

University of Macedonia
Master Information Systems
Networking Technologies
Professor: A.A. Economides
economid@uom.gr

ADAPTIVE DISTRIBUTED ROUTING AND TRAFFIC CONTROL IN OPTICAL NETWORKS

LEONIDAS OXOUZOGLOU

11/01/2002

Πανεπιστήμιο Μακεδονίας
ΠΜΣ Πληροφοριακά Συστήματα
Τεχνολογίες Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων
Υπεύθυνος Καθηγητής: Α.Α. Οικονομίδης
economid@uom.gr

**ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ
ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ
ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ**

ΛΕΩΝΙΔΑΣ ΟΞΟΥΖΟΓΛΟΥ

11/01/2002

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	1
1. Εισαγωγή.....	3
1.1 Πολυπλεξία μέσω Διαίρεσης Μήκους Κύματος (Wavelength-division Multiplexing – WDM)	3
1.2 Δρομολόγηση και Ανάθεση Μήκους Κύματος – (Routing and Wavelength Assignment) . Περιγραφή του Προβλήματος.....	5
2. Προσαρμοστική Κατανεμημένη Δρομολόγηση.....	6
2.1 Στατική Εγκατάσταση Μονοπατιού Φωτός (Static Lightpath Establishment) .	6
2.2 Δυναμική Εγκατάσταση Μονοπατιού Φωτός (Dynamic Lightpath Establishment).....	8
3. Ανάθεση Μήκους Κύματος (Wavelength Assignment).....	14
3.1 Στατική Ανάθεση Μήκους Κύματος.....	14
3.2 Δυναμική Ανάθεση Μήκους Κύματος.....	15
4. Κατανεμημένη Διαχείριση Συνδέσεων Σε Δίκτυα WDM	20
4.1 Κατανεμημένη δέσμευση μήκους κύματος (Distributed wavelength reservation).....	20
4.2 Πρωτόκολλα Ελέγχου και Διαχείρισης Σύνδεσης	25
5. Συμπεράσματα.....	28

CONTENTS

Abstract.....	1
1. Introduction	3
1.1 Wavelength-division Multiplexing – WDM	3
1.2 Routing and Wavelength Assignment.....	5
2. Adaptive Distributed Routing.....	6
2.1 Static Lightpath Establishment.....	6
2.2 Dynamic Lightpath Establishment.....	8
3. Wavelength Assignment	14
3.1 Static Wavelength Assignment	14
3.2 Dynamic Wavelength Assignment.....	15
4. Distributed Control Management in WDM Networks.....	20
4.1 Distributed wavelength reservation.....	20
4.2 Connection Management Approaches	25
5. Συμπεράσματα.....	28

Περίληψη

Η κυρίαρχη τεχνολογία σήμερα στα οπτικά δίκτυα είναι η τεχνολογία πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (WDM) και αυτό γιατί καταφέρνει να καλύψει τις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες σε εύρος ζώνης των χρηστών. Σε ένα δίκτυο WDM τα κανάλια επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων είναι μήκη κύματος, τα οποία πολυπλέκονται στο ίδιο φυσικό μέσο. Τα δίκτυα WDM είναι δίκτυα προσανατολισμένα προς τη σύνδεση. Επομένως, για να γίνει δυνατή η ανταλλαγή των δεδομένων μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου πρέπει να εγκατασταθεί μία σύνδεση. Η σύνδεση αυτή, σε δίκτυα WDM ονομάζεται μονοπάτι φωτός (lightpath). Για τον καθορισμό του μονοπατιού φωτός, δεν είναι απαραίτητο να καθορισθεί μόνο το σύνολο των διαδοχικών ζεύξεων (links) που απαρτίζουν τη διαδρομή, αλλά και το μήκος κύματος που θα χρησιμοποιηθεί. Αν ένα μονοπάτι είναι δυνατό να καταλαμβάνει από ζεύξη σε ζεύξη διαφορετικά μήκη κύματος, τότε το δίκτυο είναι πολυπλεξίας ζεύξης (Link Multiplexing), ενώ αν ένα μονοπάτι είναι υποχρεωμένο να καταλαμβάνει το ίδιο μήκος κύματος σε όλες τις ζεύξεις του, τότε το δίκτυο ονομάζεται πολυπλεξίας μονοπατιού (Path Multiplexing). Το πρόβλημα του υπολογισμού του μονοπατιού φωτός που θα χρησιμοποιηθεί από μία σύνδεση, αναφέρεται ως πρόβλημα δρομολόγησης και ανάθεσης μήκους κύματος (Routing and Wavelength Assignment – RWA). Για τη λύση του προβλήματος υπάρχουν στατικές και δυναμικές προσεγγίσεις. Σε μία στατική προσέγγιση, το μονοπάτι φωτός που χρησιμοποιεί η κάθε σύνδεση είναι προκαθορισμένο, ενώ σε μία δυναμική (προσαρμοστική) προσέγγιση, το μονοπάτι υπολογίζεται κάθε φορά που ζητείται η σύνδεση και εξαρτάται από την κατάσταση του δικτύου τη στιγμή εκείνη. Εάν ο υπολογισμός του μονοπατιού γίνεται από κάποιο κεντρικό σημείο του δικτύου, τότε η δρομολόγηση θεωρείται συγκεντρωτική, ενώ αν ο υπολογισμός αυτός γίνεται από τους κόμβους του δικτύου, τότε η δρομολόγηση, είναι κατανεμημένη. Τέλος, για να γίνει εφικτή η σύνδεση είναι απαραίτητα πρωτόκολλα που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο δεσμεύονται και αποδεσμεύονται πόροι του δικτύου από μία σύνδεση. Τα πρωτόκολλα αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Αυτά που δεσμεύουν πόρους με κατεύθυνση από την πηγή προς τον προορισμό (Source Initiated Reservation – SIR) και αυτά που δεσμεύουν πόρους με αντίθετη κατεύθυνση (Destination Initiated Reservation – DIR)

Abstract

The dominant technology in optical networking is Wavelength Division Multiplexing as it is capable of meeting the continuously increasing needs in bandwidth. In a WDM network the channels of communication between the nodes are wavelengths, multiplexed on each fiber. WDM are connection oriented networks. Consequently, in order to exchange data between two nodes a connection should be set up, namely a lightpath. A lightpath is determined, not only by its route but also by the wavelength used on each link. In some cases, the wavelength used by a lightpath may differ from one link to another. If this is the case, the network is referred as Link Multiplexing Network. On the other hand, in most cases a lightpath occupies the same wavelength on every link along its route. The network then is referred as Path Multiplexing Network. The issue of determining a lightpath for a connection, is reported as the Routing and Wavelength Assignment Problem (RWA). Several approaches to RWA are proposed in the literature. These approaches engage static and dynamic methods. In a static approach, for each source-destination pair, a lightpath to carry out the connection is predetermined, while in dynamic (adaptive) approaches, the path is determined the time the connection request arrives and depends on the current network state. If lightpaths are established by a central point in the network, then the routing is considered to be 'centralized', while if the establishment of lightpaths is carried out by a controller on each node, the routing is considered to be distributed. Finally, in order to establish connections, a network control protocol is essential to reserve or release network resources. Two approaches in wavelength reservation protocols are presented: Source Initiated Reservation (SIR) and Destination Initiated Reservation (DIR) protocols.

1. Εισαγωγή

1.1 Πολυπλεξία μέσω Διαίρεσης Μήκους Κύματος (Wavelength-division Multiplexing – WDM)

Με δεδομένο ότι, θεωρητικά, το εύρος ζώνης μίας μονότροπης (single-mode) οπτικής ίνας είναι σχεδόν 50 Tbps[6], ενώ οι ταχύτητες μετάδοσης των ηλεκτρονικών μέσων βρίσκονται στα επίπεδα μερικών Gbps, προκύπτει ένα τεράστιο κενό μεταξύ των ταχυτήτων μετάδοσης και κίνησης της πληροφορίας, το οποίο πρέπει να καλυφθεί, αν ο στόχος είναι η καλύτερη αξιοποίηση των πόρων ενός δικτύου.

Μία απάντηση σε αυτό το πρόβλημα είναι η τεχνολογία Πολυπλεξίας μέσω Διαίρεσης Μήκους Κύματος (Wavelength-division Multiplexing – WDM) . Η βασική αρχή του WDM είναι η διαίρεση του φάσματος οπτικής μετάδοσης σε μη επικαλυπτόμενες «ζώνες» με βάση το μήκος κύματος (wavelength bands). Κάθε τέτοια «ζώνη» είναι ένα κανάλι επικοινωνίας, στο οποίο ο τελικός χρήστης, μπορεί να μεταδίδει πρακτικά με οποιοδήποτε ρυθμό επιθυμεί (πχ το μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης για ηλεκτρονικό μέσο μετάδοσης). Η πιο αποδοτική χρήση του μέσου προκύπτει από το ότι πολλοί χρήστες μπορούν ταυτόχρονα να μεταδίδουν στην ίδια οπτική ίνα αλλά σε διαφορετικά μήκη κύματος δηλαδή τελικά η ίδια φυσική σύνδεση να χρησιμοποιείται από πολλές λογικές συνδέσεις.

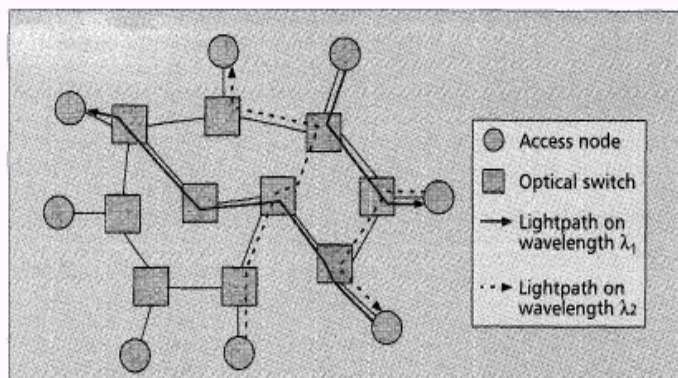
Με τον όρο «εξολοκλήρου» οπτικό δίκτυο (all-optical network), εννοούμε το δίκτυο στο οποίο δεν γίνεται καμία μετατροπή του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρονικό παρά μόνο στον αρχικό και στον τελικό κόμβο. Έτσι, σε ένα τέτοιο δίκτυο το σήμα μετατρέπεται σε οπτικό από την πηγή και μεταφέρεται ως οπτικό μέχρι τον προορισμό του όπου τελικά μετατρέπεται και πάλι σε ηλεκτρονικό. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι καθυστερήσεις που απαιτούνται για τη μετατροπή και την επεξεργασία του σήματος και επιτρέπει την επικοινωνία πηγής-προορισμού σε ρυθμούς που πλησιάζουν τους ρυθμούς της οπτικής μετάδοσης.

Σε τοπικά εξολοκλήρου οπτικά δίκτυα, για την επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων χρησιμοποιείται η τεχνική εκπομπής-επιλογής (broadcast and select) [6]. Σύμφωνα με τις βασικές αρχές της εκπομπής-επιλογής, οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι σε τοπολογία παθητικού αστέρα (passive star). Κάθε κόμβος λαμβάνει πληροφορία σε καθορισμένο μήκος κύματος. Κάθε φορά που ένας κόμβος μεταδίδει σήμα σε συγκεκριμένο μήκος

κύματος, το σήμα φτάνει στον παθητικό αστέρα και ο αστέρας το ενισχύει και το μεταδίδει σε όλους τους κόμβους. Τελικά ο κόμβος που μπορεί να λάβει πληροφορία στο συγκεκριμένο μήκος κύματος είναι ο παραλήπτης, ενώ όλοι οι υπόλοιποι το αγνοούν.

Στην περίπτωση των οπτικών δικτύων ευρείας περιοχής (Wide area optical networks), χρησιμοποιείται η τεχνική της δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength routing). Ένα τέτοιο δίκτυο αποτελείται από ενεργά διακοπτικά στοιχεία (active switches) τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με οπτικές ίνες. Κάθε

τελικός χρήστης είναι συνδεδεμένος σε κάποιο από τα ενεργά διακοπτικά στοιχεία. Το σύστημα τελικός χρήστης-διακόπτης αποτελεί έναν κόμβο (node) του δικτύου. Κάθε φορά που ένας κόμβος πρέπει να μεταδώσει πληροφορία σε



Σχήμα 1. Δίκτυο δρομολόγησης μήκους κύματος

κάποιον άλλο, εγκαθίσταται μία σύνδεση μεταξύ τους και στη συνέχεια ακολουθεί η ροή των δεδομένων. Μετά το τέλος της μετάδοσης ακολουθεί η απεγκατάσταση της σύνδεσης.

Η μετάδοση της πληροφορίας σε δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength routed) γίνεται με τη βοήθεια λογικών συνδέσεων, είναι δηλαδή μία μορφή μεταγωγής κυκλώματος (circuit switching). Η μεταγωγή πακέτου σε πλήρως οπτικά δίκτυα είναι τεχνολογία που ακόμα βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται σε οπτικά WDM δίκτυα μεταγωγής πακέτου είναι οι καθυστερήσεις στην επεξεργασία της κεφαλίδας του πακέτου (η οποία μπορεί να γίνει και οπτικά), οι οποίες δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν αποδοτικά σε ένα εξολοκλήρου οπτικό δίκτυο, αφού δεν υπάρχει δυνατότητα οπτικής αποθήκευσης του πακέτου [7]. Μία παρουσίαση πρωτοκόλλων μεταγωγής πακέτου για LANs δίνεται στο [11].

Βασικό στοιχείο μιας σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων σε ένα δίκτυο δρομολόγησης μήκους κύματος είναι το *μονοπάτι φωτός* (lightpath). Το μονοπάτι φωτός είναι ένα εξολοκλήρου οπτικό κανάλι επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων, το οποίο καθορίζεται από την διαδρομή που χρησιμοποιείται, δηλαδή το σύνολο των

κόμβων από τους οποίους διέρχεται, αλλά και από το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται σε κάθε τμήμα του (σύνδεση διαδοχικών κόμβων - network link). Εξαιτίας του διαμερισμού του φυσικού μέσου μετάδοσης σε μήκη κύματος, είναι δυνατό δύο μονοπάτια να χρησιμοποιούν, σε κάποια τμήματά τους το ίδιο φυσικό μέσο (link). Ο βασικός περιορισμός στα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος είναι ότι *δεν μπορούν δύο μονοπάτια φωτός να χρησιμοποιούν την ίδια ζεύξη (link) και το ίδιο μήκος κύματος.*

Σε ένα δίκτυο δρομολόγησης-μήκους κύματος, είναι δυνατό οι διακόπτες των κόμβων να έχουν τη δυνατότητα μετατροπής του μήκους κύματος. Σε μια τέτοια περίπτωση ένα μονοπάτι φωτός μπορεί σε κάθε ζεύξη (link) του να έχει διαφορετικό μήκος κύματος (Link multiplexing). Εάν στο δίκτυο δεν υπάρχουν μηχανισμοί μετατροπής μήκους κύματος, τότε κάθε μονοπάτι δεσμεύει το ίδιο μήκος κύματος σε κάθε ακμή του (Path multiplexing). Η έλλειψη της δυνατότητας μετατροπής του μήκους κύματος από τα διακοπτικά στοιχεία (switches) του δικτύου, αναφέρεται ως *περιορισμός της συνέχειας του μήκους κύματος (wavelength continuity constraint)* και με αυτό το κριτήριο, γίνεται μία πρώτη ταξινόμηση των δικτύων δρομολόγησης-μήκους κύματος.

1.2 Δρομολόγηση και Ανάθεση Μήκους Κύματος – (Routing and Wavelength Assignment) . Περιγραφή του Προβλήματος.

Σε ένα δίκτυο δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength routed), το πρόβλημα της εγκατάστασης μιας σύνδεσης, δηλαδή της εύρεσης ενός μονοπατιού φωτός (lightpath), ανάμεσα σε αρχικό και τελικό κόμβο ανάγεται σε δύο μέρη: Στον προσδιορισμό της διαδρομής (route) και στον προσδιορισμό του μήκους κύματος (wavelength assignment). Το πρόβλημα είναι γνωστό ως δρομολόγηση-ανάθεση μήκους κύματος (routing – wavelength assignment). Η δρομολόγηση-ανάθεση μήκους κύματος μπορεί να προσεγγιστεί με διαφορετικούς τρόπους, είτε ως όλο ή χωριζόμενο στα δύο υποπροβλήματα που το αποτελούν. Επίσης μπορεί να αντιμετωπιστεί με στατικούς τρόπους (Static Lightpath Establishment) ή με δυναμικούς τρόπους (Dynamic Lightpath Establishment). Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στον εξαρχής ορισμό ενός μονοπατιού φωτός για κάθε σύνδεση ενώ η δεύτερη αναφέρεται στη δέσμευση (reservation) ενός μονοπατιού φωτός κάθε φορά που ζητείται μία σύνδεση και στην απελευθέρωση των πόρων του δικτύου κάθε φορά

που τελειώνει η χρήση της σύνδεσης. Στους δυναμικούς τρόπους επιλογής του μονοπατιού φωτός, εάν η επιλογή του μονοπατιού γίνεται από κάθε κόμβο ανεξάρτητα, γίνεται λόγος για κατανεμημένη (distributed) αποκεντρωμένη (decentralised) δρομολόγηση. Εάν η επιλογή της διαδρομής γίνεται από κάποιο κεντρικό σημείο του δικτύου, πχ κάποιον διαχειριστή δικτύου, τότε γίνεται λόγος για συγκεντρωτική (centralised) δρομολόγηση.

Το συνηθέστερο μέτρο για την απόδοση των αλγορίθμων που χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία είναι η πιθανότητα μπλοκαρίσματος μίας κλήσης (blocking probability), δηλαδή η πιθανότητα να μην είναι δυνατόν να βρεθούν ελεύθεροι πόροι στο δίκτυο για την εγκατάσταση μίας συγκεκριμένης σύνδεσης. Επιπλέον, στην συνολική αξιολόγηση ενός αλγορίθμου συναντούνται έννοιες όπως η ανοχή σε σφάλματα (fault tolerance), το υπολογιστικό φορτίο (overhead) με το οποίο επιβαρύνονται οι κόμβοι, στην περίπτωση της αποκεντρωμένης δρομολόγησης και ανάθεσης μήκους κύματος, η χρήση των πόρων του δικτύου (resource utilization), η δίκαιη απόδοση των πόρων του δικτύου (fair designation of resources) και η δυνατότητα επέκτασης του δικτύου (scalability). [14]

Στο υπόλοιπο της εργασίας αυτής γίνεται μία σύντομη περιγραφή στατικών τρόπων δρομολόγησης και στη συνέχεια παρουσιάζονται προσαρμοστικοί κατανεμημένοι αλγόριθμοι δρομολόγησης και ανάθεσης μήκους κύματος για εξολοκλήρου οπτικά δίκτυα WDM. Τέλος, παρουσιάζονται πρωτόκολλα που αναφέρονται σε κατανεμημένο έλεγχο και διαχείριση συνδέσεων σε δίκτυα WDM.

2. Προσαρμοστική Κατανεμημένη Δρομολόγηση

2.1 Στατική Εγκατάσταση Μονοπατιού Φωτός (Static Lightpath Establishment)

- **Προκαθορισμένη δρομολόγηση ελάχιστης διαδρομής (fixed shortest path routing)**

Στην προκαθορισμένη δρομολόγηση ελάχιστης διαδρομής ο υπολογισμός κάθε διαδρομής γίνεται συνήθως με τη χρήση κάποιου αλγορίθμου βέλτιστης διαδρομής (Dijkstra, Bellman-Ford) πριν την έναρξη λειτουργίας του δικτύου (off

line) ενώ μπορεί να συνδυαστεί με στατικούς ή και με δυναμικούς τρόπους ανάθεσης μήκους κύματος . Το βασικότερο πλεονέκτημα της προκαθορισμένης δρομολόγησης (fixed routing) είναι ότι ο υπολογισμός της βέλτιστης διαδρομής για κάθε ζεύγος κόμβων γίνεται μόνο μία φορά, οπότε οι κόμβοι του δικτύου δεν επιβαρύνονται με υπολογιστικό φορτίο (overhead) κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, η προκαθορισμένη δρομολόγηση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές πιθανότητες μπλοκαρίσματος μιας κλήσης (αν η ανάθεση του μήκους κύματος γίνεται δυναμικά) ή σε χρήση παραπάνω μηκών κύματος από όσο χρειάζεται (αν η ανάθεση του μήκους κύματος γίνεται και αυτή στατικά). Επίσης, μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα σε περίπτωση σφαλμάτων-βλαβών σε κάποιους κόμβους ή συνδέσεις, δηλαδή δεν παρουσιάζει ανοχή σφαλμάτων (fault tolerance). [9] Το πρόβλημα του στατικού καθορισμού της διαδρομής (routing) σε συνδυασμό με την ανάθεση μήκους κύματος μοντελοποιείται ως πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού [9], ή και ως πρόβλημα χρωματισμού γράφων (graph coloring problem) [9] [10]

- ***Προκαθορισμένη-εναλλακτική δρομολόγηση ελάχιστης διαδρομής (fixed alternate shortest path routing)***

Μία δεύτερη προσέγγιση στο πρόβλημα της δρομολόγησης μίας κλήσης είναι η προκαθορισμένη-εναλλακτική δρομολόγηση (fixed-alternate routing). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, για κάθε ζεύγος κόμβων υπολογίζονται εξ αρχής περισσότερες από μία διαδρομές, οι οποίες δεν έχουν κοινές συνδέσεις από κόμβο σε κόμβο (link-disjoint). Όταν ένας κόμβος επιθυμεί σύνδεση με έναν άλλο, αναζητεί ελεύθερα μήκη κύματος στη βέλτιστη από αυτές τις διαδρομές . Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατό να γίνει η σύνδεση μέσω αυτής της διαδρομής, δοκιμάζεται η επόμενη κ.ο.κ. Τελικά η αίτηση σύνδεσης μπλοκάρεται αν καμία από τις προκαθορισμένες διαδρομές δεν είναι δυνατόν να την πραγματοποιήσει. Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η απλότητα στον τρόπο ελέγχου των προκαθορισμένων διαδρομών και τα καλύτερα αποτελέσματα σε πιθανότητες μπλοκαρίσματος και ανοχή σφαλμάτων σε σχέση με την προκαθορισμένη δρομολόγηση. [9]

2.2 Δυναμική Εγκατάσταση Μονοπατιού Φωτός (Dynamic Lightpath Establishment)

Μία άλλη προσέγγιση στο πρόβλημα της δρομολόγησης μίας σύνδεσης, είναι η προσαρμοστική ή δυναμική δρομολόγηση (adaptive routing – dynamic routing). Στην προσαρμοστική δρομολόγηση, η επιλογή της διαδρομής εξαρτάται από την κατάσταση του δικτύου κάθε στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι, αν η δρομολόγηση γίνεται καταναμημένα οι κόμβοι πρέπει να είναι ενημερωμένοι για την κατάσταση του δικτύου. Προϋπόθεση για να συμβεί αυτό είναι η ύπαρξη ενός δικτύου ελέγχου το οποίο πρέπει να έχει την ίδια φυσική τοπολογία με το βασικό δίκτυο και μπορεί να χρησιμοποιεί πόρους από το ίδιο το δίκτυο (in-band) ή να είναι ένα άλλο δίκτυο(out-of-band) [4]

Στην περίπτωση της προσαρμοστικής δρομολόγησης το υπολογιστικό φορτίο (overhead) στους κόμβους είναι μεγαλύτερο από αυτό της στατικής, γιατί απαιτείται όχι μόνο υπολογισμός της βέλτιστης διαδρομής κάθε φορά που ζητείται μια σύνδεση αλλά και συνεχής ενημέρωση των κόμβων για την κατάσταση του δικτύου. Από την άλλη πλευρά τα αποτελέσματα στις πιθανότητες μπλοκαρίσματος (blocking probability) είναι καλύτερα από τις προηγούμενες δύο προσεγγίσεις. [9]. Στην περίπτωση που η δρομολόγηση γίνεται συγκεντρωτικά και όχι καταναμημένα, δεν απαιτείται μεγάλη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κόμβων, πράγμα που μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό φορτίο (overhead). Από την άλλη πλευρά, το σημείο της κεντρικής διαχείρισης αποτελεί μοναδικό σημείο αποτυχίας (single point of failure). [12]

- *Δρομολόγηση Προκαθορισμένων Μονοπατιών -Ελάχιστης Συμφόρησης (Fixed Paths - Least Congestion Routing, FPLC) [5] [13]*

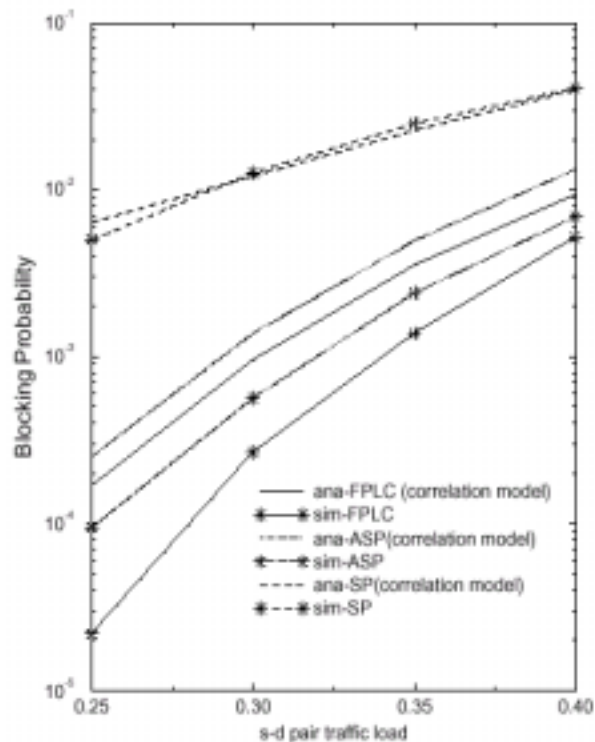
Μία βασική υπόθεση που γίνεται στην περιγραφή του αλγόριθμου που ακολουθεί είναι ότι στους κόμβους του δικτύου δεν υπάρχει δυνατότητα μετατροπής του μήκους κύματος, δηλαδή ισχύει ο περιορισμός της συνέχειας του μήκους κύματος (wavelength continuity constraint)

Σε αυτή τη μέθοδο καταρχήν υπολογίζεται στατικά ένα σύνολο από διαδρομές για κάθε ζεύγος πηγής – προορισμού (source – destination) στο δίκτυο και οι πληροφορίες αποθηκεύονται σε κάθε κόμβο πηγή (source node). Κάθε φορά που

φτάνει μία αίτηση για σύνδεση στον κόμβο, αυτός ελέγχει παράλληλα τις προκαθορισμένες διαδρομές για να βρει ελεύθερα μήκη κύματος σε κάθε ζεύξη (link). Αυτό γίνεται με την αποστολή πακέτων ελέγχου (needle packets), μέσω του δικτύου ελέγχου τα οποία ελέγχουν κάθε κόμβο της διαδρομής, μέχρι τον προορισμό. Τελικά αφού η πληροφορία συγκεντρωθεί στον αρχικό κόμβο, επιλέγεται η διαδρομή με τα περισσότερα ελεύθερα μήκη κύματος. Εάν σε καμία από τις διαδρομές δεν υπάρχουν ελεύθερα μήκη κύματος, τότε η αίτηση σύνδεσης «μπλοκάρεται». (Επειδή στο δίκτυο υποθέσαμε ότι ισχύει η συνέχεια του μήκους κύματος, ο αλγόριθμος δεν αναζητεί τουλάχιστον ένα ελεύθερο μήκος κύματος ανά ζεύξη (link), αλλά την τομή των συνόλων των ελεύθερων μηκών κύματος σε κάθε ζεύξη (link)). Μία λεπτομερέστερη περιγραφή του αλγορίθμου σε βηματική μορφή δίνεται στο [13].

Το πλήθος των διαδρομών που υπολογίζονται εξαρχής για κάθε σύνδεση πηγής – προορισμού είναι προτιμότερο να είναι 2, και αυτό γιατί με περισσότερες διαδρομές δεν γίνεται αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου. Επίσης, οι δύο διαδρομές που υπολογίζονται στατικά, πρέπει μην έχουν κοινές ακμές (link disjointed) για να μπορεί να γίνει η αναζήτηση της βέλτιστης διαδρομής παράλληλα στις δύο διαδρομές, αλλά και για λόγους ανοχής σφαλμάτων (fault tolerance).[5][13]

Στο σχήμα 2 φαίνεται η σύγκριση του αλγορίθμου Προκαθορισμένων Μονοπατιών -Ελάχιστης Συμφόρησης, με αλγορίθμους Προκαθορισμένης Ελάχιστης Διαδρομής (Shortest Path –SP) και Προκαθορισμένης-Εναλλακτικής Δρομολόγησης Ελάχιστης Διαδρομής (Alternate Shortest Path – ASP). Στο σχήμα φαίνεται η πιθανότητα μπλοκαρίσματος (blocking probability) σε σχέση με το κυκλοφοριακό φόρτο (traffic load) των τριών αλγορίθμων υπολογισμένη με αναλυτικό



Σχήμα 2. Πιθανότητα Μπλοκαρίσματος (blocking probability) σε σχέση με το κυκλοφοριακό φορτίο (traffic load), για αλγορίθμους δρομολόγησης με τυχαία ανάθεση μήκους κύματος [5]

τρόπο που περιγράφεται στα [5][13] και με προσομοίωση. Είναι φανερό ότι ο αλγόριθμος Δρομολόγησης Προκαθορισμένων Μονοπατιών -Ελάχιστης Συμφόρησης (Fixed Paths - Least Congestion Routing, FPLC) παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα.

- ***Δρομολόγηση Προκαθορισμένων Μονοπατιών -Ελάχιστης Συμφόρησης χρησιμοποιώντας Τοπική Πληροφορία (Fixed Paths - Least Congestion Routing using Local Information)[5][13]***

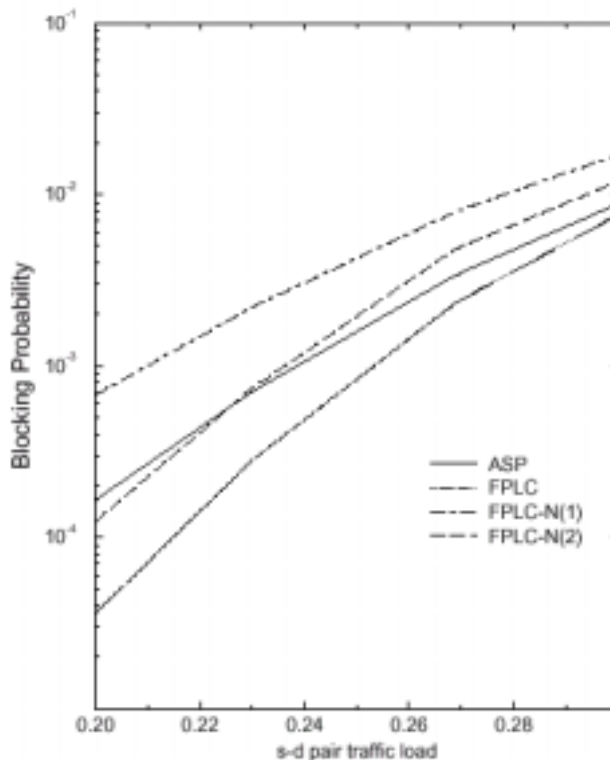
Μία παραλλαγή του προηγούμενου αλγορίθμου είναι ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται παρακάτω. Η χρήση του αλγορίθμου, δίνει απάντηση στην ανάγκη για μικρότερο υπολογιστικό φορτίο (control overhead) στους κόμβους και στο πρόβλημα της επεκτασιμότητας (scalability) του δικτύου, καθώς για δίκτυα με πολλούς κόμβους, ο αλγόριθμος Προκαθορισμένων Μονοπατιών - Ελάχιστης Συμφόρησης (Fixed Paths - Least Congestion) δίνει σημαντικό φορτίο (overhead) στους κόμβους και δημιουργεί προβλήματα συγκρούσεων (conflicts) και καθυστερήσεων εγκατάστασης (setup delays).

Στον αλγόριθμο Δρομολόγησης Προκαθορισμένων Μονοπατιών –Ελάχιστης Συμφόρησης χρησιμοποιώντας Τοπική Πληροφορία (Fixed Paths - Least Congestion Routing using Local Information), υπολογίζεται εξ αρχής ένα σύνολο διαδρομών για κάθε ζεύγος πηγής – προορισμού (source – destination) το οποίο αποθηκεύεται στον κόμβο πηγής. Όταν φτάσει στον κόμβο μία αίτηση σύνδεσης, ο αλγόριθμος ελέγχει τις προκαθορισμένες διαδρομές όπως ο FPLC, με τη διαφορά ότι δεν ελέγχονται όλες οι συνδέσεις (links) των διαδρομών αλλά μόνο οι πρώτες k . Η βέλτιστη διαδρομή αποφασίζεται με κριτήριο τα περισσότερα ελεύθερα μήκη κύματος στις πρώτες k ακμές. Εάν στη διαδρομή που επιλέγεται τελικά δεν υπάρχει ελεύθερο μήκος κύματος, η κλήση «μπλοκάρεται».

Υπάρχουν δύο δυνατότητες για τη συλλογή της τοπικής πληροφορίας για την κατάσταση του δικτύου: Μπορεί αυτή η πληροφορία να συλλέγεται στον κόμβο όταν ζητείται μία σύνδεση ή ο κάθε κόμβος να ενημερώνεται περιοδικά.

Ο αλγόριθμος Προκαθορισμένων Μονοπατιών -Ελάχιστης Συμφόρησης χρησιμοποιώντας Τοπική Πληροφορία για τις πρώτες k συνδέσεις (links) ονομάζεται FPLC-N(k) (Fixed Paths - Least Congestion Routing – N(k))

Στο σχήμα 3 φαίνεται η μέση Πιθανότητα Μπλοκαρίσματος (blocking probability) σε σχέση με το κυκλοφοριακό φορτίο (traffic load), για αλγόριθμους δρομολόγησης ASP, FPLC, FPLC-N(1), FPLC-N(2). Τα αποτελέσματα που φαίνονται είναι αποτελέσματα προσομοίωσης στο NSFnet. Παρατηρούμε ότι FPLC έχει καλύτερη επίδοση από τον ASP, ενώ οι αλγόριθμοι FPLC που χρησιμοποιούν τοπική πληροφορία έχουν σαφώς κατώτερη επίδοση από τον FPLC με καλύτερο τον FPLC-N(2). Η επίδοση του αλγόριθμου FPLC-N(2) είναι παρόμοια με αυτή του ASP. Γενικά,



Σχήμα 3. Πιθανότητα Μπλοκαρίσματος (blocking probability) σε σχέση με το κυκλοφοριακό φορτίο (traffic load), για αλγόριθμους δρομολόγησης ASP, FPLC, FPLC-N(1), FPLC-N(2) [5]

οι αλγόριθμοι Προκαθορισμένων Μονοπατιών -Ελάχιστης Συμφόρησης χρησιμοποιώντας Τοπική Πληροφορία (Fixed Paths - Least Congestion Routing using Local Information, FPLC-N(k)) συγκρινόμενοι με τον FPLC παρουσιάζουν σαφώς χαμηλότερες επιδόσεις όσον αφορά την πιθανότητα μπλοκαρίσματος, αλλά δίνουν μικρότερο υπολογιστικό φορτίο (overhead) στους κόμβους και μικρότερους χρόνους καθυστέρησης εγκατάστασης σύνδεσης (setup delay times).

- **Δρομολόγηση Εναλλακτικής Ζεύξης (Alternate Link Routing) [2]**

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, σε κάθε κόμβο διατηρείται ένας πίνακας ο οποίος δείχνει για κάθε κόμβο προορισμό μία ή περισσότερες ζεύξεις από τις οποίες μπορεί να γίνει η σύνδεση (outgoing links). Αυτές οι εναλλακτικές ζεύξεις είναι διατεταγμένες έτσι ώστε η κάθε αίτηση σύνδεσης με κάποιον κόμβο- προορισμό να μπορεί να επιλέξει μία από αυτές με βάση κάποια κριτήρια. Όταν μία αίτηση σύνδεσης φτάσει σε κάποιο κόμβο, ο κόμβος επιλέγει μία από τις προκαθορισμένες ζεύξεις (outgoing links). Αυτή η επιλογή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: Ο πρώτος τρόπος είναι να επιλεγεί η πρωτεύουσα ζεύξη (primary outgoing link) εάν σε αυτή

υπάρχουν ελεύθερα μήκη κύματος, και αν όχι να επιλέγεται η επόμενη κλπ. Ο δεύτερος τρόπος είναι να επιλέγεται η ζεύξη (outgoing link) με τα περισσότερα ελεύθερα μήκη κύματος. Ο πρώτος τρόπος επιλογής είναι μία μορφή επιλογής βέλτιστης διαδρομής (shortest path first), ενώ ο δεύτερος είναι μία μορφή επιλογής ζεύξης ελάχιστης συμφόρησης (least congested link).

Μετά την επιλογή της ζεύξης ο κόμβος-πηγή προωθεί την αίτηση σύνδεσης στον κόμβο που βρίσκεται στην άλλη άκρη της ζεύξης. Ο κόμβος που παραλαμβάνει την αίτηση σύνδεσης, ακολουθεί την ίδια διαδικασία, μέχρι τελικά η αίτηση να φτάσει στον προορισμό. Η αίτηση «μπλοκάρεται» όταν σε κάποιο κόμβο δεν υπάρχουν ζεύξεις (outgoing links) με ελεύθερους πόρους, ή όταν οι ζεύξεις οδηγήσουν την αίτηση σε κόμβο από τον οποίο έχει περάσει. Για να αποφευχθεί η παγίδευση της αίτησης της σύνδεσης σε βρόχο (loop), καταγράφονται στο πακέτο της αίτησης οι κόμβοι από τους οποίους έχει διέλθει.

Όταν η αίτηση σύνδεσης φτάσει στον κόμβο – προορισμό, επιλέγεται ένα μήκος κύματος από τα διαθέσιμα της διαδρομής και ένα μήνυμα εγκατάστασης σύνδεσης φεύγει από τον προορισμό κατά μήκος της επιλεγμένης διαδρομής. Το μήνυμα δεσμεύει τους κατάλληλους πόρους του δικτύου σε κάθε κόμβο και ζεύξη (link). Όταν τελικά φτάσει στον κόμβο πηγή, η σύνδεση εγκαθίσταται. Είναι πιθανό μέσα στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την αποστολή της αίτησης από κάποιο κόμβο μέχρι την παραλαβή του μηνύματος εγκατάστασης της σύνδεσης, οι πόροι να έχουν δεσμευτεί από άλλη σύνδεση. Σε αυτήν την περίπτωση το μήνυμα εγκατάστασης της σύνδεσης δεν μπορεί να προχωρήσει, και η αίτηση «μπλοκάρεται». Το ζήτημα της δέσμευσης των πόρων του δικτύου αναλύεται στο 4^ο Κεφάλαιο αυτής της εργασίας.

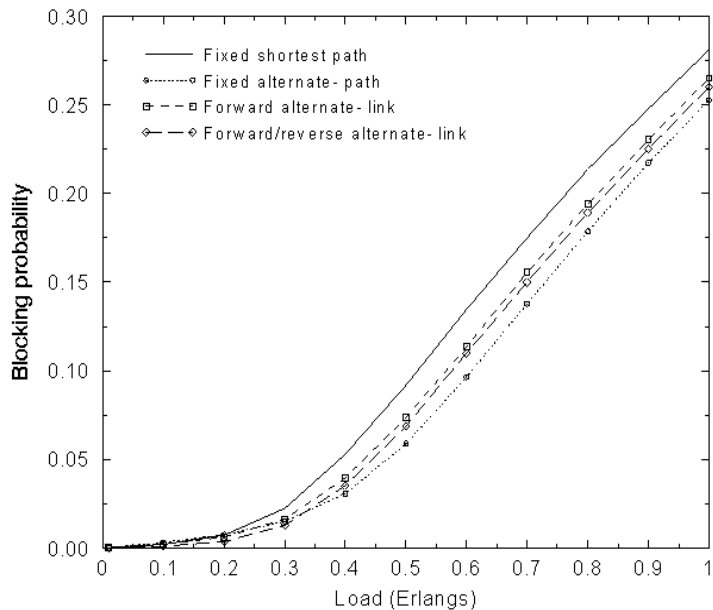
Η δρομολόγηση εναλλακτικής ζεύξης, ειδικά στην περίπτωση που η διαδρομή επιλέγεται με κριτήριο την ελάχιστη συμφόρηση, είναι παρόμοια τεχνική με τη δρομολόγηση Προκαθορισμένων Μονοπατιών -Ελάχιστης Συμφόρησης χρησιμοποιώντας Τοπική Πληροφορία (FPLC using Local Information). Η διαφορά των δύο προσεγγίσεων είναι ότι στο ότι στην πρώτη επιλέγονται ζεύξεις από κάθε κόμβο στη διαδρομή (βήμα προς βήμα – hop by hop), ενώ στη δεύτερη επιλέγεται από τον αρχικό κόμβο μία ολόκληρη διαδρομή (από άκρο σε άκρο – end-to-end)[12].

Η δρομολόγηση εναλλακτικής ζεύξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα, όπως αυτά που περιγράφονται παρακάτω στην εργασία αυτή.(2.3). Στα πρωτόκολλα αυτά μπορεί ένας κόμβος να μην έχει ενημερωμένη

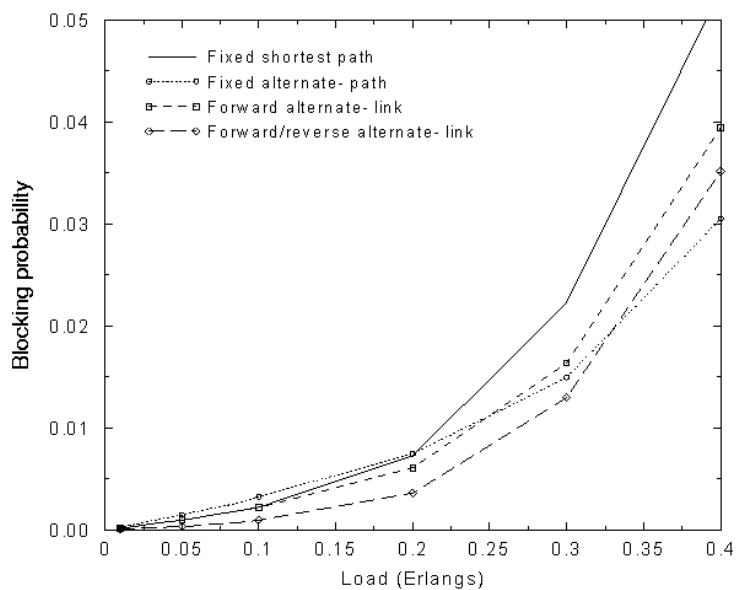
πληροφορία για την κατάσταση του δικτύου και να προσπαθήσει να δεσμεύσει μία ζεύξη η οποία ήδη χρησιμοποιείται από άλλη σύνδεση. Σε αυτή την περίπτωση η σύνδεση θα «μπλοκαριστεί». Ωστόσο, αν επιτραπεί στους κόμβους να μπορούν να εκτρέψουν μία αίτηση σύνδεσης όταν μία ζεύξη χρησιμοποιείται ήδη, η σύνδεση μπορεί να πραγματοποιηθεί από άλλη διαδρομή. [2]

Στα σχήματα 4α και 4β φαίνεται οι πιθανότητα «μπλοκαρίσματος» (blocking probability) μίας κλήσης σε σχέση με το φορτίο [2]. Τα αποτελέσματα προέρχονται

από προσομοίωση σε συγκεκριμένο δίκτυο που παρουσιάζεται στο [2]. Στα σχήματα 4α και 4β παρουσιάζεται η επίδοση της δρομολόγησης εναλλακτικής ζεύξης με προς τα μπρος δέσμευση πόρων (forward reservation) και με προς τα πίσω δέσμευση πόρων (reverse reservation) και συγκρίνεται με την επίδοση άλλων προσεγγίσεων, όπως αυτή των προκαθορισμένων μονοπατιών (fixed paths) και των προκαθορισμένων εναλλακτικών μονοπατιών (fixed alternate path). Παρατηρούμε ότι η επίδοση της δρομολόγησης εναλλακτικής ζεύξης είναι καλύτερη από αυτήν της δρομολόγησης προκαθορισμένων εναλλακτικών μονοπατιών μόνο όταν το φορτίο του δικτύου είναι μικρό (σχήμα 4β). Στην περίπτωση που το φορτίο είναι



Σχήμα 4α. Πιθανότητα «μπλοκαρίσματος» (blocking probability) σε σχέση με το φορτίο [2]



Σχήμα 4β. Πιθανότητα «μπλοκαρίσματος» (blocking probability) σε σχέση με το φορτίο [2]

μεγάλο, η επίδοση της δρομολόγησης εναλλακτικής ζεύξης είναι χαμηλότερη από αυτήν της δρομολόγησης προκαθορισμένων εναλλακτικών μονοπατιών. (Σχήμα 4α). Το σημαντικό πλεονέκτημα που προσφέρει η δρομολόγηση εναλλακτικής ζεύξης είναι το ότι εκτός από έναν στατικό πίνακα δρομολόγησης, ο κάθε κόμβος χρειάζεται να είναι ενήμερος μόνο για τη χρήση των μηκών κύματος στις ζεύξεις που αρχίζουν από αυτόν. Αυτό δίνει σε κάθε κόμβο μικρότερη επιβάρυνση για υπολογισμούς (overhead) αλλά και γενικά στο δίκτυο μικρότερη επιβάρυνση σε εύρος ζώνης για δίκτυο ελέγχου (control network). [12]

3. Ανάθεση Μήκους Κύματος (Wavelength Assignment)

3.1 Στατική Ανάθεση Μήκους Κύματος

Το πρόβλημα της ανάθεσης μήκους κύματος στη στατική του μορφή είναι, με δεδομένο ένα σύνολο μονοπατιών φωτός και τις διαδρομές τους, να ανατεθεί ένα μήκος κύματος σε κάθε μονοπάτι έτσι ώστε σε κάθε ζεύξη (link) να μην υπάρχουν δύο μονοπάτια που να έχουν το ίδιο μήκος κύματος. Το πρόβλημα αυτό, εάν υπάρχει ο περιορισμός της συνέχειας του μήκους κύματος (wavelength continuity constraint), μπορεί να εκφραστεί ως πρόβλημα χρωματισμού γράφων (graph-coloring problem), ως εξής [9]:

1. Κατασκευάσε έναν βοηθητικό γράφο $G(V,E)$, τέτοιον ώστε κάθε μονοπάτι στο σύστημα να παριστάνεται από έναν κόμβο στο G . Μία μη κατευθυνόμενη ακμή ενώνει δύο κόμβους του γράφου G εάν τα αντίστοιχα μονοπάτια περνούν από την ίδια ζεύξη (link) του δικτύου.
2. Χρωμάτισε τους κόμβους του γράφου G έτσι ώστε δύο συνδεδεμένοι κόμβοι να μην έχουν το ίδιο χρώμα.

Ο σκοπός της στατικής ανάθεσης μήκους κύματος, όπως εκφράζεται από το αντίστοιχο πρόβλημα χρωματισμού είναι να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων μηκών κύματος.

Το πρόβλημα είναι NP-complete και ο ελάχιστος αριθμός χρωμάτων που χρειάζονται είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Ωστόσο, υπάρχουν επαρκείς σειριακοί

αλγόριθμοι χρωματισμού (sequential graph-coloring) οι οποίοι είναι βέλτιστοι σε ότι αφορά στο πλήθος των χρωμάτων που χρησιμοποιούν.

Σε μία σειριακή προσέγγιση χρωματισμού γράφου, η πορεία που ακολουθείται είναι: στο ήδη χρωματισμένο μέρος του γράφου προστίθεται κάθε φορά μία νέα κορυφή (κόμβος) και οι ακμές που συνδέουν τη νέα κορυφή με αυτές που ήδη υπάρχουν. Ο σκοπός είναι ο χρωματισμός των νέων ακμών κρατώντας το συνολικό αριθμό των χρωμάτων του γράφου ελάχιστο. Αποδεικνύεται ότι, εάν $\chi(G)$ είναι ο ελάχιστος αριθμός χρωμάτων που απαιτείται (χρωματικός αριθμός του γράφου) τότε:

$$\chi(G) \leq \Delta(G) + 1 \quad [9]$$

όπου $\Delta(G)$ είναι ο μέγιστος βαθμός του γράφου (βαθμός μίας κορυφής ονομάζεται το πλήθος των ακμών που έχουν άκρο αυτήν την κορυφή). Για το σειριακό χρωματισμό γράφου η συνηθέστερη προσέγγιση είναι να εισάγονται στο γράφημα πρώτες οι κορυφές με το μεγαλύτερο βαθμό (largest fit).

Άλλες προσεγγίσεις στο πρόβλημα της ανάθεσης μήκους κύματος με χρωματισμό γράφου δίνονται στο [15]. Οι προσεγγίσεις αυτές αναφέρονται σε οπτικά WDM δίκτυα με τοπολογία δακτυλίων ή δέντρων δακτυλίων, και η αναφορά τους δεν είναι στους σκοπούς αυτής της εργασίας.

3.2 Δυναμική Ανάθεση Μήκους Κύματος

Στην περίπτωση που οι διαδρομές των συνδέσεων δεν είναι προκαθορισμένες η ανάθεση μήκους κύματος πρέπει να γίνεται δυναμικά, δηλαδή ανάλογα με της διαδρομή που επιλέχθηκε να αποφασίζεται και το μήκος κύματος που θα χρησιμοποιηθεί. Η ανάθεση μπορεί να γίνει σε κάθε κόμβο ή μόνο στον αρχικό (εάν υπάρχει ο περιορισμός της συνέχειας του μήκους κύματος). Για τη δυναμική ανάθεση μήκους κύματος στη βιβλιογραφία προτείνονται ευρετικοί τρόποι (heuristics), των οποίων ο σκοπός είναι να ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα μπλοκαρίσματος μιας κλήσης. Οι ευρετικοί τρόποι που προτείνονται είναι οι: Random, First-Fit, Least-Used/SPREAD, Most-Used/PACK, Min-Product, Least Loaded, MAX-SUM, Relative Capacity Loss, Wavelength Reservation και Protecting Thershold. [8] [9]. Οι τρόποι αυτοί υλοποιούνται ως αλγόριθμοι που εκτελούνται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του δικτύου και μπορούν να συνδυαστούν με διάφορες προσεγγίσεις για την δρομολόγηση της σύνδεσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ευρετικοί τρόποι (heuristics) που προτείνονται στη βιβλιογραφία.[8][9]. Σε όλες τις μεθόδους που

παρουσιάζονται, υποθέτουμε πως ισχύει ο περιορισμός της συνέχειας του μήκους κύματος (wavelength continuity constraint)

1. **Random Wavelength Assignment** : Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, πρώτα αναζητούνται τα ελεύθερα μήκη κύματος και επιλέγεται ένα τυχαία (συνήθως με ομοιόμορφη κατανομή)
2. **First-Fit** : Σε αυτή τη μέθοδο τα μήκη κύματος είναι αριθμημένα. Η αναζήτηση ελεύθερου μήκους κύματος ξεκινάει σειριακά από αυτό με το μικρότερο αριθμό και μόλις βρεθεί κάποιο ελεύθερο, γίνεται η ανάθεση. Με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιούνται περισσότερο τα μήκη κύματος με μικρότερο αύξοντα αριθμό ενώ αυτά με μεγάλο αριθμό μένουν ελεύθερα για να χρησιμοποιηθούν ενδεχομένως από κάποιες μεγάλες διαδρομές. Η μέθοδος αυτή, όπως και η προηγούμενη, δεν χρειάζεται γενική (global) πληροφορία για την κατάσταση του δικτύου. Ωστόσο, υπερέχει από την τυχαία ανάθεση (Random) γιατί δεν ελέγχονται ταυτόχρονα όλα τα μήκη κύματος μίας διαδρομής, αλλά ένα-ένα και η ανάθεση γίνεται στο πρώτο ελεύθερο.
3. **Least-Used/ SPREAD** : Στην προσέγγιση αυτή από τα ελεύθερα μήκη κύματος, η ανάθεση γίνεται στο μήκος κύματος που χρησιμοποιείται λιγότερο στο δίκτυο. Η γενική αρχή είναι να διαμεριστεί ισότιμα το συνολικό φορτίο στο δίκτυο. Η επίδοση του SPREAD είναι χειρότερη από αυτήν της τυχαίας ανάθεσης, αφού αφενός απαιτεί τη συλλογή γενικής (global) πληροφορίας και αφετέρου απαιτεί επιπλέον αποθηκευτικό χώρο και υπολογιστικό φορτίο. Στην πράξη δεν χρησιμοποιείται.
4. **Most-Used/ PACK** : Η προσέγγιση αυτή ακολουθεί αντίθετη λογική από την προηγούμενη. Αφού γίνει η αναζήτηση των ελεύθερων μηκών κύματος, η ανάθεση γίνεται σε αυτό που έχει τη μεγαλύτερη χρήση στο δίκτυο. Το υπολογιστικό φορτίο, οι απαιτήσεις σε αποθηκευτικό χώρο και η ανάγκη συνεχούς ανανέωσης της πληροφορίας για την κατάσταση του δικτύου είναι παρόμοια με αυτή του SPREAD. Ωστόσο, έχει ελαφρά καλύτερη επίδοση από τον first-fit, καθώς είναι καλύτερος στο να

συμπιέζει τις συνδέσεις σε όσο το δυνατόν πιο λίγα μήκη κύματος, απελευθερώνοντας έτσι πόρους του δικτύου.

5. **Min – Product** : Χρησιμοποιείται σε δίκτυα πολλαπλών οπτικών ινών (multifiber networks) και είναι το αντίστοιχο του first-fit. Σε αυτή τη μέθοδο, υπολογίζεται πρώτα το γινόμενο:

$$\prod_{l \in \pi(p)} D_{lj}$$

όπου D_{lj} το πλήθος των χρησιμοποιούμενων ινών ανά ζεύξη l και μήκος κύματος j ,

και $\pi(p)$ το σύνολο των ζεύξεων που απαρτίζουν το μονοπάτι p .

Ο αλγόριθμος αναζητεί το σύνολο X των μηκών κύματος που ελαχιστοποιεί το παραπάνω γινόμενο και επιλέγει ένα από αυτά, με προκαθορισμένη σειρά. Ο min-product δεν έχει τόσο καλές επιδόσεις όσο ο first-fit προσαρμοσμένος για δίκτυα πολλαπλών ινών και επιπλέον, παρουσιάζει μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος.

6. **Least-Loaded** : Και αυτός ο αλγόριθμος είναι σχεδιασμένος για δίκτυα πολλαπλών ινών. Επιλέγει το μήκος κύματος με το μικρότερο αύξοντα αριθμό που ικανοποιεί τη συνθήκη

$$\max_{j \in S_p} \min_{l \in \pi(p)} (M_l - D_{lj})$$

όπου D_{lj} το πλήθος των χρησιμοποιούμενων ινών ανά ζεύξη l και μήκος κύματος j ,

$\pi(p)$ το σύνολο των ζεύξεων που απαρτίζουν το μονοπάτι p ,

S_p το σύνολο των διαθέσιμων μηκών κύματος στο μονοπάτι p ,

και M_l το πλήθος των ινών στη ζεύξη l .

Στην περίπτωση δικτύων μίας ίνας (single –fiber) ο αλγόριθμος εκφυλίζεται σε first-fit. Η επίδοση του σε πιθανότητα «μπλοκαρίσματος», είναι καλύτερη από αυτή των Most-Used και First-Fit σε δίκτυα πολλαπλών ινών.

7. **Max-Sum** : Ο αλγόριθμος αυτός αναφέρεται σε δίκτυα πολλαπλών ινών. Βασική υπόθεση είναι ότι ο πίνακας κυκλοφορίας (traffic matrix) είναι γνωστός εκ των προτέρων και ότι η διαδρομή για κάθε σύνδεση είναι

προκαθορισμένη. Οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται αν δεχθούμε ότι ο πίνακας κίνησης είναι σταθερός για κάποιο χρονικό διάστημα και άρα οι διαδρομές για κάθε εν δυνάμει μονοπάτι μπορούν να υπολογιστούν μέσα στο χρονικό διάστημα αυτό. Ο αλγόριθμος αυτός αναθέτει μία σύνδεση σε ένα μήκος κύματος, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας που απομένει στο μονοπάτι. Αυτό, εκφραζόμενο διαφορετικά, σημαίνει ότι ο αλγόριθμος προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την απώλεια χωρητικότητας του μονοπατιού που προκαλεί η ανάθεση του μήκους κύματος.

8. **Relative Capacity Loss** : Είναι μία παραλλαγή του αλγορίθμου Max-Sum. Η διαφορά είναι ότι ενώ ο προηγούμενος αλγόριθμος ελαχιστοποιεί την απώλεια χωρητικότητας που προκαλεί η ανάθεση του μήκους κύματος, αυτός ο αλγόριθμος ελαχιστοποιεί τη σχετική απώλεια της χωρητικότητας, δηλαδή την απώλεια διαιρούμενη με τη χωρητικότητα που είχε το μονοπάτι πριν την ανάθεση.
9. **Wavelength Reservation** : Σε αυτή τη μέθοδο, ένα μήκος κύματος σε μία ζεύξη δεσμεύεται για μία συγκεκριμένη σύνδεση και αποκλειστικά για αυτήν. Ακόμα και αν το μήκος κύματος δεν χρησιμοποιείται από την αντίστοιχη σύνδεση, δεν μπορεί να παραχωρηθεί σε άλλη. Η τεχνική αυτή ελαττώνει την πιθανότητα «μπλοκαρίσματος» για συνδέσεις που περνούν από ενδιάμεσους κόμβους (multihop) ενώ την αυξάνει για συνδέσεις που γίνονται με μία ζεύξη (single-hop)
10. **Protecting Threshold** : Σε αυτή τη μέθοδο, μία σύνδεση ενός βήματος (single-hop) χρησιμοποιεί ένα μήκος κύματος μόνο αν ο αριθμός των ανενεργών μηκών κύματος σε μία ζεύξη είναι μεγαλύτερος ή ίσος από κάποιο δεδομένο ελάχιστο.

Οι δύο τελευταίοι αλγόριθμοι, δεν αποσκοπούν στο να μειώσουν τη συνολική πιθανότητα μπλοκαρίσματος μίας σύνδεσης, αλλά στο να την καταναείμουν πιο δίκαια ανάμεσα σε συνδέσεις που απασχολούν λίγες ή περισσότερες ζεύξεις (links).

Σύγκριση των αλγορίθμων με προσομοίωση [9]: Η σύγκριση περιλαμβάνει τους πρώτους 8 αλγορίθμους, σε συνδυασμό με προκαθορισμένη δρομολόγηση σε συγκεκριμένο δίκτυο. Η προσομοίωση δείχνει ότι όταν στο δίκτυο υπάρχει μία ίνα ανά ζεύξη (single fiber), οι αλγόριθμοι Max-Sum και Relative Capacity Loss έχουν

ελαφρά καλύτερη επίδοση σε πιθανότητα «μπλοκαρίσματος» όταν το φορτίο είναι υψηλό. Όταν ο αριθμός των ινών ανά ζεύξη είναι δύο, σε μεγάλο φορτίο, υπερέχουν οι Least-Loaded και Max-Sum, ενώ όταν ο αριθμός των ινών ανά ζεύξη είναι 4, ο Least-Loaded υπερέχει. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η διαφορές των επιδόσεων δεν είναι σημαντικές.

Πολυπλοκότητα [9]. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η πολυπλοκότητα των 8 πρώτων αλγορίθμων ανάθεσης μήκους κύματος.

Αλγόριθμος	Πολυπλοκότητα
Random	$O(W)$
First-Fit	$O(W)$
Least-Used/SPREAD	$O(WLM)$
Most-Used/PACK	$O(WLM)$
Min-Product	$O(KW)$
Least Loaded	$O(KW)$
MAX-SUM	$O(WK^3)$
Relative Capacity Loss	$O(WK^3)$

W: το πλήθος των μηκών κύματος στο δίκτυο

L: το πλήθος των ζεύξεων (links) στο δίκτυο

M: το πλήθος των ινών ανά ζεύξη

K: το πλήθος των κόμβων στο δίκτυο.

Παρατηρούμε ότι οι Max-Sum και RCL παρουσιάζουν μεγάλη πολυπλοκότητα, ενώ οι πιο απλοί τρόποι ανάθεσης είναι οι Random και First-fit .

Στο [16] εξετάζεται η απόδοση των αλγορίθμων First-fit και Least- Loaded, σε συνδυασμό με προκαθορισμένη δρομολόγηση (Fixed routing) και συγκρίνεται με τον συνδυασμό δρομολόγησης ελάχιστης συμφόρησης (Least congestion) και ανάθεσης μήκους κύματος Least Loaded, σε δίκτυα που επιτρέπουν τη μετατροπή του μήκους κύματος (wavelength conversion). Το κέρδος στην πιθανότητα «μπλοκαρίσματος» και στη χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου (utilisation) που προκύπτει από τη μετατροπή του μήκους κύματος (wavelength conversion gain), είναι σημαντικό μόνο σε δίκτυα μίας ίνας (single – fiber) και για χαμηλό φορτίο.

4. Κατανεμημένη Διαχείριση Συνδέσεων Σε Δίκτυα WDM

4.1 Κατανεμημένη δέσμευση μήκους κύματος (Distributed wavelength reservation).

Σε δίκτυα WDM, αφού επιλεγθεί το μονοπάτι φωτός (lightpath) είναι απαραίτητο να δεσμευθούν οι πόροι του δικτύου (κατάλληλο μήκος κύματος σε κάθε ζεύξη) που είναι απαραίτητοι για τη σύνδεση. Μόλις γίνει η δέσμευση των πόρων, μπορεί να αρχίσει η μεταφορά δεδομένων. Είναι, λοιπόν, απαραίτητη η ύπαρξη κανόνων (πρωτοκόλλων) τα οποία καθορίζουν το πώς γίνεται η δέσμευση των πόρων κι η αποδέσμευσή τους μετά το τέλος της σύνδεσης. Σε μεγάλης κλίμακας οπτικά δίκτυα, οι τεχνικές κεντρικού ελέγχου δεν είναι εφικτές. Επομένως, πρωτόκολλα κατανεμημένης δέσμευσης μήκους κύματος είναι απαραίτητα. Αυτού του είδους τα πρωτόκολλα, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες : αυτά που κάνουν τη δέσμευση «προς τα μπρος» (forward reservation) ή πρωτόκολλα δέσμευσης από την πηγή (Source Initiated Reservation - SIR) και αυτά που κάνουν τη δέσμευση προς τα πίσω (backward reservation) ή πρωτόκολλα δέσμευσης από τον προορισμό (Destination Initiated Reservation - DIR). Σε ένα πρωτόκολλο «προς-τα-μπρος» δέσμευσης, η σειρά της δέσμευσης των μηκών κύματος είναι από την πηγή προς τον προορισμό. Αντίθετα, στην «προς-τα-πίσω» δέσμευση, τα μήκη κύματος δεσμεύονται με σειρά από τον προορισμό προς την πηγή. [1]

Εκτός όμως από τον τρόπο της δέσμευσης, ένα πρωτόκολλο ελέγχου της κίνησης πρέπει να έχει ενσωματωμένη απάντηση για την τακτική που ακολουθείται όταν μία σύνδεση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. Όταν ένα πρωτόκολλο αντιληφθεί ότι η πραγματοποίηση μίας σύνδεσης δεν προοδεύει, υπάρχουν δύο τακτικές που μπορεί να ακολουθηθούν: να αποδεσμευθούν οι πόροι που έχουν δεσμευθεί μέχρι εκείνη τη στιγμή και η αίτηση να θεωρηθεί «μπλοκαρισμένη» (απομάστευση – dropping), ή να κρατηθούν οι δεσμευμένοι πόροι για κάποιο χρονικό διάστημα, με την προοπτική να αποδεσμευθούν και οι υπόλοιποι πόροι που απαιτούνται και η σύνδεση να πραγματοποιηθεί. (κράτηση – holding). Τέλος, ένα πρωτόκολλο μπορεί να ταξινομηθεί και με κριτήριο το πόσο επιθετική (aggressive) ή συντηρητική (conservative) είναι η δέσμευση που επιτρέπει. Σε μία επιθετική τακτική δέσμευσης,

το πρωτόκολλο προσπαθεί να δεσμεύσει όσο το δυνατό περισσότερα μήκη κύματος μέχρι να γίνει η σύνδεση. Στη συνέχεια, τα μήκη κύματος που δεν είναι απαραίτητα στη σύνδεση αποδεσμεύονται. Αντίθετα, σε μία τακτική συντηρητικής δέσμησης, το πρωτόκολλο προσπαθεί να κάνει εφικτή τη σύνδεση, χρησιμοποιώντας όσο το δυνατό λιγότερους πόρους στη διαδικασία της δέσμησης. [1]

Πριν την περιγραφή των βασικών αρχών της «προς-τα-μπρος» και «προς-τα-πίσω» δέσμησης, σημειώνεται ότι για τη λειτουργία ενός καταναμημένου πρωτοκόλλου ελέγχου συνδέσεων, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός «σκιώδους» δικτύου μέσω του οποίου ανταλλάσσονται οι πληροφορίες ελέγχου μεταξύ των κόμβων. Ένα τέτοιο δίκτυο, μπορεί να είναι ένα ηλεκτρονικό δίκτυο με την ίδια φυσική τοπολογία με το βασικό δίκτυο ή και ένα κανάλι του βασικού δικτύου. Το δίκτυο ελέγχου λειτουργεί με μεταγωγή πακέτου και έχει πολύ μικρότερη κίνηση από το βασικό δίκτυο μεταφοράς δεδομένων. [1]

«Προς-τα-Μπρος» Δέσμηση (Forward Reservation).[1] Τα πακέτα ελέγχου που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία ενός τέτοιου πρωτοκόλλου είναι τα εξής: *Πακέτα Δέσμησης (Reservation packets)*, *Πακέτα Επιβεβαίωσης (Acknowledgement packets)*, *Πακέτα Αποτυχίας (Fail ή Negative Acknowledgement packets)* και *Πακέτα Αποδέσμησης (Release packets)*. Η δέσμηση των μηκών κύματος γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο. Όταν ο κόμβος-πηγή επιθυμεί να συνδεθεί με κάποιον κόμβο-προορισμό, συνθέτει ένα *πακέτο δέσμησης*, το οποίο περιέχει πληροφορία και για τα μήκη κύματος που η σύνδεση μπορεί να χρησιμοποιήσει. Το πακέτο δρομολογείται στον κόμβο-προορισμό. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος, καθορίζει την επόμενη ζεύξη (link) στην οποία θα στείλει το πακέτο και υπολογίζει την τομή του συνόλου των μηκών κύματος που το πακέτο περιέχει και του συνόλου των μηκών κύματος που είναι ελεύθερα στην επόμενη ζεύξη. Αν η τομή των δύο συνόλων είναι κενή, αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει διαθέσιμο μήκος κύματος για να πραγματοποιηθεί η σύνδεση. Οι τακτικές που μπορούν να ακολουθούν είναι δύο. Η απομάστευση (dropping) ή η αναμονή (holding). Στην απομέστευση, μόλις διαπιστωθεί ότι δεν υπάρχει ελεύθερο μήκος κύματος για τη σύνδεση, ένα *πακέτο αποτυχίας* στέλνεται στην πηγή. Στην αναμονή, ο κόμβος αποθηκεύει για κάποιο χρονικό διάστημα το *πακέτο δέσμησης* και περιμένει την αποδέσμηση κάποιου μήκους κύματος. Αν αυτό δεν συμβεί, στέλνει ένα *πακέτο αποτυχίας* στην πηγή.

Στην περίπτωση που υπάρχουν ελεύθερα μήκη κύματος, το *πακέτο δέσμευσης* ενημερώνεται με τα ελεύθερα μήκη κύματος, τα οποία δεσμεύονται από τον κόμβο, και στη συνέχεια προωθείται. Όταν το *πακέτο δέσμευσης* φθάσει στον προορισμό, ελέγχεται το σύνολο των μηκών κύματος, και αν δεν είναι κενό, επιλέγεται ένα μήκος κύματος. Από τον προορισμό φεύγει ένα *πακέτο επιβεβαίωσης* το οποίο περιέχει πληροφορία και για το μήκος κύματος που επιλέχθηκε. Κάθε κόμβος που δέχεται το *πακέτο επιβεβαίωσης*, αποδεσμεύει τα μήκη κύματος που δεν επιλέχθηκαν και προωθεί το *πακέτο*. Μόλις η πηγή λάβει το *πακέτο επιβεβαίωσης*, αρχίζει να στέλνει δεδομένα. Για τον τερματισμό της σύνδεσης, η πηγή στέλνει ένα *πακέτο αποδέσμευσης*.

Η επιθετικότητα ή συντηρητικότητα στη δέσμευση, καθορίζεται από τον αριθμό των ελεύθερων μηκών κύματος με τα οποία ενημερώνεται το *πακέτο δέσμευσης* από την πηγή. Εάν στο *πακέτο δέσμευσης* υπάρχουν όλα τα ελεύθερα μήκη κύματος που διαθέτει η πηγή τότε σε κάθε κόμβο κρατούνται όλα τα δυνατά μήκη κύματος για να επιτευχθεί η σύνδεση. Σε αυτή την περίπτωση, η δέσμευση είναι επιθετική. Εάν η πηγή ενημερώσει το *πακέτο δέσμευσης* με ένα μόνο μήκος κύματος, τότε η δέσμευση είναι συντηρητική.

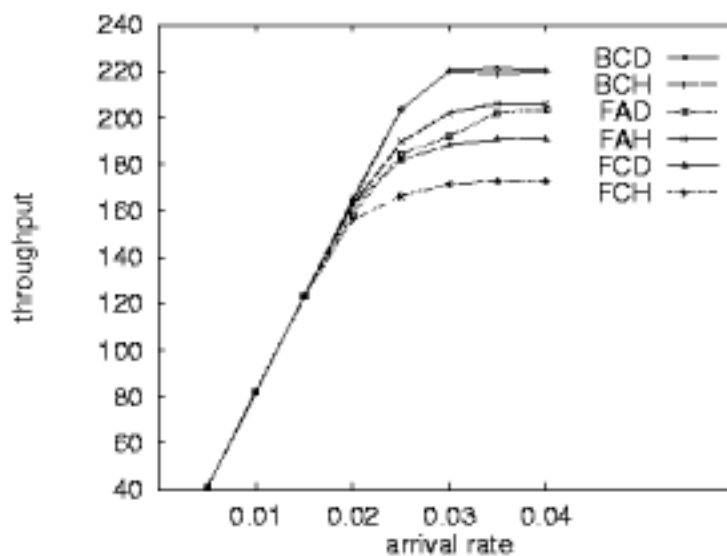
«Προς-τα-Πίσω» Δέσμευση (Backward Reservation). [1] Τα πακέτα ελέγχου που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία ενός πρωτοκόλλου προς-τα-πίσω δέσμευσης είναι τα παρακάτω: *Πακέτα Διερεύνησης (Probe packets)*, *Πακέτα Δέσμευσης (Reservation packets)*, *Πακέτα Επιβεβαίωσης (Acknowledgement packets)*, *Πακέτα Αποτυχίας (Fail packets)*, *Πακέτα Αρνητικής Επιβεβαίωσης (Negative Acknowledgement packets)* και *Πακέτα Αποδέσμευσης (Release packets)*. Η δέσμευση του μήκους κύματος γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο: Όταν ο κόμβος-πηγή επιθυμεί να συνδεθεί με κάποιον κόμβο-προορισμό, συνθέτει ένα *πακέτο διερεύνησης* το οποίο περιέχει πληροφορία και για τα ελεύθερα μήκη κύματος που υπάρχουν διαθέσιμα. Το *πακέτο διερεύνησης* προωθείται στον προορισμό με τρόπο ανάλογο με αυτόν που προωθείται το *πακέτο δέσμευσης* στην προς-τα-μπρος δέσμευση. Η διαφορά είναι ότι το *πακέτο διερεύνησης* στην πορεία του προς τον προορισμό δεν δεσμεύει μήκη κύματος. Όταν το *πακέτο διερεύνησης* φτάσει στον προορισμό, ελέγχεται το σύνολο των μηκών κύματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση και, αν δεν είναι κενό, δημιουργείται ένα *πακέτο δέσμευσης*, το οποίο προωθείται προς την πηγή. Το *πακέτο δέσμευσης* περιέχει ένα υποσύνολο των

ελεύθερων μηκών κυμάτων (ανάλογα με το πόσο επιθετικό είναι το πρωτόκολλο) . Το πακέτο δέσμευσης ακολουθεί την πορεία προορισμός – πηγή, δεσμεύοντας μήκη κύματος με τρόπο ανάλογο με αυτόν της προς-τα-εμπρός δέσμευσης. Όταν φτάσει στην πηγή με μη κενό σύνολο μηκών κύματος, η πηγή επιλέγει ένα μήκος κύματος, και δημιουργεί ένα *πακέτο επιβεβαίωσης*, το οποίο στέλνεται στον προορισμό. Το *πακέτο επιβεβαίωσης* αποδεσμεύει τα μήκη κύματος που δεν χρειάζονται στη σύνδεση. Η πηγή μπορεί να αρχίσει να μεταδίδει δεδομένα αμέσως μετά την αποστολή του *πακέτου επιβεβαίωσης*.

Εκτίμηση Επίδοσης

Στο σχήμα 5 φαίνονται οι επιδόσεις σε συνολική μέγιστη ροή των διάφορων πρωτοκόλλων δέσμευσης μήκους κύματος [17]. Τα πρωτόκολλα ονομάζονται με τρία γράμματα που δείχνουν την τακτική που ακολουθείται στο καθένα. (B: Backward, F: Forward, C: Conservative, A: Aggressive, D: Dropping, H: Holding). Έτσι, για παράδειγμα, το BCD είναι το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί «προς-τα-πίσω» συντηρητική δέσμευση, με

τακτική απομάστευσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5, τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν «προς-τα-πίσω» συντηρητική δέσμευση, είτε με τακτική απομάστευσης ή αναμονής, υπερέχουν σαφώς των άλλων. Από τα πρωτόκολλα «προς-τα-εμπρος» δέσμευσης, υπερέχουν αυτά που

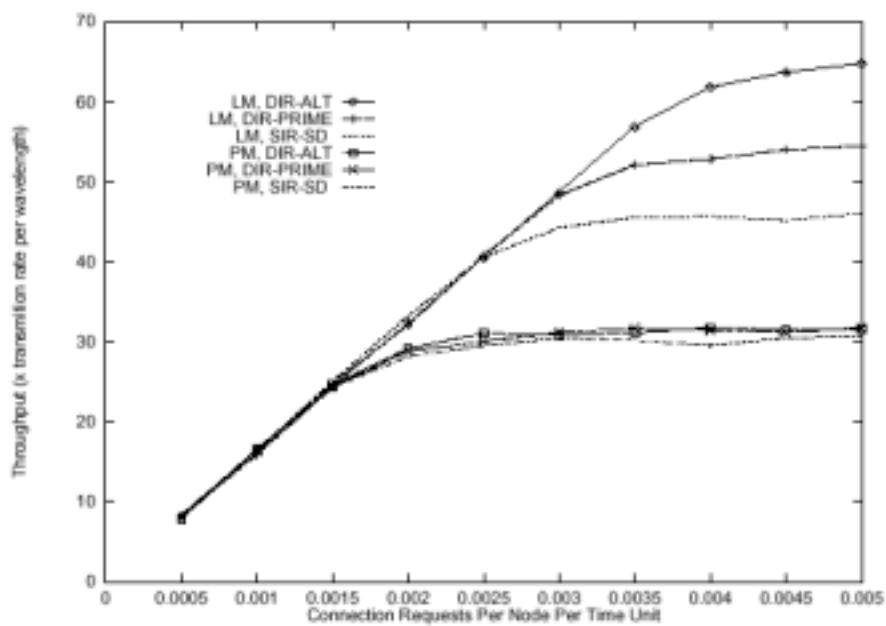


Σχήμα 5. Συνολική Μέγιστη Ροή (Throughput) , για διάφορα πρωτόκολλα δέσμευσης μήκους κύματος. [17]

ακολουθούν επιθετική τακτική και αυτά που ακολουθούν τακτική απομάστευσης. Το βασικό μειονέκτημα της επιθετικής δέσμευσης είναι ότι γίνεται σπατάλη εύρους ζώνης μέχρι την εγκατάσταση της σύνδεσης. Έτσι, σε δίκτυα με μεγάλο αριθμό μηκών κύματος ανά ίνα, τα επιθετικά πρωτόκολλα αναμένονται να έχουν καλύτερη επίδοση. Επίσης, στο [17] αναφέρεται ότι με χρήση προσομοίωσης φαίνεται ότι η

έλλειψη της δυνατότητας μετατροπής του μήκους κύματος (wavelength conversion) μειώνει τη συνολική μέγιστη ροή του δικτύου. Επιπλέον, φαίνεται ότι μεγάλο μέρος του εύρους ζώνης που χάνεται λόγω της έλλειψης μετατροπής του μήκους κύματος, μπορεί να ανακτηθεί από τη χρήση πρωτοκόλλων «προς-τα-πίσω» δέσμευσης.

Στο [20] γίνεται σύγκριση των δύο κατηγοριών πρωτοκόλλων SIR και DIR. Και εκεί διαπιστώνεται ότι τα πρωτόκολλα DIR έχουν καλύτερες επιδόσεις από τα SIR ειδικά σε δίκτυα που έχουν τη δυνατότητα μετατροπής του μήκος κύματος, δηλαδή κάνουν πολυπλεξία ζεύξης (Link Multiplexing), όπως φαίνεται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6. Απόδοση πρωτοκόλλων SIR και DIR σε δίκτυα πολυπλεξίας ζεύξης (LM) και δίκτυα πολυπλεξίας μονοπατιού (PM)

4.2 Πρωτόκολλα Ελέγχου και Διαχείρισης Σύνδεσης

Όπως σε κάθε δίκτυο που είναι προσανατολισμένο προς τη σύνδεση, έτσι και στα δίκτυα WDM είναι απαραίτητο ένα πρωτόκολλο το οποίο διαχειρίζεται τις συνδέσεις, δηλαδή είναι ικανό να ρυθμίζει τα διακοπτικά στοιχεία του δικτύου (network switches) ώστε να εγκατασταθεί μία σύνδεση με επιτυχία και να απελευθερώνει τους πόρους που χρησιμοποιήθηκαν από προηγούμενες συνδέσεις. Βασικά στοιχεία ενός τέτοιου πρωτοκόλλου εκτός από την επιλογή του μονοπατιού φωτός που θα χρησιμοποιηθεί για μία σύνδεση είναι ο τρόπος εγκατάστασης μίας σύνδεσης, ο τρόπος της κατάργησής της, η ενημέρωση των κόμβων για τη λογική τοπολογία του δικτύου και η ανάνηψη (recovery) από σφάλματα που οφείλονται σε τρίτους παράγοντες. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο προσεγγίσεις για πρωτόκολλα Κατανεμημένου Ελέγχου και Διαχείρισης. (Distributed Control and Management): Η πρώτη αναφέρεται ως προσέγγιση με βάση την Κατάσταση της Ζεύξης (Link State) και η δεύτερη ως προσέγγιση Κατανεμημένης Δρομολόγησης (Distributed Routing).

Προσέγγιση Κατάστασης Ζεύξης (Link State Approach) [4]: Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση σε κάθε κόμβο διατηρείται πληροφορία για ολόκληρη την τοπολογία του δικτύου και επίσης πληροφορία για το ποια μήκη κύματος χρησιμοποιούνται σε κάθε ζεύξη. Με την άφιξη μίας αίτησης σύνδεσης στον κόμβο, επιλέγεται με τη βοήθεια της τοπολογικής πληροφορίας το μονοπάτι φωτός (lightpath) που θα χρησιμοποιηθεί. Στη συνέχεια, ο κόμβος προσπαθεί να δεσμεύσει το επιλεγμένο μήκος κύματος σε κάθε μία από τις επιλεγμένες ζεύξεις, στέλνοντας αιτήσεις δέσμευσης σε κάθε κόμβο της επιλεγμένης διαδρομής. Οι ενδιαμέσοι κόμβοι αποκρίνονται με μηνύματα επιβεβαίωσης ή αρνητικής επιβεβαίωσης εάν η δέσμευση που ζητείται είναι δυνατή ή όχι. Εάν όλοι οι κόμβοι αποκριθούν θετικά, τότε ένα μήνυμα εγκατάστασης (Setup) στέλνεται από την πηγή προς όλους τους κόμβους και αρχίζει η μεταφορά των δεδομένων. Στην περίπτωση που, κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης, μία δέσμευση δεν είναι δυνατή, τότε η πηγή στέλνει ένα μήνυμα κατάργησης (Takedown) σε όλους τους κόμβους για να αποδεσμεύσουν τα ήδη δεσμευμένα μήκη κύματος και η αίτηση «μπλοκάρεται».

Κάθε φορά που μία σύνδεση εγκαθίσταται ή απεγκαθίσταται, ο κάθε κόμβος που εμπλέκεται μεταδίδει προς όλους τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου με πληροφορία για τη νέα κατάσταση των ζεύξεων που συνδέονται με αυτόν.

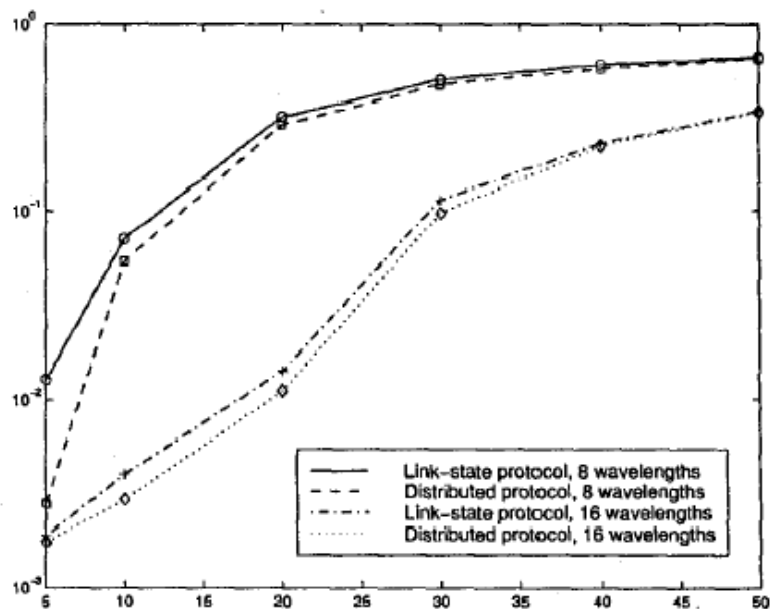
Προσέγγιση Κατανεμημένης Δρομολόγησης [18] : Σε αυτή την προσέγγιση, ο κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα δρομολόγησης για κάθε μήκος κύματος ο οποίος καθορίζει το επόμενο βήμα (hop) για κάθε προορισμό και το κόστος που αντιστοιχεί (το κόστος μπορεί να είναι αριθμός βημάτων ή πραγματικές αποστάσεις). Με την άφιξη μίας αίτησης σύνδεσης ο κόμβος επιλέγει το μήκος κύματος με το μικρότερο κόστος για το συγκεκριμένο προορισμό και προωθεί την αίτηση στον επόμενο κόμβο της διαδρομής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στον επόμενο κόμβο, μέχρι η αίτηση να φτάσει στον προορισμό. Από εκεί στέλνεται ένα μήνυμα επιβεβαίωσης, προς την πηγή, προς την αντίστροφη πορεία. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος που λαμβάνει το μήνυμα δεσμεύει το μήκος κύματος. Όταν τελικά το μήνυμα φτάσει στην πηγή, αρχίζει η μεταφορά των δεδομένων. Αν ένας κόμβος στην διαδρομή δεν μπορεί να κάνει τη ζητούμενη δέσμευση, στέλνει ένα μήνυμα αρνητικής επιβεβαίωσης, με την αντίστροφη πορεία.. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι που το λαμβάνουν αποδεσμεύουν τα δεσμευμένα μήκη κύματος και η πηγή προσπαθεί να εγκαταστήσει τη σύνδεση με τον ίδιο τρόπο σε άλλο μήκος κύματος. Σε περίπτωση αποτυχίας σε όλα τα διαθέσιμα μήκη κύματος η αίτηση «μπλοκάρεται».

Με την εγκατάσταση ή την απεγκατάσταση μίας σύνδεσης, κάθε κόμβος της διαδρομής στέλνει στους γειτονικούς του κόμβους ένα μήνυμα ενημέρωσης για την κατάσταση της ζεύξης που μόλις έχει αλλάξει. Οι κόμβοι που παίρνουν το μήνυμα κάνουν, αν χρειαστεί αλλαγές στους πίνακες δρομολόγησής τους και με τη σειρά τους ενημερώνουν τους γειτονικούς τους κόμβους.

Σύγκριση των δύο προσεγγίσεων: Ένα βασικό μειονέκτημα της προσέγγισης της Κατάστασης Ζεύξης (Link State Approach) είναι το ότι λόγω του τρόπου ενημέρωσης των κόμβων κάθε φορά που εγκαθίσταται ή απεγκαθίσταται μία σύνδεση χρειάζεται αρκετό εύρος ζώνης για το δίκτυο ελέγχου. Επίσης, λόγω του τρόπου της δέσμευσης των πόρων, υπάρχει σοβαρή καθυστέρηση στην εγκατάσταση μίας σύνδεσης (connection setup delay). Ειδικότερα, διαπιστώνεται ότι [18]:

- Η προσέγγιση κατανεμημένης δρομολόγησης δίνει μικρότερο χρόνο εγκατάστασης της σύνδεσης

- Όσο πιο μεγάλο είναι το δίκτυο τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στο απαιτούμενο εύρος ζώνης που χρειάζεται το δίκτυο ελέγχου στις δύο προσεγγίσεις. Αυτό οφείλεται στο ότι η Κατανεμημένη Δρομολόγηση δεν απαιτεί την ενημέρωση κάθε κόμβου για την κατάσταση των ζεύξεων, πράγμα που χρειάζεται στην εναλλακτική ζεύξη.
- Συγκρίνοντας την πιθανότητα «μπλοκαρίσματος» μίας κλήσης, ανάμεσα στις δύο προσεγγίσεις, παρατηρείται ότι η κατανεμημένη δρομολόγηση υπερέχει σημαντικά μόνο σε χαμηλό φορτίο . Όταν το φορτίο είναι υψηλό, οι επιδόσεις των δύο προσεγγίσεων είναι παρόμοιες, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7



Σχήμα 7. Πιθανότητα «μπλοκαρίσματος» σε σχέση με το φορτίο για πειραματικό δίκτυο με 8 και 16 μήκη κύματος. [18]

- Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της προσέγγισης Κατάστασης Ζεύξης είναι ότι επειδή σε κάθε κόμβο υπάρχει ολική πληροφορία για το δίκτυο, επιτρέπει δρομολόγηση με περισσότερη πληροφορία. Αυτό προσθέτει μεγαλύτερη ανοχή σφαλμάτων σε ένα δίκτυο.

5. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν αλγόριθμοι δρομολόγησης και ανάθεσης μήκους κύματος, σε οπτικά δίκτυα τεχνολογίας πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (WDM). Η έμφαση δόθηκε σε δίκτυα ευρείας περιοχής με τυχαία τοπολογία (mesh) όπου, λόγω του μεγέθους (αριθμού κόμβων) είναι απαραίτητη η χρήση καταναμημένων τρόπων διαχείρισης και ελέγχου. Επίσης, έμφαση δόθηκε σε προσαρμοστικές τεχνικές δρομολόγησης, οι οποίες υπολογίζουν το μονοπάτι φωτός (lightpath) που θα χρησιμοποιηθεί από μία σύνδεση, όταν ζητηθεί η σύνδεση. Οι τεχνικές που μελετήθηκαν, αναφέρονται κυρίως σε δίκτυα πολυπλεξίας μονοπατιού (path multiplexing) και αυτό γιατί η μετατροπή του μήκους κύματος ενός μονοπατιού σε κάποιο κόμβο, απαιτεί υλική υποδομή η οποία είναι δαπανηρή, αλλά και τα αποτελέσματα που προσφέρει δεν είναι θεαματικά.

Το βασικό πλεονέκτημα των προσαρμοστικών τεχνικών είναι η αποδοτικότερη χρήση των πόρων του δικτύου (network resource utilization) καθώς επιτρέπουν σε μία σύνδεση να χρησιμοποιεί πόρους όταν τους χρειάζεται και να τους αποδεσμεύει όταν η σύνδεση λήξει. Έτσι, είναι δυνατή η δικτύωση με λιγότερες ζεύξεις (links). Από την άλλη πλευρά, οι αλγόριθμοι προσαρμοστικής δρομολόγησης έχουν πολυπλοκότητα και άρα αυξημένο υπολογιστικό φορτίο στους κόμβους.

Παρουσιάστηκαν επίσης πρωτόκολλα, που καθορίζουν τη δέσμευση των πόρων του δικτύου από μία σύνδεση. Στη βιβλιογραφία φαίνεται ότι τα πρωτόκολλα που κάνουν «προς-τα-πίσω» δέσμευση (πρωτόκολλα DIR) υπερέχουν σε επιδόσεις τόσο σε δίκτυα πολυπλεξίας ζεύξης (Link Multiplexing) όσο και σε δίκτυα πολυπλεξίας μονοπατιού (Path Multiplexing). Από την άλλη πλευρά σε σχέση με τα πρωτόκολλα SIR, είναι πιο σύνθετα, με αποτέλεσμα να χρειάζεται μεγαλύτερη πληροφορία στο υποκείμενο δίκτυο ελέγχου και άρα περισσότερο εύρος ζώνης.

Τέλος, παρουσιάστηκαν δύο προσεγγίσεις για πρωτόκολλα που αφορούν στη διαχείριση συνδέσεων του δικτύου. Φαίνεται στη βιβλιογραφία πως προσέγγιση της καταναμημένης δρομολόγησης υπερέχει σε καθυστερήσεις εγκατάστασης μίας σύνδεσης (setup delays) και σε πιθανότητα «μπλοκαρίσματος» σε περιπτώσεις υψηλού φορτίου. Από την άλλη πλευρά, η προσέγγιση της κατάστασης ζεύξης φαίνεται πως έχει πλεονεκτήματα στην καλύτερη δρομολόγηση μίας σύνδεσης, λόγω της καλύτερης πληροφορίας που διαθέτουν οι κόμβοι αλλά και στην ανοχή σφαλμάτων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] X. Yuan, R. Gupta, and R. Melhem “Distributed Control In Optical WDM Networks” Department of Computer Science, University of Pittsburg
<http://citeseer.nj.nec.com/yuan96distributed.html>
- [2] Jason P. Jue and Gaoxi Xiao “An Adaptive Routing Algorithm for Wavelength-Routed Optical Networks with a Distributed Control Scheme” Proceedings, Ninth International Conference on Computer Communications and Networks (IC3N’2000), Las Vegas, NV, October 2000.
<http://www.utdallas.edu/~jjue/publications/>
- [3] Rajiv Ramaswami and K. Sivaravan “Routing and Wavelength Assignment in all Optical Networks”
- [4] Rajiv Ramaswami and Andrian Segall “Distributed Network Control for Optical Networks” IEEE/ACM Transactions On Networking 1996.
<http://citeseer.nj.nec.com/62213.html>
- [5] Ling Li and Arun K. Somani “Dynamic Wavelength Routing Using Congestion and Neighborhood Information” . IEEE/ACM Transactions on Networking 7(5): 779-786 (1999).
http://dblp.uni-trier.de/db/indices/a-tree/s/Somani@Arun_K=.html
- [6] B. Mukherjee and Hui Zang “Survey of State-of-the-Art”, από το βιβλίο “Optical WDM Networks, Principles and Practice” των K.M. Sivalingam και S. Subramaniam.
- [7] C. Qiao and Myungsik Yoo “A Taxonomy of Switching Techniques” από το βιβλίο “Optical WDM Networks, Principles and Practice” των K.M. Sivalingam και S. Subramaniam.
- [8] Ahmed Mokhtar and Murat Azizoglou “Adaptive Wavelength Routing in All-Optical Networks” IEEE\ ACM Transactions on Networking (1997)
<http://citeseer.nj.nec.com/mokhtar97adaptive.html>
- [9] H. Zang, J. Jue and B. Mukherjee “A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM networks”
<http://www.utdallas.edu/~jjue/publications/>
- [10] T.E Stern and K.Bala “Multiwavelength Optical Networks, A Layered Approach”, Addison-Wesley Publications.
- [11] J. Jue “Design and Analysis of Architectures and Protocols for WDM Optical Networks”, PhD dissertation, University of California, Davis 1999.
<http://www.utdallas.edu/~jjue/publications/>
- [12] H. Zang, J. Jue, L. Sahasrabudde, R. Rumamurthy and B. Mukherjee “Dynamic Lightpath Establishment in Wavelength-Routed WDM Networks”, IEEE Communications Magazine vol 39, no 9, September 2001.
<http://www.utdallas.edu/~jjue/publications/>
- [13] Ling Li and Arun K. Somani “Dynamic Wavelength Routing Techniques and Performance” από το βιβλίο “Optical WDM Networks, Principles and Practice” των K.M. Sivalingam και S. Subramaniam.

- [14] O. Basbugoglu “Distributed Routing and Wavelength Assignment in WDM Networks”, PhD dissertation, Dep of Electrical Engineering, Middle East Technical University, 2000.
- [15] Peng-Jun Wan “Multichannel Optical Networks”, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [16] E. Karasan and E. Ayanoglou “Effects of Wavelength Routing and Selection Algorithms on Wavelength Conversion Gain in WDM Optical Networks”, IEEE/ACM Transactions on Networking 1998.
<http://citeseer.nj.nec.com/karasan98effects.html>
- [17] X. Yuan, R. Melhem, R. Gupta, Y. Mei, C. Qiao “Distributed Control Protocols For Wavelength Reservation And Their Performance Evaluation” (1998) <http://citeseer.nj.nec.com/yuan98distributed.html>
- [18] H. Zang, J. Jue, L. Sahasrabudhe, R. Rumamurthy and B. Mukherjee “Connection Management for Wavelength-Routed WDM Networks”, Proceedings, IEEE Globecom 99, Rio De Janeiro, BRASIL, December 1999
www.utdallas.edu/~jjue/publications/
- [19] C. Qiao and Y. Mei “Wavelength Reservation Under Distributed Control” IEEE/LEOS summer topical meeting: Broadband Optical Networks.
www.cs.buffalo.edu/~qiao/leos1.ps
- [20] Y. Mei and C. Qiao “Efficient Distributed Control Protocols for WDM All-Optical Networks” (1997) <http://citeseer.nj.nec.com/mei97efficient.html>
- [21] C. Chang and R. Melhem “Adaptive Global Routing for Multiplexed Optical Communication on Mesh and Torus Networks”
<http://citeseer.nj.nec.com/174656.html>