C.Chung,"A novel optical signal-to-noise ratio monitoring technique for WDM networks," in *Tech.Dig.OFC'2000*,Baltimore,MD,Mar.2000,paper WK6,pp.182-184.
- [33] M.Rasztovits-Wiech,M.Danner,and W.R.Leeb,"Optical signal-to-noise ratio measurement in WDM networks using polarization extinction,"in *Proc.ECOC'98*,Madrid,Spain,Sept.1998,pp.549-550.
- [34] D.K.Jung,C.H.Kim,and Y.C.Chung,"OSNR monitoring technique using polarization-nulling method," in *Tech.Dig.OFC'2000*,Baltimore,MD,Mar.2000,paper WK4,pp.176-178.
- [35] P.A.Greenhalgh,R.D.Abel,and P.A.Davies,"Optical prefiltering in subcarrier systems," *Electron.Lett.*,vol.28,no.19,pp.1850-1852,Sept.10,1992.
- [36] G.P.Agrawal,*Fiber-Optic Communication Systems*.New York:Wiley,1992.

