



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Αρχιτεκτονικές Ελέγχου και Τεχνικές Μετάδοσης
για τη Βελτιστοποίηση της Απόδοσης
Οπτικών WDM Δικτύων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Περιστέρα Α. Μπαζιάνα

Αθήνα, Δεκέμβριος 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Αρχιτεκτονικές Ελέγχου και Τεχνικές Μετάδοσης
για τη Βελτιστοποίηση της Απόδοσης
Οπτικών WDM Δικτύων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Περιστέρα Α. Μπαζιάνα

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ιωάννης Ε. Πουντουράκης

Εμμανουήλ Ν. Πρωτονοτάριος

Ευστάθιος Δ. Συκάς

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 3^η Δεκεμβρίου 2008.

.....
Ι. Πουντουράκης
Καθηγητής

.....
Α.-Γ. Σταφυλοπάτης
Καθηγητής

.....
Ε. Συκάς
Καθηγητής

.....
Ν. Μήτρος
Καθηγητής

.....
Δ. Σιβρίδης
Καθηγητής

.....
Μ. Θεολόγου
Καθηγητής

.....
Η. Αβραμόπουλος
Αν. Καθηγητής

Αθήνα, Δεκέμβριος 2008

.....
Περιστεέρα Α. Μπαζιάνα

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

Copyright © Περιστεέρα Α. Μπαζιάνα, 2008.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την επιστημονική επίβλεψη και την αμέριστη και ολόψυχη ηθική συμπαράσταση του Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Πουντουράκη, η συμβολή του οποίου ήταν καθοριστική στη διερεύνηση τόσο επιστημονικών και όσο και φιλοσοφικών οριζόντων.

Επίσης, την αποφασιστικότητα για την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής τροφοδότησε η ειλικρινής και ανιδιοτελής συμπαράσταση και συμμετοχή όλων εκείνων με τους οποίους συμπορεύθηκα σε μια μακρά διαδρομή, μοιραζόμενοι την πεποίθηση ότι η ερευνητική δραστηριότητα δεν πρέπει να υποτάσσεται στο οικονομικό όφελος.

*Στη μνήμη του πατέρα μου,
για τα φωτεινά μονοπάτια της αγάπης και της γνώσης που χάραξε μέσα μου*

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Σχημάτων	13
Ευρετήριο Πινάκων	15
Περίληψη	17
Περίληψη στην Αγγλική Γλώσσα (Abstract)	19

Μέρος Ι: Οπτικά Πολυδιαυλικά Δίκτυα: Τεχνολογίες και Σύγχρονες Τάσεις

Εισαγωγή	23
----------------	----

Κεφάλαιο 1 : Οπτικά Πολυδιαυλικά Δίκτυα..... 25

1.1	Τεχνολογική εξέλιξη οπτικών δικτύων	26
1.1.1	Πρώτη γενιά οπτικών δικτύων	26
1.1.2	Δεύτερη γενιά οπτικών δικτύων	27
1.2	Χαρακτηριστικά οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς.....	28
1.2.1	Οπτικά πολυδιαυλικά δίκτυα.....	29
1.2.2	Τεχνικές πολύπλεξης οπτικών δικτύων	30
1.3	Οπτικά WDM δίκτυα - Τοπολογίες.....	33
1.3.1	Τοπολογία παθητικού αστέρα	34
1.3.2	Τοπολογία δακτυλίου	35
1.3.3	Σύγκριση τοπολογιών	36
1.4	Μετάδοση και μεταγωγή στα οπτικά WDM δίκτυα.....	37
1.4.1	Επιλογικά WDM δίκτυα καθολικής εκπομπής.....	37
1.4.2	Δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος.....	38
1.5	Στοιχεία οπτικών δικτύων	39
1.5.1	Οπτικοί εκπομποί.....	39
1.5.2	Οπτικοί δέκτες και φίλτρα.....	40

Κεφάλαιο 2 : Απόδοση Οπτικών WDM Δικτύων – Αρχιτεκτονικές και Πρωτόκολλα.. 43

2.1	Παράμετροι απόδοσης πολυδιαυλικών δικτύων	43
2.2	Παράμετροι απόδοσης οπτικών πολυδιαυλικών δικτύων	47
2.2.1	Συγκρούσεις στα WDM κανάλια	48
2.2.2	Συγκρούσεις στον προορισμό.....	49
2.2.3	Πλήθος οπτικών εκπομπών - δεκτών	51
2.2.4	Καθυστέρηση διάδοσης.....	52
2.2.5	Χρόνος συντονισμού οπτικών φίλτρων.....	53
2.2.6	Οπτο-ηλεκτρονικά και αμιγώς οπτικά δίκτυα	53

Κεφάλαιο 3 : Σύγχρονες Τάσεις στα Οπτικά Δίκτυα.....	57
3.1 Σύγχρονες τάσεις στα WDM μητροπολιτικά δίκτυα.....	57
3.1.1 Σχετικές μελέτες	59
3.2 Άλλες τεχνικές ελέγχου - Τεχνολογία μεταγωγής Optical Burst Switching ...	61
3.2.1 Τεχνικές μεταγωγής και καθορισμού του χρόνου offset.....	62
3.2.2 Παράμετροι απόδοσης δικτύου μεταγωγής OBS	63
3.2.3 Αρχιτεκτονικές δικτύων μεταγωγής OBS	64
Μέρος II: Αρχιτεκτονικές Ελέγχου και Τεχνικές Μετάδοσης Τοπικών WDM	
Δικτύων Τοπολογίας Παθητικού Αστήρα: Αναλυτική Μοντελοποίηση Απόδοσης	
Εισαγωγή	69
Κεφάλαιο 4 : Αναλυτική Μελέτη Απόδοσης Πολυδιαυλικών Δικτύων.....	71
4.1 Μοντέλο επικοινωνίας στο πολυδιαυλικό δίκτυο	71
4.2 Πρωτόκολλο συμμετρικής πρόσβασης.....	72
4.2.1 Μέτρα αποδοτικότητας.....	75
4.2.2 Κανονικοποιημένα μέτρα αποδοτικότητας	76
4.2.3 Αριθμητικά αποτελέσματα	77
4.3 Πρωτόκολλο ασύμμετρης πρόσβασης.....	81
4.3.1 Μέτρα αποδοτικότητας.....	82
4.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα	83
4.4 Συμπεράσματα	86
Κεφάλαιο 5 : Αναλυτική Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου σε Τοπικά WDM	
 Δίκτυα Τοπολογίας Παθητικού Αστήρα - Συμμετρική Πρόσβαση	89
5.1 Μοντέλο δικτύου και πρωτόκολλο πρόσβασης.....	90
5.2 Ανάλυση πρωτοκόλλου αγνοώντας τις συγκρούσεις στον προορισμό	92
5.2.1 Μέτρα αποδοτικότητας.....	94
5.3 Ανάλυση πρωτοκόλλου συνυπολογίζοντας τις συγκρούσεις στον προορισμό.....	95
5.3.1 Μέτρα αποδοτικότητας.....	96
5.4 Αριθμητικά αποτελέσματα	97
5.5 Συμπεράσματα	105
Κεφάλαιο 6 : Αναλυτική Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου σε Τοπικά WDM	
 Δίκτυα Τοπολογίας Παθητικού Αστήρα - Ασύμμετρη Πρόσβαση	107
6.1 Μοντέλο δικτύου και πρωτόκολλο πρόσβασης.....	108
6.2 Ανάλυση πρωτοκόλλου αγνοώντας τις συγκρούσεις στον προορισμό	109
6.2.1 Μέτρα αποδοτικότητας.....	111
6.3 Ανάλυση πρωτοκόλλου συνυπολογίζοντας τις συγκρούσεις στον προορισμό	111
6.3.1 Μέτρα αποδοτικότητας.....	113
6.4 Βελτιστοποίηση απόδοσης	114

6.4.1	Προσεγγιστική ανάλυση πρωτοκόλλου αγνοώντας τις συγκρούσεις στον προορισμό	114
6.4.2	Προσεγγιστική ανάλυση πρωτοκόλλου συνυπολογίζοντας τις συγκρούσεις στον προορισμό	115
6.5	Βέλτιστα μέτρα αποδοτικότητας	116
6.5.1	Βέλτιστη πιθανότητα επανεκπομπής Γ_{opt}	117
6.5.2	Βέλτιστος λόγος διαχωρισμού καναλιών ελέγχου ν_f / ν_b	117
6.5.3	Βέλτιστος αριθμός ν_{f_opt} , ν_{b_opt} καναλιών ελέγχου	118
6.6	Αριθμητικά αποτελέσματα	118
6.7	Συμπεράσματα	126

Μέρος III: Αρχιτεκτονικές Ελέγχου και Τεχνικές Μετάδοσης Μητροπολιτικών WDM Δικτύων Τοπολογίας Δακτυλίου: Μελέτη Απόδοσης σε Περιβάλλον Εκρηκτικής Κίνησης

Εισαγωγή	131
----------------	-----

Κεφάλαιο 7 : Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου – Στρατηγική Αποδέσμευσης Χρονικών Σχισμών στον Αποστολέα.....

7.1	Μοντέλο δικτύου	135
7.2	Δομή πακέτου ελέγχου	137
7.3	Στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα	138
7.4	Πρωτόκολλο πρόσβασης	138
7.5	Ανάλυση	141
7.6	Μοντέλο και παράμετροι εξομοίωσης.....	143
7.7	Αριθμητικά αποτελέσματα	149
7.8	Συμπεράσματα	160

Κεφάλαιο 8 : Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου – Στρατηγική Αποδέσμευσης Χρονικών Σχισμών στον Προορισμό

8.1	Μοντέλο δικτύου	163
8.2	Δομή πακέτου ελέγχου	163
8.3	Στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό	164
8.4	Πρωτόκολλο πρόσβασης	164
8.5	Ανάλυση	164
8.6	Μοντέλο και παράμετροι εξομοίωσης.....	166
8.7	Αριθμητικά αποτελέσματα	167
8.8	Συμπεράσματα	175

Κεφάλαιο 9 : Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου - Ανοχή σε Δικτυακές Καταστροφές.....

9.1	Μοντέλο δικτύου	177
9.2	Δομή πακέτου ελέγχου	177

9.3	Στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών	179
9.4	Πρωτόκολλο πρόσβασης	179
9.5	Ανάλυση	181
9.6	Μοντέλο και παράμετροι εξομοίωσης.....	181
9.7	Αριθμητικά αποτελέσματα	184
Κεφάλαιο 10 : Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου – Αξιοποίηση Πολλαπλών Καναλιών Δεδομένων		185
10.1	Μοντέλο δικτύου	186
10.2	Δομή πακέτου ελέγχου	186
10.3	Στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών	186
10.4	Πρωτόκολλο πρόσβασης	187
10.5	Ανάλυση	187
10.6	Μοντέλο και παράμετροι εξομοίωσης.....	187
10.7	Αριθμητικά αποτελέσματα	188
10.8	Συμπεράσματα	194
Συμπεράσματα – Στοιχεία Μελλοντικής Έρευνας.....		197
Παράρτημα:		199
Κεφάλαιο 11 : Μοντέλα εξομοίωσης τηλεπικοινωνιακής κίνησης		201
11.1	Poisson διαδικασία γέννησης κίνησης.....	201
11.1.1	Ιδιότητες της κατανομής Poisson	202
11.1.2	Φορτίο συνολικής Poisson κίνησης.....	203
11.1.3	Τυχαίες μεταβλητές για τη γέννηση Poisson κίνησης.....	203
11.2	Self-similar διαδικασία γέννησης κίνησης.....	204
11.2.1	Ιδιότητες της κατανομής Pareto	205
11.2.2	Φορτίο συνολικής self-similar κίνησης.....	207
11.2.3	Παράμετροι συνολικής self-similar κίνησης.....	209
11.2.4	Τυχαίες μεταβλητές για τη γέννηση self-similar κίνησης.....	209
Ευρετήριο Συντομογραφιών		211
Ορολογία – Μετάφραση όρων		213
Βιβλιογραφία		215
Δημοσιεύσεις – Βραβεύσεις.....		223

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1.	WDM κανάλια σε μια οπτική ζεύξη.....	28
Σχήμα 1-2.	Τοπολογία παθητικού αστέρα σε WDM δίκτυο	34
Σχήμα 1-3.	Τοπολογία δακτυλίου σε WDM δίκτυο	35
Σχήμα 4-1.	Κανονικοποιημένη διέλευση S_{nor} για $N=1,5,10$	77
Σχήμα 4-2.	Κανονικοποιημένη διέλευση S_{nor} για $M=10,20,30$	78
Σχήμα 4-3.	Ενεργοί σταθμοί για $N=1,5,10$	79
Σχήμα 4-4.	Μέγιστη πιθανότητα απόρριψης.....	80
Σχήμα 4-5.	Κανονικοποιημένη καθυστέρηση D_{nor} για $N=2,5,10$	80
Σχήμα 4-6.	Κανονικοποιημένη διέλευση S_{nor} για $N=1,2, 5,10$	83
Σχήμα 4-7.	Κανονικοποιημένη διέλευση S_{nor} για $M=10,20,30$	84
Σχήμα 4-8.	Ενεργοί σταθμοί για $N=1,5,10$	85
Σχήμα 4-9.	Μέγιστη πιθανότητα απόρριψης.....	85
Σχήμα 4-10.	Κανονικοποιημένη καθυστέρηση D_{nor} για $N=1,2,5,10$	86
Σχήμα 5-1.	Μοντέλο δικτύου πολυδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου	91
Σχήμα 5-2.	Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $R=0,5,10$	98
Σχήμα 5-3.	Καθυστέρηση D_{rc} για $R=0,5,10$	99
Σχήμα 5-4.	Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $v=20,25,30$	99
Σχήμα 5-5.	Καθυστέρηση D , D_{rc} ως προς τη διέλευση S_d , $S_{d,rc}$ για $v=20,25,30$...	100
Σχήμα 5-6.	Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $v=20,25,30$	101
Σχήμα 5-7.	Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $N=10,15,20$	101
Σχήμα 5-8.	Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $N=10,15,20$	102
Σχήμα 5-9.	Καθυστέρηση D , D_{rc} ως προς τη διέλευση S_d , $S_{d,rc}$ για $N=10,15,20$...	103
Σχήμα 5-10.	Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $M=50,100,150$	103
Σχήμα 5-11.	Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $M=50,100,150$	104
Σχήμα 5-12.	Μέγιστη πιθανότητα απόρριψης $P_{rej}(max)$ για $M=50,100,150$ και $N=15,20$	104
Σχήμα 6-1.	Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $v=20,25,30$	119
Σχήμα 6-2.	Καθυστέρηση D_{rc} ως προς τη διέλευση $S_{d,rc}$ για $v=20,25,30$	120
Σχήμα 6-3.	Καθυστέρηση D , D_{rc} ως προς τη διέλευση S_d , $S_{d,rc}$ για $v=20,25,30$...	120
Σχήμα 6-4.	Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $v=20,25,30$	121
Σχήμα 6-5.	Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $N=10,15,20$	122
Σχήμα 6-6.	Καθυστέρηση D_{rc} ως προς τη διέλευση $S_{d,rc}$ για $N=10,15,20$	123
Σχήμα 6-7.	Καθυστέρηση D , D_{rc} ως προς τη διέλευση S_d , $S_{d,rc}$ για $N=10,15,20$...	123
Σχήμα 6-8.	Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $N=10,15,20$	124
Σχήμα 6-9.	Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $M=50,100,150$	125
Σχήμα 6-10.	Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $M=50,100,150$	125
Σχήμα 6-11.	Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $R=0,5,10$	126
Σχήμα 7-1.	Μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου	135
Σχήμα 7-2.	Λογική αρχιτεκτονική κόμβου.....	136
Σχήμα 7-3.	Δομή της χρονικής πολυ-σχισμής.....	137
Σχήμα 7-4.	Δομή πακέτου ελέγχου.....	138
Σχήμα 7-5.	Άφιξη και αναχώρηση μιας χρονικής πολυ-σχισμής σε ένα κόμβο ...	139
Σχήμα 7-6.	Διάγραμμα εξομοίωσης των ενεργειών που εκτελεί ένας κόμβος κατά την άφιξη μιας χρονικής πολυ-σχισμής	147
Σχήμα 7-7.	Μέση διέλευση ανά κόμβο για $N=20$, $W=4$, $B=100$	153
Σχήμα 7-8.	Μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου για $N=20$, $W=4$, $B=100$	154

Σχήμα 7-9.	Μέση πιθανότητα απόρριψης για $N=20, W=4, B=100$	155
Σχήμα 7-10.	Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=20, W=4, B=100$	156
Σχήμα 7-11.	Μέγιστη διέλευση ανά κόμβο	157
Σχήμα 7-12.	Μέσο φορτίο καταχωρητών για $N=20, W=4, B=100,300,500$	158
Σχήμα 7-13.	Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=20, B=100, W=4,5,6$	159
Σχήμα 7-14.	Μέση συνολική καθυστέρηση για $W=4, B=100, N=20,30,40$	160
Σχήμα 8-1.	Δομή πακέτου ελέγχου	163
Σχήμα 8-2.	Μέση διέλευση ανά κόμβο για $N=20, W=4, B=100$	169
Σχήμα 8-3.	Μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές για $N=20, W=4, B=100$	170
Σχήμα 8-4.	Μέση πιθανότητα απόρριψης για $N=20, W=4, B=100$	170
Σχήμα 8-5.	Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=20, W=4, B=100$	172
Σχήμα 8-6.	Μέγιστη διέλευση ανά κόμβο	172
Σχήμα 8-7.	Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=20, W=4, B=100,300,500$	174
Σχήμα 8-8.	Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=20, B=100, W=4,5,6$	174
Σχήμα 8-9.	Μέση συνολική καθυστέρηση για $W=4, B=100, N=20,30,40$	175
Σχήμα 9-1.	Δομή πακέτου ελέγχου	178
Σχήμα 10-1.	Μέση διέλευση ανά κόμβο για $W=32, B=100, N=64,120,150$	190
Σχήμα 10-2.	Μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές για $W=32, B=100,$ $N=64,120,150$	190
Σχήμα 10-3.	Μέση πιθανότητα απόρριψης για $W=32, B=100, N=64,120,150$	191
Σχήμα 10-4.	Μέση συνολική καθυστέρηση για $W=32, B=100, N=64,120,150$	192
Σχήμα 10-5.	Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=64, B=100, W=4,8,32$	193
Σχήμα 10-6.	Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=64, W=32, B=100,300,500$	194
Σχήμα 11-1.	Συνολική self-similar κίνηση από 4 ON-OFF πηγές	204
Σχήμα 11-2.	Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας για $c=1,2$	205
Σχήμα 11-3.	Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για $c=1,2$	206

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 4-1.	Μέγιστη Κανονικοποιημένη Διέλευση $S_{\text{nor}}(\text{max})$	79
Πίνακας 4-2.	Μέγιστη Κανονικοποιημένη Διέλευση $S_{\text{nor}}(\text{max})$	84
Πίνακας 7-1.	Δομοστοιχεία μοντέλου εξομοίωσης.....	145
Πίνακας 7-2.	Παράμετροι μοντέλου εξομοίωσης.....	148
Πίνακας 8-1.	Παράμετροι μοντέλου εξομοίωσης.....	167
Πίνακας 9-1.	Δομοστοιχεία μοντέλου εξομοίωσης.....	182
Πίνακας 9-2.	Παράμετροι μοντέλου εξομοίωσης.....	183
Πίνακας 10-1.	Παράμετροι μοντέλου εξομοίωσης.....	188
Πίνακας 11-1.	Τιμές παραμέτρων σχήματος και θέσης των Pareto κατανομών των ON-OFF πηγών.....	209

Περίληψη

Στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες, η τεχνολογία οπτικών WDM δικτύων αναδεικνύεται ως επικρατούσα τάση για την ανάπτυξη ευρυζωνικών δικτύων. Η τάση αυτή υποδεικνύεται από τη συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη των χρηστών για μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης με σκοπό την εξυπηρέτηση ενός συνεχώς διευρυνόμενου συνόλου σύγχρονων ευρυζωνικών υπηρεσιών, όπως πολυμεσικών εφαρμογών, υπηρεσιών τηλεματικής και γρήγορης πλοήγησης στο διαδίκτυο. Στο περιβάλλον αυτό, τα σύγχρονα WDM δίκτυα οφείλουν να παρέχουν εξασφαλισμένη ποιότητα υπηρεσίας, αξιοπιστία σχετικά με το χρόνο εξυπηρέτησης και το ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων καθώς και ανοχή σε πιθανές δικτυακές ατέλειες. Αρκετά από τα πρωτόκολλα πρόσβασης σε οπτικά WDM δίκτυα, που είτε έχουν ήδη υλοποιηθεί είτε προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία, αξιοποιούν αρχιτεκτονικές καναλιών ελέγχου για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την παροχή εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή συνεισφέρει στην ανάπτυξη αξιόπιστων και αποδοτικών οπτικών WDM δικτύων. Η διδακτορική διατριβή προτείνει σύγχρονες αρχιτεκτονικές ελέγχου και τεχνικές μετάδοσης σε οπτικά WDM δίκτυα, τόσο τοπικής όσο και μητροπολιτικής κλίμακας. Τα αποτελέσματα της διδακτορικής έρευνας συντελούν στην ανάπτυξη αποδοτικών αλγορίθμων πρόσβασης σε οπτικά WDM δίκτυα για την αποφυγή των απωλειών και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, συνυπολογίζοντας τις ιδιαίτερες παραμέτρους που επηρεάζουν τη λειτουργία τους.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής προτείνεται η πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου για τοπικά WDM δίκτυα τοπολογίας παθητικού αστέρα και διατυπώνονται σύγχρονα πρωτόκολλα συμμετρικής και ασύμμετρης πρόσβασης σε αυτή. Στα πρωτόκολλα αυτά αξιοποιείται ως εγγενής ιδιότητα των οπτικών δικτύων η καθυστέρηση διάδοσης της οπτικής ακτινοβολίας για τη διατύπωση αποτελεσματικών αλγορίθμων πρόσβασης που αποφεύγουν τις συγκρούσεις πακέτων τόσο στα WDM κανάλια όσο και στον προορισμό. Σημαντική συνεισφορά της διδακτορικής έρευνας αποτελεί η αναλυτική μοντελοποίηση της απόδοσης των προτεινόμενων πρωτοκόλλων με χρήση μαρκοβιανής ανάλυσης και ο καθορισμός αυστηρών μαθηματικών τύπων για τα μέτρα αποδοτικότητας.

Επίσης, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής προτείνεται η μονοδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου για μητροπολιτικά WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου. Η διδακτορική έρευνα προτείνει μια νέα δικτυακή διεπαφή κόμβου η οποία αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών παρέχοντας υψηλή ικανότητα κλιμάκωσης και συντήρησης. Προτείνονται πολλά πρωτόκολλα πρόσβασης που αξιοποιούν την πληροφορία ελέγχου με αποδοτικούς αλγορίθμους για την πλήρη αποφυγή συγκρούσεων στα κανάλια και στον προορισμό, παρέχοντας ανοχή σε δικτυακά σφάλματα. Η μελέτη πραγματοποιείται συνυπολογίζοντας τον εκρηκτικό χαρακτήρα της τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα σύγχρονα μητροπολιτικά δίκτυα. Τα συμπεράσματα της διδακτορικής έρευνας καταδεικνύουν ότι η προτεινόμενη μονοδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου σε συνδυασμό με τα πρωτόκολλα πρόσβασης βελτιώνει σημαντικά την απόδοση, ιδιαίτερα σε υψηλά φορτία, αξιοποιώντας αποτελεσματικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης της οπτικής ίνας.

Οι προτεινόμενες στην παρούσα διδακτορική διατριβή αρχιτεκτονικές ελέγχου και οι τεχνικές πρόσβασης έτυχαν πολλαπλής δημοσίευσης σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια και αποσκοπούν στο να συνεισφέρουν στη διεθνή ερευνητική μελέτη για ανάπτυξη σύγχρονων οπτικών WDM δικτύων και βελτιστοποίηση της απόδοσης τους.

Λέξεις κλειδιά: WDM, πολυδιαυλικά δίκτυα, μαρκοβιανή ανάλυση, εκτίμηση απόδοσης.

Περίληψη στην Αγγλική Γλώσσα (Abstract)

In modern telecommunications, the optical WDM network technology is arisen as the dominant trend for the development of broadband networks. This trend is suggested by the increasing need of users for more available bandwidth to serve a continuously extended set of modern broadband services, like multi-media applications, telematic services and fast Internet surfing.

In this environment, the contemporary optical WDM networks have to provide guaranteed Quality of Service, reliability concerning the service time and the bit error rate, as well as tolerance to possible network faults. Many access protocols that either have already been developed or have been proposed in the literature, exploit control channels architectures for optical WDM networks to ameliorate the performance and to provide guaranteed Quality of Service.

The present PhD thesis contributes to the development of reliable and efficient optical WDM networks. The PhD thesis proposes modern control architectures and transmission techniques for optical WDM networks, suitable for local and metropolitan area scale. The results of the PhD thesis conduce to the determination of efficient access algorithms for optical WDM networks aiming to avoid the packet loss and to improve the performance, taking into account the parameters that strongly affect to their operation.

In the context of the PhD thesis, the multi-channel control architecture suitable for local WDM networks of passive star topology is proposed and some synchronous protocols for symmetric and asymmetric access rights are presented. In these protocols, the propagation delay latency is exploited as a key attribute of optical WDM networks to develop effective access algorithms that avoid the packet collisions at both the WDM channels and the destination. The analytical modeling of the proposed protocols performance using markovian analysis and the determination of strict mathematical formulas for the performance measures constitutes a significant contribution of the PhD research.

Also, in the context of the PhD thesis the single-channel control architecture suitable for metropolitan area WDM networks of ring topology is proposed. The PhD research proposes a new node network interface that exploits the advantages of tunable transmitters and receivers providing high network scalability and maintenance. Multiple access protocols are proposed that utilize the control information by efficient algorithms to totally avoid the collisions at both the WDM channels and the destination, providing tolerance to network faults. The study is performed taking into account the bursty nature of telecommunication traffic at modern metropolitan area networks. The results of the PhD thesis prove that the proposed single-channel control architecture in conjunction with the access protocols achieves essential performance improvement, especially in high load conditions, effectively exploiting the fiber available bandwidth.

The proposed in the present PhD thesis control architectures and transmission techniques manage multiple publications at several international scientific journals and conferences and aim to contribute to the international research study for the development of modern optical WDM networks and for their performance amelioration.

Keywords: WDM, multi-channel networks, markovian analysis, performance evaluation.

Μέρος Ι:

Οπτικά Πολυδιαυλικά Δίκτυα: Τεχνολογίες και Σύγχρονες Τάσεις

Εισαγωγή

Οι τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων χρόνων, στην περιοχή των οπτικών δικτύων υψηλών ταχυτήτων παρέχουν στους σχεδιαστές δικτύων ένα ευρύ πλήθος εναλλακτικών προτάσεων, για την υλοποίηση και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης οπτικών δικτύων διαφόρων αρχιτεκτονικών και εφαρμογών.

Στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα, η βέλτιστη αξιοποίηση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας, που αγγίζει τα Tb/s, αποτελεί σημαντική παράμετρο για την ανάπτυξη επικοινωνιακών πρωτοκόλλων. Διάφορες τεχνικές αξιοποίησης του έχουν αναπτυχθεί, καθώς και ποικίλες αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων που αυτές εφαρμόζονται. Σήμερα, η κυριότερη τεχνική που εφαρμόζεται για τη βέλτιστη αξιοποίηση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας είναι η πολύπλεξη επιμερισμού μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM). Σύμφωνα με τη WDM τεχνική, το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας διαιρείται σε πολλαπλά παράλληλα κανάλια χαμηλότερης ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων. Κάθε ένα από τα παράλληλα κανάλια αντιστοιχεί σε διαφορετικό οπτικό μήκος κύματος. Έτσι, με τη χρήση της WDM τεχνικής δημιουργείται ένα πολυδιαυλικό οπτικό δίκτυο στο οποίο τα κανάλια διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με τη συχνότητα μετάδοσης του οπτικού σήματος.

Ανάλογα με την αρχιτεκτονική, κάθε σταθμός του οπτικού πολυδιαυλικού δικτύου μπορεί να διαθέτει έναν ή περισσότερους οπτικούς εκπομπούς και δέκτες για να προσπελάσει το δίκτυο. Οι οπτικοί εκπομποί και δέκτες μπορεί να είναι είτε σταθερά συντονισμένοι σε μία καθορισμένη οπτική συχνότητα, είτε συντονιζόμενοι σε διαφορετικές συχνότητες του οπτικού φάσματος.

Στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται διάφορες αρχιτεκτονικές διασύνδεσης των σταθμών ενός WDM δικτύου μεταξύ τους. Οι αρχιτεκτονικές αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το πλήθος των ενδιάμεσων κόμβων κατά τη μετάδοση της πληροφορίας: Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα δίκτυα WDM καναλιών καθολικής εκπομπής, στα οποία έχουν πρόσβαση όλοι οι σταθμοί για τη λήψη των πακέτων πληροφορίας που τους αφορούν. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν δίκτυα δρομολόγησης και μεταγωγής, στα οποία η μετάδοση των πακέτων πληροφορίας από τον εκπομπό στο δέκτη πραγματοποιείται με την επιλογή του μονοπατιού-δρόμου που τους συνδέει. Τα μονοπάτια αυτά είναι συνδέσεις σημείο-προς-σημείο που παρέχει το δίκτυο. Η χρήση WDM καναλιών καθολικής εκπομπής για τη μετάδοση της πληροφορίας από τον εκπομπό στο δέκτη πραγματοποιείται συνήθως στα τοπικά WDM δίκτυα, στα οποία το φορτίο είναι πιο περιορισμένο. Αντίθετα, σε μητροπολιτικά και ευρείας περιοχής WDM δίκτυα, όπου το φορτίο είναι μεγάλο, χρησιμοποιούνται τεχνικές δρομολόγησης και μεταγωγής της πληροφορίας.

Οι τοπολογίες διασύνδεσης των σταθμών στα WDM δίκτυα ποικίλουν και μπορεί να είναι: αστέρα, δακτυλίου και mesh. Σε κάθε τοπολογία, οι σταθμοί του δικτύου ενημερώνονται για την εκπομπή ενός πακέτου προς ένα σταθμό προορισμού είτε παρακολουθώντας το σύνολο των WDM παράλληλων καναλιών, είτε χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα ξεχωριστά κανάλια ελέγχου. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορα πρωτόκολλα για την εξασφάλιση δικαιωμάτων πρόσβασης στο WDM δίκτυο και ελέγχου της επιτυχίας της μετάδοσης.

Επίσης, στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορα πρωτόκολλα πρόσβασης (Medium Access Control – MAC) των σταθμών στα παράλληλα κανάλια του οπτικού πολυδιαυλικού δικτύου. Ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι συγχρονισμού στη μετάδοση δεδομένων στα παράλληλα κανάλια, τα MAC πρωτόκολλα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στα σύγχρονα και στα ασύγχρονα πρωτόκολλα.

Στην ιδανική περίπτωση, ένα πρωτόκολλο για οπτικό WDM δίκτυο επιτρέπει την πλήρη αξιοποίηση της χωρητικότητας της οπτικής ίνας και παρέχει ελάχιστες καθυστερήσεις στη μετάδοση των πακέτων. Στην πραγματικότητα όμως, η απόδοση ενός πρωτοκόλλου για WDM οπτικά δίκτυα εξαρτάται από ένα πλήθος παραμέτρων, που επιδρούν καθοριστικά στην απόδοσή του.

Οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι: η καθυστέρηση διάδοσης τ της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο δίαυλο, ο χρόνος μετάδοσης T ενός πακέτου, ο χρόνος συντονισμού από συχνότητα σε συχνότητα τόσο του συντονιζόμενου εκπομπού όσο και του συντονιζόμενου δέκτη, το πλήθος των οπτικών δεκτών και εκπομπών που διαθέτει κάθε σταθμός, οι συγκρούσεις πακέτων στα WDM κανάλια και οι συγκρούσεις πακέτων στον προορισμό. Οι παράμετροι αυτές περιορίζουν την απόδοση του δικτύου και θέτουν ένα ανώτατο όριο στην αξιοποίηση των πρωτοκόλλων των WDM δικτύων.

Ειδικότερα, ο λόγος της καθυστέρησης διάδοσης τ προς το χρόνο μετάδοσης T χαρακτηρίζει τη μέγιστη απόσταση μεταξύ των σταθμών σε ένα οπτικό δίκτυο. Σε τοπικά WDM δίκτυα, η καθυστέρηση διάδοσης έχει πολύ μικρότερη τιμή από το χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου, και επομένως η παράμετρος $\alpha = \tau / T$ έχει πολύ μικρή τιμή, πολύ μικρότερη της μονάδας. Έτσι, στα τοπικά WDM δίκτυα η επίδραση της καθυστέρησης διάδοσης στην απόδοση του δικτύου μπορεί να αγνοηθεί χωρίς σημαντική απόκλιση από την πραγματικότητα. Αντίθετα, στα μητροπολιτικά και ευρείας περιοχής WDM δίκτυα, η καθυστέρησης διάδοσης έχει υψηλές τιμές αφού οι σταθμοί απέχουν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Έτσι, στα δίκτυα αυτά η παράμετρος α δεν μπορεί να αγνοηθεί από την ανάλυση του συστήματος.

Στα επόμενα κεφάλαια του Μέρους I δίνεται μια εισαγωγή στα χαρακτηριστικά των οπτικών δικτύων, στις αρχιτεκτονικές και τα πρωτόκολλα που έχουν διατυπωθεί στην παγκόσμια βιβλιογραφία. Επίσης, παρουσιάζονται οι κατευθύνσεις στην έρευνα και την ανάπτυξη σύγχρονων οπτικών WDM δικτύων. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν το ερευνητικό περιβάλλον της διδακτορικής διατριβής.

Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται οι γενικές αρχές λειτουργίας των σύγχρονων οπτικών πολυδιαυλικών δικτύων. Επίσης, δίνεται η ιστορική εξέλιξη των οπτικών δικτύων και αναλύονται λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά, οι τοπολογίες και οι τεχνικές μετάδοσης και μεταγωγής των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς. Τέλος, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των στοιχείων που συγκροτούν τα σύγχρονα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι παράμετροι απόδοσης των πολυδιαυλικών και των οπτικών πολυδιαυλικών δικτύων και μελετάται η επίδραση τους στην αποδοτικότητα του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 3 δίνονται συνοπτικά οι σύγχρονες τάσεις στα οπτικά δίκτυα και παρουσιάζονται οι σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές. Επίσης, δίνονται οι σύγχρονες ερευνητικές κατευθύνσεις για την ανάπτυξη μητροπολιτικών WDM δικτύων. Τέλος, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές ανάπτυξης του οπτικού δικτύου HORNET και της τεχνολογίας μεταγωγής οπτικού σήματος Optical Burst Switching (OBS).

Κεφάλαιο 1 : Οπτικά Πολυδιαυλικά Δίκτυα

Στις μέρες μας, οι τεχνολογικές εξελίξεις στην περιοχή των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών έχουν εντείνει τη συνεχή απαίτηση για τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν συνεχώς αυξανόμενη χωρητικότητα και συνεχώς μειούμενο κόστος.

Η απαίτηση αυτή καθοδηγείται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες. Η αλματώδης ανάπτυξη του Διαδικτύου (Internet) και του Παγκόσμιου Ιστού (World Wide Web) έχει επιφέρει τη συνεχή αύξηση των χρηστών τους. Συνεπακόλουθα, έχει επιφέρει την ανάγκη για διάθεση όλο και μεγαλύτερου εύρους ζώνης για τη μεταφορά πληροφορίας μεγάλης χωρητικότητας, όπως κινούμενης εικόνας (video) καθώς και σταθερής εικόνας. Επίσης, στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες η χρονική διάρκεια μιας κλήσης για την επικοινωνία εφαρμογών Internet είναι πολύ μεγαλύτερη από τη χρονική διάρκεια μιας κλήσης φωνής, με αποτέλεσμα τη σημαντική επιβάρυνση των κλασσικών τηλεφωνικών δικτύων με επιπλέον φορτίο που δύσκολα μπορούν να εξυπηρετήσουν [1].

Ταυτόχρονα, τα δίκτυα intranet και extranet και ειδικότερα τα δίκτυα υψηλών ταχυτήτων βρίσκουν συνεχή εφαρμογή σε εταιρείες, δημόσιες υπηρεσίες, πανεπιστήμια, νοσοκομεία για την εξυπηρέτηση καθημερινών λειτουργιών. Η σημερινή απαίτηση για πρόσβαση σε πληροφορίες από οπουδήποτε, ανεξάρτητα από το που βρίσκονται αποθηκευμένες -ακριβώς σαν να βρίσκονταν σε κοντινή απόσταση- διαμορφώνει την ανάγκη τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα να παρέχουν την απαιτούμενη ταχύτητα και αξιοπιστία για την εξυπηρέτηση της.

Είναι λοιπόν προφανές ότι οι σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες απαιτούν τόσο την εγκατάσταση δικτύων με υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, όσο και την ανάπτυξη υπηρεσιών που αξιοποιούν το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Για την εξυπηρέτηση των αναγκών των χρηστών σε χωρητικότητα δικτύου και νέες ευρυζωνικές υπηρεσίες, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι οφείλουν να αναπτύξουν νέες τεχνολογίες, όπως είναι η τεχνολογία οπτικών δικτύων. Αναπόφευκτα, η συνεχής ανάπτυξη νέων τεχνολογιών επιφέρει μείωση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας των δικτύων υψηλών ταχυτήτων και συνεπακόλουθα μείωση του κόστους πρόσβασης των χρηστών σε αυτά [1].

Επιπλέον, η μείωση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας δικτύων υψηλών ταχυτήτων, επιτρέπει την ανάπτυξη και παροχή νέων ευρυζωνικών υπηρεσιών για την αξιοποίηση του, όπως υπηρεσίες τηλεματικής, τηλεϊατρικής, τηλε-εκπαίδευσης. Άμεση συνέπεια είναι η επιπλέον αύξηση του προσφερόμενου φορτίου στο δίκτυο.

Η τεχνολογική εξέλιξη των τελευταίων χρόνων στο πεδίο των οπτικών δικτύων αλλά και οι αυξανόμενες ανάγκες για υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και νέες ευρυζωνικές υπηρεσίες, εγγυώνται ότι σύντομα τα οπτικά δίκτυα θα πάνε να έχουν μόνο ερευνητικό ενδιαφέρον και θα τύχουν σημαντικών εμπορικών εφαρμογών και υλοποιήσεων.

Στην Ελλάδα, η ανάπτυξη και η αξιοποίηση οπτικών δικτύων είναι ακόμα σχετικά περιορισμένη. Παρόλα αυτά, οι τάσεις στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες στη χώρα μας εγγυώνται τη σταδιακή αντικατάσταση των υπάρχοντων ηλεκτρονικών δικτυακών υποδομών από ηλεκτρο-οπτικά ή αμιγώς οπτικά δίκτυα για την εξυπηρέτηση των συνεχώς αναπτυσσόμενων ευρυζωνικών εφαρμογών και υπηρεσιών γρήγορης μετάδοσης δεδομένων.

Αντίθετα, στις τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες του εξωτερικού έχουν συντελεστεί σημαντικά βήματα ανάπτυξης και υλοποίησης σύγχρονων δικτύων οπτικών ινών. Μερικά από αυτά παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι γενικές αρχές λειτουργίας των σύγχρονων οπτικών πολυδιαυλικών δικτύων. Επίσης, δίνεται η ιστορική εξέλιξη των οπτικών δικτύων και αναλύονται λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά, οι τοπολογίες και οι τεχνικές μετάδοσης και μεταγωγής των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς. Τέλος, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των στοιχείων που συγκροτούν τα σύγχρονα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς.

1.1 Τεχνολογική εξέλιξη οπτικών δικτύων

Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για μετάδοση πληροφορίας σε δίκτυα οπτικών ινών έχει συντελέσει καθοριστικά στην σταδιακή αύξηση του προσφερόμενου εύρους ζώνης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Οι οπτικές ίνες παρέχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης συγκριτικά με τα καλώδια χαλκού και είναι λιγότερο ευαίσθητες σε διαφόρων ειδών ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις και άλλες ανεπιθύμητες παρεμβολές. Το γεγονός αυτό καθιστά τις οπτικές ίνες ένα από τα πιο προτιμητέα μέσα διάδοσης δεδομένων μεγάλης χωρητικότητας σε αποστάσεις μεγαλύτερες του ενός χιλιομέτρου.

Το αρχικό μέλημα κατά την έρευνα και ανάπτυξη της τεχνολογίας οπτικών ινών ήταν η μετάδοση δεδομένων σε μεγαλύτερες αποστάσεις χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Η αντικατάσταση όμως των υπάρχοντων δικτύων καλωδίων χαλκού που αποτελούνται από ηλεκτρονικά στοιχεία, από δίκτυα οπτικών ινών που χρησιμοποιούν αποκλειστικά οπτικά στοιχεία είναι μια υλοποίηση αρκετά δαπανηρή. Επίσης, η άμεση και πλήρης αντικατάσταση είναι τεχνικά δύσκολα υλοποιήσιμη. Έτσι, επιλέγεται η σταδιακή ενοποίηση των υπάρχοντων δικτυακών υποδομών με την οπτική τεχνολογία δημιουργώντας υβριδικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Για το λόγο αυτό, κατά την εξέλιξη των δικτύων οπτικών ινών και την ενοποίηση τους με τις υπάρχουσες τηλεπικοινωνιακές υποδομές, διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες οπτικών δικτύων: Τα οπτικά δίκτυα πρώτης και δεύτερης γενιάς [1] των οποίων τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

1.1.1 Πρώτη γενιά οπτικών δικτύων

Τα πρώτα οπτικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ως δίκτυα κορμού για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων των τηλεπικοινωνιακών παρόχων. Η υλοποίηση αυτή δεν απαιτούσε την αντικατάσταση των ηλεκτρονικών κόμβων και υποδομών των υπάρχοντων δικτύων, παρά μόνο την αντικατάσταση του φυσικού μέσου μετάδοσης με οπτικές ίνες.

Η υλοποίηση αυτή οδήγησε στα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς. Στα δίκτυα αυτά η μετάδοση της πληροφορίας στο δίκτυο κορμού πραγματοποιείται μέσω των οπτικών ινών, ενώ η μεταγωγή και δρομολόγηση της πραγματοποιείται ηλεκτρονικά μέσω των υπάρχοντων υποδομών. Είναι προφανές ότι η χρησιμοποίηση οπτικών ινών κατά τη μετάδοση βελτιώνει την ταχύτητα και την απόδοση του δικτύου. Παρόλα αυτά, ο συγκερασμός της οπτικής και της ηλεκτρονικής τεχνολογίας εισάγει σημαντικές καθυστερήσεις κατά τη μετάδοση καθώς και πιθανές απώλειες πληροφορίας κατά τη μεταγωγή και τη δρομολόγηση της.

Η πληροφορία στα υπάρχοντα ηλεκτρονικά δίκτυα είναι δομημένη σύμφωνα με δεδομένα τηλεπικοινωνιακά πρωτόκολλα στα οποία η μετάδοση είναι ηλεκτρονική. Η μετάδοση όμως της πληροφορίας στο οπτικό δίκτυο απαιτεί τη μετατροπή της σε οπτικό

σήμα. Για τη σύγκλιση της οπτικής και της ηλεκτρονικής τεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί και υλοποιηθεί διάφορες τεχνικές που επιτρέπουν τη μετάδοση της πληροφορίας του ηλεκτρονικού δικτύου στο δίκτυο οπτικών ινών.

Οι τεχνικές αυτές έτυχαν της ευρύτερης εφαρμογής στα ακόλουθα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς: στο δίκτυο SONET (Synchronous Optical Network) που υλοποιήθηκε ως δίκτυο κορμού στη Βόρεια Αμερική και στα δίκτυα SDH (Synchronous Digital Hierarchy) που υλοποιήθηκε ως δίκτυο κορμού στην Ευρώπη και την Ασία [1]. Το πιο χαρακτηριστικό οπτικό δίκτυο πρώτης γενιάς είναι το FDDI (Fiber Distributed Data Interface). Το FDDI χρησιμοποιείται για εμπορικούς σκοπούς σε μητροπολιτικά δίκτυα και επιτρέπει τη μετάδοση πληροφορίας με ταχύτητες 100 Mb/s πάνω από μονοτροπική ή πολυτροπική οπτική ίνα.

Η υλοποίηση οπτικών δικτύων πρώτης γενιάς χρησιμοποιείται σήμερα από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους, τόσο στην Ελλάδα όσο και σε άλλες αναπτυγμένες χώρες, για τη μετάδοση πληροφορίας σε δίκτυα κορμού.

1.1.2 Δεύτερη γενιά οπτικών δικτύων

Η έρευνα που πραγματοποιείται στην περιοχή των οπτικών δικτύων έχει δημιουργήσει τις προϋποθέσεις έτσι ώστε τα οπτικά δίκτυα να παρέχουν, εκτός από τη μεταφορά της πληροφορίας, ένα πλήθος ευρυζωνικών υπηρεσιών. Τα ερευνητικά αποτελέσματα οδήγησαν στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς.

Στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς όλο και περισσότερες λειτουργίες των στοιχείων του δικτύου πραγματοποιούνται οπτικά, ενώ αντίθετα περιορίζονται οι ηλεκτρονικές λειτουργίες. Παρόλα αυτά, η πλήρης αντικατάσταση των ηλεκτρονικών στοιχείων του δικτύου από αμιγώς οπτικά στοιχεία δεν είναι ακόμα υλοποιήσιμη. Η τεχνολογική έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί και οι σημερινές προσεγγίσεις απαιτούν ιδιαίτερα υψηλό κόστος που δεν μπορούν να καλύψουν οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι.

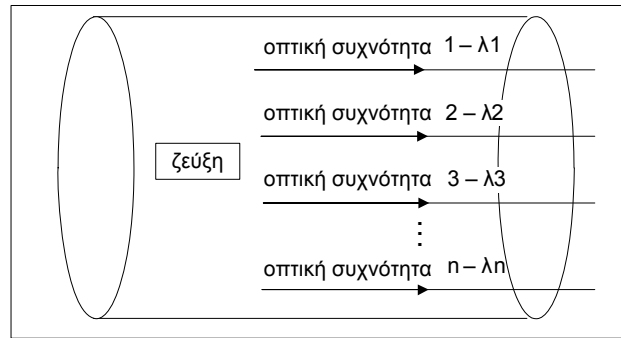
Στη σημερινή δεύτερη γενιά οπτικών δικτύων, μέρος των λειτουργιών μεταγωγής και δρομολόγησης της πληροφορίας πραγματοποιείται οπτικά. Η ανάπτυξη της τεχνικής πολύπλεξης με επιμερισμό μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM) και η εφαρμογή της στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς επιτρέπει την ανάπτυξη υπηρεσιών για την καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας.

Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούν WDM κανάλια διαφορετικών συχνοτήτων για τη ζεύξη μεταξύ δύο σταθμών του δικτύου. Η οπτική ζεύξη είναι ένας αγωγός πληροφορίας υψηλού ρυθμού μετάδοσης που αγγίζει τα Tb/s. Σε κάθε κανάλι της ζεύξης ανατίθεται μια συγκεκριμένη συχνότητα μετάδοσης δεδομένων λ_i , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-1.

Τα σημερινά οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παρέχουν στους χρήστες τους τριών τύπων υπηρεσίες:

- την υπηρεσία του οπτικού μονοπατιού
- την υπηρεσία ιδεατού κυκλώματος
- την υπηρεσία δεδομένο-γράμματος (datagram).

Οι υπηρεσίες αυτές παρέχονται σε συνδέσεις τόσο σημείο-προς-σημείο όσο και σημείο-προς-πολλά-σημεία.



Σχήμα 1-1. WDM κανάλια σε μια οπτική ζεύξη.

Η υπηρεσία οπτικού μονοπατιού εφαρμόζεται σε δίκτυα WDM καναλιών. Το οπτικό μονοπάτι είναι μία ζεύξη μεταξύ δύο σταθμών του δικτύου και ενεργοποιείται με την ανάθεση ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος για τη λειτουργία κάθε επιμέρους τμήματος της ζεύξης [2]. Όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια, σύμφωνα με τη WDM τεχνική τα μήκη κύματος που επιλέγονται για κάθε ζεύξη αποτελούν τα κανάλια μετάδοσης της πληροφορίας και λειτουργούν σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Σύμφωνα με το μοντέλο αναφοράς τηλεπικοινωνιακών δικτύων O.S.I. (Open System Interconnection), η υπηρεσία οπτικού μονοπατιού προσφέρεται στα ανώτερα επίπεδα του δικτύου μετά από αίτηση ανώτερων εφαρμογών. Τέλος, η υπηρεσία οπτικού μονοπατιού προσφέρει λειτουργίες μεταγωγής κυκλώματος [1].

Η υπηρεσία ιδεατού κυκλώματος υλοποιεί τη μεταγωγή κυκλώματος μεταξύ δύο σταθμών στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς. Σε αρκετές περιπτώσεις, το προσφερόμενο εύρος ζώνης στη ζεύξη μεταξύ δύο σταθμών είναι πολύ μεγαλύτερο από το αναγκαίο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στη ζεύξη αυτή. Έτσι, η υπηρεσία ιδεατού κυκλώματος επιμερίζει το προσφερόμενο εύρος ζώνης μιας ζεύξης σε περισσότερες της μιας συνδέσεις, για τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου. Όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια, ο επιμερισμός του εύρους ζώνης της σύνδεσης πραγματοποιείται με τεχνικές πολύπλεξης επιμερισμού χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM) και είναι είτε σταθερός είτε στατιστικά μεταβαλλόμενος.

Τέλος, η υπηρεσία δεδομένο-γράμματος επιτρέπει τη μετάδοση μικρών πακέτων ή μηνυμάτων μεταξύ δύο σταθμών του δικτύου χωρίς την επιβάρυνση εγκατάστασης επιπλέον συνδέσεων, όπως στο πρωτόκολλο Internet.

1.2 Χαρακτηριστικά οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς

Τα σύγχρονα οπτικά δίκτυα υλοποιούνται με τη χρήση οπτικών ινών και οπτικών ή οπτο-ηλεκτρικών στοιχείων. Η τεχνολογική εξέλιξη των τελευταίων χρόνων στην περιοχή των οπτικών δικτύων παρέχει ένα πλήθος εναλλακτικών προτάσεων υλοποίησης οπτικών δικτύων, διαφόρων αρχιτεκτονικών και πρωτοκόλλων.

Οι σύγχρονες υλοποιήσεις οπτικών δικτύων οφείλουν να λαμβάνουν υπόψη τους τα χαρακτηριστικά των σημερινών δικτύων επικοινωνιών που περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά στοιχεία, αφού η πλήρης αντικατάστασή τους από αμιγώς οπτικά δίκτυα δεν είναι ούτε τεχνικά εφικτή αλλά ούτε οικονομικά συμφέρουσα. Οι σύγχρονες τεχνολογικές τάσεις περιγράφουν την ανάγκη για υλοποιήσεις οπτικών δικτύων που θα λειτουργούν κυρίως ως δίκτυα κορμού στα σημερινά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα πρόσβασης ή ως δίκτυα ευρείας περιοχής για την εξυπηρέτηση ευρυζωνικών υπηρεσιών.

Η υλοποίηση οπτικών δικτύων αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της απόδοσης των δικτύων. Οι σημαντικότερες παράμετροι απόδοσης που λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση ενός οπτικού δικτύου είναι οι ακόλουθες [2]:

- το διαθέσιμο εύρος ζώνης
- ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων
- η καθυστέρηση μετάδοσης της πληροφορίας.

Με βάση τις παραπάνω παραμέτρους απόδοσης, τα οπτικά δίκτυα παρέχουν ικανοποιητική απόδοση συγκριτικά με δίκτυα άλλων τεχνολογιών. Το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας προσεγγίζει την τάξη των Tb/s, γεγονός που προσφέρει ένα ευζωνικό περιβάλλον επικοινωνίας. Είναι χαρακτηριστικό ότι το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας είναι περίπου δέκα τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από αυτό των τηλεφωνικών γραμμών.

Επίσης, ο ρυθμός σφαλμάτων στα οπτικά δίκτυα είναι σημαντικά μικρότερος σε σχέση με τα σημερινά τηλεφωνικά δίκτυα κατά περίπου δέκα τάξεις μεγέθους. Για παράδειγμα, πριν από μερικά χρόνια ένας διαμορφωτής-αποδιαμορφωτής (modem) φωνής εμφάνιζε τυπική τιμή ρυθμού σφαλμάτων περίπου 10^{-5} για πλοήγηση στο Internet. Σήμερα, η τιμή αυτή μπορεί να μειωθεί σε 10^{-15} [2] περίπου για πλοήγηση στον ιστό με χρήση οπτικών δικτύων. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται από φυσική άποψη λόγω της υψηλής επίδρασης εξωτερικών παραγόντων κατά τη μετάδοση της πληροφορίας μέσω των χάλκινων καλωδίων των σημερινών τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Έτσι, στα δίκτυα χάλκινων καλωδίων η επίδραση της κίνησης των ηλεκτρονίων σε αυτά μειώνει σημαντικά την απόδοσή τους, σε σχέση με την αμελητέα επίδραση της κίνησης των φωτονίων στην απόδοση των οπτικών δικτύων.

Η χρήση της οπτικής ίνας ως μέσο μετάδοσης δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα την αξιοσημείωτα μικρή τιμή της καθυστέρησης διάδοσης του οπτικού σήματος. Αντίθετα, τα σύγχρονα οπτικά δίκτυα εισάγουν σημαντικές καθυστερήσεις κατά τη μεταγωγή της οπτικής πληροφορίας μέσω των ηλεκτρονικών ή/και οπτο-ηλεκτρονικών στοιχείων του δικτύου. Παρόλα αυτά, η συνολική καθυστέρηση μετάδοσης στα οπτικά δίκτυα είναι σημαντικά μικρότερη αυτής των τηλεπικοινωνιακών δικτύων χάλκινων καλωδίων.

1.2.1 Οπτικά πολυδιαυλικά δίκτυα

Στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα, η βέλτιστη αξιοποίηση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας, που αγγίζει τα Tb/s, αποτελεί σημαντική παράμετρο για την ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι πολύ υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων σε μια οπτική ίνα δεν είναι δυνατόν να εξυπηρετηθούν από τα οπτικά ή/και οπτο-ηλεκτρονικά στοιχεία των σημερινών δικτύων. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές αξιοποίησης του σημαντικά μεγάλου εύρους ζώνης, καθώς και ποικίλες αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων που αυτές εφαρμόζονται.

Σήμερα, οι τεχνικές που εφαρμόζονται για τη βέλτιστη αξιοποίηση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας είναι τεχνικές πολύπλεξης της πληροφορίας. Στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα, η πιο διαδεδομένη τεχνική είναι η τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού μήκους κύματος WDM [3], που παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

Σύμφωνα με τη WDM τεχνική, το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας διαιρείται σε πολλαπλά παράλληλα κανάλια χαμηλότερης ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων από αυτή της οπτικής ίνας. Κάθε ένα από τα παράλληλα κανάλια αντιστοιχεί σε διαφορετικό οπτικό μήκος κύματος.

Είναι προφανές ότι η διαίρεση της συνολικής χωρητικότητας της οπτικής ίνας σε πολλαπλά παράλληλα κανάλια δημιουργεί ένα πολυδιαυλικό δίκτυο παράλληλων καναλιών καθολικής εκπομπής. Ειδικότερα, με τη χρήση της WDM τεχνικής δημιουργείται ένα πολυδιαυλικό οπτικό δίκτυο στο οποίο τα κανάλια διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με τη συχνότητα μετάδοσης του οπτικού σήματος σε αυτά.

Η μοντελοποίηση της λειτουργίας των οπτικών δικτύων βασίζεται στην ανάλυση και λειτουργία των κλασσικών πολυδιαυλικών δικτύων. Για το λόγο αυτό σημαντικό μέρος της διδακτορικής έρευνας επενδύεται στη διατύπωση αυστηρών μαθηματικών εργαλείων ανάλυσης της απόδοσης των πολυδιαυλικών δικτύων [J.1],[J.2],[C.1],[C.2], που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4. Τα ερευνητικά συμπεράσματα επεκτάθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες παραμέτρους που επιδρούν στη απόδοση των οπτικών πολυδιαυλικών δικτύων, οι οποίες παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους. Έτσι, η διδακτορική έρευνα οδήγησε στη διατύπωση ορισμένων σύγχρονων πρωτοκόλλων για οπτικά WDM δίκτυα [J.3],[J.5],[J.6],[C.3],[C.4] που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5 και στο Κεφάλαιο 6.

1.2.2 Τεχνικές πολύπλεξης οπτικών δικτύων

Στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, η αυξανόμενη απαίτηση για όλο και μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης καθώς και το μεγάλο κόστος των οπτικών ινών δημιουργούν την ανάγκη για καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης των οπτικών δικτύων και δυνατότητα ταυτόχρονης πρόσβασης πολλαπλών χρηστών σε αυτά.

Η πρόσβαση όλο και περισσότερων χρηστών στα οπτικά δίκτυα για την επικοινωνία μέσω ευρυζωνικών υπηρεσιών που απαιτούν όλο και μεγαλύτερο εύρος ζώνης, προϋποθέτει όλο και μεγαλύτερη διαθέσιμη χωρητικότητα. Στα οπτικά δίκτυα, για την ικανοποίηση αυτής της ανάγκης χρησιμοποιούνται τεχνικές πολύπλεξης, προκειμένου μεγάλος αριθμός χρηστών να έχουν ταυτόχρονη-πολλαπλή πρόσβαση στο δίκτυο χωρίς να παρατηρείται υπέρθεση και καταστροφή των μεταδιδόμενων σημάτων.

Οι κυριότερες τεχνικές πολύπλεξης της πληροφορίας στα οπτικά δίκτυα είναι:

- η τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM).
- η τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM).
- η τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού κώδικα (Code Division Multiplexing – CDM).

1.2.2.1 WDM

Η τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού μήκους κύματος WDM αποσκοπεί στην εκμετάλλευση του μεγάλου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας. Στόχος της πολύπλεξης WDM είναι ο υποβιβασμός της υψηλής ταχύτητας μετάδοσης της πληροφορίας μέσα από το οπτικό δίκτυο, στην ταχύτητα λειτουργίας των ηλεκτρονικών ή/και οπτο-ηλεκτρονικών στοιχείων των τελικών χρηστών. Η τεχνική WDM χρησιμοποιείται τόσο σε οπτικά δίκτυα καθολικής εκπομπής όσο και σε δίκτυα μεταγωγής.

Σύμφωνα με τη WDM τεχνική, η συνολική χωρητικότητα της οπτικής ίνας διαιρείται σε πολλαπλά παράλληλα κανάλια χαμηλότερης ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, που πολυπλέκονται μέσα στο ίδιο φυσικό μέσο. Κάθε ένα από τα παράλληλα κανάλια αντιστοιχεί σε διαφορετικό μήκος κύματος του οπτικού φάσματος [3]-[5]. Τα παράλληλα WDM κανάλια δεν αλληλοκαλύπτονται στη συχνότητα λειτουργίας τους και διακρίνονται

μεταξύ τους ανάλογα με τη συχνότητα μετάδοσης του οπτικού σήματος σε αυτά. Έτσι, με τη χρήση της WDM τεχνικής το οπτικό δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πολυδιαυλικό οπτικό δίκτυο πολλαπλής προσπέλασης στα WDM κανάλια των διαφορετικών συχνοτήτων [6]-[12].

Στη βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί διάφορα MAC πρωτόκολλα για την πρόσβαση των σταθμών στα παράλληλα κανάλια του οπτικού πολυδιαυλικού δικτύου. Ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι συγχρονισμού στη μετάδοση δεδομένων στα παράλληλα κανάλια, η μετάδοση δεδομένων στα WDM κανάλια διακρίνεται σε:

- *Ασύγχρονη μετάδοση:* η μετάδοση των δεδομένων στα παράλληλα WDM κανάλια πραγματοποιείται ασύγχρονα, χωρίς συγχρονισμό και τα MAC πρωτόκολλα είναι ασύγχρονα [6],[8],[9],[11].
- *Σύγχρονη μετάδοση:* ο χρόνος είναι χωρισμένος σε χρονικές σχισμές και η μετάδοση των δεδομένων στα παράλληλα WDM κανάλια πραγματοποιείται με σύγχρονο τρόπο, τα δε MAC πρωτόκολλα πρόσβασης είναι σύγχρονα [6],[11],[13].

Η προσπέλαση των σταθμών του οπτικού δικτύου στα WDM παράλληλα κανάλια, πραγματοποιείται μέσω των οπτικών εκπομπών/δεκτών που κάθε σταθμός διαθέτει. Ανάλογα με την αρχιτεκτονική του οπτικού δικτύου, κάθε σταθμός μπορεί να διαθέτει έναν ή περισσότερους οπτικούς εκπομπούς και δέκτες για να προσπελάσει το δίκτυο των παράλληλων WDM καναλιών.

Στη βιβλιογραφία τα MAC πρωτόκολλα πρόσβασης διακρίνονται ανάλογα με το είδος των εκπομπών και δεκτών που διαθέτουν οι σταθμοί. Έτσι, διακρίνονται σε:

- MAC πρωτόκολλα πρόσβασης στα οποία κάθε εκπομπός ή/και δέκτης σε κάθε σταθμό λειτουργεί σε ένα μόνο μήκος κύματος [8],[9],[14]. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι ο σταθμός διαθέτει σταθερά συντονισμένους εκπομπούς - δέκτες.
- MAC πρωτόκολλα πρόσβασης στα οποία κάθε εκπομπός ή/και δέκτης σε κάθε σταθμό λειτουργεί σε περισσότερα του ενός μήκος κύματος [6],[15],[16]. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι ο σταθμός διαθέτει συντονιζόμενους εκπομπούς – δέκτες.

Ανάλογα με το MAC πρωτόκολλο πρόσβασης, ένας σταθμός που θέλει να εκπέμψει διαμέσου του πολυδιαυλικού δικτύου επιλέγει ένα από τα WDM κανάλια για τη μετάδοση του πακέτου του. Στην περίπτωση που ο σταθμός διαθέτει σταθερά συντονισμένο εκπομπό για τη μετάδοση στο επιλεγμένο WDM κανάλι, η πληροφορία του πακέτου διαμορφώνεται στη συχνότητα του WDM καναλιού και αποστέλλεται στο δίκτυο. Αντίθετα, στην περίπτωση ο σταθμός διαθέτει συντονιζόμενο εκπομπό, η μετάδοση του πακέτου απαιτεί το συντονισμό του συντονιζόμενου εκπομπού στη συχνότητα του επιλεγμένου WDM καναλιού για την εκπομπή της πληροφορίας.

Κατά τη λήψη ενός πακέτου από ένα WDM κανάλι του οπτικού δικτύου, ανάλογα με το MAC πρωτόκολλο πρόσβασης ο σταθμός προορισμού ενημερώνεται για το πακέτο που απευθύνεται προς αυτόν με χρήση τεχνικών ελέγχου [6]. Στην περίπτωση που ο σταθμός διαθέτει σταθερά συντονισμένο δέκτη για τη λήψη από το επιλεγμένο WDM κανάλι, ο σταθμός προορισμού παραλαμβάνει το πακέτο αποδιαμορφώνοντας την πληροφορία από τη συχνότητα του συγκεκριμένου WDM καναλιού [8], [11]. Αντίθετα, στην περίπτωση ο σταθμός διαθέτει συντονιζόμενο δέκτη, η λήψη του πακέτου απαιτεί το συντονισμό του συντονιζόμενου δέκτη στη συχνότητα του επιλεγμένου WDM καναλιού για τη λήψη της πληροφορίας [6], [16].

Στην ιδανική περίπτωση, ένα MAC πρωτόκολλο πρόσβασης για WDM οπτικό δίκτυο επιτρέπει την πλήρη αξιοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου και παρέχει ελάχιστες καθυστερήσεις στη μετάδοση των πακέτων. Στην πραγματικότητα όμως, η απόδοση ενός πρωτοκόλλου για οπτικά WDM δίκτυα εξαρτάται από ένα πλήθος παραμέτρων, που επιδρούν καθοριστικά στην απόδοση του. Οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι:

- η καθυστέρηση διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο διάυλο
- ο χρόνος μετάδοσης ενός πακέτου
- ο χρόνος συντονισμού του εκπομπού και του δέκτη μεταξύ δύο διαφορετικών συχνοτήτων
- το πλήθος των οπτικών εκπομπών και δεκτών που διαθέτει κάθε σταθμός
- οι συγκρούσεις πακέτων στα WDM κανάλια
- οι συγκρούσεις πακέτων στον προορισμό.

Οι παράμετροι αυτές περιορίζουν την απόδοση του δικτύου και θέτουν ένα ανώτατο όριο στην αξιοποίηση των MAC πρωτοκόλλων πρόσβασης WDM δικτύων. Οι παράμετροι αυτές και η επίδραση τους στην απόδοση του οπτικού δικτύου εξετάζονται διεξοδικά σε επόμενες παραγράφους.

1.2.2.2 TDM

Η τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού χρόνου TDM χρησιμοποιείται για την αξιοποίηση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας στα πρώτα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς. Η τεχνική TDM χρησιμοποιείται τόσο σε οπτικά δίκτυα καθολικής εκπομπής όσο και σε δίκτυα μεταγωγής.

Κατά την τεχνική πολύπλεξης TDM οι σταθμοί του δικτύου διακρίνονται μεταξύ τους στο πεδίο του χρόνου και εξυπηρετούνται από φορέα με την ίδια συχνότητα και εύρος ζώνης [17].

Σε ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί τεχνική TDM, ένα πλήθος N σταθμών χρησιμοποιεί ένα κοινό κανάλι καθολικής εκπομπής με εκ περιτροπής δικαιώματα πρόσβασης. Τα δικαιώματα πρόσβασης των σταθμών στο δίκτυο διακρίνονται σε:

- *ισότιμα δικαιώματα πρόσβασης*: όλοι οι σταθμοί του δικτύου -όταν αποκτήσουν δικαιώματα εκπομπής- μπορούν να χρησιμοποιήσουν το κανάλι για T χρονικές στιγμές για την εκπομπή τους.
- *μη-ισότιμα δικαιώματα πρόσβασης*: οι σταθμοί διαμοιράζονται ανισομερώς το κανάλι. Έτσι, ο i σταθμός του δικτύου έχει δικαίωμα εκπομπής στο κανάλι για $(k_i \times T)$ χρονικές σχισμές, όπου $i=1,2,\dots,N$.

Κατά την τεχνική TDM οι σταθμοί του δικτύου είναι απόλυτα συγχρονισμένοι. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μεταδόσεις πακέτων στο δίκτυο να μην εμφανίζουν υπερθέσεις και συγκρούσεις.

Σε ένα οπτικό TDM δίκτυο, η μετάδοση της πληροφορίας μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- με πολύπλεξη των δεδομένων από το σταθμό εκπομπής με χρήση της μεθόδου αλληλοεμπλοκής δυαδικών ψηφίων (bit-interleaving).
- με πολύπλεξη ανά χρονική σχισμή.

Έτσι, κατά τη λήψη της πληροφορίας από το σταθμό προορισμού είναι απαραίτητη η χρήση τεχνικών ανάκτησης ρολογιού για την αποδιαμόρφωση του ωφέλιμου σήματος.

1.2.2.3 CDM

Η τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού κώδικα CDM χρησιμοποιείται σε δίκτυα καθολικής εκπομπής, σε αντίθεση με τις τεχνικές WDM και TDM που χρησιμοποιούνται τόσο σε οπτικά δίκτυα καθολικής εκπομπής όσο και σε δίκτυα μεταγωγής.

Κατά την τεχνική πολύπλεξης CDM, όλοι οι σταθμοί του δικτύου έχουν δικαίωμα ταυτόχρονης πρόσβασης στη συνολική χωρητικότητα της οπτικής ίνας [17]. Προκειμένου να είναι δυνατή η διάκριση των διαφορετικών μεταδόσεων σε ένα CDM δίκτυο, σε κάθε σταθμό του δικτύου έχει ανατεθεί ένας ξεχωριστός κωδικός για την κωδικοποίηση των δεδομένων του.

Κατά την εκπομπή πληροφορίας σε ένα CDM δίκτυο, ο σταθμός-εκπομπός κωδικοποιεί σύμφωνα με το δικό του κωδικό τα δεδομένα του και τα αποστέλλει στο δίκτυο. Κατά τη λήψη πληροφορίας από το δίκτυο, ο σταθμός προορισμού συντονίζεται στο κωδικό αποστολής της πληροφορίας, παραλαμβάνει και αποκωδικοποιεί τα δεδομένα. Είναι προφανές ότι ο σταθμός προορισμού που δεν κατέχει τον κωδικό εκπομπής της πληροφορίας δεν μπορεί να την παραλάβει και να την αποκωδικοποιήσει.

Η τεχνική πολύπλεξης CDM χρησιμοποιείται στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς και παρέχει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις τεχνικές WDM και TDM. Έτσι, η τεχνική CDM παρέχει ένα είδος ασφάλειας στο δίκτυο σε σχέση με τις τεχνικές WDM και TDM, αφού η μεταδιδόμενη πληροφορία μπορεί να παραληφθεί μόνο από το σταθμό που γνωρίζει τον κωδικό αποστολής.

Επίσης, η τεχνική CDM δεν θέτει περιορισμούς σχετικά με το μέγιστο πλήθος των σταθμών στο δίκτυο, όπως θέτουν οι τεχνικές WDM και TDM. Συγκεκριμένα για τη βέλτιστη αξιοποίηση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας, στην τεχνική WDM το πλήθος των σταθμών στο δίκτυο δεν πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο του πλήθους των WDM καναλιών. Επίσης, στην τεχνική TDM η απόδοση του δικτύου μειώνεται δραματικά όταν το πλήθος των σταθμών στο δίκτυο είναι μεγαλύτερο του πλήθους των χρησιμοποιούμενων χρονικών σχισμών. Αντίθετα, σε ένα CDM δίκτυο, μπορούν να προστεθούν νέοι σταθμοί που χρησιμοποιούν νέους κωδικούς χωρίς να μειωθεί η απόδοση του δικτύου [17].

1.3 Οπτικά WDM δίκτυα - Τοπολογίες

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία έχουν μελετηθεί διάφορες αρχιτεκτονικές οπτικών WDM δικτύων, διαφόρων τοπολογιών. Ανάλογα με τη μέγιστη απόσταση μεταξύ των σταθμών ενός δικτύου, έχουν προταθεί διαφορετικές τοπολογίες για την υλοποίηση ενός οπτικού δικτύου. Συγκεκριμένα:

- για τοπικά δίκτυα (Local Area Networks – LANs) οπτικών ινών προτείνονται διάφορες αρχιτεκτονικές τοπολογίας παθητικού αστέρα [3]-[16], [18],[19].
- για μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Area Networks – MANs) και για δίκτυα ευρείας περιοχής (Wide Area Networks – WANs) προτείνονται αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων τοπολογίας δακτυλίου [20]-[23].

Στις επόμενες παραγράφους εξετάζονται τα χαρακτηριστικά των τοπολογιών αυτών σε οπτικά WDM δίκτυα.

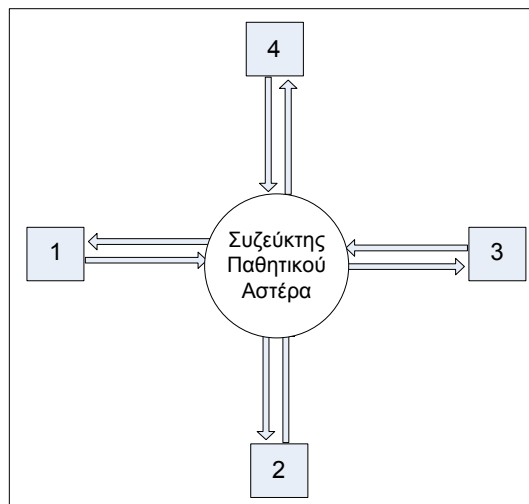
1.3.1 Τοπολογία παθητικού αστέρα

Στη βιβλιογραφία, μια από τις πιο διαδεδομένες αρχιτεκτονικές οπτικών WDM δικτύων που εφαρμόζεται κυρίως σε τοπικά δίκτυα, είναι η τοπολογία παθητικού αστέρα. Η τοπολογία αυτή παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 1-2.

Στην τοπολογία αυτή, το πολυδιαυλικό δίκτυο αποτελείται από N παράλληλα WDM κανάλια για τη μετάδοση πακέτων δεδομένων. Κάθε ένα από τα N παράλληλα κανάλια λειτουργεί σε συγκεκριμένη συχνότητα του οπτικού φάσματος λ . Έτσι, τα κανάλια δεδομένων διακρίνονται ανάλογα με τη συχνότητα, σε $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$. Σε πολλά πρωτόκολλα, η τοπολογία παθητικού αστέρα διαθέτει ένα επιπλέον κανάλι ελέγχου που λειτουργεί στη συχνότητα λ_0 , για τη μετάδοση πακέτων ελέγχου και την εξασφάλιση δικαιωμάτων πρόσβασης των σταθμών στο δίκτυο [3]-[5],[13],[15],[19]. Το πλήθος των σταθμών που είναι συνδεδεμένοι στο WDM δίκτυο είναι, στη γενική περίπτωση, $M \geq N$.

Οι σταθμοί συνδέονται στις πόρτες εισόδου και εξόδου ενός κεντρικού συζεύκτη παθητικού αστέρα ο οποίος αποτελεί το κύριο μέσο επικοινωνίας μεταξύ των σταθμών. Ο συζεύκτης παθητικού αστέρα είναι ένας διαιρέτης ισχύος που λειτουργεί ως ένα καθολικής εκπομπής κανάλι πολλαπλής προσπέλασης. Στην τοπολογία αυτή, κάθε συχνότητα λ_i αποτελεί ένα ξεχωριστό καθολικής εκπομπής κανάλι πολλαπλής πρόσβασης.

Ανάλογα με το πρωτόκολλο, κάθε σταθμός διαθέτει έναν ή περισσότερους οπτικούς εκπομπούς και έναν ή περισσότερους οπτικούς δέκτες για τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων. Οι οπτικοί εκπομποί και δέκτες λειτουργούν στο φάσμα συχνοτήτων των καναλιών δεδομένων, δηλαδή μπορούν να συντονίζονται για αποστολή και λήψη στις συχνότητες $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$.



Σχήμα 1-2. Τοπολογία παθητικού αστέρα σε WDM δίκτυο

Στην περίπτωση που οι σταθμοί του δικτύου διαθέτουν ένα ή περισσότερους σταθερά συντονισμένους εκπομπούς, η αποστολή των πακέτων πραγματοποιείται στο συγκεκριμένο WDM κανάλι που έχει ανατεθεί σε κάθε σταθμό με συντονισμό του εκπομπού στο κανάλι για τη μετάδοση.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση που οι σταθμοί του δικτύου διαθέτουν ένα ή περισσότερους σταθερά συντονισμένους δέκτες, η λήψη των πακέτων πραγματοποιείται από το συγκεκριμένο WDM κανάλι που έχει ανατεθεί σε κάθε σταθμό με συντονισμό του δέκτη στο κανάλι λήψης.

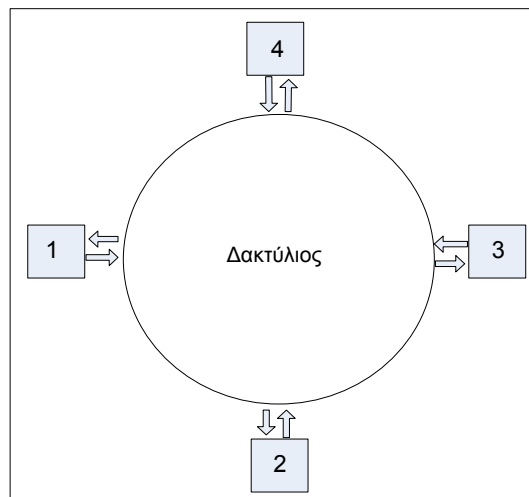
Επίσης στα πρωτόκολλα που διαθέτουν ένα επιπλέον κανάλι ελέγχου, κάθε σταθμός διαθέτει ένα σταθερά συντονισμένο εκπομπό και ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη που λειτουργούν στο δεδομένο κανάλι ελέγχου λ_0 . Τα πρωτόκολλα αυτά χαρακτηρίζονται τόσο από το πρωτόκολλο πρόσβασης P_c στο κανάλι ελέγχου, όσο και από το πρωτόκολλο πρόσβασης P_d στα κανάλια δεδομένων και ονομάζονται συνήθως ως πρωτόκολλα P_c/P_d .

Σε κάθε χρονική στιγμή, κάθε σταθμός μπορεί να εκπέμπει σε ένα δεδομένο κανάλι λ_T και ταυτόχρονα να λαμβάνει από ένα άλλο κανάλι λ_R , όπου $\lambda_T, \lambda_R \in \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$. Κάθε σταθμός πληροφορείται για την επιτυχή ή όχι μετάδοση του πακέτου δεδομένων ή του πακέτου ελέγχου, παρακολουθώντας το πολυδιαυλικό σύστημα του συζεύκτη παθητικού αστέρα, αφού αυτό λειτουργεί σαν ένα μέσο καθολικής εκπομπής.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα κυριότερα πρωτόκολλα οπτικών δικτύων τοπολογίας παθητικού αστέρα που έχουν διατυπωθεί σε σχετικές μελέτες.

1.3.2 Τοπολογία δακτυλίου

Μια από τις πιο διαδεδομένες αρχιτεκτονικές WDM δικτύων, για μητροπολιτικά δίκτυα και δίκτυα ευρείας περιοχής είναι η τοπολογία δακτυλίου. Η τοπολογία αυτή παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 1-3.



Σχήμα 1-3. Τοπολογία δακτυλίου σε WDM δίκτυο

Όπως στην τοπολογία παθητικού αστέρα, έτσι και στην τοπολογία δακτυλίου το πολυδιαυλικό δίκτυο αποτελείται από N παράλληλα κανάλια για τη μετάδοση δεδομένων, κάθε ένα από τα οποία λειτουργεί σε συγκεκριμένη συχνότητα λ . Τα κανάλια διακρίνονται ανάλογα με τη συχνότητα, σε $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ [20]-[23]. Το πλήθος των σταθμών που είναι συνδεδεμένοι στο WDM δίκτυο είναι, στη γενική περίπτωση, $M \geq N$.

Στη βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί πρωτόκολλα τοπολογίας δακτυλίου που διαθέτουν έναν επιπλέον WDM κανάλι ελέγχου που λειτουργεί στη συχνότητα λ_0 , για τη μετάδοση πακέτων ελέγχου και εξασφάλιση δικαιωμάτων πρόσβασης των σταθμών στο δίκτυο.

Η αξιοποίηση των WDM καναλιών για την εκπομπή και τη λήψη πακέτων από το WDM δακτύλιο καθορίζεται ανάλογα με το πρωτόκολλο. Στη γενική κατηγορία πρωτοκόλλων οπτικού δακτυλίου, κάθε σταθμός διαθέτει ένα ή περισσότερους

συντονιζόμενους εκπομπούς για τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων και ένα ή περισσότερους συντονιζόμενους δέκτες για τη λήψη των πακέτων.

Επίσης, στη βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί πρωτόκολλα μετάδοσης σε οπτικό δακτύλιο, στα οποία το πλήθος των WDM καναλιών ισούται με το πλήθος των σταθμών. Στην περίπτωση αυτή, τα πρωτόκολλα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τα δικαιώματα επικοινωνίας μέσω αυτών:

- πρωτόκολλα στα οποία σε κάθε σταθμό έχει ανατεθεί ένα δεδομένο κανάλι για την εκπομπή των πακέτων του [24]-[29]. Στα πρωτόκολλα αυτά, κάθε σταθμός διαθέτει ένα σταθερά συντονισμένο εκπομπό που λειτουργεί στη δεδομένη συχνότητα εκπομπής του σταθμού και ένα ή περισσότερους συντονιζόμενους δέκτες για τη λήψη των πακέτων δεδομένων. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση αυτή δεν παρατηρούνται συγκρούσεις στα κανάλια, ενώ είναι πιθανό να προκύψουν συγκρούσεις στον προορισμό.
- πρωτόκολλα στα οποία σε κάθε σταθμό έχει ανατεθεί ένα δεδομένο κανάλι για τη λήψη των πακέτων του [30]-[37]. Στα πρωτόκολλα αυτά, κάθε σταθμός διαθέτει ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη που λειτουργεί στη δεδομένη συχνότητα λήψης του σταθμού και ένα ή περισσότερους συντονιζόμενους εκπομπούς για τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή, είναι πιθανό να προκύψουν συγκρούσεις στα κανάλια, ενώ δεν παρατηρούνται συγκρούσεις στον προορισμό.

Σε κάθε χρονική στιγμή, κάθε σταθμός μπορεί να εκπέμπει σε ένα δεδομένο κανάλι λ_T και ταυτόχρονα να λαμβάνει από ένα άλλο κανάλι λ_R , όπου $\lambda_T, \lambda_R \in \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$. Ανάλογα με το πρωτόκολλο, εφαρμόζονται διάφορες πολιτικές ελέγχου για την ενημέρωση κάθε σταθμού για την επιτυχή ή όχι μετάδοση του πακέτου του.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά πρωτόκολλα οπτικών δικτύων τοπολογίας δακτυλίου που έχουν διατυπωθεί σε σχετικές μελέτες.

1.3.3 Σύγκριση τοπολογιών

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, οι τοπολογίες WDM δικτύων παθητικού αστέρα και δακτυλίου χρησιμοποιούνται σε δίκτυα διαφορετικών περιοχών κάλυψης, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Έτσι, η τοπολογία παθητικού αστέρα χρησιμοποιείται κυρίως σε τοπικά οπτικά WDM δίκτυα, ενώ η τοπολογία δακτυλίου χρησιμοποιείται σε μητροπολιτικά οπτικά WDM δίκτυα και δίκτυα ευρείας περιοχής.

Είναι προφανές ότι στην τοπολογία παθητικού αστέρα μεγάλο μέρος του εύρους ζώνης του δικτύου καταναλώνεται σε λειτουργίες ελέγχου. Στην τοπολογία αυτή, ο συζεύκτης παθητικού αστέρα ανταλλάσσει μηνύματα ελέγχου με τους σταθμούς του δικτύου για τη διαχείριση της πρόσβασης στο δίκτυο, γεγονός που επιβαρύνει την κίνηση στο δίκτυο με υψηλό φορτίο.

Αντίθετα, στην τοπολογία δακτυλίου δεν παρατηρείται επιφόρτιση του δικτύου με μηνύματα ελέγχου αφού δεν υπάρχει ένα στοιχείο στο δίκτυο που εκτελεί λειτουργίες ελέγχου. Στην τοπολογία αυτή, ο έλεγχος της πρόσβασης στα WDM κανάλια πραγματοποιείται σύμφωνα με τη στρατηγική πρόσβασης στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή τα μηνύματα ελέγχου επιφορτίζουν μόνο το κανάλι ελέγχου -αν αυτό υπάρχει- και όχι τα WDM κανάλια δεδομένων.

Η σύγκριση δύο πρωτοκόλλων τοπολογίας δακτυλίου και παθητικού αστέρα, για μητροπολιτικά WDM δίκτυα επιχειρείται στη μελέτη [38]. Η μελέτη εξετάζει ένα πρωτόκολλο τοπολογίας δακτυλίου, στο οποίο κάθε σταθμός διαθέτει ένα συντονιζόμενο εκπομπό και ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη. Το πρωτόκολλο αυτό συγκρίνεται με το AWG πρωτόκολλο παθητικού αστέρα, στο οποίο κάθε σταθμός διαθέτει ένα συντονιζόμενο εκπομπό και ένα συντονιζόμενο δέκτη. Η ανάλυση θεωρεί Βερνουλλί κίνηση στα δύο δίκτυα και τα αποτελέσματα εξάγονται με χρήση εξομοίωσης. Η μελέτη αυτή επιβεβαιώνει τα παραπάνω συμπεράσματα.

1.4 Μετάδοση και μεταγωγή στα οπτικά WDM δίκτυα

Στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς η μετάδοση, η δρομολόγηση και η μεταγωγή της πληροφορίας πραγματοποιούνται με χρήση οπτικών στοιχείων που χρησιμοποιούν την τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού μήκους κύματος WDM. Στη βιβλιογραφία έχουν μελετηθεί διάφορες αρχιτεκτονικές επικοινωνίας σε οπτικά WDM δίκτυα. Οι αρχιτεκτονικές αυτές περιγράφουν τη μετάδοση της πληροφορίας από τον εκπομπό στο δέκτη μέσω των WDM καναλιών του δικτύου.

Όπως σε όλα τα δίκτυα, έτσι και στα οπτικά δίκτυα το φυσικό μέσο (οπτική ίνα) μεταδίδει την πληροφορία με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- *προς όλο το δίκτυο*: η μεταδιδόμενη πληροφορία είναι διαθέσιμη σε όλους τους σταθμούς του δικτύου. Ο σταθμός προορισμού παρακολουθεί το δίκτυο και απορροφά την πληροφορία που προορίζεται για αυτόν.
- *επιλεκτικά προς το σταθμό προορισμού*: η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη σε όλο το δίκτυο και κατευθύνεται μέσω επιλεγμένου οπτικού δρόμου στο σταθμό προορισμού [1].

Ανάλογα με την αρχιτεκτονική τους και τον τρόπο μετάδοσης της πληροφορίας από τον εκπομπό στο δέκτη, τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς διακρίνονται σε:

- επιλογικά WDM δίκτυα καθολικής εκπομπής
- δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

1.4.1 Επιλογικά WDM δίκτυα καθολικής εκπομπής

Στα επιλογικά WDM δίκτυα καθολικής εκπομπής δεν χρησιμοποιούνται τεχνικές δρομολόγησης και μεταγωγής της οπτικής πληροφορίας [1]. Στα δίκτυα αυτά, η μεταδιδόμενη πληροφορία διατίθεται σε όλους τους σταθμούς του δικτύου. Ο σταθμός προορισμού παρακολουθεί την κίνηση στα WDM κανάλια και ενημερώνεται για τα πακέτα που μεταδίδονται στο δίκτυο. Στην περίπτωση που ένας σταθμός αντιληφθεί ότι κάποιο πακέτο προορίζεται για αυτόν, τότε συντονίζει τον οπτικό δέκτη του στο κανάλι μετάδοσης και απορροφά το πακέτο.

Στη βιβλιογραφία έχουν εξεταστεί διάφορες τοπολογίες επιλογικών WDM δικτύων καθολικής εκπομπής. Η πιο διαδεδομένη είναι η τοπολογία παθητικού αστέρα και έχει μελετηθεί τόσο σε τοπικά δίκτυα [3]-[16],[18],[19], όσο και σε μητροπολιτικά δίκτυα [39].

Επίσης, έχουν αναπτυχθεί διάφορες αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα επικοινωνίας για επιλογικά WDM δίκτυα καθολικής εκπομπής, που βελτιστοποιούν την απόδοση του δικτύου

[3]-[5],[13],[15],[19]. Τα πρωτόκολλα αυτά εξετάζουν την επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην απόδοση του δικτύου, όπως του αριθμού των σταθερά συντονισμένων ή συντονιζόμενων δεκτών που διαθέτει κάθε σταθμός [6]-[12],[14],[16],[18], του πλήθους των καναλιών ελέγχου [8]-[10] κ.α.

Στα επιλογικά WDM δίκτυα καθολικής εκπομπής, η μετάδοση της πληροφορίας στα WDM κανάλια και στο κανάλι ελέγχου πραγματοποιείται είτε σύγχρονα είτε ασύγχρονα. Στη βιβλιογραφία έχει διατυπωθεί πλήθος πρωτοκόλλων, όπως το Slotted ALOHA/ALOHA, το Improved Slotted ALOHA/ALOHA, το Slotted ALOHA/N-Server Switch και η ανάλυση της απόδοσης τους έχει πραγματοποιηθεί με χρήση Poisson στατιστικής [3], [5], [6]. Τα πρωτόκολλα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.

1.4.2 Δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος

Τα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος χρησιμοποιούν τεχνικές δρομολόγησης και μεταγωγής της οπτικής πληροφορίας [1]. Στα δίκτυα αυτά, η μεταδιδόμενη πληροφορία δεν διατίθεται σε όλους τους σταθμούς του δικτύου, αλλά δρομολογείται μέσω ενός οπτικού μονοπατιού στον σταθμό προορισμού.

Στη βιβλιογραφία, τα περισσότερα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος είναι μητροπολιτικά, στα οποία οι σταθμοί (κόμβοι) διασυνδέονται με τοπολογία δακτυλίου [20]-[23].

Στα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος, κάθε σταθμός διαθέτει έναν ή περισσότερους σταθερά συντονισμένους ή συντονιζόμενους εκπομπούς ή/και δέκτες για την επικοινωνία μέσω των WDM καναλιών. Σε κάθε σταθμό, η απορρόφηση πληροφορίας από το δίκτυο πραγματοποιείται με τη βοήθεια αποπολυπλέκτη, ενώ η δρομολόγηση πληροφορίας προς το δίκτυο πραγματοποιείται με τη βοήθεια πολυπλέκτη. Έτσι, κάθε σταθμός του δικτύου διαθέτει έναν πολυπλέκτη - αποπολυπλέκτη (Add/Drop Multiplexer - ADM) για την επικοινωνία μέσω των WDM καναλιών.

Τα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος εκτελούν οπτικές λειτουργίες στο βαθμό που έχουν αντικαταστήσει τα ηλεκτρονικά στοιχεία του δικτύου με οπτικά. Στα δίκτυα αυτά, οι λειτουργίες οπτικής δρομολόγησης και μεταγωγής εκτελούνται είτε από τους σταθμούς του δικτύου, είτε από ξεχωριστά στοιχεία (οπτικούς δρομολογητές, οπτικούς μεταγωγείς, οπτικούς μετατροπείς μήκους κύματος). Οι λειτουργίες αυτές ονομάζονται λειτουργίες οπτικού επιπέδου [1], οι κυριότερες από τις οποίες είναι [2]:

- *η λειτουργία pass-through*: αφορά τη δρομολόγηση ενός WDM καναλιού του δικτύου από ένα σταθμό προς κάποιον άλλο σταθμό του δικτύου, χωρίς αυτό να υποστεί κάποια οπτική μετατροπή ή χωρίς να περάσει από το WDM πολυπλέκτη-αποπολυπλέκτη του σταθμού.
- *η διαφάνεια*: στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς καθορίζει ότι η κίνηση των WDM καναλιών είναι ανεξάρτητη του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου και του ρυθμού μετάδοσης. Έτσι, το οπτικό επίπεδο μπορεί να μεταφέρει ταυτόχρονα δεδομένα πολλών διαφορετικών εφαρμογών ανώτερων επιπέδων, σε διαφορετικά WDM κανάλια [1].
- *η επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος*: επιτρέπει τη λειτουργία του οπτικού δικτύου με χρήση περιορισμένου αριθμού συχνοτήτων. Η χρήση του ίδιου μήκους κύματος σε διαφορετικές ζεύξεις του οπτικού δικτύου δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας πολύ μεγαλύτερου αριθμού συνδέσεων στο ίδιο δίκτυο από τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων μηκών κύματος [2].

- *αξιοπιστία*: στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς καθορίζει τις λειτουργίες επαναδρομολόγησης της πληροφορίας σε περίπτωση αποτυχίας.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι κυριότερες από τις σύγχρονες τάσεις στα οπτικά δίκτυα, τόσο επιλογικών WDM δικτύων καθολικής εκπομπής, όσο και δικτύων δρομολόγησης μήκους κύματος.

1.5 Στοιχεία οπτικών δικτύων

Οι εξελίξεις στη τεχνολογία των οπτικών δικτύων παρέχουν ασφαλείς εγγυήσεις για τα χαρακτηριστικά των στοιχείων που συγκροτούν ένα σύγχρονο οπτικό δίκτυο. Έτσι, οι απαιτήσεις για αξιοπιστία στο χρόνο απόκρισης και στην απόδοση των στοιχείων των οπτικών δικτύων μπορούν να ικανοποιηθούν σε σημαντικό βαθμό, συντελώντας στην υλοποίηση αποδοτικών σύγχρονων δικτύων οπτικών ινών.

Τα στοιχεία που συγκροτούν ένα σύγχρονο οπτικό δίκτυο είναι τα ακόλουθα:

- οπτικοί εκπομποί
- οπτικοί δέκτες
- γραμμές καθυστέρησης
- οπτικοί συζεύκτες
- οπτικοί ενισχυτές
- στοιχεία οπτικής μεταγωγής (optical switching components)
- στοιχεία μετατροπής μήκους κύματος (wavelength conversion components) κ.α.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των κυριότερων στοιχείων των οπτικών δικτύων.

1.5.1 Οπτικοί εκπομποί

Οι οπτικοί εκπομποί (lasers) αποτελούν τον εξοπλισμό των σταθμών ενός οπτικού δικτύου για τη μετάδοση πληροφορίας διαμορφωμένης σε οπτικό σήμα υψηλής ισχύος.

Οι οπτικοί εκπομποί διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- *σταθερά συντονισμένοι*: είναι οι οπτικοί εκπομποί που μπορούν να μεταδίδουν πακέτα σε ένα μόνο μήκος κύματος του οπτικού φάσματος.
- *συντονιζόμενοι*: είναι οι οπτικοί εκπομποί που μπορούν να συντονίζονται και να μεταδίδουν πακέτα σε ένα σύνολο μηκών κύματος του οπτικού φάσματος.

Χαρακτηριστικά συντονιζόμενων οπτικών εκπομπών

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός συντονιζόμενου οπτικού εκπομπού, που προσδιορίζουν τη λειτουργία του, είναι τα εξής:

- *εύρος συντονισμού*: αποτελεί το εύρος των μηκών κύματος του οπτικού φάσματος στο οποίο ο οπτικός εκπομπός μπορεί να συντονιστεί για τη μετάδοση οπτικής πληροφορίας.

- *χρόνος συντονισμού*: αποτελεί το χρονικό διάστημα που απαιτείται για το συντονισμό του οπτικού εκπομπού από τη μία συχνότητα του οπτικού φάσματος λειτουργίας σε μία άλλη. Ο χρόνος συντονισμού ενός οπτικού εκπομπού καθορίζει το χρόνο απόκρισης του και επηρεάζει σημαντικά τη συνολική απόδοση του οπτικού δικτύου.
- *συχνότητες συντονισμού*: καθορίζει αν ο οπτικός εκπομπός μπορεί να συντονιστεί σε όλες ή σε συγκεκριμένες συχνότητες του εύρους συντονισμού του.

Τεχνολογίες συντονιζόμενων οπτικών εκπομπών

Οι κυριότερες τεχνολογίες συντονιζόμενων οπτικών εκπομπών είναι οι ακόλουθες:

- *οπτικοί εκπομποί Fabry-Perot*: ο συντονισμός των οπτικών εκπομπών πραγματοποιείται μηχανικά, με τη ρύθμιση της απόστασης μεταξύ δύο καθρεφτών. Το εύρος συντονισμού είναι αρκετά μεγάλο, ενώ ο χρόνος συντονισμού είναι ιδιαίτερα υψηλός εξαιτίας του μηχανικού τρόπου συντονισμού.
- *ακουστο-οπτικοί εκπομποί*: ο συντονισμός μεταξύ διαφορετικών οπτικών συχνοτήτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια διαφορετικών ηχητικών κυμάτων, που καθορίζουν τη μετάδοση της πληροφορίας σε διαφορετικές συχνότητες. Το εύρος συντονισμού είναι περιορισμένο, ενώ ο χρόνος συντονισμού είναι μικρότερος σε σχέση με τους οπτικούς εκπομπούς Fabry-Perot.
- *ηλεκτρο-οπτικοί εκπομποί*: ο συντονισμός μεταξύ διαφορετικών οπτικών συχνοτήτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια διαφορετικών ηλεκτρικών ρευμάτων, που καθορίζουν τη μετάδοση της πληροφορίας σε διαφορετικές συχνότητες. Το εύρος συντονισμού είναι περιορισμένο, ενώ ο χρόνος συντονισμού είναι μικρότερος σε σχέση με τους οπτικούς εκπομπούς Fabry-Perot.
- *οπτικοί εκπομποί διοχέτευσης ρεύματος (injection current)*: ο συντονισμός μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων πραγματοποιείται μέσω δικτύου περίθλασης (diffraction grating).

1.5.2 Οπτικοί δέκτες και φίλτρα

Οι οπτικοί δέκτες αποτελούν τον εξοπλισμό των σταθμών ενός οπτικού δικτύου για τη λήψη πληροφορίας διαμορφωμένης σε οπτικό σήμα υψηλής ισχύος.

Οι οπτικοί δέκτες διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- *σταθερά συντονισμένοι*: είναι οι οπτικοί δέκτες που μπορούν να λαμβάνουν πακέτα από ένα μόνο μήκος κύματος του οπτικού φάσματος.
- *συντονιζόμενοι*: είναι οι οπτικοί δέκτες που μπορούν να συντονίζονται και να λαμβάνουν πακέτα από ένα σύνολο μηκών κύματος του οπτικού φάσματος.

Χαρακτηριστικά συντονιζόμενων οπτικών δεκτών

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός οπτικού δέκτη, που προσδιορίζουν τη λειτουργία του, είναι τα εξής:

- *εύρος συντονισμού*: αποτελεί το εύρος των μηκών κύματος του οπτικού φάσματος στο οποίο ο οπτικός δέκτης μπορεί να συντονιστεί για τη λήψη οπτικής πληροφορίας.
- *χρόνος συντονισμού*: αποτελεί το χρονικό διάστημα που απαιτείται για το συντονισμό του οπτικού δέκτη από τη μία συχνότητα του οπτικού φάσματος λειτουργίας σε μία άλλη. Ο χρόνος συντονισμού ενός οπτικού δέκτη καθορίζει το χρόνο απόκρισης του και επηρεάζει σημαντικά τη συνολική απόδοση του οπτικού δικτύου.
- *συχνότητες συντονισμού*: καθορίζει αν ο οπτικός δέκτης μπορεί να συντονιστεί σε όλες ή σε συγκεκριμένες συχνότητες του εύρους συντονισμού του.

Τεχνολογίες συντονιζόμενων οπτικών δεκτών

Οι κυριότερες τεχνολογίες συντονιζόμενων οπτικών δεκτών είναι οι ακόλουθες:

- *οπτικοί δέκτες Elaton*: ο συντονισμός των οπτικών δεκτών πραγματοποιείται με τη βοήθεια δύο καθρεφτών, με τη μηχανική ρύθμιση της απόστασης μεταξύ τους. Το εύρος συντονισμού είναι αρκετά μεγάλο, ενώ ο χρόνος συντονισμού είναι ιδιαίτερα υψηλός εξαιτίας του μηχανικού τρόπου συντονισμού.
- *Mach-Zehnder συμβολόμετρο*: ο συντονισμός των οπτικών δεκτών πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός οπτικού διαιρέτη (splitter) που διαχωρίζει το εισερχόμενο κύμα σε δύο κύματα και ένα οπτικό συνδυαστή (combiner) που συνδυάζει ξανά στην έξοδο τα δύο κύματα. Ο συντονισμός των οπτικών δεκτών βασίζεται στη διαφορά φάσης των δύο κυμάτων. Το εύρος συντονισμού είναι ιδιαίτερα περιορισμένο, ενώ επιτυγχάνεται αρκετά γρήγορος χρόνος συντονισμού.
- *ακουστο-οπτικοί δέκτες*: ο συντονισμός μεταξύ διαφορετικών οπτικών συχνοτήτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια διαφορετικών ηχητικών κυμάτων, που καθορίζουν τη λήψη της πληροφορίας σε διαφορετικές συχνότητες. Το εύρος συντονισμού είναι περιορισμένο, ενώ ο χρόνος συντονισμού είναι αρκετά μικρός.
- *ηλεκτρο-οπτικοί δέκτες*: ο συντονισμός μεταξύ διαφορετικών οπτικών συχνοτήτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια διαφορετικών ηλεκτρικών ρευμάτων, που καθορίζουν τη λήψη της πληροφορίας σε διαφορετικές συχνότητες. Το εύρος συντονισμού είναι περιορισμένο, ενώ ο χρόνος συντονισμού είναι αρκετά μικρός.
- *οπτικοί εκπομποί υγρών κρυστάλλων Fabry-Perot*: ο συντονισμός μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια υγρών κρυστάλλων. Το εύρος συντονισμού είναι σχετικά ευρύ, ενώ ο χρόνος συντονισμού είναι αρκετά μικρός.

Τεχνολογίες σταθερά συντονισμένων οπτικών δεκτών

Οι κυριότερες τεχνολογίες σταθερά συντονισμένων οπτικών δεκτών είναι οι ακόλουθες:

- *οπτικοί δέκτες δικτύου περίθλασης (diffraction grating)*: η ρύθμιση της σταθερής συχνότητας συντονισμού πραγματοποιείται με τον καθορισμό της γωνίας ανάκλασης του οπτικού σήματος.

- οπτικοί δέκτες Bragg: η ρύθμιση της σταθερής συχνότητας συντονισμού πραγματοποιείται με τον καθορισμό της μεταβολής του συντελεστή ανάκλασης του οπτικού σήματος.
- οπτικοί δέκτες παρεμβολής λεπτού φιλμ (*thin-film interference*): η ρύθμιση της σταθερής συχνότητας συντονισμού πραγματοποιείται με τον καθορισμό της μεταβολής του συντελεστή ανάκλασης του οπτικού σήματος. Οι δέκτες αυτοί χρησιμοποιούν διαφορετικά επίπεδα για υλικά χαμηλού και υλικά υψηλού συντελεστή ανάκλασης.

Κεφάλαιο 2 : Απόδοση Οπτικών WDM Δικτύων – Αρχιτεκτονικές και Πρωτόκολλα

Στο Κεφάλαιο 1 αναφέρθηκε ότι στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα χρησιμοποιείται η τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού μήκους κύματος WDM για τη βέλτιστη αξιοποίηση του μεγάλου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας.

Σύμφωνα με τη WDM τεχνική, το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας διαιρείται σε πολλαπλά παράλληλα κανάλια χαμηλότερης ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε διαφορετικό οπτικό μήκος κύματος. Η διαίρεση της συνολικής χωρητικότητας της οπτικής ίνας σε πολλαπλά παράλληλα κανάλια δημιουργεί ένα πολυδιαυλικό δίκτυο.

Η μελέτη της απόδοσης των οπτικών δικτύων βασίζεται στην ανάλυση των κλασσικών πολυδιαυλικών δικτύων. Για το λόγο αυτό η διατύπωση αυστηρών αναλυτικών εργαλείων μοντελοποίησης της απόδοσης των πολυδιαυλικών δικτύων αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για τη μετέπειτα μελέτη των οπτικών WDM δικτύων. Έτσι, τα ερευνητικά συμπεράσματα της μοντελοποίησης της απόδοσης των πολυδιαυλικών δικτύων μπορούν να επεκταθούν λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες παραμέτρους που επιδρούν στη απόδοση των οπτικών πολυδιαυλικών δικτύων, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Για την καλύτερη κατανόηση της απόδοσης των πολυδιαυλικών δικτύων, κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών τους. Η παρουσίαση αυτή αναδεικνύει τις ιδιαιτερότητες των πολυδιαυλικών δικτύων και αποτελεί ένα αρχικό μοντέλο ανάλυσης της απόδοσης των οπτικών WDM δικτύων.

2.1 Παράμετροι απόδοσης πολυδιαυλικών δικτύων

Τα πολυδιαυλικά δίκτυα αποτελούν μια αρχιτεκτονική ευρυζωνικών κυρίως δικτύων διαφόρων τεχνολογιών, όπως τα WDM οπτικά δίκτυα και τα ασύρματα δίκτυα κινητής επικοινωνίας. Οι πρόσφατες έρευνες σχετικά με τα πολυδιαυλικά δίκτυα πολλαπλής προσπέλασης υψηλών ταχυτήτων έχουν αναπτύξει μια ποικιλία πρωτοκόλλων, τα οποία βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου σε σχέση με το συμβατικό μονοδιαυλικό δίκτυο.

Η χρήση των πολυδιαυλικών δικτύων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το μονοδιαυλικό δίκτυο της ίδιας χωρητικότητας, όπως:

- *μείωση του απαιτούμενου υλικού για τον έλεγχο πρόσβασης στο δίκτυο:* για παράδειγμα, στα WDM δίκτυα [40]-[41] η χρήση του πολυδιαυλικού δικτύου χαμηλότερης ταχύτητας μετάδοσης σε σχέση με την ταχύτητα του αντίστοιχου μονοδιαυλικού δικτύου, αντιμετωπίζει το φαινόμενο της συμφόρησης.
- *υψηλή αξιοπιστία και ανοχή σε σφάλματα:* στο πολυδιαυλικό δίκτυο ο μηχανισμός αντιμετώπισης των ανεπιτυχών μεταδόσεων σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι ανεξάρτητος από την αιτία τις προκάλεσε (σύγκρουση πακέτων ή σφάλμα στο κανάλι).
- *βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου*
- *επέκταση του χρόνου ζωής των παρώντων συστημάτων:* το πολυδιαυλικό δίκτυο επιτρέπει τη σταδιακή επέκταση του συστήματος με την προσθήκη νέων καναλιών, ανάλογα με τις απαιτήσεις φορτίου.

Στα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης που έχουν διατυπωθεί στην παγκόσμια βιβλιογραφία, μια προσέγγιση για τη βελτίωση της αξιοποίησης του δικτύου είναι η εκμετάλλευση των παραπάνω πλεονεκτημάτων του πολυδιαυλικού δικτύου.

Η μελέτη των πολυδιαυλικών δικτύων βασίζεται στη μοντελοποίηση της λειτουργίας τους. Η αξιολόγηση της απόδοσης τους πραγματοποιείται με τον καθορισμό των μέτρων αποδοτικότητας κάθε πρωτοκόλλου.

Ανάλογα με το μοντέλο ανάλυσης, τα μέτρα αποδοτικότητας ενός πολυδιαυλικού δικτύου είναι:

- η διέλευση (throughput)
- η καθυστέρηση διάδοσης της πληροφορίας (propagation delay latency)
- το πλήθος των ενεργών σταθμών (backlogged stations) κ.α.

Στη βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί πολλά πρωτόκολλα πρόσβασης σε πολυδιαυλικά δίκτυα [42]-[48] και έχει μελετηθεί η απόδοση τους τόσο με εξομοίωση, όσο και με αναλυτικά εργαλεία.

Στα πολυδιαυλικά δίκτυα, παρατηρούνται απώλειες της μεταφερόμενης πληροφορίας εξαιτίας δύο κυρίως αιτιών:

- των συγκρούσεων πακέτων στα κανάλια
- των συγκρούσεων πακέτων στον προορισμό.

Η απώλεια πληροφορίας εξαιτίας του φαινομένου των συγκρούσεων στα κανάλια παρατηρείται τόσο στα μονοδιαυλικά όσο και στα πολυδιαυλικά δίκτυα. Αντίθετα, η απώλεια πληροφορίας εξαιτίας του φαινομένου των συγκρούσεων στον προορισμό αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα των πολυδιαυλικών δικτύων και δεν παρατηρείται σε μονοδιαυλικά δίκτυα.

Ανεξάρτητα από την τεχνολογία του πολυδιαυλικού δικτύου, τα επικοινωνιακά πρωτόκολλα που έχουν αναπτυχθεί επιχειρούν να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες της απόδοσης των δικτύων αυτών εξαιτίας των συγκρούσεων στα κανάλια και στον προορισμό.

Συγκρούσεις πακέτων στα κανάλια

Σε ένα πολυδιαυλικό δίκτυο, οι σταθμοί προσπελούν τα παράλληλα κανάλια του δικτύου για τη μετάδοση και λήψη των πακέτων πληροφορίας. Όπως συμβαίνει και στο μονοδιαυλικό δίκτυο, στην περίπτωση που περισσότεροι του ενός σταθμοί επιχειρήσουν να εκπέμψουν τα πακέτα τους στο ίδιο κανάλι του πολυδιαυλικού δικτύου, τότε όλες οι μεταδόσεις θεωρούνται ανεπιτυχείς. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σύγκρουση στα κανάλια.

Τα πακέτα που συμμετέχουν στη σύγκρουση καταστρέφονται λόγω της ταυτόχρονης μετάδοσης τους στο ίδιο κανάλι του πολυδιαυλικού δικτύου. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται υπέρθεση των μεταδιδόμενων σημάτων-πακέτων και επομένως καταστροφή όλων των πακέτων που εμπλέκονται στη σύγκρουση.

Το φαινόμενο των συγκρούσεων στα κανάλια δεν είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα των πολυδιαυλικών δικτύων, αλλά παρατηρείται και στα μονοδιαυλικά δίκτυα, στην περίπτωση που περισσότεροι του ενός σταθμοί επιχειρούν ταυτόχρονη μετάδοση στο μοναδικό κανάλι.

Στη βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί πολλά πρωτόκολλα πρόσβασης σε πολυδιαυλικά δίκτυα που επιχειρούν να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του δικτύου, ελαχιστοποιώντας τις

απώλειες εξαιτίας των συγκρούσεων στα κανάλια. Στα πρωτόκολλα αυτά, η απόδοση των πολυδιαυλικών δικτύων έχει μελετηθεί τόσο με εξομοίωση, όσο και με αναλυτικά εργαλεία και έχουν υπολογιστεί τα μέτρα αποδοτικότητας.

Ειδικότερα:

Στη μελέτη [42] παρουσιάζεται ένα σύγχρονο πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης σε πολυδιαυλικό δίκτυο κινητών επικοινωνιών. Στην μελέτη αυτή ο πληθυσμός των σταθμών είναι πεπερασμένος, ενώ η ανάλυση πραγματοποιείται με χρήση μαρκοβιανού μοντέλου και δίνεται η υπό συνθήκη πιθανότητα μετάβασης ενός βήματος του συστήματος.

Επίσης, ένα σύγχρονο πρωτόκολλο ασύμμετρης πρόσβασης των σταθμών στο δίκτυο, ανάλογα με το είχαν επιτυχή μετάδοση κατά την προηγούμενη χρονική σχισμή, παρουσιάζεται στη [43]. Στη μελέτη αυτή, ο πληθυσμός θεωρείται πεπερασμένος και κατάσταση του συστήματος αναλύεται ως μια μαρκοβιανή αλυσίδα διακριτού χρόνου.

Στη [44] παρουσιάζεται ένα σύγχρονο πρωτόκολλο ασύμμετρης πρόσβασης σε πολυδιαυλικό δίκτυο, στο οποίο οι σταθμοί δημιουργούν ουρές για την πρόσβαση στα κανάλια. Η ανάλυση πραγματοποιείται με χρήση του μαρκοβιανού μοντέλου και υπολογίζονται η διέλευση και η καθυστέρηση του συστήματος.

Στη [45] παρουσιάζονται δύο μη-επίμονα Carrier Sense Multiple Access (CSMA) πρωτόκολλα. Η διαδικασία άφιξης πακέτων στο δίκτυο κατανέμεται κατά Poisson. Στην εργασία αυτή μελετάται η ευστάθεια του συστήματος και με χρήση μαρκοβιανής ανάλυσης εξάγονται τα μέτρα αποδοτικότητας και οι περιοχές ευστάθειας.

Στις μελέτες [46]-[48] παρουσιάζονται δύο πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης σε ασύρματα πολυδιαυλικά δίκτυα. Ειδικότερα, στη [46] μελετώνται δύο σύγχρονα ALOHA πρωτόκολλα, για τη μετάδοση διαφορετικών τύπων πληροφορίας στο ασύρματο δίκτυο (δεδομένα, φωνή). Στην εργασία αυτή εξετάζεται τόσο η συμμετρική όσο και η ασύμμετρη πρόσβαση των διαφορετικών τύπων δεδομένων στο δίκτυο, ενώ η ανάλυση πραγματοποιείται με χρήση μαρκοβιανής αλυσίδας διακριτού χρόνου.

Στη [47] εξετάζεται η τεχνική DS-CDMA σε σύγχρονο ALOHA πρωτόκολλο και τα μέτρα αποδοτικότητας του συστήματος εξάγονται με μαρκοβιανή ανάλυση θεωρώντας πεπερασμένο πληθυσμό σταθμών.

Η μελέτη του πρωτοκόλλου με εξασφάλιση πρόσβασης (reservation) CROMA για ασύρματα Ad-Hoc δίκτυα (Mobile Ad-Hoc Networks -MANETs) παρουσιάζεται στη [48]. Η ανάλυση είναι μαρκοβιανή, ενώ η διαδικασία άφιξης των πακέτων στο δίκτυο μοντελοποιείται με χρήση πηγών κίνησης των οποίων οι περίοδοι εκπομπής και σιωπής (ON/OFF περίοδοι) κατανέμονται εκθετικά.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, τα πρωτόκολλα που διατυπώθηκαν για πολυδιαυλικά δίκτυα, είτε συμμετρικής είτε ασύρματης πρόσβασης στα κανάλια, λαμβάνουν υπόψη τις συγκρούσεις στα κανάλια για τον υπολογισμό των μέτρων αποδοτικότητας [J.1],[J.2],[C.1],[C.2]. Τα πρωτόκολλα αυτά παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Συγκρούσεις πακέτων στον προορισμό

Σε ένα πολυδιαυλικό δίκτυο, εκτός από τις συγκρούσεις στα κανάλια, παρατηρούνται απώλειες πληροφορίας εξαιτίας του φαινομένου των συγκρούσεων στον προορισμό.

Το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό παρατηρείται στην περίπτωση που περισσότερα του ενός πακέτα που έχουν μεταδοθεί επιτυχώς μέσω του πολυδιαυλικού δικτύου έχουν τον ίδιο σταθμό προορισμού. Στην περίπτωση αυτή, ο σταθμός προορισμού

δεν μπορεί να παραλάβει όλα τα πακέτα που προορίζονται για αυτόν, λόγω της περιορισμένης χωρητικότητας του καταχωρητή εισόδου που διαθέτει. Έτσι, ανάλογα με το πρωτόκολλο, ο σταθμός προορισμού παραλαμβάνει μέρος των πακέτων που προορίζονται για αυτόν και απορρίπτει τα υπόλοιπα.

Η παράμετρος των συγκρούσεων στο προορισμό προκαλεί σημαντική απώλεια πληροφορίας σε όλα τα πολυδιαυλικά δίκτυα. Οι περισσότερες μελέτες σχετικά με τα πολυδιαυλικά δίκτυα θεωρούν ότι κάθε σταθμός διαθέτει άπειρη χωρητικότητα καταχωρητή εισόδου και επομένως δεν συνυπολογίζουν τις συγκρούσεις στον προορισμό στην ανάλυση του δικτύου.

Στην πραγματικότητα, η χωρητικότητα εισόδου των σταθμών έχει δεδομένη πεπερασμένη τιμή και παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση του. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ορισμένα πρωτόκολλα πολυδιαυλικών δικτύων που λαμβάνουν υπόψη τους τις συγκρούσεις στον προορισμό και υπολογίζουν τα μέτρα αποδοτικότητας με αναλυτικά εργαλεία ή με εξομοίωση.

Συγκεκριμένα, στη μελέτη [49] παρουσιάζεται το M-CSMA-IC πρωτόκολλο πολυδιαυλικού δικτύου στο οποίο η διαδικασία αφίξεων στο πολυδιαυλικό δίκτυο ακολουθεί την κατανομή Poisson. Στην εργασία αυτή υπολογίζεται η απόδοση του δικτύου θεωρώντας ότι οι σταθμοί διαθέτουν χωρητικότητα εισόδου ενός πακέτου.

Στη [50] εξετάζεται το M-CSMA/CD πρωτόκολλο για πεπερασμένο πληθυσμό σταθμών, λαμβάνοντας υπόψη τις συγκρούσεις στον προορισμό. Στην εργασία αυτή υπολογίζεται, με χρήση εξομοιωτικού μοντέλου, η απόδοση του δικτύου για διάφορες τιμές της χωρητικότητας εισόδου.

Στη [51] παρουσιάζεται το πρωτόκολλο M-CSMA/CD για πεπερασμένο πληθυσμό σταθμών. Στη μελέτη αυτή υπολογίζεται προσεγγιστικά η πιθανότητα επιτυχούς λήψης των πακέτων, χρησιμοποιώντας μαρκοβιανή ανάλυση και θεωρώντας μοναδιαία χωρητικότητα εισόδου.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, τα πρωτόκολλα που διατυπώθηκαν για πολυδιαυλικά δίκτυα, είτε συμμετρικής είτε ασύρματης πρόσβασης στα κανάλια, λαμβάνουν υπόψη τις συγκρούσεις στον προορισμό για τον υπολογισμό των μέτρων αποδοτικότητας [J.1],[J.2],[C.1],[C.2]. Τα πρωτόκολλα αυτά παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Απώλειες σε ασύρματα πολυδιαυλικά δίκτυα

Στα ασύρματα πολυδιαυλικά δίκτυα, απώλεια πληροφορίας μπορεί να συμβεί εξαιτίας διαφόρων αιτών: είτε συγκρούσεων στα κανάλια επικοινωνίας, είτε συγκρούσεων στον προορισμό, είτε παρεμβολών στις συχνότητες μετάδοσης. Επίσης λόγω της φύσης της ασύρματης επικοινωνίας, στα ασύρματα δίκτυα είναι δυνατόν να παρατηρηθεί απώλεια πληροφορίας εξαιτίας του φαινομένου του κρυμμένου σταθμού και του πολυδιαυλικού κρυμμένου σταθμού.

Στην περίπτωση του φαινομένου του κρυμμένου σταθμού, δύο ή περισσότεροι σταθμοί του ασύρματου δικτύου, που ο καθένας βρίσκεται εκτός της περιοχής (out of range) του άλλου, αποστέλλουν τα πακέτα τους στον ίδιο σταθμό προορισμού. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σύγκρουση των πακέτων στον προορισμό και την καταστροφή τους.

Επίσης στην περίπτωση του φαινομένου του πολυδιαυλικού κρυμμένου σταθμού, σταθμοί που βρίσκονται ο ένας στην περιοχή λήψης (in range) του άλλου είναι δυνατόν να πραγματοποιούν μετάδοση στο ίδιο κανάλι, παρόλο που εφαρμόζονται τεχνικές ελέγχου πρόσβασης στα κανάλια για την αποφυγή συγκρούσεων. Το γεγονός αυτό έχει ως

αποτέλεσμα τη σύγκρουση των πακέτων και την καταστροφή τους. Το φαινόμενο του πολυδιαυλικού κρυμμένου σταθμού παρατηρείται όταν ένας σταθμός επιχειρεί μετάδοση σε κανάλι που είναι δεσμευμένο, γεγονός που δεν το γνωρίζει αφού κατά τη δέσμευση του καναλιού ο σταθμός ήταν απασχολημένος με άλλη μετάδοση σε άλλο κανάλι.

Στη βιβλιογραφία, έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρωτόκολλα που προτείνουν στρατηγικές πρόσβασης για την αποφυγή συγκρούσεων στα ασύρματα πολυδιαυλικά δίκτυα. Είναι προφανές ότι στα πρωτόκολλα αυτά, η εφαρμογή μηχανισμού για την αποφυγή συγκρούσεων αυξάνει σημαντικά την καθυστέρηση στο δίκτυο και απαιτεί κατάλληλους αλγορίθμους ελέγχου.

Συγκεκριμένα, στις μελέτες [52]-[53] παρουσιάζονται δύο πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης, το CARMA-NTQ που χρησιμοποιεί ουρές πακέτων και το CARMA-NTG που χρησιμοποιεί ομάδες πακέτων αντίστοιχα. Τα πρωτόκολλα αυτά μελετούν την αποφυγή συγκρούσεων στα κανάλια. Η επιτυχής μετάδοση στα κανάλια επιτυγχάνεται μετά την επιτυχή εκπομπή ενός πακέτου ελέγχου κατά τη διάρκεια ανταγωνισμού, η οποία εξασφαλίζει την επιτυχή μετάδοση του πακέτου δεδομένων από την κατάλληλη ουρά ή ομάδα αντίστοιχα. Στις μελέτες αυτές η διαδικασία άφιξης πακέτων ακολουθεί την κατανομή Poisson και η κατάσταση των συστημάτων αναλύεται με μαρκοβιανή ανάλυση.

Στη [54] εξετάζεται το πρωτόκολλο CARM-MC που αντιμετωπίζει αναλυτικά το φαινόμενο του κρυμμένου σταθμού. Το πρωτόκολλο παρουσιάζει ένα ντετερμινιστικό μοντέλο για τη λήψη πακέτων σε κάθε σταθμό και καθορίζει την πιθανότητα επιτυχούς λήψης τόσο με αναλυτικό τρόπο όσο και με εξομοίωση.

Στη [55] τροποποιείται η προδιαγραφή IEEE 802.11 [56] προκειμένου να λειτουργεί σε πολυδιαυλικό περιβάλλον ad-hoc ασύρματων δικτύων. Στη μελέτη αυτή εξετάζεται το πρωτόκολλο MMAC που αντιμετωπίζει τις απώλειες εξαιτίας παρεμβολών και του φαινόμενου κρυμμένου σταθμού. Στην ανάλυση η διαδικασία άφιξης πακέτων στο δίκτυο ακολουθεί την κατανομή Poisson και υπολογίζεται η διέλευση του συστήματος και η πιθανότητα επιτυχούς λήψης.

Η [57] εξετάζει τις απώλειες εξαιτίας του φαινόμενου του πολυδιαυλικού κρυμμένου σταθμού σε multi-hop πολυδιαυλικό δίκτυο. Η ανάλυση προτείνει το σύγχρονο πρωτόκολλο MMAC και υπολογίζει τη διέλευση και την καθυστέρηση του δικτύου με χρήση εξομοίωσης.

Τέλος, στην [58] παρουσιάζεται ένα σύγχρονο πρωτόκολλο που εξετάζει τη μετάδοση πολλών πακέτων προς τον ίδιο προορισμό σε ασύρματα πολυδιαυλικά δίκτυα. Η ανάλυση θεωρεί πεπερασμένο πληθυσμό σταθμών και υπολογίζει τη διέλευση και την καθυστέρηση του συστήματος με χρήση του μαρκοβιανού μοντέλου.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, διατυπώθηκε ένα πρωτόκολλο για ασύρματα πολυδιαυλικά δίκτυα που λαμβάνει υπόψη τις συγκρούσεις στα κανάλια και στον προορισμό για τον υπολογισμό των μέτρων αποδοτικότητας [J.4].

2.2 Παράμετροι απόδοσης οπτικών πολυδιαυλικών δικτύων

Τα οπτικά WDM δίκτυα δεύτερης γενιάς ανήκουν στην κατηγορία των πολυδιαυλικών δικτύων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα WDM κανάλια της οπτικής ίνας δημιουργούν ένα πολυδιαυλικό δίκτυο στο οποίο τα παράλληλα κανάλια διακρίνονται ανάλογα με το μήκος κύματος στο οποίο μεταδίδουν την πληροφορία.

Στα οπτικά WDM δίκτυα διακρίνουμε τα ίδια χαρακτηριστικά, όπως και στα πολυδιαυλικά δίκτυα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Επιπρόσθετα, εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους, η απόδοση ενός οπτικού WDM δικτύου εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους που σχετίζονται με τις ιδιότητες μετάδοσης δεδομένων στην οπτική ίνα. Συνολικά, η απόδοση ενός οπτικού WDM δικτύου εξαρτάται από:

- τις συγκρούσεις πακέτων στα κανάλια
- τις συγκρούσεις πακέτων στον προορισμό
- το πλήθος των σταθερά συντονισμένων και συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών που διαθέτει κάθε σταθμός του δικτύου
- την καθυστέρηση διάδοσης της οπτικής ακτινοβολίας
- το χρόνο συντονισμού των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών
- την καθυστέρηση μετάδοσης κατά την οπτο-ηλεκτρονική μετατροπή του οπτικού σήματος στα στοιχεία του δικτύου.

Η επίδραση των παραμέτρων αυτών στην απόδοση του οπτικού WDM δικτύου έχει μελετηθεί για πλήθος αρχιτεκτονικών και πρωτοκόλλων.

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση κάθε μιας από τις παραμέτρους αυτές στη απόδοση του οπτικού WDM πολυδιαυλικού δικτύου.

2.2.1 Συγκρούσεις στα WDM κανάλια

Σε ένα WDM οπτικό δίκτυο, ανεξάρτητα από την τοπολογία (παθητικού αστέρα, δακτυλίου) και την περιοχή κάλυψης (LAN, MAN, WAN), είναι πιθανό να παρατηρηθούν απώλειες εξαιτίας συγκρούσεων στα κανάλια. Όπως σε κάθε πολυδιαυλικό δίκτυο, σύγκρουση στα WDM κανάλια του οπτικού δικτύου συμβαίνει όταν ένας ή περισσότεροι σταθμοί μεταδίδουν τα πακέτα τους στο ίδιο WDM κανάλι και οι μεταδόσεις αυτές αλληλοκαλύπτονται χρονικά.

Στη βιβλιογραφία έχει εξεταστεί διεξοδικά το φαινόμενο των συγκρούσεων στα κανάλια του οπτικού WDM δικτύου. Στις σχετικές μελέτες έχουν διατυπωθεί πρωτόκολλα πρόσβασης στα WDM κανάλια που ελαχιστοποιούν ή/και μηδενίζουν τις απώλειες εξαιτίας συγκρούσεων στα κανάλια και υπολογίζουν την απόδοση του δικτύου με αναλυτικά εργαλεία ή εξομοίωση.

Συγκεκριμένα, στη μελέτη [3] παρουσιάζονται διάφορα πρωτόκολλα πρόσβασης σε WDM δίκτυο τοπολογίας παθητικού αστέρα που διαθέτει ένα ξεχωριστό κανάλι ελέγχου. Η μελέτη θεωρεί ότι η μετάδοση στο κανάλι ελέγχου είναι σύγχρονη και ότι τα πρωτόκολλα μετάδοσης στα κανάλια δεδομένων είναι ασύγχρονα. Τα πρωτόκολλα που εξετάζονται ποικίλουν και είναι τα: Slotted ALOHA/ALOHA, Improved Slotted ALOHA/ALOHA, Slotted ALOHA/N-Server Switch πρωτόκολλα. Στη μελέτη αυτή θεωρείται ότι το πλήθος των σταθμών στο δίκτυο είναι άπειρο. Η ανάλυση υπολογίζει τη διέλευση και την καθυστέρηση του συστήματος με χρήση Poisson στατιστικής.

Στη [4] μελετάται η πρόβλεψη για την αποφυγή συγκρούσεων στα WDM κανάλια ενός δικτύου παθητικού αστέρα όπου η μετάδοση τόσο στο κανάλι ελέγχου όσο και στα κανάλια δεδομένων είναι σύγχρονη. Στο πρωτόκολλο αυτό, ο χρόνος είναι κβαντισμένος σε χρονικές σχισμές. Στο κανάλι ελέγχου, οι σχισμές ελέγχου διακρίνονται σε υπό-σχιμές, που χρησιμοποιούνται για την εξασφάλιση δικαιώματος πρόσβασης στο δίκτυο. Η ανάλυση

θεωρεί άπειρο πληθυσμό σταθμών και βασίζεται στο Poisson μοντέλο, υπολογίζοντας τη διέλευση και την καθυστέρηση του συστήματος.

Οι συγκρούσεις στα κανάλια εξετάζονται στην [5] σε διάφορα πρωτόκολλα, όπως τα: ALOHA/ALOHA, Slotted ALOHA/ALOHA, ALOHA/CSMA, CSMA/ALOHA, CSMA/N-Server Switch, για ασύγχρονη μετάδοση στα κανάλια δεδομένων. Στη μελέτη αυτή το πλήθος των σταθμών θεωρείται πεπερασμένο και η ανάλυση βασίζεται στην Poisson στατιστική.

Στη [13] εξετάζονται πρωτόκολλα σύγχρονης μετάδοσης στα κανάλια ελέγχου, στα οποία εφαρμόζονται διαφορετικές πολιτικές εξασφάλισης πρόσβασης μέσω του καναλιού ελέγχου, για την αποφυγή συγκρούσεων στα WDM κανάλια. Στη μελέτη το πλήθος των σταθμών θεωρείται πεπερασμένο και η ανάλυση βασίζεται στην Poisson στατιστική.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, τα πρωτόκολλα που διατυπώθηκαν για οπτικά WDM δίκτυα, είτε τοπικής είτε μητροπολιτικής κλίμακας, λαμβάνουν υπόψη τις συγκρούσεις στα WDM κανάλια για τον υπολογισμό των μέτρων αποδοτικότητας [J.3], [J.5]-[J.8], [C.3]-[C.7]. Τα πρωτόκολλα αυτά παρουσιάζονται στα: Κεφάλαιο 5 - Κεφάλαιο 6 και Κεφάλαιο 7 - Κεφάλαιο 10.

2.2.2 Συγκρούσεις στον προορισμό

Στα οπτικά πολυδιαυλικά WDM δίκτυα, το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό διαφέρει από τα κλασσικά πολυδιαυλικά δίκτυα. Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, στα κλασσικά πολυδιαυλικά δίκτυα οι συγκρούσεις στον προορισμό οφείλονται στην περιορισμένη χωρητικότητα εισόδου των σταθμών. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα πακέτα με τον ίδιο προορισμό να μην μπορούν να απορροφηθούν από τον καταχωρητή εισόδου του σταθμού προορισμού και να απορρίπτονται.

Αντίθετα, στα οπτικά WDM δίκτυα παρατηρούνται συγκρούσεις στον προορισμό εξαιτίας του συντονισμού των οπτικών δεκτών του σταθμού προορισμού σε άλλο WDM κανάλι. Έτσι στα οπτικά WDM δίκτυα, ένα πακέτο που έχει μεταδοθεί επιτυχώς μέσω του πολυδιαυλικού δικτύου των WDM καναλιών θα απορριφθεί από το σταθμό προορισμού επειδή ο συντονιζόμενος δέκτης του προορισμού είναι συντονισμένος σε άλλο κανάλι για τη λήψη άλλου πακέτου.

Το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό παρατηρείται με διαφορετικό τρόπο στα WDM δίκτυα σύγχρονης και ασύγχρονης μετάδοσης. Έτσι, στα πρωτόκολλα ασύγχρονης μετάδοσης WDM δικτύων, σύγκρουση στον προορισμό θα συμβεί όταν το πακέτο που έχει μεταδοθεί επιτυχώς μέσω του δικτύου δεν μπορεί να παραληφθεί από τον προορισμό γιατί ο συντονιζόμενος δέκτης του προορισμού έχει συντονιστεί σε προηγούμενη χρονική στιγμή σε άλλο κανάλι για τη λήψη ενός άλλου πακέτου.

Στα σύγχρονα πρωτόκολλα μετάδοσης WDM δικτύων, το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό διαφέρει. Στα πρωτόκολλα αυτά, η μετάδοση των πακέτων είναι συγχρονισμένη στην αρχή κάθε χρονικής σχισμής. Έτσι, η άφιξη των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων στο σταθμό προορισμού πραγματοποιείται σχεδόν ταυτόχρονα. Αν δύο ή περισσότερα πακέτα προορίζονται για τον ίδιο σταθμό κατά τη διάρκεια της ίδιας χρονικής σχισμής, μόνο ένα από αυτά μπορεί να παραληφθεί από το δέκτη και τα υπόλοιπα απορρίπτονται.

Στη βιβλιογραφία, έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης WDM δικτύων που λαμβάνουν υπόψη τους το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό. Ο συνυπολογισμός των συγκρούσεων στον προορισμό στην ανάλυση του

συστήματος παρέχει μια πιο ρεαλιστική εικόνα για τη απόδοση του, σε σχέση με την ανάλυση που αγνοεί την επίδραση του φαινομένου αυτού.

Ο περιορισμός της αποδοτικότητας του συστήματος εξαιτίας των συγκρούσεων στον προορισμό υπολογίζεται από την πιθανότητα απόρριψης ενός πακέτου στον προορισμό. Η πιθανότητα αυτή δίνεται ως ο λόγος της μείωσης της διέλευσης του συστήματος εξαιτίας των συγκρούσεων στον προορισμό προς τη διέλευση χωρίς το συνυπολογισμό του φαινομένου αυτού.

Τα περισσότερα πρωτόκολλα στα οποία μελετάται το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό αναφέρονται σε τοπικά δίκτυα τοπολογίας παθητικού αστέρα. Στα πρωτόκολλα αυτά υπολογίζεται η μείωση της απόδοσης του WDM δικτύου και η πιθανότητα απόρριψης εξαιτίας των συγκρούσεων στον προορισμό, είτε με αναλυτικά εργαλεία είτε με εξομοίωση.

Συγκεκριμένα, η πρόβλεψη για την αποφυγή των συγκρούσεων τόσο στα κανάλια όσο και στο προορισμό, εισάγεται στη μελέτη [19]. Η μελέτη αυτή βασίζεται στην εισαγωγή λειτουργιών ελέγχου στο συζεύκτη παθητικού αστέρα για την κίνηση στο δίκτυο. Η ανάλυση προτείνει ένα νέο πρωτόκολλο που αυξάνει την αποδοτικότητα του WDM δικτύου, ενώ τα αποτελέσματα δίνονται με αναλυτικό τρόπο και με εξομοίωση.

Στην [6] αναλύεται το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό σε δύο πρωτόκολλα: το πρωτόκολλο σύγχρονης και το πρωτόκολλο ασύγχρονης μετάδοσης στα κανάλια δεδομένων. Η μελέτη αυτή υπολογίζει τη διέλευση και την πιθανότητα απόρριψης στον προορισμό με αναλυτικά εργαλεία και θεωρεί ότι κάθε σταθμός διαθέτει ένα συντονιζόμενο οπτικό δέκτη που μπορεί να παραλάβει ένα πακέτο. Η ανάλυση θεωρεί πεπερασμένο πλήθος σταθμών και τα μέτρα αποδοτικότητας υπολογίζονται με βάση την Poisson στατιστική.

Στην [7] προτείνονται τέσσερα πρωτόκολλα που λαμβάνουν υπόψη τους τις συγκρούσεις στον προορισμό, χρησιμοποιώντας τις τεχνικές LCB και CRU. Η μελέτη εισάγει στην τοπολογία παθητικού αστέρα τη χρήση πολλών καναλιών ελέγχου για την αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος. Η ανάλυση πραγματοποιείται για πεπερασμένο πλήθος σταθμών και ασύμμετρη πρόσβαση στο δίκτυο.

Στις μελέτες [8]-[10] εξετάζεται με αναλυτικό τρόπο η απόδοση του συστήματος και παρέχονται τα μέτρα αποδοτικότητας: η διέλευση, η καθυστέρηση και η πιθανότητα απόρριψης εξαιτίας συγκρούσεων στον προορισμό. Στις μελέτες αυτές, η τοπολογία παθητικού αστέρα έχει τροποποιηθεί και περιλαμβάνει πλήθος παράλληλων WDM καναλιών ελέγχου, αντί της τοπολογίας με ένα κανάλι ελέγχου. Επίσης, στις μελέτες αυτές θεωρείται ότι κάθε σταθμός διαθέτει ένα πεπερασμένο πλήθος σταθερά συντονισμένων δεκτών για τα πακέτα ελέγχου και ένα συντονιζόμενο δέκτη για τα πακέτα δεδομένων.

Συγκεκριμένα, στην [8] παρουσιάζεται ένα σύγχρονο πρωτόκολλο για την πρόσβαση τόσο στα WDM κανάλια ελέγχου, όσο και στα WDM κανάλια δεδομένων. Η ανάλυση βασίζεται στην Poisson στατιστική και πραγματοποιείται τόσο για πεπερασμένο όσο και για άπειρο πληθυσμό σταθμών.

Στην [9] εξετάζεται ένα πρωτόκολλο ασύγχρονης πρόσβασης στα WDM κανάλια δεδομένων, ενώ η μετάδοση στα WDM κανάλια ελέγχου είναι σύγχρονη. Η ανάλυση βασίζεται σε Poisson προσεγγίσεις και πραγματοποιείται τόσο για πεπερασμένο όσο και για άπειρο πληθυσμό σταθμών.

Η [10] παρουσιάζει δύο πρωτόκολλα πρόσβασης: το πρωτόκολλο σύγχρονης και το πρωτόκολλο ασύγχρονης μετάδοσης στα κανάλια δεδομένων. Η μελέτη αυτή βασίζεται στην Poisson στατιστική και πραγματοποιείται για πεπερασμένο πληθυσμό σταθμών.

Στην [11] παρουσιάζεται ένα σύγχρονο πρωτόκολλο πρόσβασης στα WDM κανάλια δεδομένων. Στη μελέτη αυτή θεωρείται ότι η τοπολογία παθητικού αστέρα περιλαμβάνει πλήθος παράλληλων WDM καναλιών ελέγχου και κάθε σταθμός εκπέμπει στο καθορισμένο κανάλι εκπομπής που του έχει ανατεθεί. Η ανάλυση βασίζεται στην Poisson στατιστική και πραγματοποιείται για πεπερασμένο πληθυσμό σταθμών.

Στη [12] εξετάζεται το πρωτόκολλο CPF που προσθέτει στον παθητικό αστέρα λειτουργίες ελέγχου, για την αποφυγή των συγκρούσεων τόσο στα κανάλια όσο και στον προορισμό. Η μελέτη πραγματοποιείται με αναλυτικό τρόπο με βάση την Poisson στατιστική και τα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται με εξομοίωση.

Επίσης, στη βιβλιογραφία έχει μελετηθεί το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό και σε μητροπολιτικά δίκτυα. Συγκεκριμένα, η [39] παρουσιάζει ένα σύγχρονο πρωτόκολλο μητροπολιτικού οπτικού δικτύου τοπολογίας παθητικού αστέρα. Στη μελέτη αυτή κάθε σταθμός διαθέτει ένα σταθερά συντονισμένο εκπομπό και ένα συντονιζόμενο δέκτη. Το πρωτόκολλο εφαρμόζει πολιτικές ελέγχου για την αποφυγή των συγκρούσεων στον προορισμό. Η ανάλυση πραγματοποιείται για πεπερασμένο πληθυσμό σταθμών και υπολογίζει τα μέτρα αποδοτικότητας του συστήματος με βάση το Poisson μοντέλο.

Η σύγκριση δύο πρωτοκόλλων τοπολογίας δακτυλίου και παθητικού αστέρα, για μητροπολιτικά δίκτυα επιχειρείται στη [38]. Η μελέτη εξετάζει ένα πρωτόκολλο τοπολογίας δακτυλίου, στο οποίο κάθε σταθμός διαθέτει ένα συντονιζόμενο εκπομπό και ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη. Το πρωτόκολλο αυτό συγκρίνεται με το AWG πρωτόκολλο παθητικού αστέρα, στο οποίο κάθε σταθμός διαθέτει ένα συντονιζόμενο εκπομπό και ένα συντονιζόμενο δέκτη. Η ανάλυση θεωρεί Bernoulli κίνηση στα δύο δίκτυα και τα αποτελέσματα εξάγονται με χρήση εξομοίωσης.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, τα πρωτόκολλα που διατυπώθηκαν για οπτικά WDM δίκτυα, είτε τοπικής είτε μητροπολιτικής κλίμακας, λαμβάνουν υπόψη τις συγκρούσεις στον προορισμό για τον υπολογισμό των μέτρων αποδοτικότητας [J.3], [J.5]-[J.8], [C.3]-[C.7]. Τα πρωτόκολλα αυτά παρουσιάζονται στα: Κεφάλαιο 5 - Κεφάλαιο 6 και Κεφάλαιο 7 - Κεφάλαιο 10.

2.2.3 Πλήθος οπτικών εκπομπών - δεκτών

Η απόδοση ενός WDM δικτύου εξαρτάται σημαντικά από το πλήθος των οπτικών δεκτών και εκπομπών που διαθέτει κάθε σταθμός. Ειδικότερα, το πλήθος των οπτικών συντονιζόμενων δεκτών που διαθέτει κάθε σταθμός σχετίζεται άμεσα με την επίδραση του φαινομένου των συγκρούσεων στον προορισμό στη απόδοση του δικτύου. Επίσης, το πλήθος των οπτικών συντονιζόμενων δεκτών κάθε σταθμού καθορίζει το μέγεθος της πιθανότητας απόρριψης λόγω συγκρούσεων στον προορισμό στα οπτικά WDM δίκτυα.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω παραγράφων αποδεικνύουν ότι η απόδοση ενός WDM δικτύου εξαρτάται καθοριστικά από το πεπερασμένο πλήθος των συντονιζόμενων οπτικών δεκτών που διαθέτουν οι σταθμοί για τη λήψη των πακέτων δεδομένων. Ορισμένες μελέτες θεωρούν ότι το πλήθος των συντονιζόμενων δεκτών ενός σταθμού έχει πεπερασμένη τιμή μεγαλύτερη της μονάδας. Οι μελέτες αυτές εξετάζουν την επίδραση της αύξησης του πλήθους των συντονιζόμενων δεκτών στη απόδοση του συστήματος.

Ειδικότερα, στην [14] παρουσιάζεται ένα σύγχρονο πρωτόκολλο πρόσβασης στα WDM κανάλια δεδομένων. Κάθε σταθμός διαθέτει ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη για τα πακέτα ελέγχου και έναν αριθμό συντονιζόμενων δεκτών για τα πακέτα δεδομένων. Η ανάλυση βασίζεται στο Poisson μοντέλο και πραγματοποιείται για πεπερασμένο πληθυσμό σταθμών.

Η τροποποίηση της τοπολογίας παθητικού αστέρα ώστε να περιλαμβάνει πλήθος παράλληλων WDM καναλιών ελέγχου, προτείνεται στην [16]. Στη μελέτη αυτή θεωρείται ότι κάθε σταθμός διαθέτει ένα πεπερασμένο πλήθος συντονιζόμενων δεκτών για τα πακέτα ελέγχου και ένα πλήθος συντονιζόμενων δεκτών για τα πακέτα δεδομένων. Η μελέτη παρουσιάζει ένα σύγχρονο πρωτόκολλο μετάδοσης και πραγματοποιείται για πεπερασμένο πληθυσμό σταθμών, με βάση το Poisson μοντέλο.

Στη [18] μελετάται η επίδραση στη απόδοση του συστήματος της αύξησης του πλήθους των συντονιζόμενων δεκτών και δίνονται συγκεκριμένα αριθμητικά παραδείγματα. Η μελέτη θεωρεί ότι το δίκτυο περιλαμβάνει πολλαπλά WDM κανάλια ελέγχου και πολλαπλά WDM κανάλια δεδομένων. Η μελέτη προτείνει ένα σύγχρονο πρωτόκολλο μετάδοσης και πραγματοποιείται για πεπερασμένο πληθυσμό σταθμών, με βάση την Poisson στατιστική.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, μελετήθηκε πρωτόκολλο για οπτικά WDM μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου με μεγάλο πλήθος καναλιών δεδομένων [J.7]. Εξαιτίας του μεγάλου χρόνου συντονισμού των οπτικών φίλτρων στο σύνολο των πολλαπλών καναλιών δεδομένων, μελετήθηκε η λειτουργία πολλαπλών παράλληλων συντονιζόμενων δεκτών ανά σταθμό. Το πρωτόκολλο αυτό παρουσιάζεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 10.

2.2.4 Καθυστέρηση διάδοσης

Η απόδοση των οπτικών WDM δικτύων εξαρτάται από την καθυστέρηση διάδοσης τ της οπτικής ακτινοβολίας στην οπτική ίνα. Ο συνυπολογισμός της παραμέτρου αυτής στην ανάλυση της απόδοσης των οπτικών δικτύων απαιτεί ιδιαίτερα σύνθετα αναλυτικά εργαλεία, και για το λόγο αυτό στις περισσότερες εργασίες η επίδραση της παραμέτρου αυτής αγνοείται.

Στα τοπικά δίκτυα WDM καναλιών, η μέγιστη απόσταση μεταξύ των πιο απομακρυσμένων σταθμών του δικτύου είναι μικρή και επομένως η καθυστέρηση διάδοσης τ έχει πολύ μικρή τιμή. Στις περισσότερες βιβλιογραφικές αναφορές με μαθηματική ανάλυση η παράμετρος της καθυστέρησης διάδοσης θεωρείται αμελητέα, χωρίς βλάβη της γενικότητας. Ειδικότερα, στη βιβλιογραφία τοπικών WDM δικτύων τόσο η καθυστέρηση διάδοσης τ καθώς και η παράμετρος $\alpha = \tau / T$, όπου T είναι ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου σε WDM κανάλι δεδομένης χωρητικότητας, δεν συνυπολογίζονται στην ανάλυση του συστήματος.

Παρόλα αυτά, η απόδοση των πρωτοκόλλων τοπικών WDM δικτύων επηρεάζεται καθοριστικά από την καθυστέρηση διάδοσης τ , ως ενυπάρχον χαρακτηριστικό των οπτικών δικτύων. Επομένως, η αγνόηση της στη μελέτη πρωτοκόλλων οπτικών WDM δικτύων καθιστά τα αποτελέσματα μη ρεαλιστικά. Σύγχρονες τάσεις στη διατύπωση τέτοιων αρχιτεκτονικών και πρωτοκόλλων επιβάλλουν τον συνυπολογισμό της επίδρασης της παραμέτρου τ στην απόδοση των πρωτοκόλλων. Έτσι, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής η συνεισφορά των πρωτοκόλλων που παρουσιάζονται στις μελέτες [J.3],[J.5],[J.6],[C.3],[C.4] είναι σημαντική, αφού αυτά εκμεταλλεύονται την καθυστέρηση

διάδοσης τ ως χρόνο επιβεβαίωσης για την ασφαλή ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου για την εξασφάλιση μετάδοσης χωρίς συγκρούσεις, σε τοπικά WDM δίκτυα τοπολογίας παθητικού αστέρα. Στο Κεφάλαιο 5 και στο Κεφάλαιο 6 δίνεται η λεπτομερής περιγραφή των πρωτοκόλλων αυτών και μελετάται η απόδοσή τους.

Σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στα τοπικά WDM δίκτυα, στα μητροπολιτικά οπτικά δίκτυα η καθυστέρηση διάδοσης τ της οπτικής ακτινοβολίας επιδρά πιο καθοριστικά στην απόδοση των πρωτοκόλλων. Στα δίκτυα αυτά η παράμετρος τ έχει πεπερασμένη και υπολογίσιμη τιμή, με δεδομένο ότι η απόσταση μεταξύ των πιο απομακρυσμένων σταθμών του δικτύου είναι αρκετά μεγάλη. Έτσι, η καθυστέρηση διάδοσης τ , καθώς και η παράμετρος $\alpha = \tau / T$ συνυπολογίζονται στην ανάλυση του συστήματος [25]-[27].

Τα αποτελέσματα της διδακτορικής έρευνας σχετικά με πρωτόκολλα WDM μητροπολιτικών δικτύων προσμετρούν την καθυστέρηση διάδοσης τ στον υπολογισμό της απόδοσής τους. Έτσι, προκειμένου να εξασφαλίσουν τον τέλειο συγχρονισμό της πληροφορίας δεδομένων και ελέγχου εισάγουν σε κάθε σταθμό κατάλληλο εξοπλισμό γραμμών καθυστέρησης (delay lines). Λεπτομερής περιγραφή των πρωτοκόλλων αυτών δίνεται στο Μέρος III (Κεφάλαιο 7- Κεφάλαιο 10).

2.2.5 Χρόνος συντονισμού οπτικών φίλτρων

Στα οπτικά WDM δίκτυα, μια παράμετρος που επιδρά στην απόδοσή τους είναι ο χρόνος συντονισμού των συντονιζόμενων οπτικών εκπομπών και δεκτών από μία συχνότητα λειτουργίας σε μια άλλη, για τη μετάδοση και λήψη πληροφορίας αντίστοιχα.

Στις περισσότερες μελέτες ο χρόνος συντονισμού των συντονιζόμενων οπτικών εκπομπών και δεκτών θεωρείται αμελητέος, προς διευκόλυνση της μαθηματικής ανάλυσης. Παρόλα αυτά, η επίδραση της παραμέτρου αυτής στην απόδοση του δικτύου λαμβάνεται υπόψη σε μελέτες που χρησιμοποιούν εξομοίωση.

Χαρακτηριστικά, στη μελέτη [15] εξετάζεται η επίδραση του χρόνου συντονισμού των συντονιζόμενων οπτικών εκπομπών και δεκτών από μία συχνότητα λειτουργίας σε άλλη. Στη μελέτη αυτή, ο χρόνος συντονισμού έχει πεπερασμένη και υπολογίσιμη τιμή. Η ανάλυση πραγματοποιείται τόσο με αναλυτικό τρόπο με βάση το Poisson μοντέλο, όσο και με εξομοίωση. Επίσης, η μελέτη αυτή θεωρεί ότι το μήκος των μεταδιδόμενων πακέτων ποικίλει και η τιμή του ακολουθεί την εκθετική κατανομή. Στη μελέτη εξετάζεται η επίδραση στην απόδοση του συστήματος της μεταβολής του μήκους των πακέτων, για διάφορες τιμές του αριθμού των καναλιών και των σταθμών του δικτύου.

Επίσης, στις μελέτες που αφορούν αποτελέσματα υλοποιημένων στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων μητροπολιτικών WDM δικτύων, ο χρόνος συντονισμού των οπτικών εκπομπών και δεκτών καθορίζεται πειραματικά [59]-[60]. Τα πειραματικά αυτά αποτελέσματα αξιοποιήθηκαν στα πρωτόκολλα που διατυπώθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας για WDM μητροπολιτικά δίκτυα και λαμβάνουν υπόψη το χρόνο συντονισμού των οπτικών εκπομπών και δεκτών στον υπολογισμό της απόδοσης [J.7],[J.8],[C.5]-[C.7]. Τα πρωτόκολλα αυτά μοντελοποιήθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής και παρουσιάζονται στο Μέρος III (Κεφάλαιο 7- Κεφάλαιο 10).

2.2.6 Οπτο-ηλεκτρονικά και αμιγώς οπτικά δίκτυα

Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα στην περιοχή των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς προσανατολίζεται στην επίλυση όλων των τεχνικών προβλημάτων προκειμένου να γίνει

εφικτή η πλήρης αντικατάσταση των ηλεκτρονικών και οπτο-ηλεκτρονικών στοιχείων ενός WDM δικτύου από αμιγώς οπτικά στοιχεία.

Η αντικατάσταση αυτή είναι προς το παρόν δύσκολα υλοποιήσιμη γιατί προϋποθέτει μεγάλες τεχνικές εργασίες και απαιτεί τεράστιο οικονομικό κόστος το οποίο οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι δεν φαίνονται πρόθυμοι να καλύψουν.

Στα σύγχρονα μητροπολιτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς εκπονούνται διάφορες έρευνες που έχουν καταλήξει στη διατύπωση συγκεκριμένων πρωτοκόλλων πρόσβασης και διαχείρισης της κίνησης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα πρωτόκολλα αυτά υλοποιούνται τεχνικές δρομολόγησης και μεταγωγής της πληροφορίας από τον εκπομπό στο δέκτη. Επίσης, η απόδοση των πρωτοκόλλων αυτών επηρεάζεται από τις παραμέτρους απόδοσης των οπτικών WDM δικτύων, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δηλαδή από: τις συγκρούσεις στα κανάλια και τον προορισμό, το πλήθος των οπτικών δεκτών και εκπομπών κάθε σταθμού, την καθυστέρηση διάδοσης τ , το χρόνο συντονισμού κ.α.

Σε πολλά πανεπιστήμια έχουν υλοποιηθεί διάφορα ερευνητικά μητροπολιτικά WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου που επιχειρούν να συγκεράσουν την οπτική και την ηλεκτρονική τεχνολογία. Χαρακτηριστικά πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας είναι: το HORNET και το DAVID που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3. Η εξέλιξη και λειτουργία των πρωτοκόλλων αυτών βρίσκεται σε πειραματικό-ερευνητικό στάδιο, ενώ προτείνεται η εμπορική τους εκμετάλλευση.

Στη μελέτη [20] παρουσιάζεται μια εκτενής επισκόπηση των πρωτοκόλλων και των αρχιτεκτονικών που έχουν αναπτυχθεί για τα μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου, ως σήμερα.

Η μελέτη ενός αμιγώς οπτικού πρωτοκόλλου για την πρόσβαση στα WDM κανάλια οπτικού μητροπολιτικού δακτυλίου παρουσιάζεται στην [21]. Στη μελέτη αυτή το πλήθος των WDM καναλιών διαφέρει από το πλήθος των σταθμών του δικτύου και αναπτύσσεται ένας μηχανισμός ελέγχου της Ποιότητας της Υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) στο δίκτυο. Στο πρωτόκολλο αυτό, κάθε σταθμός διαθέτει ένα συντονιζόμενο εκπομπό και ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη που λειτουργεί στη δεδομένη συχνότητα λήψης του σταθμού. Η ανάλυση υπολογίζει τη διέλευση, την καθυστέρηση και την πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης με βάση το semi-Markov μοντέλο. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται με τη χρήση μεθόδων εξομοίωσης.

Τα αποτελέσματα του Ευρωπαϊκού I.S.T. προγράμματος DAVID (Data And Voice Integration over DWDM) παρουσιάζονται στη [22]. Το πειραματικό δίκτυο DAVID περιλαμβάνει επιμέρους δίκτυα μεταγωγής πακέτου, που είναι τόσο μητροπολιτικά όσο και ευρείας περιοχής και έχουν διακριτή δομή. Σε όλα τα επιμέρους τμήματα του δικτύου η μετάδοση είναι σύγχρονη. Το πρωτόκολλο συνδυάζει δύο διαφορετικές τεχνολογίες υλοποίησης οπτικών δικτύων: την αμιγώς οπτική και την ηλεκτρονική τεχνολογία. Τα μέτρα αποδοτικότητας του δικτύου υπολογίζονται με χρήση μεθόδων εξομοίωσης.

Στην [23] εξετάζονται τέσσερις αλγόριθμοι σχεδιασμού, οι: RS, DPQ, LQF και SPF για το CSMA/CA πρωτόκολλο με χρήση του backoff MAC αλγορίθμου. Οι παραπάνω αλγόριθμοι σχεδιασμού στοχεύουν στη βελτίωση της δίκαιης κατανομής και της αποδοτικότητας του συστήματος. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση εξομοίωσης και υπολογίζει τη διέλευση, την καθυστέρηση και το βαθμό δίκαιης κατανομής στο WDM μητροπολιτικό δίκτυο.

Στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας για WDM μητροπολιτικά δίκτυα, τα πρωτόκολλα που διατυπώθηκαν βασίζονται στην οπτο-ηλεκτρονική μετατροπή της πληροφορίας ελέγχου προκειμένου αυτή να τύχει επεξεργασίας τοπικά σε κάθε σταθμό για

την αποφυγή συγκρούσεων στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό [J.7],[J.8],[C.5]-[C.7]. Τα πρωτόκολλα αυτά παρουσιάζονται στο Μέρος ΙΙΙ (Κεφάλαιο 7- Κεφάλαιο 10).

Κεφάλαιο 3 : Σύγχρονες Τάσεις στα Οπτικά Δίκτυα

Η σύγχρονη ερευνητική κατεύθυνση στην περιοχή των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς επιδιώκει να επιλύσει προβλήματα της οπτικής μεταγωγής και μετάδοσης που προκύπτουν από την επίδραση των παραμέτρων απόδοσης που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Σύγχρονες έρευνες επικεντρώνονται στη μοντελοποίηση της λειτουργίας μητροπολιτικών δικτύων και δικτύων ευρείας περιοχής και προτείνουν νέες υλοποιήσεις οπτικών δικτύων που βελτιστοποιούν την απόδοσή τους.

Το κύριο ερευνητικό μέλημα των σύγχρονων μελετών είναι η σταδιακή αντικατάσταση όλων των ηλεκτρονικών και οπτο-ηλεκτρονικών στοιχείων ενός οπτικού δικτύου από αμιγώς οπτικά στοιχεία. Η αντικατάσταση αυτή επιχειρεί να αντιμετωπίσει τις σημαντικές καθυστερήσεις επεξεργασίας και μεταγωγής της μεταδιδόμενης οπτικής πληροφορίας στα ενδιάμεσα στοιχεία του δικτύου. Στην κατεύθυνση αυτή έχουν διατυπωθεί διάφορες τεχνικές υλοποίησης οπτικών δικτύων και μεταγωγής του οπτικού σήματος σε αυτά.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι σύγχρονες ερευνητικές κατευθύνσεις στην υλοποίηση μητροπολιτικών WDM δικτύων. Επίσης, αναφέρονται χαρακτηριστικά παραδείγματα σύγχρονων υλοποιήσεων, όπως το οπτικό δίκτυο HORNET, καθώς και η τεχνολογία μεταγωγής οπτικού σήματος OBS.

3.1 Σύγχρονες τάσεις στα WDM μητροπολιτικά δίκτυα

Τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μητροπολιτικής κλίμακας χρησιμοποιούνται, κατά κύριο λόγο, ως δίκτυα κορμού και διασυνδέουν διάφορα δίκτυα πρόσβασης διαφορετικών τύπων κίνησης, όπως Ethernet πακέτα, Internet ριπές δεδομένων, ATM πλαίσια και frame relay κίνηση. Η τεχνική πολύπλεξης διαίρεσης μήκους κύματος WDM, που παρουσιάζεται στην παράγραφο 1.2.2.1, έχει αναδειχθεί ως η επικρατούσα τεχνολογία για την υλοποίηση μητροπολιτικών δικτύων υψηλών ταχυτήτων. Και αυτό γιατί η WDM τεχνική επιτυγχάνει να διαχωρίσει το μεγάλο εύρος ζώνης της οπτικής ίνας, που δεν μπορεί να αξιοποιηθεί εύκολα εξαιτίας του πολύ υψηλού ρυθμού μετάδοσης, σε πολλαπλά παράλληλα κανάλια -στις μέρες μας περισσότερα από 100- που λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες μετάδοσης, συμβατές με τα ηλεκτρονικά στοιχεία ενός σταθμού [1],[2],[41],[87].

Στις μέρες μας, τα MANs συναντώνται σε τοπολογία δακτυλίου. Στα επόμενα χρόνια τα WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου αναμένεται να αποτελέσουν την κυρίαρχη υλοποίηση μητροπολιτικών δικτύων επόμενης γενιάς [88]. Πολλά πλεονεκτήματα σχετίζονται με την τοπολογία δακτυλίου και τα πιο σημαντικά είναι [89]:

- η απλή πολιτική δρομολόγησης
- ο απλός έλεγχος και η απλή διαχείριση των δικτυακών πόρων
- η απλή προστασία από δικτυακές καταστροφές.

Πολλές εργασίες έχουν ήδη διερευνήσει την εφικτότητα και την αποδοτικότητα πολλαπλών πρωτοκόλλων πρόσβασης κατάλληλων για WDM μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου. Με δεδομένο ότι τα μέτρα αποδοτικότητας των δικτύων αυτών εξαρτώνται καθοριστικά από τις συγκρούσεις στα WDM κανάλια και από τις συγκρούσεις

στον προορισμό, η πλειονότητα των WDMA πρωτόκολλων πρόσβασης στοχεύουν στην επίλυση των συγκρούσεων αυτών.

Κρίσιμο στοιχείο για την απόδοση των WDMA πρωτοκόλλων είναι η ιδιότητα να εμφανίζουν πολύ μεγάλη τιμή της καθυστέρησης διάδοσης της οπτικής ακτινοβολίας σε σχέση με το χρόνο μετάδοσης του πακέτου δεδομένων. Η ιδιότητα αυτή δυσχεραίνει την ανταλλαγή πληροφοριών ελέγχου στα WDMA πρωτόκολλα προκειμένου να αποφευχθούν οι απώλειες εξαιτίας των συγκρούσεων. Έτσι, τα περισσότερα WDMA πρωτόκολλα αφιερώνουν ένα συγκεκριμένο WDM κανάλι ανά σταθμό είτε για λήψη είτε για μετάδοση, προκειμένου να επιλύσουν τις συγκρούσεις στον προορισμό και στα WDM κανάλια αντίστοιχα.

Ειδικότερα, σε πολλά WDMA πρωτόκολλα μητροπολιτικών δικτύων τοπολογίας δακτυλίου κάθε σταθμός (κόμβος) είναι εξοπλισμένος με ένα συντονιζόμενο εκπομπό και ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη. Αυτή η δικτυακή διεπαφή κόμβου συμβολίζεται ως TT-FR. Στην περίπτωση αυτή, κάθε σταθμός (κόμβος) διαθέτει ένα συγκεκριμένο WDM κανάλι για λήψη, αποφεύγοντας τις συγκρούσεις στον προορισμό [30]-[37].

Αντίστοιχα, σε πολλά WDMA πρωτόκολλα κάθε σταθμός είναι εξοπλισμένος με ένα σταθερά συντονισμένο εκπομπό και ένα συντονιζόμενο δέκτη. Αυτή η δικτυακή διεπαφή κόμβου συμβολίζεται ως FT-TR. Στην περίπτωση αυτή, κάθε σταθμός (κόμβος) διαθέτει ένα συγκεκριμένο WDM κανάλι για μετάδοση, αποφεύγοντας τις συγκρούσεις στα κανάλια [25]-[29].

Στα WDMA πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν τόσο τη TT-FR όσο και τη FT-TR δικτυακή διεπαφή κόμβου εισάγεται ένας περιορισμός σχετικά με τον αριθμό των σταθμών γύρω στον οπτικό δακτύλιο. Ειδικότερα, τα πρωτόκολλα αυτά θεωρούν ότι ο αριθμός των σταθμών N είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο D του αριθμού των WDM καναλιών W στο δακτύλιο, δηλαδή: $D = N / W$.

Παρόλο που ο περιορισμός αυτός στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των συγκρούσεων, εισάγει σημαντικά προβλήματα στην ικανότητα κλιμάκωσης (scalability) του δικτύου. Και αυτό γιατί:

- δυσχεραίνει και καθιστά ιδιαίτερα περίπλοκη τη συντήρηση του δικτύου σε περίπτωση απενεργοποίησης ενός σταθμού.
- καθιστά ανέφικτη την επιπλέον επέκταση του δικτύου που συχνά απαιτείται με την εισαγωγή νέων σταθμών.

Για παράδειγμα, αν ακολουθείται το FT-TR πρωτόκολλο με $D = 1$ και επιδιώκεται η πρόσθεση ενός νέου σταθμού στο δακτύλιο, τότε απαιτείται η εισαγωγή ενός επιπλέον WDM καναλιού για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει τα προβλήματα κλιμάκωσης, αφού απαιτείται ο επανα-σχεδιασμός ολόκληρου του δικτύου καθώς και επιπρόσθετο κόστος. Τέλος, η αύξηση του αριθμού των σταθμών -και επομένως των WDM καναλιών μετάδοσης- πρέπει να λαμβάνει υπόψη το εύρος συντονισμού του συντονιζόμενου δέκτη των σταθμών.

Επίσης, σε σύγχρονα WDMA μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου, ο παραπάνω περιορισμός έχει ως άμεση συνέπεια πολλές χρονικές σχισμές στο δακτύλιο να παραμένουν αχρησιμοποίητες, ακόμα και σε κατάσταση πολύ υψηλού φορτίου. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μη αποδοτική χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης, προκαλώντας σημαντικό περιορισμό της απόδοσης. Προκειμένου να βελτιώσουν τα περιγραφικά μεγέθη, ορισμένα πρωτόκολλα εισηγούνται τη χρησιμοποίηση ενός επιπλέον καναλιού αφιερωμένου στην

ανταλλαγή πληροφοριών ελέγχου καθώς και τη χρησιμοποίηση επιπλέον εκπομπών και δεκτών ανά σταθμό [30],[35]-[37].

3.1.1 Σχετικές μελέτες

Στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται πολλά σύγχρονα πρωτόκολλα για WDM μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου με τον προαναφερθέντα περιορισμό $D = N / W$ σχετικά με τον αριθμό των WDM καναλιών και τον αριθμό των σταθμών (κόμβων) στον οπτικό δακτύλιο.

Μελέτες TT-FR δικτυακής διεπαφής κόμβου

Στα περισσότερα πρωτόκολλα, κάθε σταθμός (κόμβος) είναι εξοπλισμένος με τη TT-FR δικτυακή διεπαφή. Ειδικότερα, στη μελέτη [30] παρουσιάζεται ένα MAC πρωτόκολλο και αναπτύσσεται μια semi-markov διαδικασία για την εξαγωγή των μέτρων αποδοτικότητας.

Επίσης, η μελέτη [31] παρουσιάζει ένα WDMA πρωτόκολλο όπου κάθε κόμβος περιέχει ένα επιπλέον ζεύγος από ένα σταθερά συντονισμένο εκπομπό και ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη για την προσπέλαση ενός ξεχωριστού καναλιού ελέγχου. Στη μελέτη αυτή, τα μέτρα αποδοτικότητας εξάγονται μέσω εξομοίωσης.

Στη [32] περιγράφονται ορισμένοι αλγόριθμοι ελέγχου δίκαιης πρόσβασης (fairness control) και η εκτίμηση των μέτρων αποδοτικότητας πραγματοποιείται μέσω ανάλυσης και εξομοίωσης.

Αντίστοιχα, στη [33] μελετάται, μέσω ενδεδειγμένων εξομοιωτικών αποτελεσμάτων, ένα σχήμα αποφυγής συγκρούσεων στα κανάλια.

Στη [34] παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος ελέγχου δίκαιης πρόσβασης (fairness control).

Επίσης, ο συγχρονισμός των χρονικών σχισμών για ένα πειραματικό δίκτυο μελετάται στη [35], όπου χρησιμοποιείται ένα επιπλέον κανάλι ελέγχου.

Στη [36] δίνεται μια επισκόπηση πολλών WDMA πρωτοκόλλων για μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου.

Τέλος, στη [37] παρουσιάζεται ένα MAC πρωτόκολλο με ένα ξεχωριστό κανάλι ελέγχου, όπου κάθε κόμβος διαθέτει πολλές εικονικές ουρές εξόδου (virtual output queues), μία για κάθε προορισμό.

Η εφικτότητα υλοποίησης ενός σύγχρονου πρωτοκόλλου για WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου με τη χρήση της TT-FR δικτυακής διεπαφής κόμβου έχει εξεταστεί πειραματικά και εκτενώς παρουσιαστεί στο δίκτυο HORNET [61]-[72] (Hybrid Opto-electronic Ring NETwork) [61]-[72] που χρησιμοποιεί τόσο οπτικά όσο και ηλεκτρονικά στοιχεία για τη δρομολόγηση των πακέτων.

Το HORNET γνωρίζει δύο εκδοχές. Η αρχική εκδοχή χρησιμοποιεί τη τεχνική πολλαπλής προσπέλασης με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή συγκρούσεων CSMA/CA με πολύπλεξη φορέα (Sub-Carrier Multiplexing – SCM) για την αποφυγή των συγκρούσεων [64]. Η εκδοχή αυτή παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς εξαιτίας της SCM τεχνικής.

Έτσι, η δεύτερη εκδοχή του HORNET αντιμετωπίζει τους περιορισμούς εξαιτίας της SCM τεχνικής χρησιμοποιώντας ένα επιπλέον κανάλι ελέγχου προκειμένου να αποφευχθούν

οι συγκρούσεις. Στην εκδοχή αυτή κάθε σταθμός του δικτύου διαθέτει πολλαπλές ουρές εκπομπής, μία για κάθε κανάλι μετάδοσης. Επίσης, σε κάθε σταθμό ακολουθείται ένας αλγόριθμος επιλογής της ουράς εκπομπής που αποσκοπεί στην αποφυγή των συγκρούσεων, με την επιλογή της κατάλληλης ουράς εκπομπής. Παρόλο που ο αλγόριθμος αυτός επιτυγχάνει υψηλή αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, παρέχει μη-δίκαιη πρόσβαση των σταθμών στο δίκτυο (unfairness) [29]. Προκειμένου να βελτιωθεί το επίπεδο παρεχόμενης δικαιοσύνης πρόσβασης των σταθμών στο δίκτυο (fairness), ανταλλάσσεται επιπλέον πληροφορία ελέγχου μεταξύ των σταθμών. Το γεγονός αυτό παρέχει, εκτός από επιβάρυνση στην επεξεργασία της πληροφορίας ελέγχου, μη-ικανοποιητική QoS, ειδικά σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου [62].

Μελέτες FT-TR δικτυακής διεπαφής κόμβου

Από την άλλη μεριά, στη βιβλιογραφία μελετώνται πολλά WDMA πρωτόκολλα για WDM μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου με τον προαναφερθέντα περιορισμό $D = N/W$, που χρησιμοποιούν τη FT-TR δικτυακή διεπαφή κόμβου.

Ειδικότερα, στις μελέτες [25]-[27] παρουσιάζεται ένα MAC πρωτόκολλο που υλοποιεί μια ειδική τεχνική ελέγχου δίκαιης πρόσβασης και τα μέτρα αποδοτικότητας υπολογίζονται μέσω θεωρητικής ανάλυσης και εξομοίωσης. Στις μελέτες αυτές προτείνεται η χρήση της FT-TR δικτυακής διεπαφής κόμβου ως εναλλακτικής επιλογής της FT-FR^x δικτυακής διεπαφής κόμβου. Στην εκδοχή των μελετών με τη FT-FR^x δικτυακή διεπαφή κόμβου κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με ένα αριθμό πολλαπλών σταθερά συντονισμένων δεκτών ίσο με το αριθμό των WDM καναλιών.

Παρόλο που η αντικατάσταση της FT-FR^x δικτυακής διεπαφής από τη FT-TR δικτυακή διεπαφή αποσκοπεί στη βελτίωση της ικανότητας κλιμάκωσης του δικτύου, αυτή περιορίζει την απόδοση του συστήματος αφού δεν αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τις συγκρούσεις στον προορισμό. Έτσι, στην περίπτωση της FT-TR δικτυακής διεπαφής, αν περισσότερα του ενός πακέτα προορίζονται για τον ίδιο προορισμό την ίδια χρονική στιγμή, μόνο ένα από τα αυτά θα παραληφθεί επιτυχώς από το συντονιζόμενο δέκτη του κόμβου προορισμού. Τα υπόλοιπα συγκρουόμενα πακέτα συνεχίζουν την περιστροφή τους στο δακτύλιο μέχρι να παραληφθούν ένα-ένα από τον προορισμό.

Η υλοποίηση αυτή έχει αρκετά μειονεκτήματα: Αρχικά, αυξάνει το χρονικό διάστημα που ένα πακέτο κυκλοφορεί γύρω στο δακτύλιο περιμένοντας να παραληφθεί από τον προορισμό, ξοδεύοντας μη αποδοτικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επιπλέον, το φαινόμενο αυτό προκαλεί αύξηση της καθυστέρησης στην ουρά και της συνολικής καθυστέρησης ενός πακέτου. Τέλος, μεταβάλλει τη σειρά λήψης των πακέτων εξαιτίας των αλληπάλληλων συγκρούσεων στον προορισμό, αφού πακέτα που στάλθηκαν αργότερα μπορεί να συγκρουστούν με παλαιότερα πακέτα που δεν έχουν παραληφθεί ακόμα.

Επίσης, στην [28] παρουσιάζεται μια στρατηγική επαναχρησιμοποίησης επιπλέον χρονικών σχισμών για WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου που χρησιμοποιούν τη FT-TR δικτυακή διεπαφή και τον παραπάνω περιορισμό. Στο πρωτόκολλο αυτό, κάθε κόμβος χρησιμοποιεί ένα επιπλέον συντονιζόμενο εκπομπό για επιπλέον μεταδόσεις προκειμένου να βελτιώσει την απόδοση.

Εν κατακλείδι, στην [29] εισάγεται η χρήση της FT-TR δικτυακής διεπαφής για κάθε δακτύλιο ενός WDM δικτύου τοπολογίας διπλού δακτυλίου και τα μέτρα αποδοτικότητας υπολογίζονται μέσω εξομοίωσης.

Μελέτες TT-TR δικτυακής διεπαφής κόμβου

Παρόλη την μεγάλη ποικιλία WDM πρωτοκόλλων, αποτελέσματα ερευνών καταδεικνύουν ότι οι FT-TR και TT-FR δικτυακές διεπαφές κόμβου εμφανίζουν παρόμοια θεωρητικά εξαγόμενα μέτρα αποδοτικότητας [90]. Αυτό σημαίνει ότι τα δύο είδη δικτυακών διεπαφών κόμβου, όχι μόνο δεν επιτυγχάνουν να επιλύσουν τα σημαντικά προβλήματα ανικανότητας κλιμάκωσης και συντήρησης των WDM δικτύων, αλλά επιπλέον δεν εισάγουν καμία αξιοσημείωτη βελτίωση της απόδοσης.

Έτσι, αναδεικνύεται ως ανάγκη η χρήση της δικτυακής διεπαφής κόμβου που αποτελείται από ένα γρήγορα συντονιζόμενο εκπομπό και ένα συντονιζόμενο δέκτη, για την αποτελεσματική εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας. Αυτή η δικτυακή διεπαφή κόμβου συμβολίζεται ως TT-TR. Τα οφέλη από τη ικανότητα συντονισμού σε πολλά κανάλια τόσο του εκπομπού όσο και του δέκτη προκειμένου να επιτευχθεί σημαντικός περιορισμός των απορρίψεων εξετάζονται στη μελέτη [91].

Τελευταίες μελέτες, όπως οι [92]-[95], προτείνουν τη TT-TR δικτυακή διεπαφή κόμβου για WDM μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου. Συγκεκριμένα, στις [92]-[93] προτείνονται δύο αλγόριθμοι πρόσβασης σύμφωνα με το αρχαιότερο διαθέσιμο κανάλι και την ελάχιστη προγραμματισμένη καθυστέρηση.

Αντίστοιχα, στην [94] παρουσιάζεται ένα σχήμα εξασφάλισης καναλιών χωρίς συγκρούσεις.

Σε όλα τα παραπάνω πρωτόκολλα, κάθε κόμβος χρησιμοποιεί ένα επιπλέον ζεύγος από ένα σταθερά συντονισμένο εκπομπό και ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη για την επικοινωνία μέσω ενός ξεχωριστού καναλιού ελέγχου όπου μεταφέρεται ένα μοναδικό πακέτο-κουπόνι για τον έλεγχο πρόσβασης. Παρόλα τα πλεονεκτήματα από την ικανότητα συντονισμού σε όλα τα κανάλια, τα παραπάνω πρωτόκολλα παρουσιάζουν πολύ υψηλή καθυστέρηση εξαιτίας της χρήσης του πακέτου-κουπονιού.

Τέλος, στην [95] προτείνονται πολλές στρατηγικές πρόσβασης. Κάθε κόμβος χρησιμοποιεί πολλές γραμμές καθυστέρησης (delay lines), μία για κάθε κανάλι. Επίσης, κάθε γραμμή καθυστέρησης εισάγει χρονική καθυστέρηση μιας χρονικής σχισμής. Παρόλο που η διάταξη αποσκοπεί στην απόκτηση πληροφορίας πρόσβασης για την αποφυγή συγκρούσεων, οι παραπάνω στρατηγικές προκαλούν πολύ υψηλές τιμές συνολικής καθυστέρησης.

3.2 Άλλες τεχνικές ελέγχου - Τεχνολογία μεταγωγής Optical Burst Switching

Η τεχνολογία μεταγωγής οπτικού σήματος (Optical Burst Switching - OBS) [73],[24] είναι μια τεχνική μεταγωγής σε οπτικά WDM δίκτυα δεύτερης γενιάς. Η τεχνολογία μεταγωγής OBS συνδυάζει τις δύο πιο διαδεδομένες τεχνικές μεταγωγής στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα: τη τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος και τη τεχνολογία μεταγωγής πακέτου. Η τεχνολογία OBS προτείνει μια νέα τεχνική μεταγωγής, ενώ απαιτεί περίπου μισό του εύρους ζώνης που απαιτούν οι τεχνολογίες μεταγωγής κυκλώματος και μεταγωγής πακέτου.

Η μονάδα πληροφορίας που μεταδίδεται στα OBS δίκτυα είναι η ριπή. Μια ριπή μπορεί να αποτελείται από πολλά πακέτα [73],[24]. Στα περισσότερα πρωτόκολλα που έχουν διατυπωθεί για OBS δίκτυα, η μετάδοση κάθε ριπής έπεται της μετάδοσης ενός πακέτου ελέγχου που μεταδίδεται σε ξεχωριστό κανάλι ελέγχου.

Στα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος, ο εκπομπός προκειμένου να προχωρήσει στη μετάδοση της πληροφορίας περιμένει την επιβεβαίωση ότι το κύκλωμα και οι πόροι του δικτύου είναι διαθέσιμα. Αντίθετα στα δίκτυα μεταγωγής OBS, ο εκπομπός της ριπής ξεκινά τη μετάδοση της λίγο μετά τη μετάδοση του πακέτου ελέγχου.

Η απόδοση των οπτικών δικτύων μεταγωγής OBS εξαρτάται από το σύνολο των παραμέτρων απόδοσης ενός οπτικού πολυδιαυλικού δικτύου, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2. Όπως συμβαίνει στα περισσότερα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς, έτσι και στα δίκτυα μεταγωγής OBS ο χρόνος καθυστέρησης της πληροφορίας στα οπτο-ηλεκτρονικά στοιχεία του δικτύου είναι σημαντικός. Η παράμετρος αυτή λαμβάνεται υπόψη στις περισσότερες βιβλιογραφικές αναφορές [24] και η τιμή της είναι μεγαλύτερη αυτής του χρόνου διάδοσης της ριπής στο δίκτυο.

Για την αντιμετώπιση των χρονικών καθυστερήσεων κατά τη μετάδοση από τον εκπομπό στο δέκτη και τη δημιουργία στρατηγικών πρόσβασης στο δίκτυο, τα περισσότερα πρωτόκολλα μεταγωγής OBS υιοθετούν μια νέα χρονική παράμετρο που επιδρά καθοριστικά στην απόδοση του δικτύου: την παράμετρο χρονικής αντιστάθμισης offset. Η παράμετρος offset εκφράζει το χρόνο που καθυστερεί ο εκπομπός μιας ριπής για τη μετάδοση της ριπής, μετά τη μετάδοση του πακέτου ελέγχου, προκειμένου να αντιμετωπίσει τις καθυστερήσεις στα οπτο-ηλεκτρονικά στοιχεία του δικτύου. Συγκεκριμένα η παράμετρος offset εκφράζει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στη μετάδοση από έναν εκπομπό του πρώτου bit του πακέτου ελέγχου και του πρώτου bit της αντίστοιχης ριπής [24].

Στα δίκτυα μεταγωγής OBS, το πακέτο ελέγχου που μεταδίδεται πριν από μια ριπή μεταφέρει πληροφορίες απαραίτητες για τη μεταγωγή προς το δέκτη. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν: τη χρονική καθυστέρηση offset, το μήκος της ριπής, την προτεραιότητα που χαρακτηρίζει τη ριπή κ.α. Με βάση τις πληροφορίες του πακέτου ελέγχου, οι ενδιάμεσοι σταθμοί του OBS δικτύου ρυθμίζουν τους δρομολογητές και τους μεταγωγείς τους προκειμένου να δρομολογήσουν τη ριπή στην κατάλληλη πόρτα εξόδου.

Η μεταγωγή μιας ριπής σε δίκτυα μεταγωγής OBS μπορεί να αποτύχει στην περίπτωση συμφόρησης ή συγκρούσεων στους ενδιάμεσους σταθμούς του δικτύου, με αποτέλεσμα την καταστροφή της ριπής.

Η εισαγωγή της χρονικής καθυστέρησης offset στη μετάδοση της ριπής, προκειμένου να διασφαλιστεί το μονοπάτι μεταγωγής της ριπής από τον εκπομπό στο δέκτη, αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα της τεχνολογίας μεταγωγής κυκλώματος. Επίσης, το γεγονός ότι διαφορετικές μεταδόσεις ριπών μεταξύ ενός ζεύγους εκπομπού-δέκτη στο δίκτυο μπορεί να δρομολογηθούν ανεξάρτητα μέσα από διαφορετικά μονοπάτια, αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα της τεχνολογίας μεταγωγής πακέτου. Για τους λόγους αυτούς, η τεχνολογία μεταγωγής οπτικού σήματος OBS συνδυάζει τόσο την τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος όσο και την τεχνολογία μεταγωγής πακέτου.

3.2.1 Τεχνικές μεταγωγής και καθορισμού του χρόνου offset

Στη βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί διάφορα πρωτόκολλα οπτικών δικτύων μεταγωγής OBS που υλοποιούν διαφορετικούς αλγόριθμους υπολογισμού του χρόνου αντιστάθμισης offset. Οι αλγόριθμοι αυτοί διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με τον τρόπο καθορισμού της διάρκειας της παραμέτρου offset.

Συγκεκριμένα, στην τεχνική JIT (Just In Time) [75] το πακέτο ελέγχου που προηγείται της ριπής δεν είναι ενήμερο για το μέγεθος της ριπής και δεν μπορεί να εξασφαλίσει το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τη μετάδοση της. Στην περίπτωση αυτή, το πακέτο ελέγχου

δεσμεύει το εύρος ζώνης κατά τη στιγμή άφιξης της ριπής σε κάθε ενδιάμεσο σταθμό. Η μεταβολή του απαιτούμενου εύρους ζώνης δεν προϋποθέτει επιβεβαίωση αφού το μέγιστο μέγεθος της ριπής θεωρείται πολύ μικρότερο από τη χωρητικότητα μετάδοσης του δικτύου.

Αντίθετα, στην τεχνική JET (Just Enough Time) [76] η παράμετρος offset καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη της χρονικές καθυστερήσεις επεξεργασίας και δρομολόγησης του πακέτου ελέγχου στους ενδιάμεσους μεταγωγείς του δικτύου, μεταξύ εκπομπού και δέκτη.

Σύμφωνα με την τεχνική JET, ο υπολογισμός της παραμέτρου offset εξαρτάται από το πλήθος των ενδιάμεσων σταθμών μεταξύ εκπομπού και δέκτη. Στην τεχνική αυτή, το πακέτο ελέγχου που προηγείται της ριπής είναι ενήμερο για το μέγεθος της ριπής και εξασφαλίζει το απαιτούμενο εύρος ζώνης για όλη τη διάρκεια μετάδοσης με χρόνο αναφοράς το καθορισμένο χρόνο offset.

Όμως το πλήθος των ενδιάμεσων σταθμών κατά τη μετάδοση μιας σειράς ριπών από ένα εκπομπό σε κάποιο δέκτη δεν είναι σταθερό για κάθε μια ριπή. Ανάλογα με το φορτίο του δικτύου και τις ιδιαίτερες συνθήκες κατά τη μετάδοση κάθε μιας ριπής, είναι πιθανόν διαφορετικές ριπές της ίδιας σειράς ριπών να δρομολογηθούν προς το δέκτη μέσω διαφορετικών οπτικών μονοπατιών και διαφορετικών ενδιάμεσων σταθμών. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός της παραμέτρου offset με χρήση της τεχνικής JET δεν συνυπολογίζει τη στατιστική εξάρτηση της από το χρόνο και επομένως δεν είναι ακριβής.

Στην [24] προτείνεται η ODD (Only Destination Delay) τεχνική υπολογισμού της παραμέτρου offset. Η τεχνική ODD επιδιώκει να αντιμετωπίσει τη στατιστική εξάρτηση της παραμέτρου offset από το πλήθος των ενδιάμεσων σταθμών μεταξύ εκπομπού και δέκτη. Η τεχνική ODD θεωρεί ότι στα σύγχρονα και συνεχώς εξελισσόμενα οπτικά στοιχεία μεταγωγής ενός δικτύου ο χρόνος επεξεργασίας και δρομολόγησης της πληροφορίας είναι πολύ μικρός. Στην περίπτωση αυτή, η τεχνική ODD προτείνει την εισαγωγή οπτικών γραμμών καθυστέρησης σε κάθε ενδιάμεσο σταθμό για την καθυστέρηση των εισερχόμενων στον ενδιάμεσο σταθμό ριπών.

Τέλος, στη βιβλιογραφία έχει διατυπωθεί η τεχνική κατάτμησης της ριπής (burst segmentation), κατά την οποία το πακέτο ελέγχου είναι ενήμερο για το μέγεθος της ριπής και δεσμεύει το εύρος ζώνης από τη χρονική στιγμή που αυτό είναι διαθέσιμο έως ότου ολοκληρωθεί η μετάδοση της υπόλοιπης ριπής. Στην περίπτωση αυτή το πρώτο μέρος της ριπής -μέχρι να εξασφαλιστεί το απαιτούμενο εύρος ζώνης- απορρίπτεται, ενώ το υπόλοιπο μεταδίδεται επιτυχώς.

3.2.2 *Παράμετροι απόδοσης δικτύου μεταγωγής OBS*

Στη βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας για οπτικά δίκτυα μεταγωγής OBS. Η απόδοση ενός δικτύου μεταγωγής OBS εξαρτάται από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και καθορίζουν την απόδοση όλων των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς: τις συγκρούσεις στα κανάλια, τις συγκρούσεις στον προορισμό, την καθυστέρηση διάδοσης, το πλήθος των οπτικών εκπομπών-δεκτών σε κάθε σταθμό, το χρόνο συντονισμού των οπτικών φίλτρων εκπομπών και δεκτών. Επίσης όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τεχνολογία οπτικής μεταγωγής OBS λαμβάνει υπόψη της την καθυστέρηση μεταγωγής και δρομολόγησης της πληροφορίας στα στοιχεία του δικτύου και υπολογίζει την παράμετρο χρονικής καθυστέρησης offset.

Ειδικότερα, οι απώλειες απόδοσης ενός δικτύου μεταγωγής OBS εξαιτίας των συγκρούσεων στον προορισμό έχουν μελετηθεί για διάφορες αρχιτεκτονικές OBS δικτύων [73],[74],[77]. Το μέγεθος που χαρακτηρίζει τις απώλειες εξαιτίας των συγκρούσεων στον

προορισμό είναι η πιθανότητα συμφόρησης στους σταθμούς προορισμού. Ο υπολογισμός της πιθανότητας συμφόρησης πραγματοποιείται είτε με αναλυτικά εργαλεία Poisson στατιστικής [73],[74], είτε με χρήση εξομοίωσης [24].

Επίσης, η απόδοση ενός οπτικού δικτύου OBS εξαρτάται από ορισμένες παραμέτρους που αφορούν ειδικά την τεχνολογία αυτή. Συγκεκριμένα, η απόδοση ενός δικτύου OBS εξαρτάται από το μέγεθος της ριπής, που αποτελεί τη μονάδα μεταδιδόμενης πληροφορίας. Το μέγεθος της ριπής είτε υπολογίζεται ντετερμινιστικά με τη βοήθεια της ελάχιστης, της μέγιστης και της μέσης τιμής της [24], είτε ακολουθεί μια στατιστική κατανομή, όπως στην [73] που ακολουθεί ανεξάρτητη εκθετική κατανομή.

Είναι προφανές ότι η καθυστέρηση μετάδοσης ενός δικτύου μεταγωγής OBS εξαρτάται από την τεχνική καθορισμού της παραμέτρου καθυστέρησης offset. Έτσι, ανάλογα με τη μοντελοποίηση της παραμέτρου αυτής, η συνολική καθυστέρηση του δικτύου υπολογίζεται είτε σύμφωνα με την τεχνική JET [73], είτε με την τεχνική JIT [75], είτε με την τεχνική ODD [24], είτε συγκριτικά σύμφωνα με τις τεχνικές JIT, JET και κατάτμησης ριπής [77].

3.2.3 Αρχιτεκτονικές δικτύων μεταγωγής OBS

Στη βιβλιογραφία έχουν μελετηθεί αρκετές αρχιτεκτονικές δικτύων μεταγωγής OBS και έχουν προταθεί πολλά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Στις περισσότερες μελέτες, η τοπολογία του οπτικού δικτύου μεταγωγής OBS είναι τοπολογία δακτυλίου.

Σύμφωνα με τις προτεινόμενες αρχιτεκτονικές δικτύου μεταγωγής OBS, σε κάθε σταθμό του δικτύου συνδέονται ένα ή περισσότερα τοπικά δίκτυα, για τη δρομολόγηση των πακέτων τους σε ευρύτερες περιοχές – στα τοπικά δίκτυα άλλων σταθμών του OBS δικτύου. Κάθε σταθμός συγκεντρώνει τα πακέτα των τοπικών δικτύων και τα ομαδοποιεί σε ουρές, ανάλογα με το σταθμό προορισμού τους στο OBS δίκτυο. Οι ομαδοποιήσεις των πακέτων στις ουρές δημιουργούν τις ριπές που ο σταθμός αποστέλλει στο δίκτυο.

Στη μελέτη [24] εξετάζεται η απόδοση ενός πρωτοκόλλου στο οποίο σε κάθε σταθμό του δικτύου έχει ανατεθεί ένα δεδομένο κανάλι για την αποστολή των ριπών του. Κάθε σταθμός διαθέτει ένα σταθερά συντονισμένο εκπομπό και ένα συντονιζόμενο δέκτη για την επικοινωνία στο OBS δίκτυο. Η μελέτη αυτή θεωρεί N το πλήθος σταθμούς και $(N+1)$ WDM κανάλια, ενώ καθορίζει την παράμετρο offset με την τεχνική ODD. Στη μελέτη υπολογίζεται η απόδοση του δικτύου με εξομοίωση, για διάφορα πρωτόκολλα αποφυγής των συγκρούσεων στον προορισμό.

Αντίθετα, στην [77] οι σταθμοί του OBS δικτύου διαθέτουν ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη και ένα συντονιζόμενο εκπομπό και σε κάθε σταθμό του δικτύου έχει ανατεθεί ένα δεδομένο κανάλι για τη λήψη των ριπών. Το δίκτυο διαθέτει N το πλήθος σταθμούς και $(N+1)$ WDM κανάλια και η ανάλυση καθορίζει την παράμετρο offset με την τεχνική JET. Στη μελέτη υπολογίζεται η απόδοση του δικτύου με εξομοίωση και ακολουθείται το CSMA/CD πρωτόκολλο πρόσβασης για αποφυγή των συγκρούσεων στα κανάλια.

Στις μελέτες [73],[74],[78] προσδιορίζεται η πιθανότητα συμφόρησης στους σταθμούς προορισμού του OBS δικτύου, με αναλυτικά εργαλεία της στατιστικής Poisson. Συγκεκριμένα, στην [73] αναλύεται το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό για σύγχρονη και ασύγχρονη μετάδοση ριπών στο OBS δίκτυο.

Στην [74] προσδιορίζεται η πιθανότητα απόρριψης στον προορισμό για αμιγώς οπτικά δίκτυα, είτε χρησιμοποιούν κατά τη μεταγωγή μετατροπείς μήκους κύματος είτε όχι. Η

μελέτη εξετάζει την απόδοση του δικτύου, μεταβάλλοντας το μήκος του οπτικού δρόμου από τον εκπομπό στο δέκτη και το μέγεθος του μεταγωγέα.

Στην [78] εξετάζεται η επίδραση του μήκους της ριπής στην απόδοση του δικτύου και μελετώνται δύο περιπτώσεις: σταθερού μήκους ριπής και μεταβαλλόμενου μήκους ριπής σύμφωνα με την εκθετική κατανομή.

Στην [77] υπολογίζεται με χρήση μαρκοβιανού μοντέλου η πιθανότητα απόρριψης στον προορισμό για δίκτυα μεταγωγής OBS. Η ανάλυση πραγματοποιείται για διάφορες τεχνικές καθορισμού της παραμέτρου offset: JET, JIT και κατάτμησης ριπής, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται συγκριτικά.

Η εξυπηρέτηση δύο κατηγοριών κίνησης, της κίνησης πραγματικού και μη-πραγματικού χρόνου, μελετάται στην [79]. Η μελέτη προτείνει ένα CPQ (Control Packet Queuing) πρωτόκολλο για την εξυπηρέτηση της κίνησης στο δίκτυο μεταγωγής OBS, χρησιμοποιώντας την τεχνική JET για τον καθορισμό της παραμέτρου offset. Το πρωτόκολλο εξυπηρετεί με προτεραιότητα την κίνηση πραγματικού χρόνου εξασφαλίζοντας το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Η απόδοση του δικτύου υπολογίζεται με εξομοίωση.

Στην [80] δίνεται ένα αναλυτικό μοντέλο υπολογισμού της απόδοσης για δίκτυα μεταγωγής OBS. Τέλος, σύγχρονες τάσεις σχετικά με πρωτόκολλα πρόσβασης και βελτιστοποίησης της απόδοσης σε δίκτυα μεταγωγής OBS δίνονται στις μελέτες [81]-[85].

Μέρος II:

Αρχιτεκτονικές Ελέγχου και Τεχνικές Μετάδοσης Τοπικών WDM Δικτύων Τοπολογίας Παθητικού Αστέρα: Αναλυτική Μοντελοποίηση Απόδοσης

Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η μελέτη της απόδοσης των οπτικών WDM δικτύων βασίζεται στη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των πολυδιαυλικών δικτύων. Και αυτό γιατί το σύστημα των παράλληλων WDM καναλιών ενός οπτικού WDM δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πολυδιαυλικό δίκτυο. Επίσης, η απόδοση των WDM δικτύων επηρεάζεται από τις παραμέτρους που αφορούν την απόδοση των πολυδιαυλικών δικτύων, δηλαδή τις συγκρούσεις στα WDM κανάλια και στον προορισμό, καθώς επίσης από επιπλέον παραμέτρους που αφορούν τη μετάδοση του οπτικού σήματος στην οπτική ίνα.

Έτσι, τα πρώτα στάδια της διδακτορικής έρευνας αφιερώνονται στην αναλυτική μοντελοποίηση της απόδοσης πολυδιαυλικών δικτύων και τον καθορισμό των μαθηματικών τύπων των μέτρων αποδοτικότητας τους. Η διδακτορική έρευνα οδήγησε στη διατύπωση δύο σύγχρονων πρωτοκόλλων μετάδοσης για πολυδιαυλικά δίκτυα με χρήση μαρκοβιανής ανάλυσης, που λαμβάνουν υπόψη τους τις παραμέτρους που επιδρούν στην απόδοση του πολυδιαυλικού δικτύου [J.1],[J.2],[C.1],[C.2].

Τα προτεινόμενα πρωτόκολλα διακρίνονται με κριτήριο τα συμμετρικά ή ασύμμετρα δικαιώματα πρόσβασης των σταθμών στο πολυδιαυλικό δίκτυο. Έτσι, διατυπώνεται το πρωτόκολλο συμμετρικής και το πρωτόκολλο ασύμμετρης πρόσβασης των σταθμών στα πολλαπλά κανάλια του πολυδιαυλικού δικτύου. Τα πρωτόκολλα αυτά παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 και δίνεται η αναλυτική μοντελοποίηση της απόδοσης τους.

Τα πρωτόκολλα αυτά αποτέλεσαν σημαντικό εργαλείο μελέτης της απόδοσης των οπτικών πολυδιαυλικών δικτύων. Κατά την εξέλιξη της διατριβής, τα ερευνητικά συμπεράσματα από τις μελέτες [J.1],[J.2],[C.1],[C.2] επεκτάθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες παραμέτρους που επιδρούν στη απόδοση των οπτικών πολυδιαυλικών δικτύων. Έτσι, η διδακτορική έρευνα οδήγησε στη διατύπωση δύο σύγχρονων πρωτοκόλλων για οπτικά WDM δίκτυα τοπολογίας παθητικού αστέρα που αξιοποιούν πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου [J.3] [J.5],[J.6],[C.3],[C.4].

Τα πρωτόκολλα αυτά διακρίνονται με κριτήριο τα συμμετρικά ή ασύμμετρα δικαιώματα πρόσβασης των σταθμών στην οπτική WDM πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου. Έτσι, διατυπώνεται το πρωτόκολλο συμμετρικής πρόσβασης των σταθμών στα WDM κανάλια του οπτικού πολυδιαυλικού δικτύου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5. Επίσης, διατυπώνεται το πρωτόκολλο ασύμμετρης πρόσβασης των σταθμών στα WDM κανάλια του οπτικού πολυδιαυλικού δικτύου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6. Η μελέτη των πρωτοκόλλων αυτών πραγματοποιείται με αναλυτικό τρόπο με χρήση μαρκοβιανής ανάλυσης και οδηγεί στην εξαγωγή ακριβών μαθηματικών τύπων για τα μέτρα αποδοτικότητας των δικτύων.

Κεφάλαιο 4 : Αναλυτική Μελέτη Απόδοσης Πολυδιαυλικών Δικτύων

Στο κεφάλαιο αυτό διατυπώνονται δύο πρωτόκολλα σύγχρονης μετάδοσης σε πολυδιαυλικά δίκτυα. Στη μελέτη λαμβάνονται υπόψη η επίδραση στην απόδοση των δικτύων των φαινομένων των συγκρούσεων πακέτων στα κανάλια και στον προορισμό.

Η συμβολή της έρευνας αυτής είναι η μοντελοποίηση της απόδοσης σύγχρονων πολυδιαυλικών δικτύων με αναλυτικά εργαλεία. Έτσι, η μελέτη πραγματοποιείται με χρήση αυστηρών μαθηματικών μοντέλων μαρκοβιανής ανάλυσης, από τα οποία προκύπτει ο πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης του πολυδιαυλικού συστήματος και τα μέτρα αποδοτικότητας του συστήματος.

Η αξιολόγηση της απόδοσης του πολυδιαυλικού δικτύου βασίζεται στον καθορισμό των μέτρων αποδοτικότητας των προτεινόμενων πρωτοκόλλων, τα οποία είναι:

- η μέση διέλευση του δικτύου
- η μέση καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων
- το μέσο πλήθος των ενεργών σταθμών
- η μέση πιθανότητα απόρριψης των πακέτων στον προορισμό.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για δύο κατηγορίες πρωτοκόλλων σύγχρονης μετάδοσης σε πολυδιαυλικά δίκτυα, ανάλογα με την άδεια πρόσβασης των σταθμών στο πολυδιαυλικό δίκτυο:

- *για πρωτόκολλα συμμετρικής πρόσβασης των σταθμών στα κανάλια:* στα οποία όλοι οι σταθμοί του δικτύου έχουν πρόσβαση σε όλα τα κανάλια για την εκπομπή των πακέτων τους.
- *για πρωτόκολλα ασύμμετρης πρόσβασης των σταθμών στα κανάλια:* στα οποία τα κανάλια του πολυδιαυλικού συστήματος είναι αριθμημένα. Οι σταθμοί που πέτυχαν τη μετάδοση τους στην προηγούμενη χρονική σχισμή επιχειρούν την εκπομπή των πακέτων τους στο κανάλι-1. Αντίθετα, οι σταθμοί που απέτυχαν τη μετάδοση τους στην προηγούμενη χρονική σχισμή, ανταγωνίζονται στα υπόλοιπα κανάλια για την επανεκπομπή των πακέτων τους.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, τα αποτελέσματα της μελέτης της απόδοσης πολυδιαυλικών δικτύων συμμετρικής και ασύμμετρης πρόσβασης δίνονται στις μελέτες [J.1], [J.2], [C.1], [C.2].

4.1 Μοντέλο επικοινωνίας στο πολυδιαυλικό δίκτυο

Το πολυδιαυλικό δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο N το πλήθος παράλληλων καναλιών πολλαπλής προσπέλασης. Το σύνολο των καναλιών διαμοιράζονται τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου. Επομένως, όλα τα παράλληλα κανάλια έχουν την ίδια μεταξύ τους χωρητικότητα.

Στο πολυδιαυλικό δίκτυο είναι συνδεδεμένοι M το πλήθος σταθμοί. Κάθε σταθμός διαθέτει N διεπαφές με το πολυδιαυλικό δίκτυο, μία για κάθε κανάλι, προκειμένου να τα προσπελάσει.

Η μετάδοση πληροφορίας στο πολυδιαυλικό δίκτυο είναι σύγχρονη. Ο χρόνος είναι κβαντισμένος σε όλα τα κανάλια και εφαρμόζονται μέθοδοι συγχρονισμού μεταξύ των

καναλιών. Η πληροφορία μεταδίδεται σε πακέτα σταθερού μήκους και σταθερού μεγέθους, ίσου με τη χρονική διάρκεια μιας χρονικής μονάδας-σχισμής. Κάθε πακέτο διαθέτει στην επικεφαλίδα του πληροφορία σχετικά με τη διεύθυνση του σταθμού αποστολής και του σταθμού προορισμού.

Κάθε σταθμός διαθέτει έναν καταχωρητή εισόδου και έναν καταχωρητή εξόδου, κάθε ένας από τους οποίους έχει χωρητικότητα ένα πακέτο. Στην περίπτωση που ο καταχωρητής εξόδου ενός σταθμού είναι άδειος, ο σταθμός ονομάζεται ελεύθερος. Στην αντίθετη περίπτωση, ο σταθμός ονομάζεται ενεργός.

Η γέννηση των πακέτων πραγματοποιείται ανεξάρτητα σε κάθε σταθμό και ακολουθεί τη γεωμετρική κατανομή. Έτσι, σε κάθε χρονική σχισμή κάθε ελεύθερος σταθμός γεννά ένα πακέτο με πιθανότητα p . Στην περίπτωση που ένας ενεργός σταθμός γεννά ένα πακέτο, αυτό δεν εισέρχεται στον καταχωρητή εξόδου και χάνεται. Στην αρχή κάθε χρονικής σχισμής, κάθε ενεργός σταθμός επιχειρεί επαναμετάδοση του πακέτου του με πιθανότητα p_1 .

Η αποστολή ενός πακέτου μέσω του πολυδιαυλικού δικτύου πραγματοποιείται ως εξής: Ένας σταθμός που είναι έτοιμος να εκπέμψει στην αρχή μιας χρονικής σχισμής, επιλέγει ένα κανάλι για την εκπομπή ανάλογα με το πρωτόκολλο πρόσβασης. Αν περισσότεροι του ενός σταθμοί επιλέξουν το ίδιο κανάλι για αποστολή στην αρχή της ίδιας χρονικής σχισμής, τότε παρατηρείται σύγκρουση πακέτων στα κανάλια.

Τα πακέτα που μεταδόθηκαν με επιτυχία μέσω του πολυδιαυλικού δικτύου, κατανέμονται ομοιόμορφα στους σταθμούς προορισμού. Κάθε σταθμός προορισμού επιλέγεται ισοπίθανα, με σταθερή πιθανότητα ίση με $1/M$ (προς χάριν της απλότητας, θεωρούμε ότι κάθε σταθμός είναι δυνατόν να αποστείλει και να παραλάβει πακέτο από τον εαυτό του).

Αν κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής περισσότεροι των δύο σταθμοί (επαν)εκπέμψουν επιτυχώς μέσω διαφορετικών καναλιών και τα πακέτα τους προορίζονται για τον ίδιο σταθμό, τότε ο σταθμός προορισμού παραλαμβάνει μόνο ένα πακέτο και απορρίπτει τα υπόλοιπα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σύγκρουση στον προορισμό.

Στην περίπτωση που ένας ενεργός σταθμός μεταδίδει με επιτυχία στα κανάλια κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής και το πακέτο δεν απορριφθεί εξαιτίας σύγκρουσης στον προορισμό, ο σταθμός γίνεται ελεύθερος κατά την επόμενη χρονική σχισμή. Αντίθετα, ένας ελεύθερος σταθμός γίνεται ενεργός στην περίπτωση είτε ανεπιτυχούς μετάδοσης μέσω των καναλιών, είτε σύγκρουσης στον προορισμό και απόρριψης του πακέτου.

Τα κανάλια δεν παρουσιάζουν σφάλματα, ούτε φαινόμενα υπέρθεσης. Έτσι, τα πακέτα είναι δυνατόν να απορριφθούν εξαιτίας είτε ταυτόχρονης μετάδοσης στο ίδιο κανάλι, είτε σύγκρουσης στον προορισμό.

Στα πολυδιαυλικά δίκτυα που εξετάζουμε, η καθυστέρηση διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο δίαυλο θεωρείται ότι έχει πολύ μικρή τιμή, πολύ μικρότερη της διάρκειας της χρονικής σχισμής. Έτσι, ο σταθμός που (επαν)εξέπεμψε ένα πακέτο στην αρχή μιας χρονικής σχισμής, πληροφορείται στο τέλος της ίδιας χρονικής σχισμής αν η μετάδοση ήταν επιτυχημένη ή όχι.

4.2 Πρωτόκολλο συμμετρικής πρόσβασης

Στο πρωτόκολλο αυτό, κάθε σταθμός έχει πρόσβαση σε όλα τα κανάλια του πολυδιαυλικού δικτύου, δηλαδή μπορεί να εκπέμψει σε (και να παραλάβει από) κάθε κανάλι. Ένας σταθμός που επιθυμεί να μεταδώσει στην αρχή κάθε χρονικής σχισμής, επιλέγει τυχαία

ένα από τα N ($2 \leq N \leq M$) κανάλια για την εκπομπή. Κάθε κανάλι επιλέγεται ισοπίθανα, με σταθερή πιθανότητα $P_i = 1/N$.

Η απόδοση του εξεταζόμενου συστήματος περιγράφεται με μια μαρκοβιανή αλυσίδα διακριτού χρόνου. Η κατάσταση του συστήματος δηλώνεται ως X_t , $t = 0, 1, \dots$, όπου X_t $0, 1, \dots, M$ είναι ο αριθμός των ενεργών σταθμών στην αρχή κάθε χρονικής σχισμής. Έστω:

$H_t = 0$ αριθμός των αφίξεων νέων πακέτων στην αρχή μιας χρονικής σχισμής, $t=0, 1, 2, \dots$

$A_t = 0$ αριθμός των πακέτων που παρελήφθησαν επιτυχώς από τον προορισμό στο τέλος μιας χρονικής σχισμής, $t=0, 1, 2, \dots$

$S_N(k) = 0$ αριθμός των επιτυχών (επανα)μεταδόσεων πακέτων στα N κανάλια, υπό την προϋπόθεση ότι k ελεύθεροι και ενεργοί σταθμοί επιχειρούν μετάδοση κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής, $0 \leq S_N(k) \leq \min(N, k)$.

Η πιθανότητα $\Pr[S_N(k) = n]$ n επιτυχιών στα N κανάλια από τις k (επανα)μεταδόσεις κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής δίνεται από τη σχέση [42]:

$$\Pr[S_N(k) = n] = \frac{(-1)^n N! k!}{N^k n!} \sum_{j=n}^{\min(N, k)} \frac{(-1)^j (N-j)^{k-j}}{(j-n)! (N-j)! (k-j)!} \quad (4.1)$$

$0 \leq n \leq \min(N, k)$ και $(k-n) \neq 1$.

Επίσης, έστω:

$A(n) = 0$ αριθμός των πακέτων που παρελήφθησαν επιτυχώς από τον προορισμό, υπό την προϋπόθεση ότι συνέβησαν n επιτυχείς (επανα)μεταδόσεις στα κανάλια κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής, $1 \leq A(n) \leq S_N(k)$ για κάθε $S_N(k) > 0$.

Η πιθανότητα $\Pr[A(n) = r]$ να παραληφθούν r πακέτα από τον προορισμό από τις n επιτυχείς (επανα)μεταδόσεις πακέτων στα κανάλια κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής δίνεται από τη σχέση [6]:

$$\Pr[A(n) = r] = \binom{M}{r} \sum_{i=0}^r (-1)^i \binom{r}{i} \left(\frac{r-i}{M} \right)^n \quad (4.2)$$

$1 \leq r \leq \min(n, N)$ για κάθε $n \geq 1$

Ορίζεται τη συνάρτηση $\Phi_N(x, y, z)$ ως το γινόμενο της πιθανότητας y επιτυχιών από x (επανα)μεταδόσεις στα N κανάλια, επί την πιθανότητα z επιτυχώς παρεληφθέντων πακέτων από τον προορισμό κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής, δηλαδή:

$$\Phi_N(x, y, z) = \Pr[S_N(x) = y] \Pr[A(y) = z] \quad (4.3)$$

όπου:

$x = 0$ αριθμός των ελευθέρων και ενεργών σταθμών που (επανα)μεταδίδουν στα N κανάλια κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής.

$y = 0$ αριθμός των επιτυχών (επανα)μεταδόσεων στα N κανάλια κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής.

$z = 0$ αριθμός των πακέτων που παρελήφθησαν επιτυχώς από τον προορισμό κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής.

Η μαρκοβιανή αλυσίδα $\{X_t, t = 0, 1, \dots\}$ είναι ομογενής, απεριοδική και ανάγωγη. Οι πιθανότητες μετάβασης ενός βήματος $P_{ij} = (X_{t+1} = j | X_t = i)$ δίνονται από τις σχέσεις:

Περίπτωση A: $\forall j < (i-N)$ τότε:

$$P_{ij} = 0 \quad (4.4)$$

Περίπτωση B: $\forall j = (i-N)$ τότε:

$$P_{ij} = Q_{0,i} q_{N,i} \Phi_N(N, N, N) \quad (4.5)$$

Περίπτωση C: $\forall (i-N) < j < i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} \sum_{n=i-j}^N q_{n,i} \sum_{m=0}^{\min(M-i, N-n)} Q_{m,i} \sum_{s=0}^{n+j-i} \Phi_N(n+m, i-j+m+s, m+i-j) + \\ + \sum_{n=i-j+2}^N q_{n,i} \sum_{m=N-n+1}^{\min(M-i, N+j-i-1)} Q_{m,i} \sum_{s=0}^{N-m+j-i-1} \Phi_N(n+m, i-j+m+s, m+i-j) + \\ + \sum_{n=N+1}^i q_{n,i} \sum_{m=0}^{\min(M-i, N+j-i-1)} Q_{m,i} \sum_{s=0}^{N-m+j-i-1} \Phi_N(n+m, i-j+m+s, m+i-j) \end{cases} \quad (4.6)$$

Περίπτωση D: $\forall j = i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} Q_{0,i} \sum_{n=2}^i q_{n,i} \Phi_N(n, 0, 0) + q_{0,i} \sum_{m=0}^N Q_{m,i} \Phi_N(m, m, m) + \\ + \sum_{m=1}^{\min(M-i, N-1)} Q_{m,i} \sum_{n=1}^{N-m} q_{n,i} \sum_{s=0}^{N-m} \Phi_N(n+m, m+s, m) + \\ + \sum_{m=1}^{\min(M-i, N-1)} Q_{m,i} \sum_{n=N-m+1}^i q_{n,i} \sum_{s=0}^{N-m-1} \Phi_N(n+m, m+s, m) \end{cases} \quad (4.7)$$

Περίπτωση E: $\forall j > i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} Q_{j-i,i} \sum_{n=0}^i q_{n,i} \Phi_N(j-i+n, 0, 0) + \\ + \sum_{m=1}^{\min(M-j, N-j+i)} Q_{j-i+m,i} \sum_{n=0}^{N-m-j+i} q_{n,i} \sum_{s=0}^{N-m} \Phi_N(j-i+n+m, m+s, m) + \\ + \sum_{m=1}^{\min(M-j, N-1)} Q_{j-i+m,i} \sum_{n=N-m-j+i+1}^i q_{n,i} \sum_{s=0}^{N-m-1} \Phi_N(j-i+n+m, m+s, m) \end{cases} \quad (4.8)$$

όπου:

$q_{i,n}$ είναι η υπό συνθήκη πιθανότητα ότι i από τους n ενεργούς σταθμούς επιχειρούν μετάδοση με πιθανότητα p_1 κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής και δίνεται από τη σχέση:

$$q_{i,n} = \text{bin}(n, i, p_1) \quad (4.9)$$

και Q_{in} είναι η υπό συνθήκη πιθανότητα ότι i από τους $(M-n)$ ελεύθερους σταθμούς επιχειρούν μετάδοση με πιθανότητα p κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής και δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{i,n} = \text{bin}(M-n, i, p) \quad (4.10)$$

όπου:

$$\text{bin}(i, j, p) = \binom{i}{j} p^j (1-p)^{i-j}, \quad i \geq j \quad (4.11)$$

4.2.1 Μέτρα αποδοτικότητας

Αφού η μαρκοβιανή αλυσίδα $\{X_t, t = 0, 1, \dots\}$ είναι εργοδική, οι πιθανότητες μόνιμης κατάστασης υπολογίζονται λύνοντας το σύστημα των ακόλουθων γραμμικών εξισώσεων:

$$\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{\pi} P \quad (4.12)$$

και:

$$\sum_{i=0}^M \pi_i = 1 \quad (4.13)$$

όπου P είναι ο πίνακας μετάβασης με στοιχεία τις πιθανότητες P_{ij} και $\boldsymbol{\pi}$ είναι ένα γραμμικό διάνυσμα με στοιχεία τις πιθανότητες μόνιμης κατάστασης π_i .

Η υπό συνθήκη διέλευση $S_{rc}(i)$ ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή του αριθμού των πακέτων που παραλήφθησαν επιτυχώς από τον προορισμό κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής, υπό την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των ενεργών σταθμών στην αρχή της χρονικής σχισμής είναι i , δηλαδή:

$$S_{rc}(i) = E[A_t | X_t = i] \quad (4.14)$$

και δίνεται από τη σχέση:

$$S_{rc}(i) = \begin{cases} \sum_{k=1}^N k \sum_{m=0}^{\min(M-i, N)} Q_{m,i} \sum_{\substack{n=0 \\ m+n \geq k}}^{\min(N-m, i)} q_{n,i} \sum_{s=0}^{N-k} \Phi_N(n+m, k+s, k) + \\ + \sum_{k=1}^{N-1} k \sum_{m=0}^{\min(M-i, N)} Q_{m,i} \sum_{n=N+1}^i q_{n,i} \sum_{s=0}^{N-k-1} \Phi_N(n+m, k+s, k) + \\ + \sum_{k=1}^{N-1} k \sum_{m=N+1}^{M-i} Q_{m,i} \sum_{n=0}^i q_{n,i} \sum_{s=0}^{N-k-1} \Phi_N(n+m, k+s, k) \end{cases} \quad (4.15)$$

Η μέση τιμή της διέλευσης μόνιμης κατάστασης S_{rc} δίνεται από τη σχέση:

$$S_{rc} = E[S_{rc}(i)] = \sum_{i=0}^M S_{rc}(i) \pi_i \quad (4.16)$$

Η μέση τιμή B του αριθμού των ενεργών σταθμών δίνεται από τη σχέση:

$$B = E[i] = \sum_{i=0}^M i \pi_i \quad (4.17)$$

Ο υπό συνθήκη ρυθμός εισόδου $S_{in}(i)$ ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή του αριθμού των αφίξεων νέων πακέτων κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής, υπό την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των ενεργών σταθμών στην αρχή της χρονικής σχισμής είναι i και δίνεται από τη σχέση:

$$S_{in}(i) = E[H_t | X_t = i] = (M - i)p \quad (4.18)$$

Η μέση τιμή του ρυθμού εισόδου μόνιμης κατάστασης S_{in} δίνεται από τη σχέση:

$$S_{in} = \sum_{i=0}^M (M - i)p\pi_i \quad (4.19)$$

Υπό συνθήκες μόνιμης κατάστασης, η μέση τιμή του ρυθμού εισόδου S_{in} πρέπει να ισούται με τη μέση τιμή της διέλευσης S_{rc} , δηλαδή είναι:

$$S_{rc} = (M - B)p \quad (4.20)$$

Η καθυστέρηση D ορίζεται ως η μέση τιμή του αριθμού των χρονικών σχισμών που ένα πακέτο περιμένει έως ότου μεταδοθεί επιτυχώς. Η καθυστέρηση υπολογίζεται από το νόμο του Little [86]:

$$D = 1 + \frac{B}{S_{rc}} \quad (4.21)$$

4.2.2 Κανονικοποιημένα μέτρα αποδοτικότητας

Για τη σύγκριση του πολυδιαυλικού με το μονοδιαυλικό σύστημα, είναι απαραίτητες οι ακόλουθες παραδοχές:

- και τα δύο συστήματα έχουν την ίδια συνολική χωρητικότητα
- τα μέτρα αποδοτικότητας αναφέρονται σε ίσες χρονικές μονάδες, που δεν είναι οι χρονικές σχισμές.

Ως χρονική μονάδα θεωρείται ο χρόνος μετάδοσης T ενός πακέτου σε ένα μονοδιαυλικό σύστημα συνολικής χωρητικότητας C πακέτα/s. Αν T_N είναι ο χρόνος μετάδοσης ενός πακέτου σε ένα πολυδιαυλικό σύστημα N καναλιών της ίδιας συνολικής χωρητικότητας, τότε:

$$T_N = N \times T \quad (4.22)$$

και: $T = 1/C \quad (4.23)$

Τα μέτρα αποδοτικότητας που αναφέρονται σε χρονικές μονάδες και όχι σε χρονικές σχισμές ορίζονται ως ακολούθως:

Η κανονικοποιημένη διέλευση S_{nor} στη μόνιμη κατάσταση ορίζεται ως ο αριθμός των πακέτων που παρελήφθησαν επιτυχώς από τον προορισμό ανά χρονική μονάδα σε ένα πολυδιαυλικό σύστημα N καναλιών και δίνεται από τη σχέση:

$$S_{nor} = \frac{S_{rc}}{N} \quad (4.24)$$

Η κανονικοποιημένη καθυστέρηση D_{nor} ορίζεται ως η μέση τιμή της καθυστέρησης σε χρονικές μονάδες σε ένα πολυδιαυλικό σύστημα N καναλιών και δίνεται από τη σχέση:

$$D_{\text{nor}} = ND \tag{4.25}$$

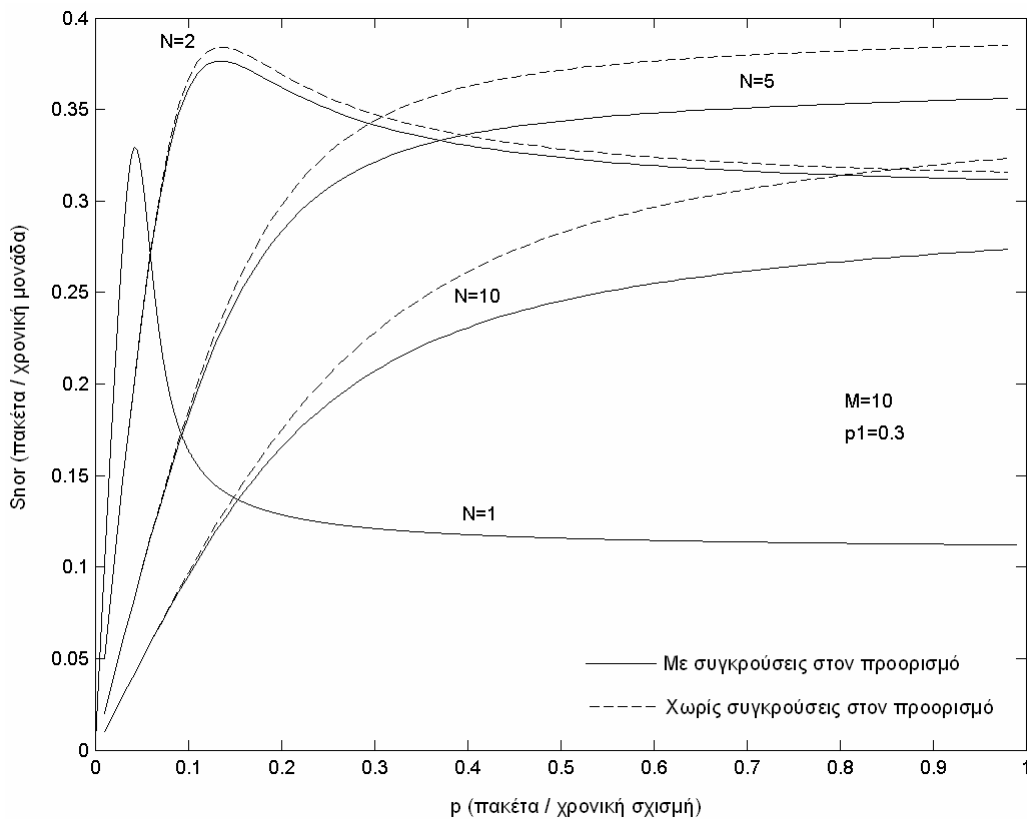
Η πιθανότητα απόρριψης πακέτων στον προορισμό P_{rej} υπολογίζεται ως ο λόγος του αναμενόμενου αριθμού των πακέτων που απορρίπτονται ανά χρονική σχισμή εξαιτίας συγκρούσεων στον προορισμό, προς τον αναμενόμενο αριθμό των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων στο πολυδιαυλικό σύστημα ανά χρονική σχισμή σε κατάσταση ισορροπίας. Για τη σύγκριση, επιλέχθηκαν τα σημεία που αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές $S(\text{max})$ και $S_{\text{rc}}(\text{max})$. Έτσι:

$$P_{\text{rej}}(\text{max}) = \frac{S(\text{max}) - S_{\text{rc}}(\text{max})}{S(\text{max})} \tag{4.26}$$

όπου $S(\text{max})$ είναι η μέγιστη τιμή της διέλευσης όταν αγνοούνται οι συγκρούσεις στον προορισμό.

4.2.3 Αριθμητικά αποτελέσματα

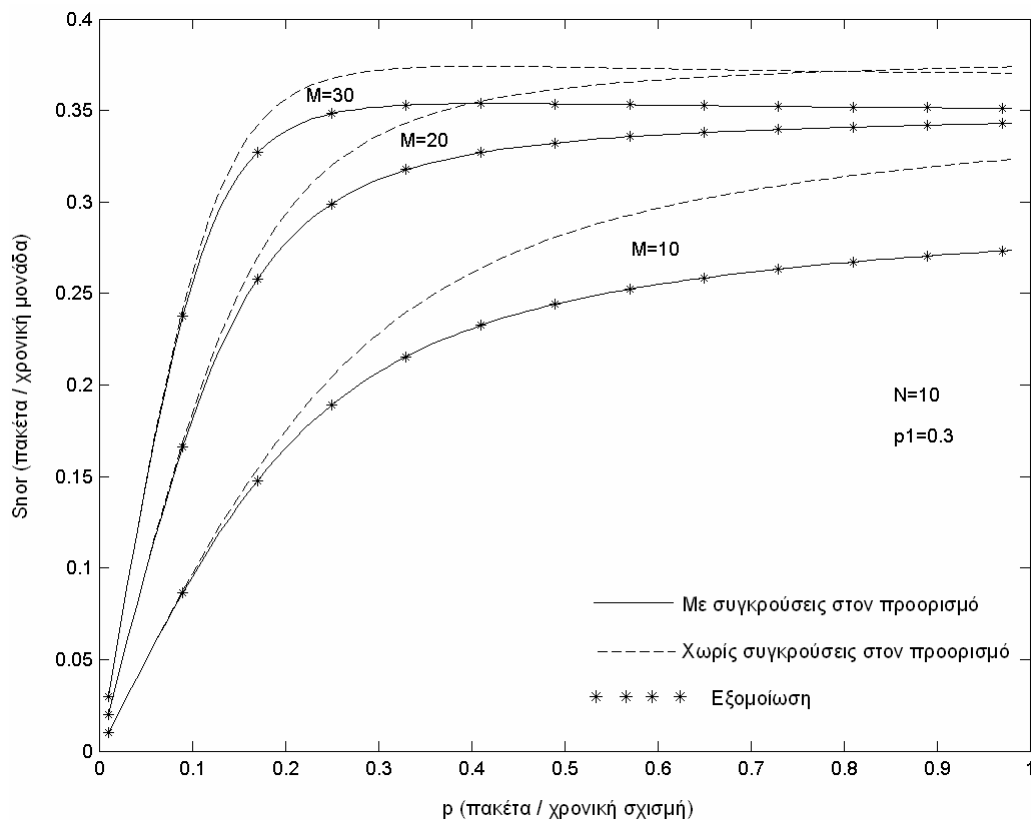
Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της θεωρητικής ανάλυσης, αναπτύχθηκε ένα διακριτών γεγονότων μοντέλο εξομοίωσης της απόδοσης του συστήματος, που παρουσιάζει ένα-προς-ένα αντιστοιχία ως προς το αναλυτικό μοντέλο. Στα ακόλουθα σχήματα, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά του συστήματος που δεν λαμβάνει υπόψη του τις συγκρούσεις στον προορισμό και δίνεται στη μελέτη [42]. Η συγκριτική αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων καταδεικνύει την επίδραση του φαινομένου των συγκρούσεων στον προορισμό στην απόδοση του συστήματος.



Σχήμα 4-1. Κανονικοποιημένη διέλευση S_{nor} για $N=1,5,10$

Το Σχήμα 4-1 και το Σχήμα 4-2 παρουσιάζουν την κανονικοποιημένη διέλευση S_{nor} ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης ρ για διάφορες τιμές πλήθους καναλιών N και σταθμών M . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-1, το πολυδιαυλικό σύστημα που λαμβάνει υπόψη του τις συγκρούσεις στον προορισμό είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε σχέση με το σύστημα που συνυπολογίζει τις απώλειες μόνο εξαιτίας των συγκρούσεων στα κανάλια. Ειδικότερα, με την αύξηση του N παρατηρείται ότι, για δεδομένη τιμή των M και ρ , η διαφορά μεταξύ των δύο γραφικών παραστάσεων διευρύνεται. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι η αύξηση του N για δεδομένη τιμή του M προκαλεί μείωση των συγκρούσεων στα κανάλια, αυξάνοντας τη διέλευση και επομένως τις συγκρούσεις στον προορισμό. Για παράδειγμα, για $\rho=0.9$ η S_{nor} μειώνεται κατά: 1.3% για $N=2$, κατά 7.58% για $N=5$ και κατά 15.25% για $N=10$.

Αντίθετα, στο Σχήμα 4-2 παρατηρείται η αντίστροφη συμπεριφορά. Με άλλα λόγια, η διαφορά μεταξύ των δύο γραφικών παραστάσεων μειώνεται με την αύξηση του αριθμού M . Και αυτό γιατί η αύξηση του αριθμού M για δεδομένη τιμή του N προκαλεί αύξηση των συγκρούσεων στα κανάλια, μειώνοντας τη διέλευση και επομένως τις συγκρούσεις στον προορισμό. Για παράδειγμα, για $\rho=0.9$ η S_{nor} μειώνεται κατά: 15.25% για $M=10$, κατά 8.1% για $M=20$ και κατά 5.4% για $M=30$.



Σχήμα 4-2. Κανονικοποιημένη διέλευση S_{nor} για $M=10,20,30$

Ο Πίνακας 4-1 παρουσιάζει τη μεταβολή της τιμής της $S_{nor}(max)$ για $N=1,2,3,4,5$ κανάλια και $M=10,20,30$ σταθμούς. Ο πίνακας αυτός μελετά την επίδραση της μεταβολής των αριθμών N και M στην απόδοση του συστήματος.

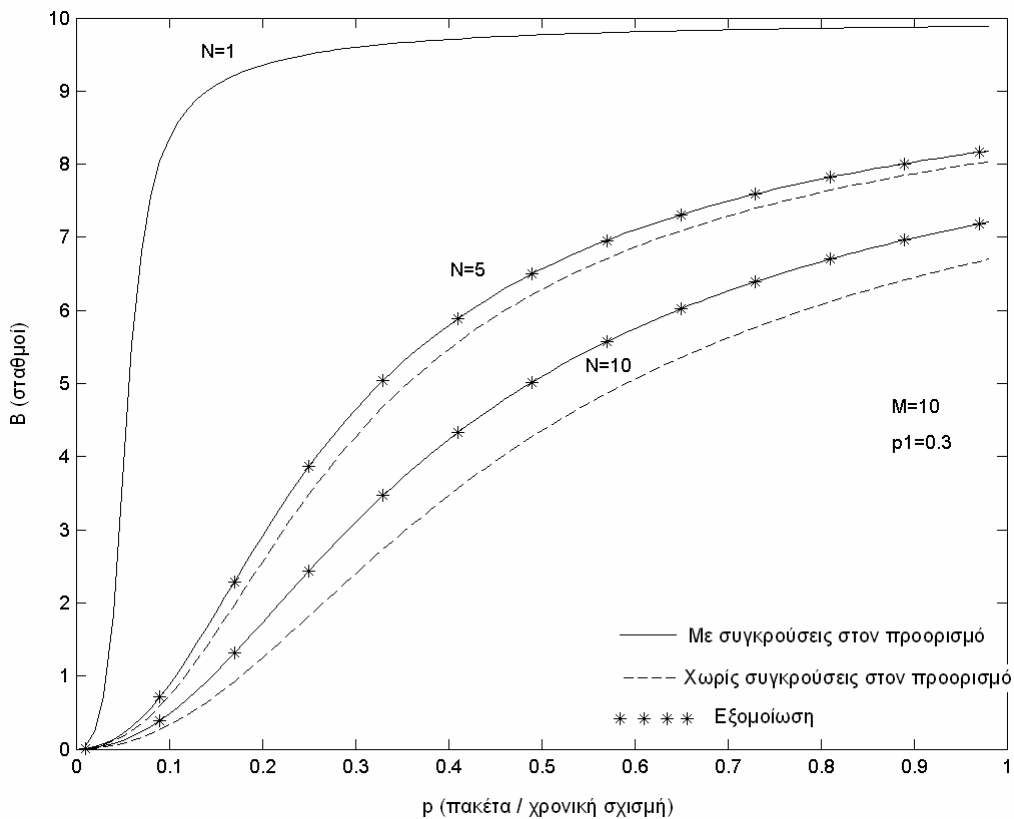
Είναι προφανές ότι η αύξηση του αριθμού M προκαλεί αύξηση των συγκρούσεων στα κανάλια, ενώ η διέλευση είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του M , για όλες τις τιμές του N . Η επίδραση των συγκρούσεων στα κανάλια είναι πιο εμφανής καθώς ο αριθμός N μειώνεται και ο αριθμός M αυξάνει. Αντίθετα, η ταυτόχρονη αύξηση των M και N προκαλεί

αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του πολυδιαυλικού δικτύου. Το γεγονός αυτό αποτελεί κρίσιμο χαρακτηριστικό της μελέτης των συγκρούσεων στον προορισμό.

N	Snor(max)		
	M=10	M=20	M=30
1	0.3260	0.1660	0.0461
2	0.3765	0.3388	0.2850
3	0.3725	0.3636	0.3421
4	0.3679	0.3653	0.3601
5	0.3561	0.3631	0.3617

Πίνακας 4-1. Μέγιστη Κανονικοποιημένη Διέλευση $S_{nor}(max)$

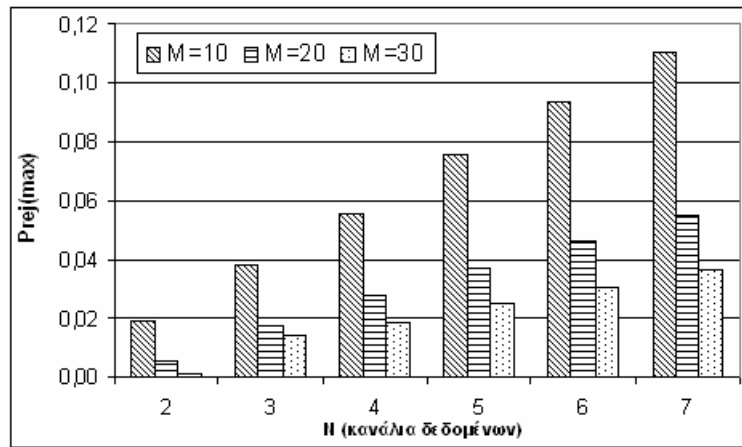
Το Σχήμα 4-3 παρουσιάζει το πλήθος των ενεργών σταθμών B ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p για $M=10$ και $N=1,5,10$. Επίσης, στο ίδιο σχήμα δίνονται τα αποτελέσματα της εξομοίωσης. Τα προηγούμενα συμπεράσματα επιβεβαιώνονται στο σχήμα αυτό. Συγκεκριμένα, ο αριθμός των ενεργών σταθμών B είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του αριθμού N για δεδομένη τιμή του M , εξαιτίας της αύξησης της επίδρασης των συγκρούσεων στον προορισμό. Για παράδειγμα για $p=0.9$, για $N=1$ είναι: $B=9.87$, για $N=5$ είναι: $B=8.03$, και για $N=10$ είναι: $B=6.99$.



Σχήμα 4-3. Ενεργοί σταθμοί για $N=1,5,10$

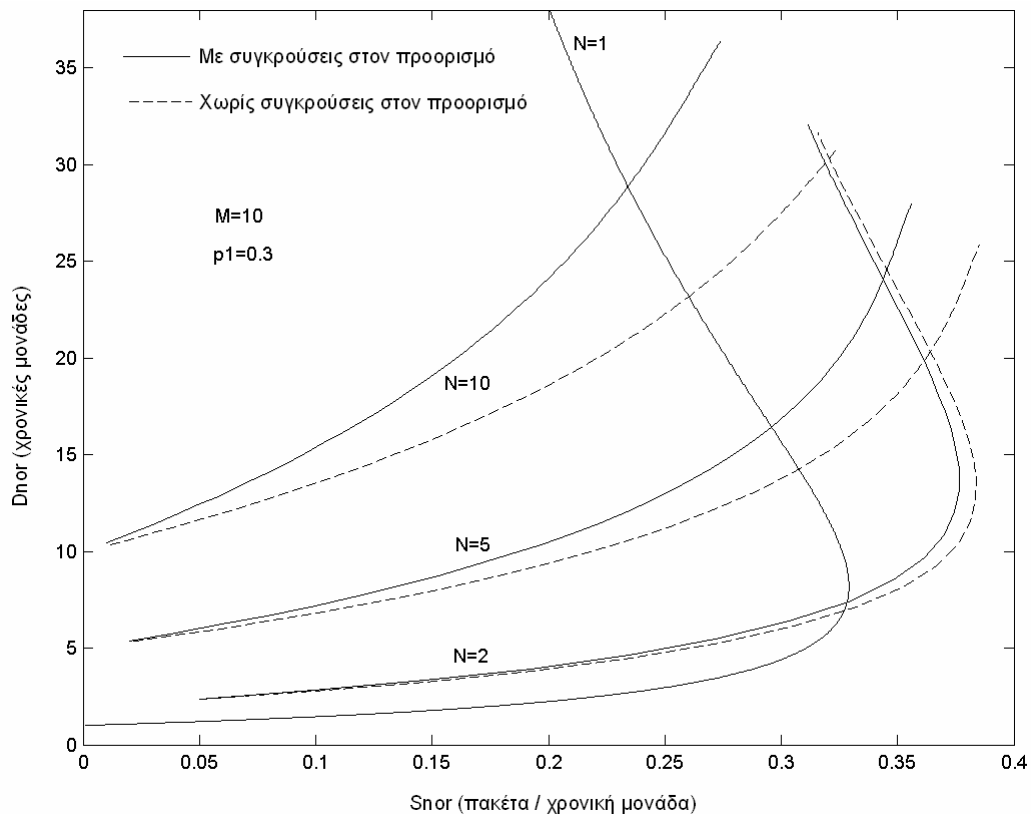
Η σχέση μεταξύ των αριθμών N και M καθορίζει την αποδοτικότητα του συστήματος. Έτσι, ο αριθμός N σχετίζεται με τις συγκρούσεις στα κανάλια και ο συνδυασμός μεταξύ N και M με τις συγκρούσεις στον προορισμό. Επίσης, όπως καταδεικνύεται στο Σχήμα 4-2, ο συνδυασμός των N και M καθορίζει την αξιοποίηση του πολυδιαυλικού δικτύου. Σε πραγματικές συνθήκες υλοποίησης του δικτύου, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο συνδυασμός

των παραμέτρων N και M , καθώς επίσης και η μέγιστη πιθανότητα απόρριψης εξαιτίας συγκρούσεων στον προορισμό $P_{rej(max)}$ προκειμένου να καθοριστούν τα κριτήρια αξιοποίησης του πολυδιαυλικού δικτύου.



Σχήμα 4-4. Μέγιστη πιθανότητα απόρριψης

Οι περιορισμοί της απόδοσης εξαιτίας της $P_{rej(max)}$ μελετώνται στο Σχήμα 4-4. Όπως είναι αναμενόμενο, η $P_{rej(max)}$ είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του αριθμού M για δεδομένη τιμή του N . Η ερμηνεία βασίζεται στα δεδομένα που παρουσιάζει ο Πίνακας 4-1. Είναι προφανές ότι η αύξηση του M προκαλεί αύξηση των συγκρούσεων στα κανάλια, περιορίζοντας την επίδραση των συγκρούσεων στον προορισμό. Επίσης, η $P_{rej(max)}$ είναι μια αύξουσα συνάρτηση του αριθμού N για δεδομένο M , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-4. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι η αύξηση του αριθμού N προκαλεί μείωση των συγκρούσεων στα κανάλια, ενισχύοντας την επίδραση των συγκρούσεων στον προορισμό.



Σχήμα 4-5. Κανονικοποιημένη καθυστέρηση D_{nor} για $N=2,5,10$

Το Σχήμα 4-5 παρουσιάζει την κανονικοποιημένη καθυστέρηση D_{nor} ως συνάρτηση της S_{nor} , για $M=10$ σταθμούς και $N=1,2,5,10$ κανάλια. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα, το σύστημα είναι ασταθές αφού υπάρχουν δύο διαφορετικές τιμές της D_{nor} που αντιστοιχούν σε δεδομένη τιμή της S_{nor} . Επίσης, η κλίση των καμπυλών για υψηλές τιμές της S_{nor} μειώνεται με την αύξηση του αριθμού N , γεγονός που ενισχύει την ευστάθεια του συστήματος και την ευελιξία στις υψηλές απαιτήσεις φορτίου.

4.3 Πρωτόκολλο ασύμμετρης πρόσβασης

Στο πρωτόκολλο αυτό, τα παράλληλα κανάλια είναι αριθμημένα: κανάλι-1, κανάλι-2, κλπ. Οι ελεύθεροι σταθμοί εκπέμπουν με πιθανότητα γέννησης p στο κανάλι-1, στην αρχή κάθε χρονικής σχισμής, ενώ οι ενεργοί σταθμοί εκπέμπουν με πιθανότητα επανεκπομπής p_1 σε ένα από τα υπόλοιπα $v = (N - 1)$ κανάλια: στο κανάλι-2, κανάλι-3 κλπ. Κάθε ενεργός σταθμός επιλέγει τυχαία και ισοπίθανα ένα από τα v κανάλια επανεκπομπής, με πιθανότητα $P_i = 1/v$.

Θεωρούνται οι τυχαίες μεταβλητές H_t , A_t και $A(n)$ όπως στην παράγραφο 4.2. Επίσης, έστω:

$S_v(k) = 0$ αριθμός των επιτυχών επαναμεταδόσεων στα v κανάλια επανεκπομπής, υπό την προϋπόθεση ότι k ενεργοί σταθμοί επιχειρούν επαναμετάδοση κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής, $0 \leq S_v(k) \leq \min(v, k)$.

Ο υπολογισμός της πιθανότητας είναι παρόμοιος με αυτόν στην σχέση (4.1) αντικαθιστώντας το N με το v .

Η συνάρτηση $\Phi_v(x, y, z)$ τροποποιείται ως εξής:

$$\Phi_v(x, y, z) = \Pr[S_v(x) = y] \Pr[A(y+k) = z] \quad (4.27)$$

όπου: x, y αφορούν τα γεγονότα στα κανάλια επανεκπομπής και:

$$k = \begin{cases} 1, & \text{if there is a success over channel-1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.28)$$

Η συμπεριφορά του συστήματος περιγράφεται από τη μαρκοβιανή αλυσίδα $\{X_t, t = 0, 1, \dots\}$, όπως στο πρωτόκολλο συμμετρικής πρόσβασης. Οι πιθανότητες μετάβασης ενός βήματος $P_{ij} = (X_{t+1} = j | X_t = i)$ δίνονται από τις σχέσεις:

Περίπτωση A: $\forall j < (i - v)$ τότε:

$$P_{ij} = 0 \quad (4.29)$$

Περίπτωση B: $\forall j = (i - v)$ τότε:

$$P_{ij} = q_{v,i} (Q_{0,i} \Phi_v(v, v, v) + Q_{1,i} \Phi_v(v, v+1, v+1)) \quad (4.30)$$

Περίπτωση C: $\forall (i - v) < j < (i + 1)$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} Q_{0,i} \left(\sum_{n=i-j}^{\min(i,v)} q_{n,i} \sum_{s=i-j}^n \Phi_v(n,s,i-j) + \sum_{n=v+1}^i q_{n,i} \sum_{s=i-j}^{v-1} \Phi_v(n,s,i-j) \right) + \\ + Q_{1,i} \left(\sum_{n=i-j}^{\min(i,v)} q_{n,i} \sum_{s=i-j}^n \Phi_v(n,s+1,i-j+1) + \sum_{n=v+1}^i q_{n,i} \sum_{s=i-j}^{v-1} \Phi_v(n,s+1,i-j+1) \right) + \\ + \sum_{m=2}^{\min(M-i,v+j-i)} Q_{m,i} \sum_{n=i-j+m}^{\min(i,v)} q_{n,i} \sum_{s=i-j+m}^n \Phi_v(n,s,i-j+m) + \\ + \sum_{m=2}^{\min(M-i,v+j-i-1)} Q_{m,i} \sum_{n=v+1}^i q_{n,i} \sum_{s=i-j+m}^{v-1} \Phi_v(n,s,i-j+m) \end{cases} \quad (4.31)$$

Περίπτωση D: Αν $j = (i + 1)$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} \sum_{m=1}^{\min(M-i,v)} Q_{m+1,i} \sum_{n=m}^{\min(i,v)} q_{n,i} \sum_{s=0}^{n-m} \Phi_v(n,m+s,m) + \\ + \sum_{m=1}^{\min(M-i,v-1)} Q_{m+1,i} \sum_{n=v+1}^i q_{n,i} \sum_{s=0}^{v-m-1} \Phi_v(n,m+s,m) \end{cases} \quad (4.32)$$

Περίπτωση E: Αν $j > (i + 1)$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} \sum_{m=0}^{\min(M-i,v)} Q_{m+j-i,i} \sum_{n=m}^{\min(i,v)} q_{n,i} \sum_{s=0}^{n-m} \Phi_v(n,m+s,m) + \\ + \sum_{m=0}^{\min(M-i,v-1)} Q_{m+j-i,i} \sum_{n=v+1}^i q_{n,i} \sum_{s=0}^{v-m-1} \Phi_v(n,m+s,m) \end{cases} \quad (4.33)$$

όπου τα $q_{i,n}$ και $Q_{i,n}$ δίνονται από τις σχέσεις (4.9) και (4.10) αντίστοιχα .

4.3.1 Μέτρα αποδοτικότητας

Οι πιθανότητες μόνιμης κατάστασης υπολογίζονται επιλύοντας το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων (4.12) και (4.13) για το σύστημα ασύμμετρης πρόσβασης.

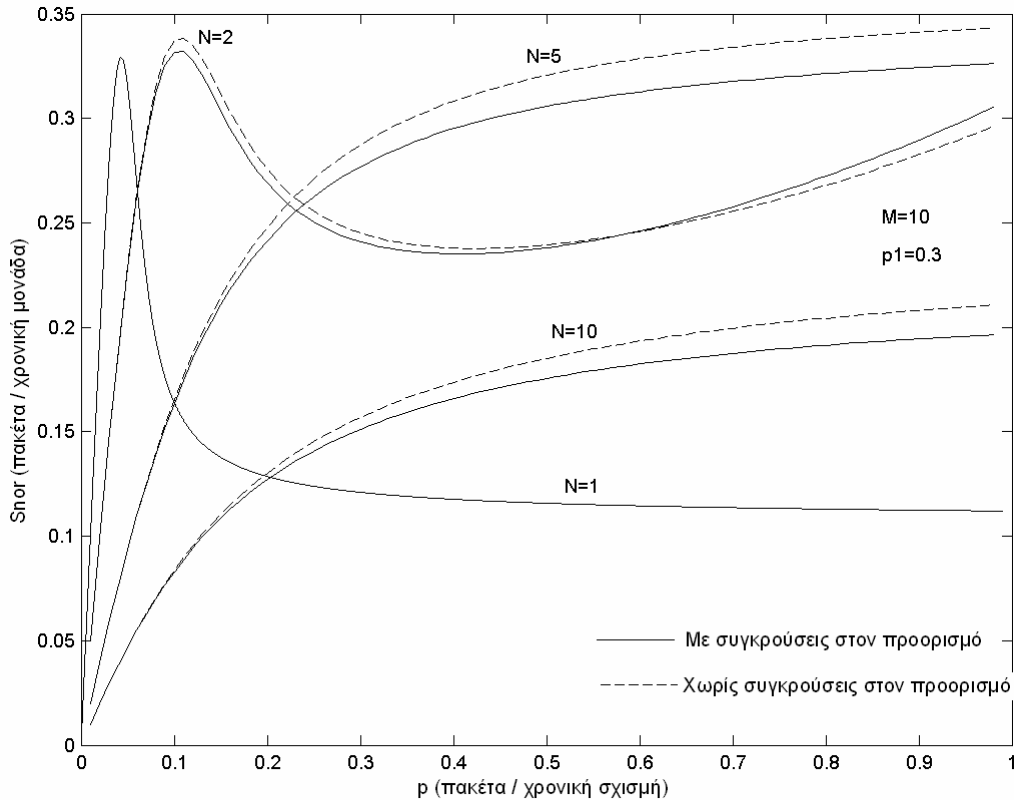
Η υπό συνθήκη διέλευση $S_{rc}(i) = E[A_t | X_t = i]$ δίνεται από τη σχέση:

$$S_{rc}(i) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{\min(i,v)} k \left((1-Q_{1,i}) \sum_{n=k}^{\min(i,v)} q_{n,i} \sum_{s=0}^{v-k} \Phi_v(n,k+s,k) + Q_{1,i} \sum_{n=v+1}^i q_{n,i} \sum_{s=0}^{v-k} \Phi_v(n,k+s,k) \right) + \\ + \sum_{k=1}^{\min(i,v-1)} k \left((1-Q_{1,i}) \sum_{n=v+1}^i q_{n,i} \sum_{s=0}^{v-k-1} \Phi_v(n,k+s,k) \right) + \\ + \sum_{k=1}^{\min(i+1,v+1)} k Q_{1,i} \left(\sum_{n=0}^{\min(i,v)} q_{n,i} \sum_{s=0}^{v-k+1} \Phi_v(n,k+s,k) \right) \end{cases} \quad (4.34)$$

Τα υπόλοιπα μέτρα αποδοτικότητας υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.16)-(4.21). Επίσης, τα κανονικοποιημένα μέτρα αποδοτικότητας και η μέγιστη πιθανότητα απόρριψης $P_{rej}(\max)$ υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.24)-(4.26).

4.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα ενός εξομοιωτικού μοντέλου διακριτών γεγονότων. Η μελέτη της απόδοσης του συστήματος αποδεικνύει ότι αυτή εξαρτάται από τις ίδιες παραμέτρους που επιδρούν στο πολυδιαυλικό δίκτυο συμμετρικής πρόσβασης.



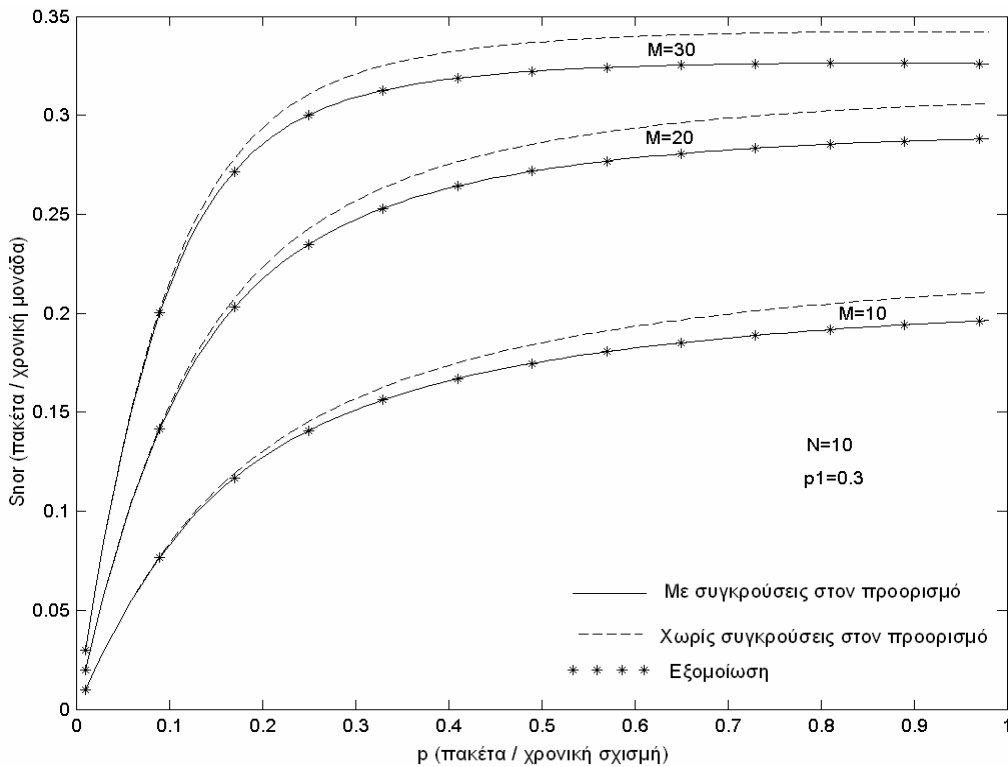
Σχήμα 4-6. Κανονικοποιημένη διέλευση S_{nor} για $N=1,2, 5,10$

Το Σχήμα 4-6 παρουσιάζει την κανονικοποιημένη διέλευση S_{nor} ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης ρ για διάφορες τιμές του αριθμού N και δεδομένη τιμή του M . Τα σχόλια είναι παρόμοια όπως στο Σχήμα 4-1. Έτσι, για $\rho=0.9$ η S_{nor} μειώνεται κατά: 4.94% για $N=5$ και κατά 6.56% για $N=10$.

Η ανάλυση που λαμβάνει υπόψη τις συγκρούσεις στον προορισμό συνδυάζει τις συγκρούσεις στα κανάλια και στον προορισμό για τον καθορισμό της κατάστασης του συστήματος και τον υπολογισμό των μέτρων αποδοτικότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6, η ανάλυση αποδεικνύει ότι για υψηλά φορτία η S_{nor} παρουσιάζει υψηλότερες τιμές σε σχέση με την περίπτωση που δεν λαμβάνονται υπόψη οι συγκρούσεις στον προορισμό. Η μεταβολή των δύο γραφικών παραστάσεων είναι παρόμοια και θα ήταν αναμενόμενο η S_{nor} να έχει χαμηλότερες τιμές σε σχέση με την S για όλες τις τιμές του φορτίου. Η απόκλιση που παρατηρείται από την λογική αυτή υπόθεση είναι πολύ ενδιαφέρουσα: Στην περίπτωση που δεν λαμβάνονται υπόψη οι συγκρούσεις στον προορισμό, ένας ενεργός σταθμός γίνεται ελεύθερος μετά την επιτυχή μετάδοση του πακέτου του στα κανάλια. Αντίθετα, στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη οι συγκρούσεις στον προορισμό, ένας ενεργός σταθμός γίνεται ελεύθερος μετά την επιτυχή λήψη του πακέτου του από τον προορισμό. Έτσι, στην δεύτερη περίπτωση ορισμένοι ενεργοί σταθμοί γίνονται ελεύθεροι και στη συνέχεια γίνονται ξανά ενεργοί κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής εξαιτίας των συγκρούσεων στον

προορισμό. Το γεγονός αυτό μειώνει το πλήθος των ελεύθερων σταθμών και συνεπακόλουθα μειώνει τον ανταγωνισμό για το κανάλι-1, αυξάνοντας ταυτόχρονα τη διέλευση του καναλιού αυτού στην επόμενη χρονική σχισμή. Το φαινόμενο αυτό σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως όταν $N=2$, εμφανίζει ότι αυξάνει τη S_{nor} σε σχέση με τη S .

Το Σχήμα 4-7 παρουσιάζει την κανονικοποιημένη διέλευση S ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p για διάφορες τιμές του αριθμού M για δεδομένη τιμή του N . Ο σχολιασμός είναι παρόμοιος με αυτόν στο Σχήμα 4-2. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι για $p=0.9$ η S_{nor} μειώνεται κατά: 6.56% για $M=10$, κατά: 5.7% για $M=20$ και κατά: 4.66% για $M=30$.



Σχήμα 4-7. Κανονικοποιημένη διέλευση S_{nor} για $M=10,20,30$

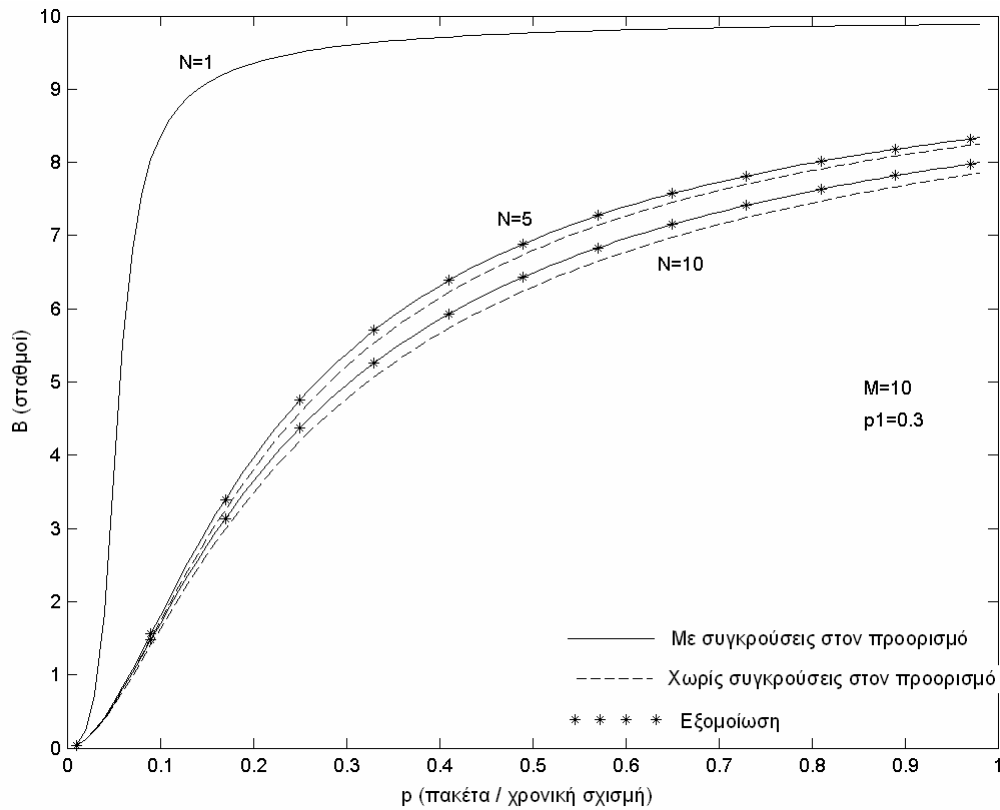
Ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζει τη μεταβολή του $S_{nor(max)}$ για $N=1,2,3,4,5$ κανάλια και $M=10,20,30$ σταθμούς και επιβεβαιώνει τα παραπάνω συμπεράσματα.

N	$S_{nor(max)}$		
	M=10	M=20	M=30
1	0.3260	0.1660	0.0461
2	0.3320	0.2606	0.1461
3	0.3846	0.3503	0.3284
4	0.3633	0.3550	0.3475
5	0.3262	0.3495	0.3468

Πίνακας 4-2. Μέγιστη Κανονικοποιημένη Διέλευση $S_{nor(max)}$

Ο αριθμός των ενεργών σταθμών B παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-8, για τα αποτελέσματα τόσο της θεωρητικής ανάλυσης όσο και της εξομοίωσης. Τα σχόλια είναι παρόμοια με αυτά στο Σχήμα 4-3. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι, για

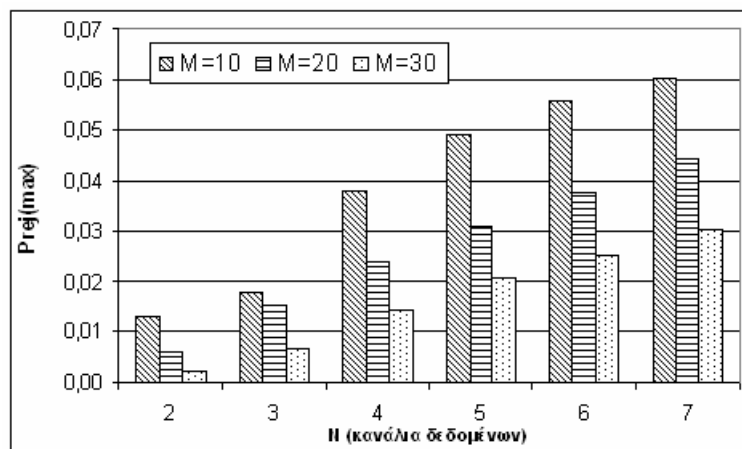
παράδειγμα, για $\rho=0.9$ έχουμε: $B=9.87$ για $N=1$, έχουμε: $B=8.20$ για $N=5$ και έχουμε: $B=7.84$ για $N=10$.



Σχήμα 4-8. Ενεργοί σταθμοί για $N=1,5,10$

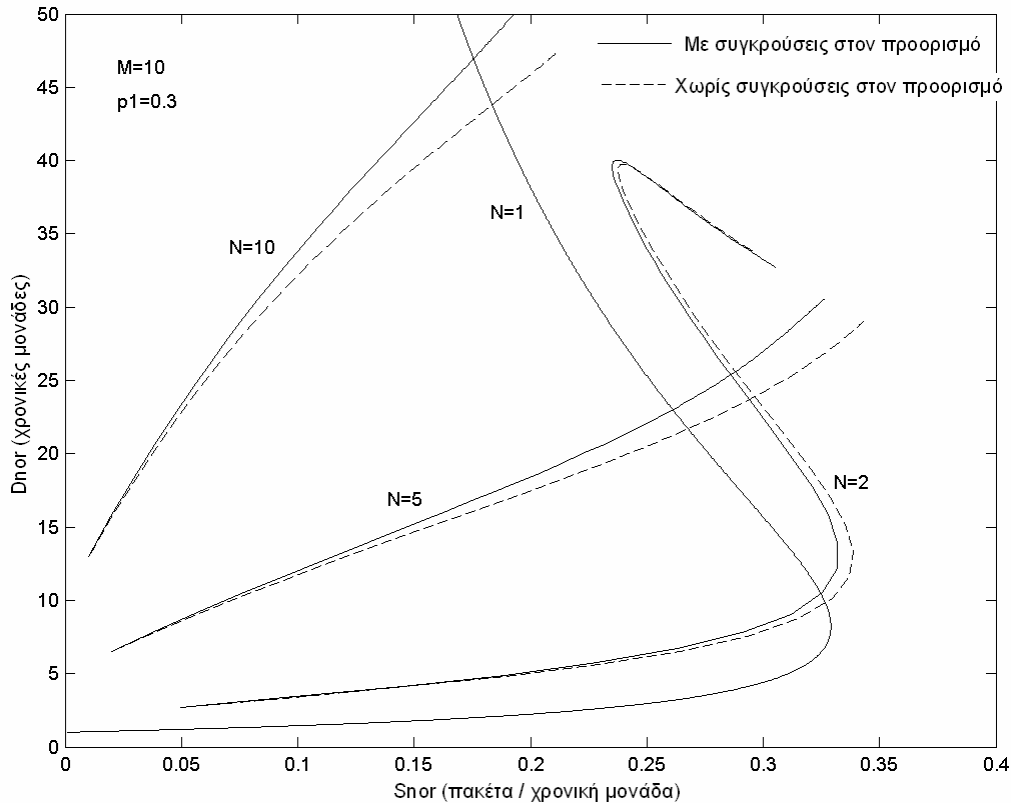
Η $P_{rej(max)}$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-9 για διάφορες τιμές των αριθμών N και M . Είναι προφανές ότι τα σχόλια είναι παρόμοια με αυτά στο Σχήμα 4-4.

Η αποδοτικότητα του συστήματος εξαρτάται από τις παραμέτρους M , N , και $P_{rej(max)}$. Ο συνδυασμός τους καθορίζει το βαθμό επίδρασης των συγκρούσεων τόσο στα κανάλια όσο και στον προορισμό στην απόδοση του συστήματος.



Σχήμα 4-9. Μέγιστη πιθανότητα απόρριψης

Για μικρές τιμές του αριθμού N , το σύστημα είναι ασταθές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-10, το οποίο παρουσιάζει την κανονικοποιημένη καθυστέρηση D_{nor} ως συνάρτηση του S_{nor} για $M=10$ σταθμούς και $N=1,2,5,10$ κανάλια. Επίσης, παρατηρείται ότι για $N=2$ και καθώς η S_{nor} αυξάνει για πολύ υψηλά φορτία, η D_{nor} μειώνεται. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτή την περιοχή στο σύστημα υπάρχουν πολλοί ενεργοί σταθμοί που συμμετέχουν σε αρκετές συγκρούσεις στα ν κανάλια. Στην περίπτωση αυτή οι ελάχιστοι ελεύθεροι σταθμοί που ανταγωνίζονται στο κανάλι-1 με μεγάλη πιθανότητα μεταδίδουν επιτυχώς το πακέτο τους, παρέχοντας υψηλές τιμές της S_{nor} και μειούμενες τιμές της D_{nor} .



Σχήμα 4-10. Κανονικοποιημένη καθυστέρηση D_{nor} για $N=1,2,5,10$

4.4 Συμπεράσματα

Όπως έγινε φανερό στην προηγούμενη παράγραφο, τα ερευνητικά αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου μαρκοβιανής ανάλυσης επιβεβαιώθηκαν απόλυτα από τα αποτελέσματα του εξομοιωτικού μοντέλου διακριτών γεγονότων που αναπτύχθηκε και παρουσιάζουν απόλυτη ταύτιση.

Η ανάλυση των πρωτοκόλλων επιβεβαίωσε τη μείωση της απόδοσης του πολυδιαυλικού δικτύου εξαιτίας των συγκρούσεων στον προορισμό σε σχέση με το δίκτυο που αγνοεί το φαινόμενο αυτό, τόσο για συμμετρικά όσο και ασύμμετρα δικαιώματα πρόσβασης των σταθμών στα κανάλια.

Συγκεκριμένα, και στα δύο πρωτόκολλα παρατηρείται ότι για δεδομένο πληθυσμό σταθμών M και δεδομένη τιμή της πιθανότητας γέννησης p η μείωση της απόδοσης του δικτύου μεγαλώνει καθώς το πλήθος των καναλιών N αυξάνει. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι με την αύξηση του N για δεδομένο M οι συγκρούσεις στα κανάλια μειώνονται, γεγονός που προκαλεί αύξηση της διέλευσης και συνεπακόλουθα αύξηση των συγκρούσεων στον προορισμό.

Αντίθετα, η απόδοση του δικτύου μειώνεται με την αύξηση του πληθυσμού M για δεδομένο αριθμό καναλιών N . Η αιτία είναι ότι καθώς το M αυξάνει για δεδομένο N , οι συγκρούσεις στα κανάλια αυξάνονται, γεγονός που προκαλεί μείωση της διέλευσης και συνεπακόλουθα μείωση των συγκρούσεων στον προορισμό.

Είναι προφανές ότι καθώς ο πληθυσμός M αυξάνει, οι συγκρούσεις στα κανάλια επίσης αυξάνονται. Έτσι, η διέλευση είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του πληθυσμού M , για όλες τις τιμές του N . Ο ρόλος των συγκρούσεων στα κανάλια γίνεται ουσιαστικότερος καθώς το N μειώνεται με ταυτόχρονη αύξηση του M . Αντίθετα, καθώς το M και το N αυξάνουν ταυτόχρονα, η αξιοποίηση του πολυδιαυλικού δικτύου γίνεται πιο αποδοτική. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό και χαρακτηρίζει την ανάλυση των συγκρούσεων στον προορισμό.

Επίσης, η ανάλυση αποδεικνύει ότι το πλήθος των ενεργών σταθμών B είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του N για δεδομένο M , εξαιτίας της αύξησης της επίδρασης των συγκρούσεων στον προορισμό.

Τα ερευνητικά συμπεράσματα επιβεβαιώνουν ότι η σχέση μεταξύ του πλήθους των καναλιών N και του πληθυσμού M καθορίζει την αποδοτικότητα του συστήματος. Έτσι, ενώ ο αριθμός των καναλιών σχετίζεται με τις συγκρούσεις στα κανάλια, ο συνδυασμός των N και M σχετίζεται με τις συγκρούσεις στον προορισμό. Η ανάλυση που προσεγγίζει την πραγματικότητα οφείλει να λαμβάνει υπόψη της τη συσχέτιση των παραμέτρων αυτών, καθώς και τη μέγιστη τιμή της πιθανότητας απόρριψης $P_{rej}(max)$, προκειμένου να καθορίσει τα κριτήρια αξιοποίησης του πολυδιαυλικού δικτύου.

Συμπερασματικά, η ανάλυση της συμπεριφοράς των δύο σύγχρονων πρωτοκόλλων για συμμετρικά και ασύμμετρα δικαιώματα πρόσβασης των σταθμών στα κανάλια, καταδεικνύει ότι η απόδοση ενός πολυδιαυλικού δικτύου πολλαπλής πρόσβασης εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους [J.1],[J.2],[C.1],[C.2]:

- το πλήθος M των σταθμών
- το πλήθος N των παράλληλων καναλιών
- τη μέγιστη τιμή της πιθανότητας απόρριψης στον προορισμό $P_{rej}(max)$.

Η ανάλυση των πρωτοκόλλων αποδεικνύει ότι σε πολυδιαυλικά δίκτυα με μεγάλο πληθυσμό σταθμών M , το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό επιδρά σε μικρό βαθμό στην απόδοση του δικτύου και μπορεί να αγνοηθεί χωρίς σημαντικές απώλειες στην ακρίβεια της ανάλυσης.

Αντίθετα, σε πολυδιαυλικά δίκτυα με μικρό πληθυσμό σταθμών M , το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό επιδρά καθοριστικά στην απόδοση του δικτύου και η επίδραση του δεν μπορεί να αγνοηθεί κατά την ανάλυση.

Τα ερευνητικά συμπεράσματα που εξήχθησαν για την απόδοση των πολυδιαυλικών δικτύων συμμετρικής και ασύμμετρης πρόσβασης αποτελούν σημαντικό εργαλείο ανάλυσης της απόδοσης και μοντελοποίησης της συμπεριφοράς οπτικών WDM δικτύων. Η μελέτη της συμπεριφοράς οπτικών WDM δικτύων με αξιοποίηση αρχιτεκτονικής ελέγχου για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης σε συστήματα συμμετρικής και ασύμμετρης πρόσβασης παρουσιάζονται στα κεφάλαια που ακολουθούν: στο Κεφάλαιο 5 και στο Κεφάλαιο 6 αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 5 : Αναλυτική Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου σε Τοπικά WDM Δίκτυα Τοπολογίας Παθητικού Αστέρα - Συμμετρική Πρόσβαση

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η απόδοση των WDM δικτύων επηρεάζεται από πολλαπλές παραμέτρους που σχετίζονται με τη φύση της μετάδοσης σε πολυδιαυλικά δίκτυα, καθώς και με τους περιορισμούς που θέτει η τεχνολογία οπτικών επικοινωνιών. Συγκεκριμένα, η απόδοση των WDM δικτύων επηρεάζεται από τις ακόλουθες παραμέτρους: τις συγκρούσεις πακέτων στα WDM κανάλια, τις συγκρούσεις πακέτων στον προορισμό, την καθυστέρηση διάδοσης του οπτικού σήματος στην οπτική ίνα, το πλήθος των οπτικών εκπομπών και δεκτών ανά σταθμό, το χρόνο συντονισμού των οπτικών εκπομπών και δεκτών μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων μετάδοσης κ.α.

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η απόδοση οπτικών WDM δικτύων τοπολογίας παθητικού αστέρα που χρησιμοποιούν την πληροφορία ελέγχου για την αποφυγή συγκρούσεων στα WDM κανάλια και στον προορισμό. Στη μελέτη αξιοποιείται η καθυστέρηση διάδοσης του οπτικού σήματος στα WDM κανάλια για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την αποφυγή των συγκρούσεων τόσο στα κανάλια όσο και στον προορισμό. Ειδικότερα, στη μελέτη η καθυστέρηση διάδοσης αποτελεί τον απαιτούμενο χρόνο για την ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου μεταξύ των σταθμών για την εξασφάλιση μετάδοσης χωρίς απώλειες.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου εισάγει την πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου (Multi-channel Control Architecture – MCA) που συγκροτείται από ένα σύνολο παράλληλων καναλιών ελέγχου για την ανταλλαγή αποκλειστικά πληροφορίας ελέγχου. Η MCA παρέχει σημαντικά μικρότερο φόρτο για την επεξεργασία της πληροφορίας ελέγχου σε σύγκριση με την αρχιτεκτονική που απασχολεί ένα μόνο κανάλι ελέγχου. Και αυτό γιατί η MCA περιορίζει αποφασιστικά τη συμφόρηση λόγω της ηλεκτρονικής επεξεργασίας (electronic processing overhead) της πληροφορίας ελέγχου και καθιστά την απόδοση του δικτύου πιο αποτελεσματική.

Στο κεφάλαιο αυτό προτείνεται ένα αποδοτικό πρωτόκολλο σύγχρονης μετάδοσης σε οπτικό WDM δίκτυο τοπολογίας παθητικού αστέρα που χρησιμοποιεί την MCA για τη μείωση της συμφόρησης λόγω της ηλεκτρονικής επεξεργασίας της πληροφορίας ελέγχου. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο πρόσβασης αξιοποιεί την καθυστέρηση διάδοσης ως χρόνο επιβεβαίωσης λήψης προκειμένου να εξαλείψει πλήρως τις συγκρούσεις πακέτων στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό.

Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του προτεινόμενου δικτύου πραγματοποιείται με χρήση αναλυτικών εργαλείων μαρκοβιανής ανάλυσης και προσδιορίζονται τα μέτρα αποδοτικότητας. Για τη αναλυτική μοντελοποίηση αξιοποιήθηκαν τα αναλυτικά συμπεράσματα της μελέτης των πολυδιαυλικών δικτύων συμμετρικής πρόσβασης που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Η επίδραση του φαινομένου των συγκρούσεων στον προορισμό μελετάται για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου και ποσοτικοποιείται ο περιορισμός της απόδοσης του πρωτοκόλλου εξαιτίας του. Έτσι, αναπτύσσονται δύο περιπτώσεις μοντέλων μαρκοβιανής ανάλυσης:

- *το μοντέλο ανάλυσης πρωτοκόλλου που αγνοεί τις συγκρούσεις στον προορισμό: η απώλεια πακέτων οφείλεται στις συγκρούσεις στα κανάλια ελέγχου και ο*

αλγόριθμος αποφυγής των συγκρούσεων εξαλείφει τις συγκρούσεις στα κανάλια δεδομένων

- το μοντέλο ανάλυσης πρωτοκόλλου που συνυπολογίζει τις συγκρούσεις στον προορισμό: η απώλεια πακέτων οφείλεται στις συγκρούσεις στα κανάλια ελέγχου και ο αλγόριθμος αποφυγής των συγκρούσεων εξαλείφει τις συγκρούσεις στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό

Τα παραπάνω μοντέλα ανάλυσης πρωτοκόλλων οδηγούν στην αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου δικτύου και στον καθορισμό των μέτρων αποδοτικότητας τα οποία είναι:

- η μέση διέλευση του δικτύου
- η μέση καθυστέρηση των πακέτων
- το μέσο πλήθος των ενεργών σταθμών
- η μέση πιθανότητα απόρριψης πακέτων στο προορισμό.

Τα αποτελέσματα της διδακτορικής έρευνας για το προτεινόμενο δίκτυο συμμετρικής πρόσβασης στην πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου τοπολογίας παθητικού αστέρα δίνονται στις μελέτες [J.1],[C.1].

5.1 Μοντέλο δικτύου και πρωτόκολλο πρόσβασης

Το τοπικό WDM δίκτυο πολυδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου συμμετρικής πρόσβασης που μελετάται παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1. Το δίκτυο είναι τοπολογίας παθητικού αστέρα και χρησιμοποιεί $(v + N)$, $v > N$, μήκη κύματος $\{\lambda_{c1}, \dots, \lambda_{cv}, \lambda_{d1}, \dots, \lambda_{dN}\}$ προκειμένου να διασυνδέσει ένα σταθερό αριθμό M , ($M > N$), σταθμών. Το πολυδιαυλικό σύστημα των μηκών κύματος $\lambda_{c1}, \dots, \lambda_{cv}$ συγκροτεί την MCA, ενώ τα υπόλοιπα N κανάλια των μηκών κύματος $\lambda_{d1}, \dots, \lambda_{dN}$ συγκροτούν το πολυδιαυλικό σύστημα των καναλιών δεδομένων.

Το μοντέλο δικτύου περιγράφεται ως $[CC]^v$ -TT-[FR]^v-[TR]. Ειδικότερα, $[CC]^v$ σημαίνει ότι το σύστημα έχει v κοινά κανάλια ελέγχου. Ο συμβολισμός TT συμβολίζει ότι κάθε σταθμός είναι εξοπλισμένος με ένα συντονιζόμενο εκπομπό που μπορεί να συντονιστεί σε οποιοδήποτε μήκος κύματος από το σύνολο των $\{\lambda_{c1}, \dots, \lambda_{cv}, \lambda_{d1}, \dots, \lambda_{dN}\}$. Η εξερχόμενη κίνηση κάθε σταθμού συνδέεται σε μία είσοδο του συζεύκτη παθητικού αστέρα. Κάθε σταθμός χρησιμοποιεί v το πλήθος σταθερά συντονισμένους δέκτες που συμβολίζονται ως FR, ένα για κάθε κανάλι ελέγχου. Επίσης, κάθε σταθμός χρησιμοποιεί ένα συντονιζόμενο δέκτη που μπορεί να συντονιστεί σε οποιοδήποτε από τα κανάλια δεδομένων $\lambda_{d1}, \dots, \lambda_{dN}$ και συμβολίζεται ως TR. Η εισερχόμενη κίνηση σε κάθε σταθμό διαμοιράζεται σε $(v + 1)$ μέρη από ένα $1 \times (v+1)$ WDMA διαιρέτη, όπως δείχνει το Σχήμα 5-1.

Τα πακέτα ελέγχου έχουν σταθερό μήκος. Ο χρόνος μετάδοσης ενός πακέτου ελέγχου ορίζεται ως χρονική μονάδα και ονομάζεται σχισμή ελέγχου (control slot). Επίσης, τα πακέτα δεδομένων έχουν σταθερό μήκος. Ο χρόνος μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων κανονικοποιημένος σε χρονικές μονάδες σχισμών ελέγχου είναι L ($L > 1$) και ονομάζεται σχισμή δεδομένων (data slot). Ο κανονικοποιημένος χρόνος διάδοσης της πληροφορίας από ένα σταθμό στο συζεύκτη παθητικού αστέρα και από εκεί σε οποιονδήποτε άλλο σταθμό ισούται με R σχισμές δεδομένων (δηλαδή $R \times L$ χρονικές μονάδες) για όλους τους σταθμούς.

Το πακέτο ελέγχου περιέχει τρία πεδία πληροφορίας:

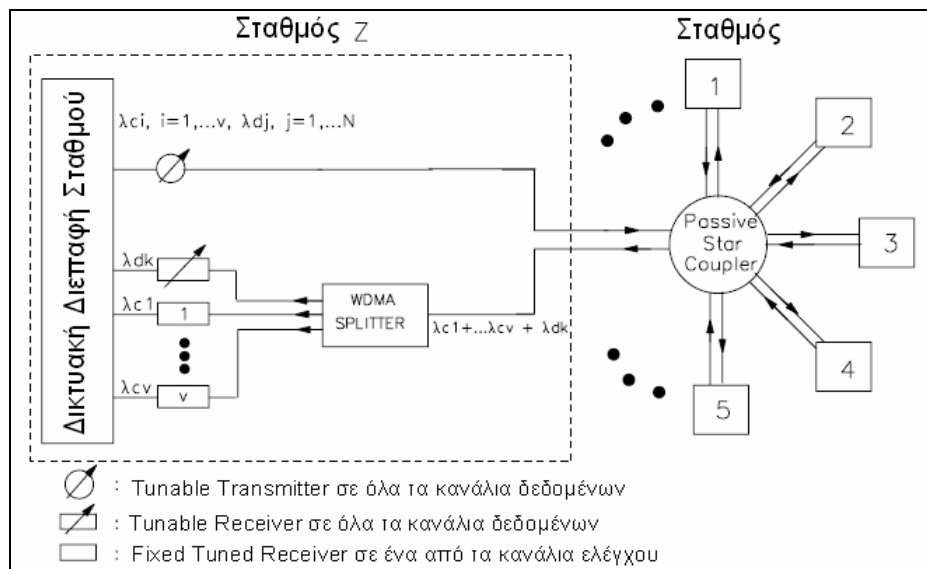
- τη διεύθυνση του αποστολέα

- τη διεύθυνση του παραλήπτη
- το κανάλι δεδομένων $\lambda_k \in \{\lambda_{d1}, \dots, \lambda_{dN}\}$ και έχει επιλεγεί για τη μετάδοση του πακέτου δεδομένων.

Τα κανάλια ελέγχου και δεδομένων χρησιμοποιούν την ίδια χρονική αναφορά η οποία ονομάζεται κύκλος. Ως κύκλο ορίζουμε το χρονικό διάστημα που περιλαμβάνει μία χρονική μονάδα για τις εκπομπές των πακέτων ελέγχου από τους σταθμούς, ακολουθούμενο από τον κανονικοποιημένο χρόνο καθυστέρησης διάδοσης και τον χρόνο μετάδοσης των πακέτων δεδομένων. Έτσι, η χρονική διάρκεια του κύκλου C είναι: $C = 1 + (R+1) \times L$ χρονικές μονάδες.

Όλοι οι σταθμοί είναι συντονισμένοι με ένα κοινό ρολόι δικτύου. Ο άξονας του χρόνου διαιρείται σε συνεχείς κύκλους ίσου μήκους, ενώ οι σταθμοί συγχρονίζονται κατά τη διάρκεια του κύκλου για την εκπομπή στα κανάλια ελέγχου και δεδομένων. Κατά τη διάρκεια του μέρους του κύκλου που αφορά το χρόνο μετάδοσης των πακέτων δεδομένων, κάθε σταθμός δύναται να εκπέμπει σε ένα κανάλι δεδομένων λ_T και ταυτόχρονα να λαμβάνει από ένα άλλο κανάλι δεδομένων λ_R .

Παρόλο που ο χρόνος συντονισμού καθώς και το εύρος συντονισμού των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών θέτουν σημαντικούς περιορισμούς στην απόδοση του πρωτοκόλλου, στην ανάλυση δεν λαμβάνονται υπόψη. Έτσι, για λόγους απλούστευσης, ο χρόνος συντονισμού θεωρείται αμελητέος και το εύρος συντονισμού πολύ μεγάλο.



Σχήμα 5-1. Μοντέλο δικτύου πολυδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου

Αποστολή πακέτων

Αν ένας σταθμός θέλει να στείλει ένα πακέτο δεδομένων, αρχικά επιλέγει τυχαία ένα από τα κανάλια δεδομένων για την αποστολή. Στη συνέχεια, ο σταθμός πληροφορεί τους υπόλοιπους σταθμούς στέλνοντας ένα πακέτο ελέγχου σε ένα από τα v κανάλια ελέγχου που επιλέγει τυχαία. Τα πακέτα ελέγχου των σταθμών ανταγωνίζονται μεταξύ τους για πρόσβαση στα κανάλια ελέγχου σύμφωνα με το πρωτόκολλο Slotted Aloha. Μετά την αποστολή του πακέτου ελέγχου, ο σταθμός παρατηρεί συνεχώς την MCA με τους σταθερά συντονισμένους δέκτες. Το αποτέλεσμα της επιτυχούς ή μη αποστολής του πακέτου ελέγχου είναι γνωστό στο σταθμό $(R \times L)$ χρονικές μονάδες αργότερα, λόγω του γεγονότος ότι όλοι οι σταθμοί παρακολουθούν τα κανάλια ελέγχου. Επομένως, ο χρόνος επιβεβαίωσης λήψης των πακέτων ελέγχων είναι $(R \times L)$ χρονικές μονάδες.

Μετά το τέλος του χρόνου επιβεβαίωσης λήψης, ο σταθμός είναι ενήμερος για τις αιτήσεις όλων των σταθμών για μετάδοση πακέτου δεδομένων. Ειδικότερα, αν ο σταθμός διαπιστώσει ότι το πακέτο ελέγχου που έστειλε μεταδόθηκε επιτυχώς μέσω της MCA και ότι το ίδιο κανάλι δεδομένων έχει επιλεγεί και από ένα ή περισσότερους άλλους σταθμούς για τη μετάδοση του πακέτου δεδομένων, τότε εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος αποφυγής των συγκρούσεων στα κανάλια δεδομένων. Για παράδειγμα, το κριτήριο επιλογής στον αλγόριθμο αποφυγής συγκρούσεων θα μπορούσε να είναι ο χρόνος γέννησης του πακέτου δεδομένων, η προτεραιότητα κ.α. Στην περίπτωση αυτή, ένας μόνο από τους σταθμούς που ανταγωνίζονται για το ίδιο κανάλι δεδομένων αποκτά δικαίωμα μετάδοσης πακέτου δεδομένων και ξεκινά αμέσως τη μετάδοση, ενώ οι υπόλοιποι σταθμοί μετατρέπονται σε ενεργούς.

Λήψη πακέτων

Αμέσως μετά την λήψη των πακέτων ελέγχου και την διαπίστωση του καναλιού δεδομένων στο οποίο γίνεται η αποστολή, ο παραλήπτης σταθμός συντονίζει το συντονιζόμενο δέκτη του στο συγκεκριμένο κανάλι δεδομένων για την λήψη. Στην περίπτωση που στην ανάλυση λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο των συγκρούσεων στον προορισμό, αν δύο ή περισσότερα πακέτα δεδομένων που μεταδίδονται σε διαφορετικά κανάλια δεδομένων προορίζονται στον ίδιο παραλήπτη, τότε μόνο ένα από τα πακέτα παραλαμβάνεται επιτυχώς, σύμφωνα με καθορισμένα κριτήρια επιλογής, ενώ τα υπόλοιπα πακέτα απορρίπτονται.

Κάθε σταθμός διαθέτει έναν καταχωρητή εξόδου χωρητικότητας ενός πακέτου δεδομένων. Αν ο καταχωρητής εξόδου είναι άδειος ο σταθμός ονομάζεται ελεύθερος, αλλιώς ονομάζεται ενεργός. Τα πακέτα δεδομένων γεννιούνται ανεξάρτητα σε κάθε σταθμό σύμφωνα με την γεωμετρική κατανομή. Με άλλα λόγια, σε κάθε κύκλο κάθε σταθμός γεννά ένα πακέτο δεδομένων με πιθανότητα γέννησης p . Επίσης, σε κάθε κύκλο κάθε ενεργός σταθμός επαναμεταδίδει το πακέτο δεδομένων που ανεπιτυχώς μεταδόθηκε σε προηγούμενο κύκλο ακολουθώντας τη γεωμετρική κατανομή με πιθανότητα επανεκπομπής p_1 . Αν ένας ενεργός σταθμός γεννήσει ένα νέο πακέτο δεδομένων, το πακέτο χάνεται.

Οι ελεύθεροι σταθμοί που μεταδίδουν ανεπιτυχώς είτε στα κανάλια ελέγχου είτε στα κανάλια δεδομένων κατά την διάρκεια ενός κύκλου, μετατρέπονται σε ενεργούς σταθμούς στον επόμενο κύκλο. Επίσης, ένας ενεργός σταθμός μετατρέπεται σε ελεύθερο στο επόμενο κύκλο αν καταφέρει να μεταδώσει χωρίς συγκρούσεις στα κανάλια ελέγχου και να κερδίσει πρόσβαση στο επιλεγμένο κανάλι δεδομένων. Επιπρόσθετα των παραπάνω προϋποθέσεων, στην περίπτωση που στην ανάλυση λαμβάνονται υπόψη οι συγκρούσεις στον προορισμό, ένας ενεργός σταθμός μετατρέπεται σε ελεύθερο στον επόμενο κύκλο αν το πακέτο δεδομένων που μεταδίδει δεν απορριφθεί στον προορισμό. Επίσης, στην περίπτωση αυτή ένας ελεύθερος σταθμός μετατρέπεται σε ενεργό σε περίπτωση απόρριψης του πακέτου δεδομένων στον προορισμό εξαιτίας συγκρούσεων.

5.2 Ανάλυση πρωτοκόλλου αγνοώντας τις συγκρούσεις στον προορισμό

Το εξεταζόμενο σύστημα περιγράφεται από μια μαρκοβιανή αλυσίδα διακριτού χρόνου. Η κατάσταση του συστήματος δηλώνεται ως X_t , $t = 1, 2, \dots$, όπου η τυχαία μεταβλητή $X_t = 0, 1, \dots, M$ εκφράζει τον αριθμό των ενεργών σταθμών στην αρχή ενός κύκλου. Έστω:

H_t = Ο αριθμός των αφίξεων νέων πακέτων ελέγχου κατά την πρώτη χρονική μονάδα ενός κύκλου, $t=0,1,2,\dots$

A_t = Ο αριθμός των επιτυχώς (επανα)μεταδιδόμενων πακέτων δεδομένων στα N κανάλια δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, $t=0,1,2,\dots$

S_k = Ο αριθμός των επιτυχών (επανα)μεταδόσεων πακέτων ελέγχου στα v κανάλια ελέγχου, υπό την προϋπόθεση ότι k ελεύθεροι και ενεργοί σταθμοί επιχειρούν μετάδοση κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, $0 \leq S_k \leq \min(v,k)$.

A_n = Ο αριθμός των επιτυχών (επανα)μεταδόσεων πακέτων δεδομένων στα N κανάλια δεδομένων, υπό την προϋπόθεση ότι συνέβησαν n επιτυχίες (επανα)μεταδόσεις στα v κανάλια ελέγχου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, $S_k = n$ για κάθε $S_k > 0$.

Η πιθανότητα $[S_k = n]$ να συμβούν n επιτυχίες από τις k (επανα)μεταδόσεις στα v κανάλια ελέγχου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, υπολογίζεται όπως στην σχέση (4.1) αντικαθιστώντας το N με το v .

Η πιθανότητα $\Pr[A_n = r]$ να συμβούν r επιτυχίες μεταδόσεις πακέτων δεδομένων στα N κανάλια δεδομένων, υπό την προϋπόθεση ότι συνέβησαν n επιτυχίες (επανα)μεταδόσεις στα v κανάλια ελέγχου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, υπολογίζεται όπως στην σχέση (4.2).

Η συνάρτηση $\Phi(x,y,z)$ ορίζεται ως το γινόμενο της πιθανότητας να συμβούν y επιτυχίες από x (επανα)μεταδόσεις στα v κανάλια ελέγχου, επί την πιθανότητα να μεταδοθούν επιτυχώς z πακέτα δεδομένων στα N κανάλια δεδομένων κατά την διάρκεια ενός κύκλου. Έτσι:

$$\Phi(x, y, z) = \Pr[S_x = y] \Pr[A_y = z] \quad (5.1)$$

όπου: x είναι ο αριθμός των ελεύθερων και ενεργών σταθμών που επιχειρήσαν μετάδοση στα v κανάλια ελέγχου, y είναι ο αριθμός των επιτυχών (επανα)μεταδόσεων στα v κανάλια ελέγχου και z είναι ο αριθμός των επιτυχών (επανα)μεταδόσεων στα N κανάλια δεδομένων, κατά τη διάρκεια ενός κύκλου.

Η μαρκοβιανή αλυσίδα $\{X_t, t = 0,1,\dots\}$ είναι ομογενής, απεριοδική και ανάγωγη. Οι πιθανότητες μετάβασης ενός βήματος $P_{ij} = (\Pr\{X_{t+1} = j \mid X_t = i\})$ δίνονται από τις σχέσεις:

Περίπτωση A: $\forall j < (i - N)$ τότε:

$$P_{ij} = 0 \quad (5.2)$$

Περίπτωση B: $\forall j = (i - N)$ τότε:

$$P_{ij} = Q_{0i} \left(\sum_{n=N}^{\min(i,v)} q_{ni} \Phi(n, n, N) + \sum_{n=N+2}^i q_{ni} \sum_{s=N}^{\min(n-2, v-1)} \Phi(n, s, N) \right) \quad (5.3)$$

Περίπτωση C: $\forall j = (i - N) < j < i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} \sum_{n=i-j}^{\min(i,v)} q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i, N-i+j, v-n)} Q_{mi} \Phi(n+m, n+m, m+i-j) + \\ \sum_{n=i-j+2}^i q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i, N-i+j)} Q_{mi} \sum_{s=m+i-j}^{\min(n+m-2, v-1)} \Phi(n+m, s, m+i-j) \end{cases} \quad (5.4)$$

Περίπτωση D: $\forall j = i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} q_{0i} Q_{0i} \Phi(0,0,0) + \sum_{n=0}^{\min(i,v-1)} q_{ni} \sum_{m=1}^{\min(M-i,N,v-n)} Q_{mi} \Phi(n+m,n+m,m) + \\ Q_{0i} \sum_{n=2}^i q_{ni} \Phi(n,0,0) + \sum_{n=2}^i q_{ni} \sum_{m=1}^{\min(M-i,N)} Q_{mi} \sum_{s=m}^{\min(n+m-2,v-1)} \Phi(n+m,s,m) \end{cases} \quad (5.5)$$

Περίπτωση E: $\forall j > i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} Q_{j-i,i} \sum_{n=0}^i q_{ni} \Phi(n+j-i,0,0) + \sum_{n=0}^{\min(i,v-1-j+i)} q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i,v-n)} Q_{mi} \Phi(n+m,n+m,m+i-j) + \\ \sum_{n=0}^i q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i,N-i+j)} Q_{mi} \sum_{s=m+i-j}^{\min(n+m-2,v-1)} \Phi(n+m,s,m+i-j) \end{cases} \quad (5.6)$$

όπου τα $q_{i,n}$ και $Q_{i,n}$ δίνονται από τις σχέσεις (4.9) και (4.10) αντίστοιχα .

5.2.1 Μέτρα αποδοτικότητας

Οι πιθανότητες μόνιμης κατάστασης υπολογίζονται επιλύοντας το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων (4.12) και (4.13) για το σύστημα πολυδιαυλικής αρχιτεκτονικής καναλιών ελέγχου.

Η υπό συνθήκη διέλευση $S(i)$ ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή του ρυθμού εξόδου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, υπό την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των ενεργών σταθμών στην αρχή του κύκλου είναι i , δηλαδή $S(i) = E[A_t | X_t = i]$. Είναι:

$$S(i) = \begin{cases} \sum_{k=1}^N k \left(\sum_{n=\max(k,M-i)-(M-i)}^i q_{ni} \sum_{\substack{m=0 \\ m+n \geq k}}^{M-i} Q_{mi} \sum_{s=k}^{\min(n+m-2,v-1)} \Phi(n+m,s,k) + \right. \\ \left. \sum_{n=\max(k,M-i)-(M-i)}^{\min(i,v)} q_{ni} \sum_{\substack{m=0 \\ v \geq m+n \geq k}}^{\min(M-i,v-n)} Q_{mi} \Phi(n+m,n+m,k) \right) \end{cases} \quad (5.7)$$

Η διέλευση μόνιμης κατάστασης S δίνεται από τη σχέση:

$$S = \frac{L}{C} E[S(i)] = \frac{L}{C} \sum_{i=0}^M S(i) \pi_i \quad (5.8)$$

Η μέση τιμή B του αριθμού των ενεργών σταθμών, ο υπό συνθήκη ρυθμός εισόδου $S_{in}(i)$ και η μέση τιμή του ρυθμού εισόδου στη μόνιμη κατάσταση S_{in} δίνονται από τις σχέσεις (4.17)-(4.19).

Η καθυστέρηση D ορίζεται ως ο μέσος αριθμός των χρονικών μονάδων τις οποίες περιμένει ένα πακέτο δεδομένων μέχρι την επιτυχή του μετάδοση. Η καθυστέρηση υπολογίζεται από το νόμο του Little [86]:

$$D = \{1 + (R + 1)L\} + \{1 + (R + 1)L\} \frac{B}{S_{in}} \quad (5.9)$$

Η διέλευση ανά κανάλι δεδομένων στη μόνιμη κατάσταση S_d ορίζεται ως ο αριθμός των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων δεδομένων ανά κανάλι δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου και δίνεται από τη σχέση:

$$S_d = \frac{S}{N} \quad (5.10)$$

5.3 Ανάλυση πρωτοκόλλου συνυπολογίζοντας τις συγκρούσεις στον προορισμό

Όπως στην προηγούμενη παράγραφο, το εξεταζόμενο σύστημα περιγράφεται ως μια μαρκοβιανή αλυσίδα διακριτού χρόνου. Η κατάσταση του συστήματος δηλώνεται ως X_t , $t=1,2,\dots$, όπου $X_t=0,1,\dots,M$ είναι ο αριθμός των ενεργών σταθμών στην αρχή ενός κύκλου. Οι τυχαίες μεταβλητές H_t , A_t , S_k και A_n της προηγούμενης παραγράφου λαμβάνονται υπόψη. Έστω:

C_t = Ο αριθμός των πακέτων δεδομένων που παρελήφθησαν επιτυχώς από τον προορισμό κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, $t=0,1,2,\dots$

C_r = Ο αριθμός των πακέτων δεδομένων που παρελήφθησαν επιτυχώς από τον προορισμό, υπό την προϋπόθεση ότι συνέβησαν r επιτυχείς (επανα)μεταδόσεις στα N κανάλια δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, $1 \leq C_r \leq A_n$ για κάθε $A_n > 0$.

Η πιθανότητα $\Pr[C_r = u]$ να παραληφθούν επιτυχώς από τον προορισμό u πακέτα δεδομένων, υπό την προϋπόθεση ότι μεταδόθηκαν επιτυχώς στα N κανάλια δεδομένων r πακέτα δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, δίνεται από τη σχέση [29]:

$$\Pr[C_r = u] = \binom{M}{u} \sum_{i=0}^u (-1)^i \binom{u}{i} \left(\frac{u-i}{M} \right)^r \quad (5.11)$$

και $1 \leq u \leq \min(r, M)$ για κάθε $r \geq 1$.

Η συνάρτηση $\Phi_{rc}(x, y, z, w)$ ορίζεται ως το γινόμενο της συνάρτησης $\Phi(x, y, z)$ της σχέσης (5.1), επί την πιθανότητα να παραληφθούν επιτυχώς από τον προορισμό w πακέτα δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, δηλαδή:

$$\Phi_{rc}(x, y, z, w) = \Pr[S_x = y] \Pr[A_y = z] \Pr[C_z = w] \quad (5.12)$$

όπου: x, y, z ορίζονται στη σχέση (5.1) και w είναι ο αριθμός των πακέτων δεδομένων που παρελήφθησαν επιτυχώς από τον προορισμό κατά τη διάρκεια ενός κύκλου.

Η μαρκοβιανή αλυσίδα $\{X_t, t = 0, 1, \dots\}$ είναι ομογενής, απεριοδική και ανάγωγη. Οι πιθανότητες μετάβασης ενός βήματος $P_{ij} = (\Pr[X_{t+1} = j | X_t = i])$ δίνονται από τις σχέσεις:

Περίπτωση A: $\forall j < (i - N)$ τότε:

$$P_{ij} = 0 \quad (5.13)$$

Περίπτωση B: $\forall j = (i - N)$ τότε:

$$P_{ij} = Q_{0i} \left(\sum_{n=N}^{\min(i, v)} q_{ni} \Phi_{rc}(n, n, N, N) + \sum_{n=N+2}^i q_{ni} \sum_{s=N}^{\min(n-2, v-1)} \Phi_{rc}(n, s, N, N) \right) \quad (5.14)$$

Περίπτωση C: $\forall (i - N) < j < i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} \sum_{n=i-j}^{\min(i,v)} q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i,N-i+j,v-n)} Q_{mi} \sum_{l=m+i-j}^{\min(m+n,N)} \Phi_{rc}(n+m,n+m,l,m+i-j) + \\ \sum_{n=i-j+2}^i q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i,N-i+j)} Q_{mi} \sum_{s=m+i-j}^{\min(n+m-2,v-1)} \sum_{l=m+i-j}^{\min(s,N)} \Phi_{rc}(n+m,s,l,m+i-j) \end{cases} \quad (5.15)$$

Περίπτωση D: Αν $j = i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} q_{0i} Q_{0i} \Phi_{rc}(0,0,0,0) + \sum_{n=0}^{\min(i,v-1)} q_{ni} \sum_{m=1}^{\min(M-i,N,v-n)} Q_{mi} \sum_{l=m}^{\min(n+m,N)} \Phi_{rc}(n+m,n+m,l,m) + \\ Q_{0i} \sum_{n=2}^i q_{ni} \Phi_{rc}(n,0,0,0) + \sum_{n=2}^i q_{ni} \sum_{m=1}^{\min(M-i,N)} Q_{mi} \sum_{s=m}^{\min(n+m-2,v-1)} \sum_{l=m}^{\min(s,N)} \Phi_{rc}(n+m,s,l,m) \end{cases} \quad (5.16)$$

Περίπτωση E: Αν $j > i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} Q_{j-i,i} \sum_{n=0}^i q_{ni} \Phi_{rc}(n+j-i,0,0,0) + \\ \sum_{n=0}^{\min(i,v-1-j+i)} q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i,v-n)} Q_{mi} \sum_{l=m+i-j}^{\min(n+m,N)} \Phi_{rc}(n+m,n+m,l,m+i-j) + \\ \sum_{n=0}^i q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i,N-i+j)} Q_{mi} \sum_{s=m+i-j}^{\min(n+m-2,v-1)} \sum_{l=m+i-j}^{\min(s,N)} \Phi_{rc}(n+m,s,l,m+i-j) \end{cases} \quad (5.17)$$

5.3.1 Μέτρα αποδοτικότητας

Οι πιθανότητες μόνιμης κατάστασης υπολογίζονται επιλύοντας το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων (4.12) και (4.13) για το σύστημα που λαμβάνει υπόψη του τις συγκρούσεις στον προορισμό.

Η υπό συνθήκη διέλευση $S_{rc}(i)$ ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή του ρυθμού εξόδου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, υπό την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των ενεργών σταθμών στην αρχή του κύκλου είναι i , δηλαδή $S_{rc}(i) = E[C_t | X_t = i]$. Είναι:

$$S_{rc}(i) = \begin{cases} \sum_{k=1}^N k \left(\sum_{n=\max(k,M-i)-(M-i)}^i q_{ni} \sum_{m=0}^{M-i} Q_{mi} \sum_{s=k}^{\min(n+m-2,v-1)} \sum_{l=k}^{\min(s,N)} \Phi_{rc}(n+m,s,l,k) + \right. \\ \left. \sum_{n=\max(k,M-i)-(M-i)}^{\min(i,v)} q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i,v-n)} Q_{mi} \sum_{l=k}^{\min(n+m,N)} \Phi_{rc}(n+m,n+m,l,k) \right) \end{cases} \quad (5.18)$$

Η μέση τιμή της διέλευσης μόνιμης κατάστασης S_{rc} δίνεται από την σχέση:

$$S_{rc} = \frac{L}{C} E[S_{rc}(i)] = \frac{L}{C} \sum_{i=0}^M S_{rc}(i) \pi_i \quad (5.19)$$

Ο αριθμός B_{rc} των ενεργών σταθμών, ο υπό συνθήκη ρυθμός εισόδου $S_{in,rc}(i)$ και ο ρυθμός εισόδου μόνιμης κατάστασης υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.17)-(4.19), θεωρώντας τις πιθανότητες μόνιμης κατάστασης π_i του συστήματος που λαμβάνει υπόψη τις συγκρούσεις στον προορισμό.

Η καθυστέρηση D_{rc} ορίζεται ως ο μέσος αριθμός των χρονικών μονάδων τις οποίες περιμένει ένα πακέτο δεδομένων μέχρι την επιτυχή του μετάδοση. Η καθυστέρηση υπολογίζεται από το νόμο του Little [86]:

$$D_{rc} = \{1 + (R + 1)L\} + \{1 + (R + 1)L\} \frac{B_{rc}}{S_{in,rc}} \quad (5.20)$$

Η διέλευση ανά κανάλι δεδομένων στη μόνιμη κατάσταση $S_{d,rc}$ ορίζεται ως ο αριθμός των πακέτων δεδομένων που παρελήφθησαν επιτυχώς από τον προορισμό ανά κανάλι δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου και δίνεται από τη σχέση:

$$S_{d,rc} = \frac{S_{rc}}{N} \quad (5.21)$$

Η πιθανότητα απόρριψης ενός πακέτου δεδομένων στον προορισμό P_{rej} ορίζεται ως ο λόγος της αναμενόμενης τιμής του αριθμού των πακέτων δεδομένων που απορρίφθηκαν στον προορισμό προς την αναμενόμενη τιμή των πακέτων δεδομένων που μεταδόθηκαν επιτυχώς στα N κανάλια δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, στη μόνιμη κατάσταση. Είναι:

$$P_{rej} = \frac{S - S_{rc}}{S} \quad (5.22)$$

όπου τα S and S_{rc} δίνονται από τις σχέσεις (5.8) και (5.19) αντίστοιχα.

Για λόγους ποιοτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, επιλέγονται για τη σύγκριση τα σημεία που αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές $S(\max)$ and $S_{rc}(\max)$ στη μόνιμη κατάσταση. Η μέγιστη τιμή της πιθανότητας απόρριψης $P_{rej}(\max)$ ορίζεται ως:

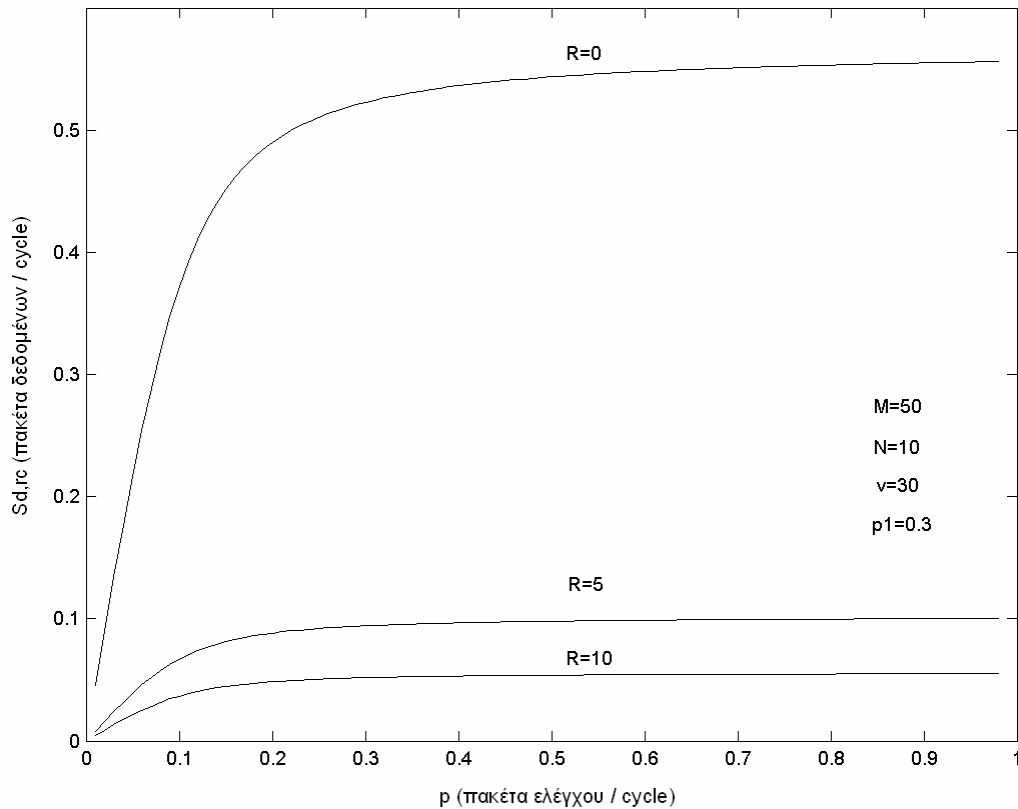
$$P_{rej}(\max) = \frac{S(\max) - S_{rc}(\max)}{S(\max)} \quad (5.23)$$

5.4 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στα ακόλουθα αριθμητικά αποτελέσματα θεωρείται ότι το κανονικοποιημένο μήκος του πακέτου δεδομένων είναι: $L=10$ χρονικές μονάδες.

Η επίδραση της κανονικοποιημένης καθυστέρησης διάδοσης R στην απόδοση του δικτύου μελετάται στο Σχήμα 5-2. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p για την περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη οι συγκρούσεις στον προορισμό, για $R=0,5,10$ χρονικές σχισμές και $M=50$ σταθμούς, $v=30$ κανάλια ελέγχου και $N=10$ κανάλια δεδομένων.

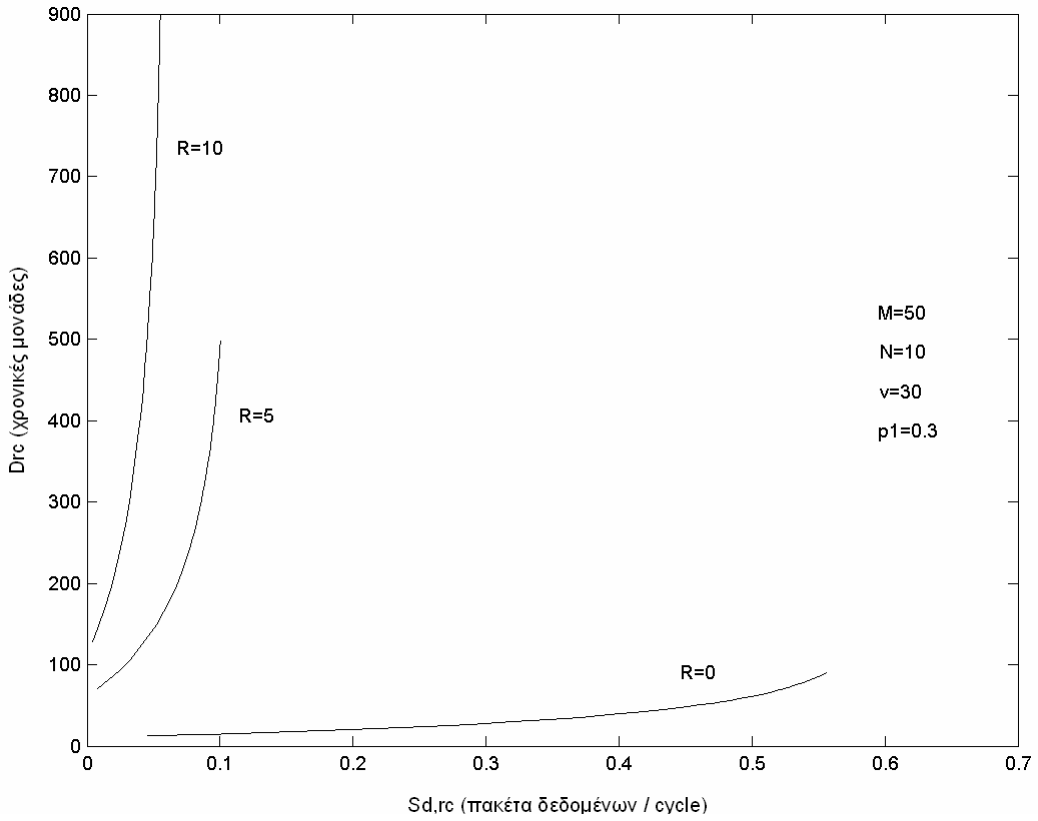
Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-2, η $S_{d,rc}$ μειώνεται σημαντικά όταν το R αυξάνει. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι η χρονική διάρκεια του κύκλου C είναι μια αύξουσα συνάρτηση του R και η $S_{d,rc}$ είναι μια αντιστρόφως ανάλογη συνάρτηση του C , σύμφωνα με τις σχέσεις (5.19) και (5.21). Με άλλα λόγια, το ποσοστό της χρονικής διάρκειας του κύκλου που ένα κανάλι δεδομένων είναι απασχολημένο με επιτυχείς μεταδόσεις μειώνεται. Το γεγονός αυτό προκαλεί τη μείωση της $S_{d,rc}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-2. Για παράδειγμα, για $p=0.9$ η $S_{d,rc}$ ανέρχεται σε 0.55 για $R=0$, ενώ μειώνεται σε 0.1 για $R=5$ και σε 0.05 για $R=10$.



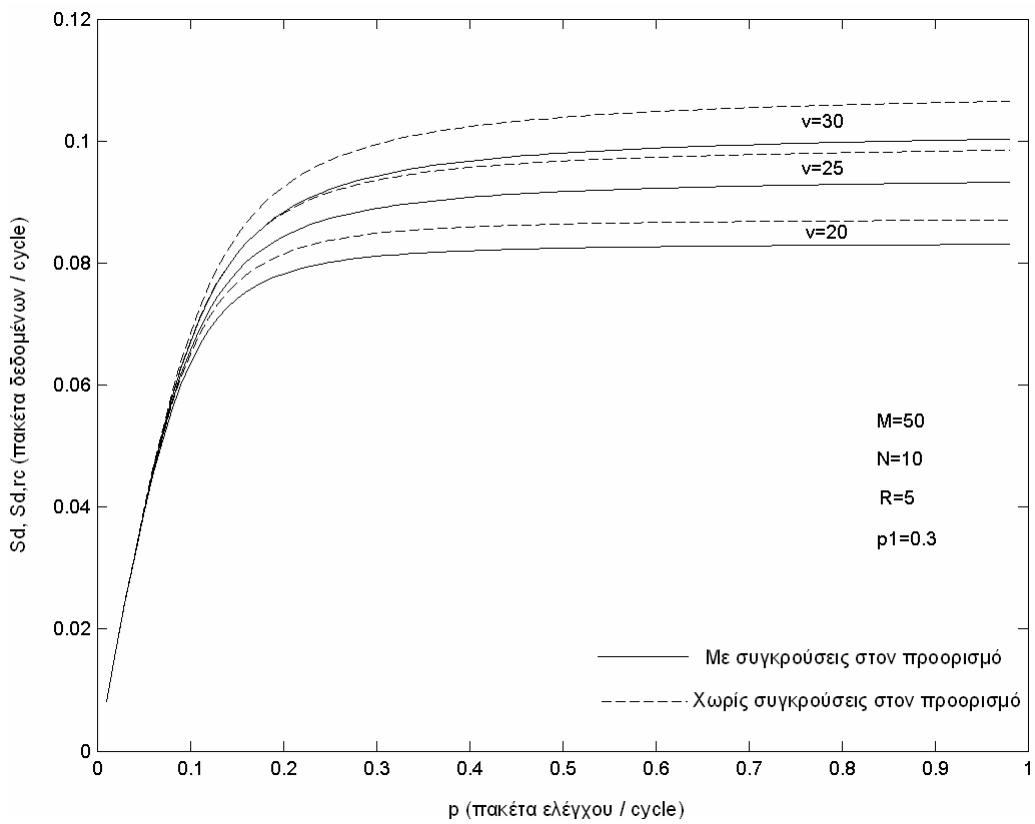
Σχήμα 5-2. Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $R=0,5,10$

Η σχέση (5.20) ερμηνεύει την ισχυρή εξάρτηση της μέσης καθυστέρησης D_{rc} από τη τιμή του R . Έτσι, η επίδραση του R στην απόδοση του συστήματος προκαλεί σημαντική αύξηση του χρονικού διαστήματος που ένα πακέτο δεδομένων πρέπει να περιμένει μέχρι την επιτυχή του μετάδοση. Το Σχήμα 5-3 παρουσιάζει την καθυστέρηση D_{rc} ως συνάρτηση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $M=50$, $N=10$, $v=30$ και $R=0,5,10$ χρονικές σχισμές. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η απόδοση του συστήματος περιορίζεται όταν το R αυξάνει. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι τόσο η διέλευση ανά κανάλι δεδομένων, όσο και η καθυστέρηση D_{rc} εξαρτώνται σημαντικά από τη τιμή του R .

Η επίδραση της μεταβολής του πλήθους v των καναλιών ελέγχου στην απόδοση του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 5-4 και στο Σχήμα 5-5. Έτσι, στο Σχήμα 5-4 παρουσιάζεται η διέλευση ανά κανάλι δεδομένων S_d , $S_{d,rc}$ ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης ρ , για $M=50$, $N=10$, $R=5$ και $v=20,25,30$ κανάλια ελέγχου, τόσο στην περίπτωση που αγνοούνται οι συγκρούσεις στον προορισμό, όσο και στην περίπτωση που συνυπολογίζονται. Όπως φαίνεται, για δεδομένη τιμή του R και για σταθερή τιμή των M , N και ρ , η $S_{d,rc}$ αυξάνει όταν ο αριθμός v αυξάνει. Και αυτό γιατί η αύξηση του αριθμού v προκαλεί μείωση των συγκρούσεων στα κανάλια ελέγχου και συνεπώς μείωση των συγκρούσεων στα κανάλια δεδομένων, γεγονός που αυξάνει τη $S_{d,rc}$ και τις συγκρούσεων στον προορισμό. Έτσι, για δεδομένη τιμή του R και σταθερές τιμές των M , N και ρ , η διαφορά μεταξύ των S_d , $S_{d,rc}$ διευρύνεται με την αύξηση του v . Για παράδειγμα, για $\rho=0.9$ και $M=50$, $N=10$ και $R=5$, η $S_{d,rc}$ είναι μικρότερη της S_d : κατά 4.58% για $v=20$, κατά 5.31% για $v=25$, και κατά 5.82% για $v=30$. Επίσης, η επίδραση των συγκρούσεων στον προορισμό είναι πιο έντονη στα υψηλά φορτία εξαιτίας του μεγάλου αριθμού ενεργών σταθμών.

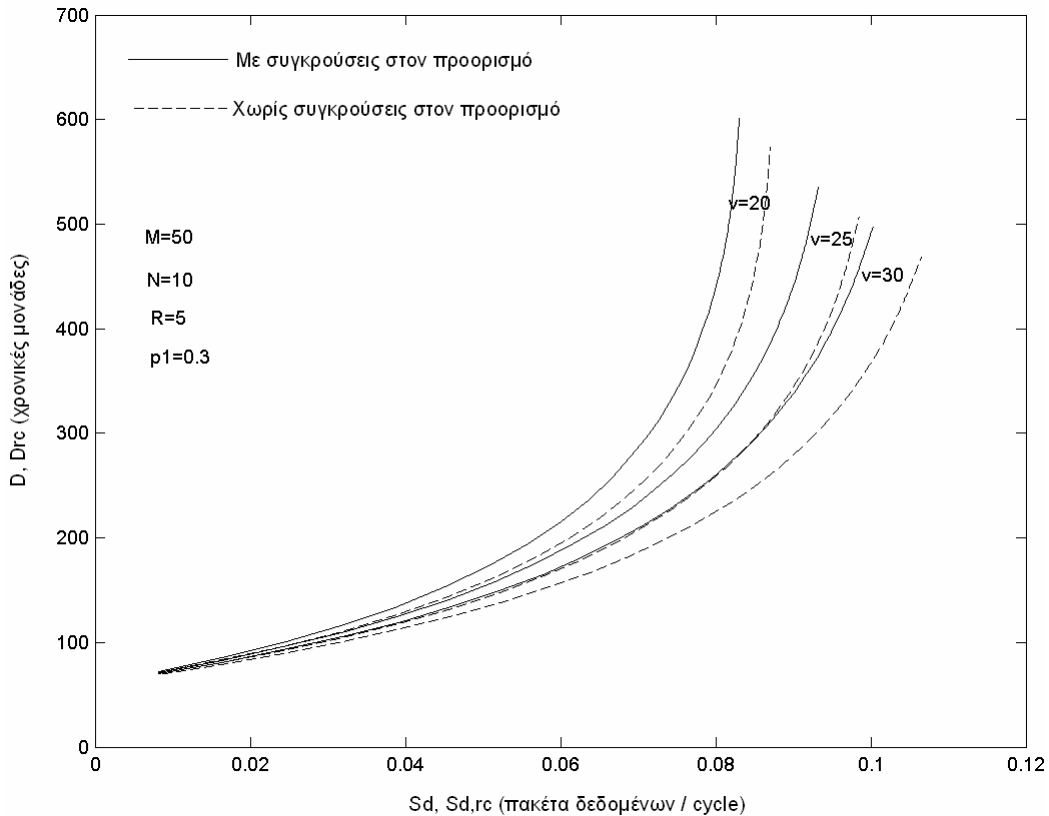


Σχήμα 5-3. Καθυστέρηση D_{rc} για $R=0,5,10$



Σχήμα 5-4. Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $v=20,25,30$

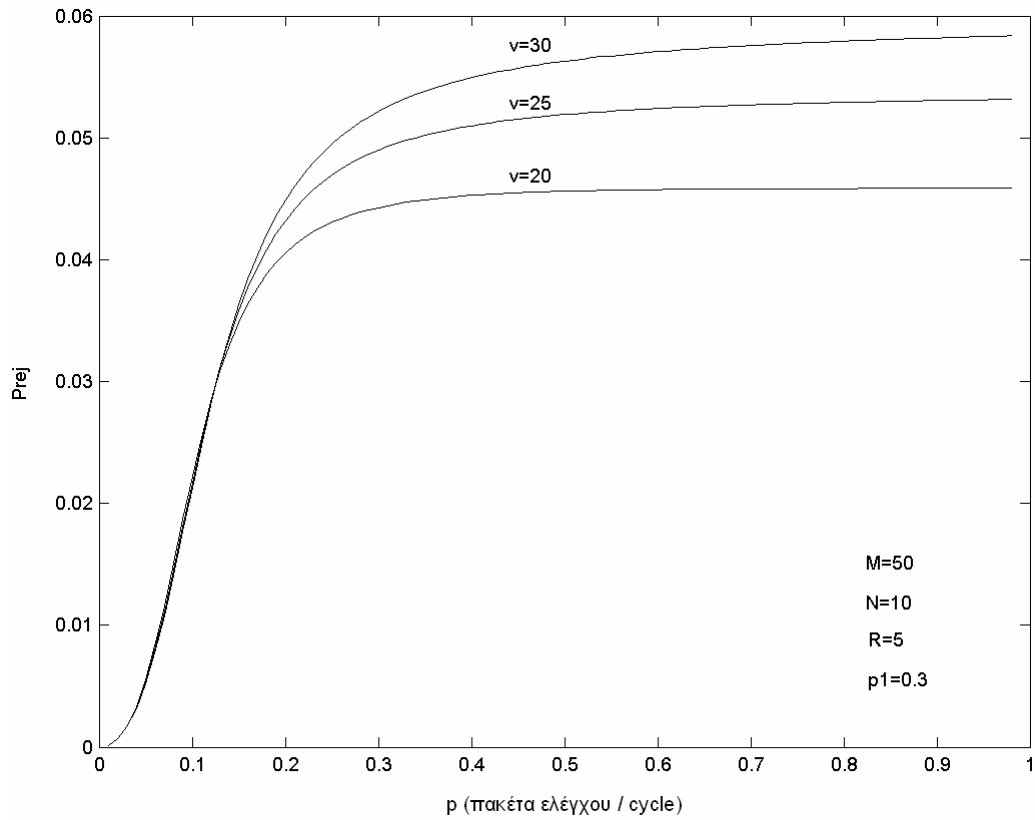
Άμεση συνέπεια των παραπάνω είναι το γεγονός ότι η αύξηση του αριθμού ν προκαλεί αύξηση της πιθανότητας επιτυχούς μετάδοσης πακέτων δεδομένων στα κανάλια δεδομένων. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μείωση του πλήθους των ενεργών σταθμών B_{rc} προκαλώντας μικρότερες τιμές καθυστέρησης D_{rc} . Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να παρατηρηθούν στο Σχήμα 5-5 που παρουσιάζει την καθυστέρηση D , D_{rc} ως συνάρτηση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων S_d , $S_{d,rc}$, για $M=50$, $N=10$, $R=5$ και $\nu=20,25,30$ κανάλια ελέγχου, τόσο στην περίπτωση που δεν λαμβάνονται υπόψη οι συγκρούσεις στον προορισμό, όσο και στην περίπτωση που συνυπολογίζονται. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η επίδραση των συγκρούσεων στον προορισμό γίνεται πιο έντονη όσο ο αριθμός ν αυξάνει, γεγονός που συμφωνεί με τα προηγούμενα σχόλια.



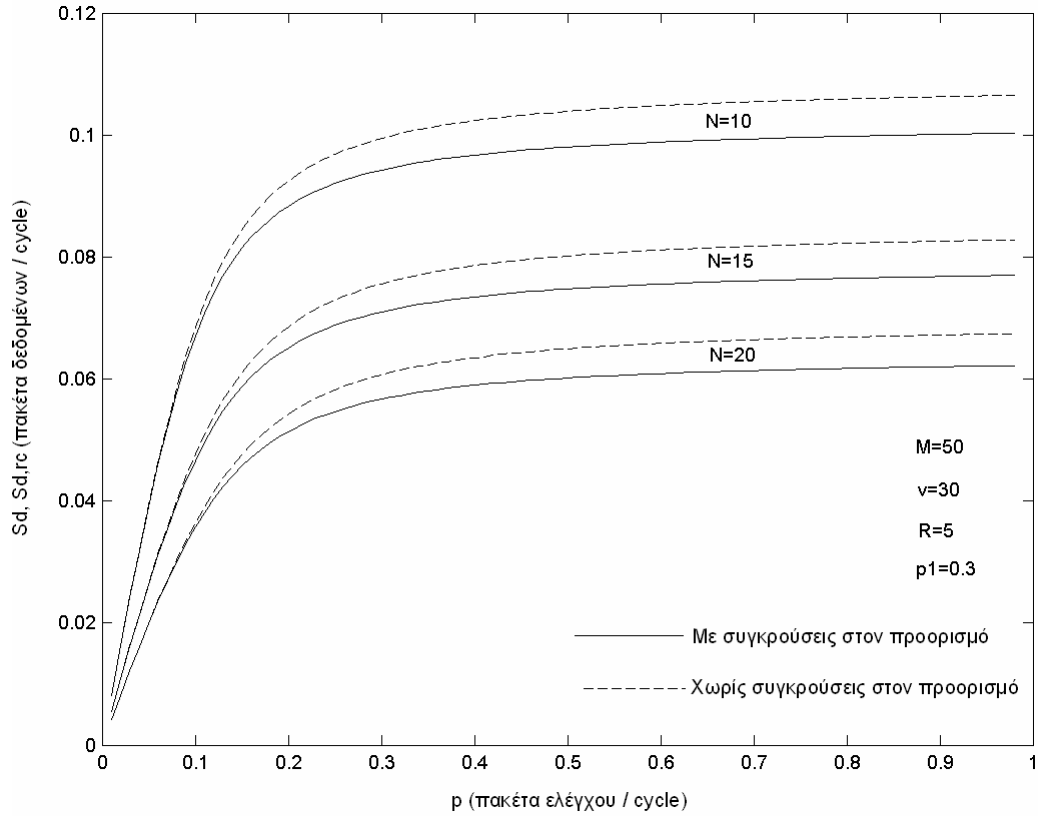
Σχήμα 5-5. Καθυστέρηση D , D_{rc} ως προς τη διέλευση S_d , $S_{d,rc}$ για $\nu=20,25,30$

Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται στο Σχήμα 5-6 που παρουσιάζει τη μέση τιμή της απόρριψης στον προορισμό P_{rej} ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p για $M=50$, $N=10$, $R=5$ και $\nu=20,25,30$ κανάλια ελέγχου. Πράγματι, η αύξηση του αριθμού ν προκαλεί αύξηση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων και συνεπακόλουθα αύξηση της P_{rej} .

Αντίθετα, η μεταβολή του αριθμού N οδηγεί σε ανάστροφη συμπεριφορά. Αυτό καταδεικνύεται στο Σχήμα 5-7 που παρουσιάζει τη διέλευση ανά κανάλι δεδομένων S_d , $S_{d,rc}$ ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p , για $M=50$, $\nu=30$, $R=5$ και $N=10,15,20$ κανάλια δεδομένων, τόσο στην περίπτωση που αγνοούνται οι συγκρούσεις στον προορισμό, όσο και στην περίπτωση συνυπολογίζονται. Με άλλα λόγια, η αύξηση του N προκαλεί μείωση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$. Και αυτό γιατί η αύξηση του αριθμού N οδηγεί σε αύξηση της πιθανότητας επιτυχούς μετάδοσης στα κανάλια δεδομένων και συνεπώς σε αύξηση της πιθανότητας απόρριψης εξαιτίας συγκρούσεων στον προορισμό. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται, για παράδειγμα, για $p=0.9$ και $M=50$, $\nu=30$, $R=5$ όπου η $S_{d,rc}$ είναι μικρότερη της S_d : κατά 5.82% για $N=10$, κατά 7.01% για $N=15$ και κατά 7.72% για $N=20$.

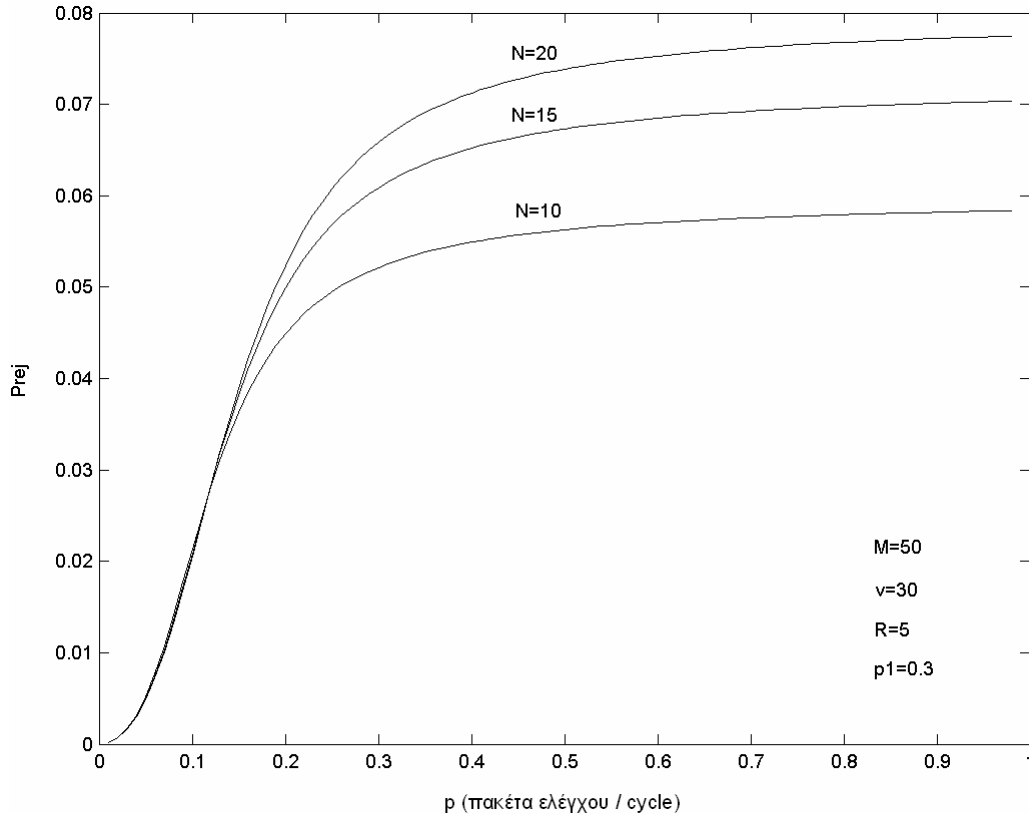


Σχήμα 5-6. Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $v=20,25,30$



Σχήμα 5-7. Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $N=10,15,20$

Τα παραπάνω συμπεράσματα επαληθεύονται στο Σχήμα 5-8 που παρουσιάζει την μέση τιμή της πιθανότητας απόρριψης εξαιτίας συγκρούσεων στον προορισμό P_{rej} ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p για $M=50$, $v=30$, $R=5$ χρονικές σχισμές και $N=10,15,20$ κανάλια δεδομένων. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η αύξηση του αριθμού N προκαλεί μείωση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων και συνεπακόλουθα αύξηση της P_{rej} .

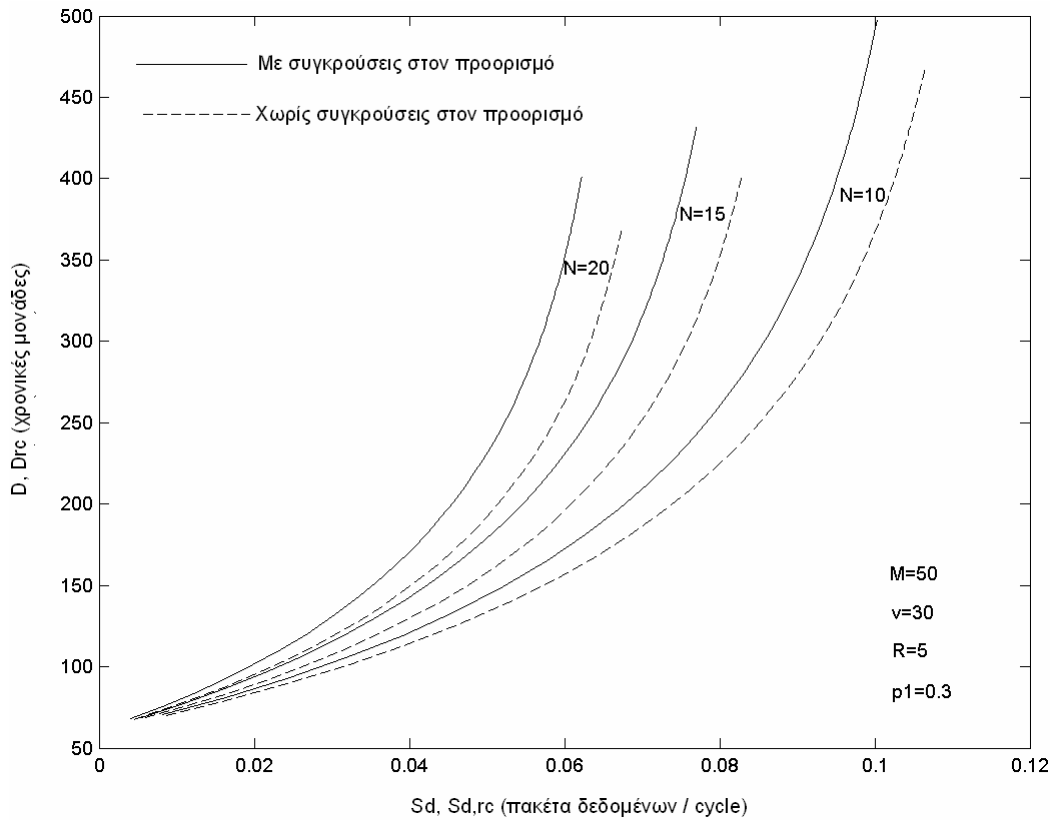


Σχήμα 5-8. Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $N=10,15,20$

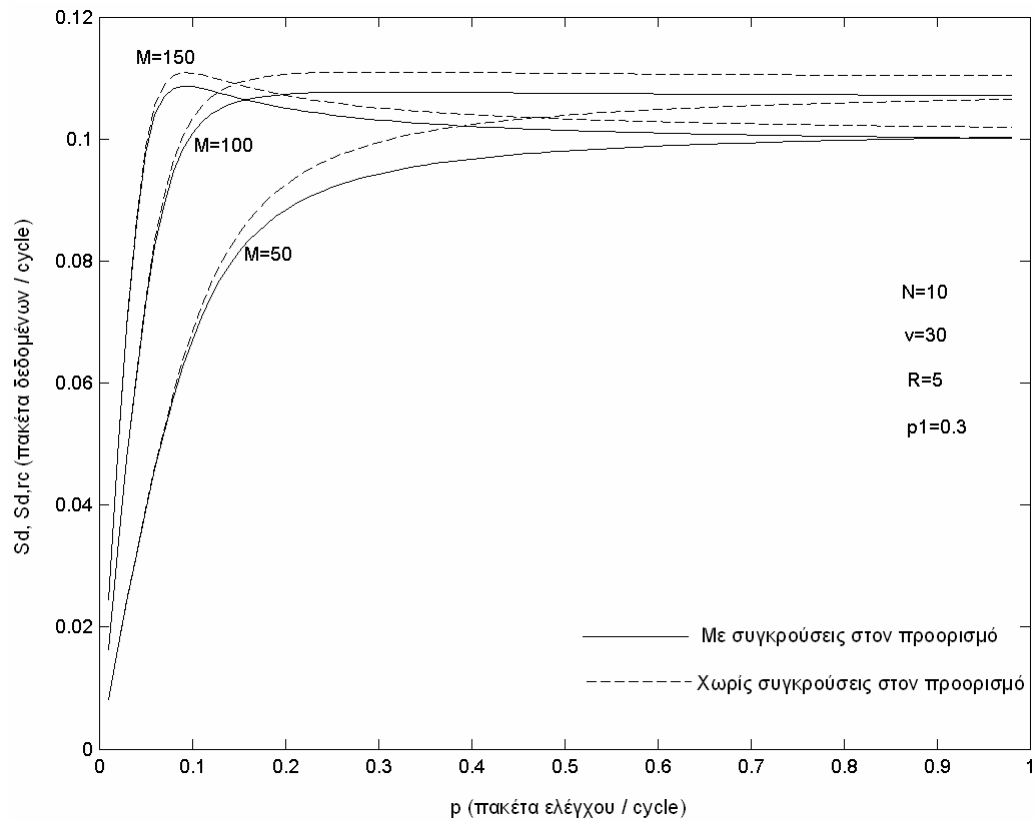
Είναι προφανές ότι με την αύξηση του αριθμού N ο αριθμός των ενεργών σταθμών B_{rc} αυξάνει, εξαιτίας της αύξησης των συγκρούσεων στον προορισμό. Το γεγονός αυτό προκαλεί σημαντική αύξηση της καθυστέρησης D_{rc} . Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 5-9 που παρουσιάζει την καθυστέρηση D , D_{rc} ως συνάρτηση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων S_d , $S_{d,rc}$, για $M=50$, $v=30$, $R=5$ και $N=10,15,20$ κανάλια δεδομένων, τόσο στην περίπτωση που δεν λαμβάνονται υπόψη οι συγκρούσεις στον προορισμό, όσο και στην περίπτωση που λαμβάνονται.

Αντίθετα, η διέλευση ανά κανάλι δεδομένων επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό από τις συγκρούσεις στον προορισμό όταν ο πληθυσμός των σταθμών είναι μεγάλος. Το γεγονός αυτό μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 5-10 που παρουσιάζει τη διέλευση ανά κανάλι δεδομένων S_d , $S_{d,rc}$ ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p , για $N=10$, $v=30$, $R=5$ χρονικές σχισμές και $M=50,100,150$ σταθμούς, τόσο στην περίπτωση που δεν λαμβάνονται υπόψη οι συγκρούσεις στον προορισμό, όσο και στην περίπτωση που λαμβάνονται. Πράγματι, η διαφορά μεταξύ των S_d , $S_{d,rc}$ μειώνεται καθώς ο αριθμός M αυξάνει. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι για δεδομένη τιμή του R και για σταθερή τιμή των v , N και p , η αύξηση του αριθμού M προκαλεί αύξηση του φορτίου και συνεπώς αύξηση των συγκρούσεων στα κανάλια ελέγχου. Το γεγονός αυτό προκαλεί μείωση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων και επομένως μείωση του ρυθμού των συγκρούσεων στον προορισμό. Για

παράδειγμα, για $p=0.9$, και $N=10$, $v=30$, $R=5$ η $S_{d,rc}$ είναι μικρότερη της S_d : κατά 5.82% για $M=50$, κατά 2.92% για $M=100$ και κατά 1.77% για $M=150$.

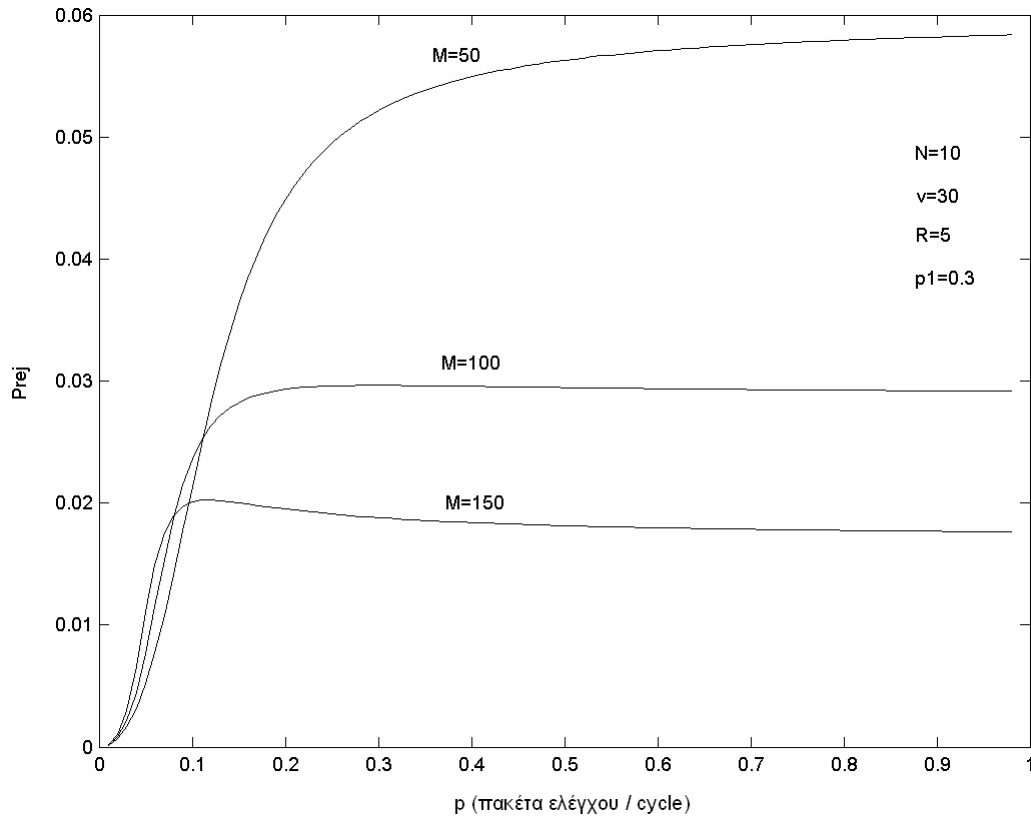


Σχήμα 5-9. Καθυστέρηση D, D_{rc} ως προς τη διέλευση $S_d, S_{d,rc}$ για $N=10,15,20$



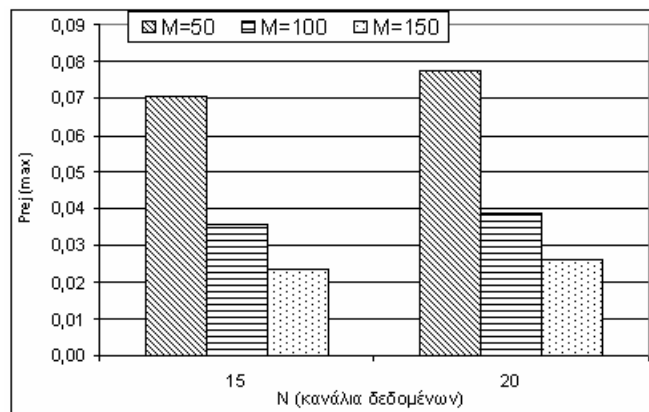
Σχήμα 5-10. Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $M=50,100,150$

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται στο Σχήμα 5-11 που παρουσιάζει τη μέση τιμή της πιθανότητας απόρριψης λόγω συγκρούσεων στον προορισμό P_{rej} ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης ρ για $N=10$, $\nu=30$, $R=5$ και $M=50,100,150$ σταθμούς.



Σχήμα 5-11. Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $M=50,100,150$

Είναι προφανές ότι η απόδοση του συστήματος εξαρτάται από τη σχέση ανάμεσα στις παραμέτρους ν , N και M . Ειδικότερα, ο αριθμός ν συνδέεται με τις συγκρούσεις στα κανάλια ελέγχου, ενώ ο αριθμός N σχετίζεται με τις συγκρούσεις στα κανάλια δεδομένων. Αντίθετα, ο συνδυασμός των N και M καθορίζει την επίδραση των συγκρούσεων στον προορισμό. Τα συμπεράσματα αυτά επαληθεύονται στο Σχήμα 5-12 που παρουσιάζει την μέγιστη τιμή της πιθανότητας απόρριψης εξαιτίας συγκρούσεων στον προορισμό $P_{rej(max)}$ για $\nu=30$, $R=5$ και $M=50,100,150$ σταθμούς και $N=15,20$ κανάλια δεδομένων. Όπως είναι αναμενόμενο, η $P_{rej(max)}$ είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του M για δεδομένο N , ενώ είναι μια αύξουσα συνάρτηση του N για δεδομένο M .



Σχήμα 5-12. Μέγιστη πιθανότητα απόρριψης $P_{rej(max)}$ για $M=50,100,150$ και $N=15,20$

5.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται ένα πρωτόκολλο σύγχρονης μετάδοσης στα WDM κανάλια ενός τοπικού δικτύου τοπολογίας παθητικού αστέρα που εκμεταλλεύεται την πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου και συμμετρικά δικαιώματα πρόσβασης σε αυτή.

Η μελέτη αυτή εισάγει την πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου προκειμένου να βελτιώσει την αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε σχέση με προηγούμενες μελέτες που χρησιμοποιούν ένα μοναδικό κανάλι ελέγχου. Έτσι, η προτεινόμενη πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου βελτιστοποιεί την απόδοση του δικτύου, αφού ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις στα κανάλια ελέγχου, γεγονός που επιδρά καθοριστικά στη βελτιστοποίηση της διέλευσης.

Το προτεινόμενο πρωτόκολλο πρόσβασης συνυπολογίζει την επίδραση της καθυστέρησης διάδοσης της οπτικής πληροφορίας στην απόδοση του δικτύου. Συγκεκριμένα, η μελέτη αξιοποιεί την καθυστέρηση διάδοσης ως χρόνο επιβεβαίωσης λήψης των πακέτων ελέγχου για την αποφυγή των συγκρούσεων στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό. Επίσης, αναπτύσσεται ένας αποδοτικός αλγόριθμος αποφυγής των συγκρούσεων στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό που αξιοποιεί την πληροφορία ελέγχου που μεταδίδεται επιτυχώς στην MCA και βελτιώνει σημαντικά την απόδοση.

Για τον υπολογισμό των μέτρων αποδοτικότητας του προτεινόμενου συστήματος αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα μαρκοβιανής ανάλυσης για δεδομένο πληθυσμό σταθμών που συνυπολογίζουν την καθυστέρηση διάδοσης. Το ένα μοντέλο μαρκοβιανής ανάλυσης αγνοεί τις συγκρούσεις στον προορισμό, ενώ το άλλο τις συνυπολογίζει. Η συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων των δύο μαρκοβιανών μοντέλων συμβάλει στην ποσοτικοποίηση της επίδρασης των συγκρούσεων στον προορισμό στην απόδοση του συστήματος. Σημαντική συμβολή στη διατύπωση των δύο μαρκοβιανών μοντέλων έχει η μαρκοβιανή ανάλυση της συμπεριφοράς πολυδιαυλικών δικτύων συμμετρικής πρόσβασης που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.

Τα αποτελέσματα της αναλυτικής μελέτης επιβεβαιώθηκαν από αυτά της εξομοίωσης που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια εξομοιωτικού μοντέλου διακριτών γεγονότων που αναπτύχθηκε. Τα αριθμητικά αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η απόδοση του προτεινόμενου δικτύου συμμετρικής πρόσβασης εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους [J.1],[C.1]:

- το πλήθος v των καναλιών ελέγχου που συγκροτούν την MCA
- το πλήθος N των καναλιών δεδομένων
- το πλήθος M των σταθμών
- τη μέση τιμή της πιθανότητας απόρριψης πακέτων στον προορισμό P_{rej}
- την κανονικοποιημένη τιμή της καθυστέρησης διάδοσης R .

Επίσης, η απόδοση του συστήματος συμμετρικής πρόσβασης στην MCA επηρεάζεται καθοριστικά από τη τιμή του λόγου της καθυστέρησης διάδοσης προς το χρόνο μετάδοσης του πακέτου δεδομένων. Συγκεκριμένα, η απόδοση του συστήματος περιορίζεται δραματικά με την αύξηση της τιμής του παραπάνω λόγου.

Συμπληρωματικά, τα αριθμητικά αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος συμμετρικής πρόσβασης στην MCA εξαρτάται από τις συγκρούσεις στον προορισμό. Η μελέτη απέδειξε ότι τα συστήματα μικρού πληθυσμού σταθμών επηρεάζονται περισσότερο από τις απώλειες εξαιτίας συγκρούσεων στον προορισμό σε σχέση με συστήματα μεγαλύτερου πληθυσμού.

Κεφάλαιο 6 : Αναλυτική Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου σε Τοπικά WDM Δίκτυα Τοπολογίας Παθητικού Αστήρα - Ασύμμετρη Πρόσβαση

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η απόδοση του τοπικού WDM δικτύου τοπολογίας δακτυλίου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5 εισάγοντας ασύμμετρα δικαιώματα πρόσβασης των σταθμών στη MCA. Η τροποποίηση αυτή στο πρωτόκολλο πρόσβασης στα κανάλια ελέγχου της MCA αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου και την ελαχιστοποίηση των απωλειών εξαιτίας συγκρούσεων σε αυτά.

Έτσι, στο κεφάλαιο αυτό θεωρείται ότι το σύνολο των v καναλιών ελέγχου διαχωρίζεται δυναμικά σε δύο ομάδες καναλιών ελέγχου, ανάλογα με τα δικαιώματα πρόσβασης των σταθμών σε αυτά. Συγκεκριμένα, το σύνολο των v καναλιών ελέγχου διαχωρίζεται:

- στην ομάδα καναλιών ελέγχου ελεuthέρων σταθμών: σε κάθε κύκλο, στην ομάδα αυτή έχουν δικαίωμα μετάδοσης πακέτων ελέγχου μόνο οι ελεuthεροι σταθμοί. Το πλήθος των καναλιών ελέγχου αυτής της ομάδας είναι v_f .
- στην ομάδα καναλιών ελέγχου ενεργών σταθμών: σε κάθε κύκλο, στην ομάδα αυτή έχουν δικαίωμα μετάδοσης πακέτων ελέγχου μόνο οι ενεργοί σταθμοί. Το πλήθος των καναλιών ελέγχου αυτής της ομάδας είναι v_b .

Ο διαχωρισμός των v καναλιών ελέγχου στις ομάδες των v_f και v_b καναλιών πραγματοποιείται δυναμικά σε κάθε χρονικό κύκλο, ανάλογα με το πλήθος των ενεργών σταθμών, με γνώμονα τη μεγιστοποίηση της διέλευσης του δικτύου. Έτσι, επιτυγχάνεται μέγιστη αξιοποίηση της MCA και του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Επίσης, ο διαχωρισμός της MCA, σε συνδυασμό με τον ακολουθούμενο αλγόριθμο αποφυγής συγκρούσεων πακέτων στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό, που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5 παρέχουν βέλτιστη αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα ασύμμετρης πρόσβασης.

Όπως και στο Κεφάλαιο 5, η απόδοση του προτεινόμενου δικτύου πολυδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου ασύμμετρης πρόσβασης επηρεάζεται από τις ακόλουθες παραμέτρους: τις συγκρούσεις πακέτων στα WDM κανάλια, τις συγκρούσεις πακέτων στον προορισμό, την καθυστέρηση διάδοσης του οπτικού σήματος στην οπτική ίνα, το πλήθος των οπτικών εκπομπών και δεκτών ανά σταθμό, το χρόνο συντονισμού των οπτικών εκπομπών και δεκτών μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων μετάδοσης κ.α.

Στη μελέτη αξιοποιείται η καθυστέρηση διάδοσης του οπτικού σήματος στα WDM κανάλια για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την αποφυγή των συγκρούσεων τόσο στα κανάλια όσο και στον προορισμό. Όπως ισχύει στο Κεφάλαιο 5, στη μελέτη η καθυστέρηση διάδοσης αποτελεί τον απαιτούμενο χρόνο επιβεβαίωσης λήψης κατά την ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου προκειμένου να εξαλειφθούν πλήρως οι απώλειες εξαιτίας των συγκρούσεων.

Επίσης, η αξιοποίηση της MCA στο προτεινόμενο WDM δίκτυο παρέχει σημαντικό πλεονέκτημα, εξασφαλίζοντας μικρότερο φόρτο για την επεξεργασία της πληροφορίας ελέγχου σε σύγκριση με την αρχιτεκτονική που απασχολεί ένα μόνο κανάλι ελέγχου. Και αυτό γιατί η MCA περιορίζει αποφασιστικά τη συμφόρηση λόγω της ηλεκτρονικής επεξεργασίας της πληροφορίας ελέγχου και καθιστά την απόδοση του δικτύου πιο αποτελεσματική.

Στο κεφάλαιο αυτό προτείνεται ένα αποδοτικό πρωτόκολλο σύγχρονης μετάδοσης σε οπτικό WDM δίκτυο τοπολογίας παθητικού αστέρα που χρησιμοποιεί την MCA για τη μείωση της συμφόρησης λόγω της ηλεκτρονικής επεξεργασίας της πληροφορίας ελέγχου και τα ασύμμετρα δικαιώματα πρόσβασης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης.

Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του προτεινόμενου δικτύου πραγματοποιείται με χρήση αναλυτικών εργαλείων μαρκοβιανής ανάλυσης και προσδιορίζονται τα μέτρα αποδοτικότητας. Για τη αναλυτική μοντελοποίηση αξιοποιήθηκαν τα αναλυτικά συμπεράσματα της μελέτης των πολυδιαυλικών δικτύων ασύμμετρης πρόσβασης που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Η επίδραση του φαινομένου των συγκρούσεων στον προορισμό μελετάται για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου και ποσοτικοποιείται ο περιορισμός της απόδοσης του πρωτοκόλλου εξαιτίας του. Έτσι, αναπτύσσονται δύο περιπτώσεις μοντέλων μαρκοβιανής ανάλυσης:

- *το μοντέλο ανάλυσης πρωτοκόλλου που αγνοεί τις συγκρούσεις στον προορισμό:* η απώλεια πακέτων οφείλεται στις συγκρούσεις στα κανάλια ελέγχου και ο αλγόριθμος αποφυγής των συγκρούσεων εξαλείφει τις συγκρούσεις στα κανάλια δεδομένων.
- *το μοντέλο ανάλυσης πρωτοκόλλου που συνυπολογίζει τις συγκρούσεις στον προορισμό:* η απώλεια πακέτων οφείλεται στις συγκρούσεις στα κανάλια ελέγχου και ο αλγόριθμος αποφυγής των συγκρούσεων εξαλείφει τις συγκρούσεις στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό.

Τα παραπάνω μοντέλα ανάλυσης πρωτοκόλλων οδηγούν στην αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου δικτύου και στον καθορισμό των μέτρων αποδοτικότητας τα οποία είναι:

- η μέση διέλευση του δικτύου
- η μέση καθυστέρηση των πακέτων
- το μέσο πλήθος των ενεργών σταθμών
- η μέση πιθανότητα απόρριψης πακέτων στο προορισμό.

Η βελτιστοποίηση της απόδοσης του προτεινόμενου δικτύου -που επιτυγχάνεται λόγω των ασύμμετρων δικαιωμάτων πρόσβασης στην MCA- μελετάται μέσω της συγκριτικής παράθεσης των αναλυτικών και εξομοιωτικών αποτελεσμάτων με αυτά του πρωτοκόλλου συμμετρικής πρόσβασης που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.

Τα αποτελέσματα της διδακτορικής έρευνας για το προτεινόμενο δίκτυο ασύμμετρης πρόσβασης στην πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου τοπολογίας παθητικού αστέρα δίνονται στις μελέτες [J.1],[J.2],[C.2].

6.1 Μοντέλο δικτύου και πρωτόκολλο πρόσβασης

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται το δίκτυο παθητικού αστέρα που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5. Το μοντέλο δικτύου και οι θεωρήσεις παραμένουν οι ίδιες. Επιπλέον, το σύνολο των v καναλιών ελέγχου διαχωρίζεται σε δύο ομάδες καναλιών ελέγχου, ως εξής: $v = v_f + v_b$. Με άλλα λόγια το σύνολο των v καναλιών ελέγχου χωρίζεται σε κάθε κύκλο, ανάλογα με το πλήθος των ενεργών σταθμών:

- στο υποσύνολο που χρησιμοποιείται από τους ελεύθερους σταθμούς και αποτελείται από v_f το πλήθος κανάλια ελέγχου,
- στο υποσύνολο που χρησιμοποιείται από τους ενεργούς σταθμούς και αποτελείται από v_b το πλήθος κανάλια ελέγχου.

Το μοντέλο του δικτύου παθητικού αστέρα πολυδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου ασύμμετρης πρόσβασης είναι παρόμοιο με αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1.

Στο προτεινόμενο πρωτόκολλο ασύμμετρης πρόσβασης, στην αρχή κάθε κύκλου όλοι οι σταθμοί γνωρίζουν τον αριθμό των ενεργών σταθμών. Η γνώση αυτή ορίζει το βέλτιστο διαχωρισμό των v καναλιών ελέγχου στις ομάδες των v_f και v_b καναλιών ελέγχου, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη αξιοποίηση των καναλιών ελέγχου.

Στην αρχή κάθε κύκλου, αν ένας σταθμός επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο δεδομένων επιλέγει τυχαία ένα από τα N κανάλια δεδομένων για τη μετάδοση. Στη συνέχεια επιλέγει τυχαία ένα κανάλι ελέγχου για να αποστείλει το πακέτο ελέγχου. Συγκεκριμένα, αν ο σταθμός είναι ελεύθερος επιλέγει τυχαία ένα κανάλι από το σύνολο των v_f καναλιών ελέγχου, ενώ αν ο σταθμός είναι ενεργός επιλέγει τυχαία ένα κανάλι από το σύνολο των v_b καναλιών ελέγχου. Η υπόλοιπη διαδικασία αποστολής και λήψης πακέτων είναι η ίδια με αυτή που δίνεται στο Κεφάλαιο 5.

Στη μαθηματική μοντελοποίηση που δίνεται στην επόμενη παράγραφο, η πιθανότητα γέννησης ενός πακέτου δεδομένων από έναν ελεύθερο σταθμό στην αρχή ενός κύκλου συμβολίζεται με p . Παρόμοια, η πιθανότητα επανεκπομπής ενός πακέτου δεδομένων από έναν ενεργό σταθμό στην αρχή ενός κύκλου συμβολίζεται με r .

6.2 Ανάλυση πρωτοκόλλου αγνοώντας τις συγκρούσεις στον προορισμό

Το εξεταζόμενο σύστημα περιγράφεται από μια μαρκοβιανή αλυσίδα διακριτού χρόνου. Η κατάσταση του συστήματος δηλώνεται ως X_t , $t=1,2,\dots$, όπου η τυχαία μεταβλητή $X_t=0,1,\dots,M$ εκφράζει τον αριθμό των ενεργών σταθμών στην αρχή ενός κύκλου. Θεωρούμε τις τυχαίες μεταβλητές H_t και A_t όπως στο Κεφάλαιο 5. Έστω:

$SB_k = 0$ αριθμός των επιτυχών επαναμεταδόσεων πακέτων ελέγχου στα v_b κανάλια ελέγχου, υπό την προϋπόθεση ότι k ενεργοί σταθμοί επιχειρούν μετάδοση κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, $0 \leq SB_k \leq \min(v_b, k)$.

$SF_m = 0$ αριθμός των επιτυχών μεταδόσεων πακέτων ελέγχου στα v_f κανάλια ελέγχου, υπό την προϋπόθεση ότι m ελεύθεροι σταθμοί επιχειρούν μετάδοση κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, $0 \leq SF_m \leq \min(v_f, m)$.

$A_n = 0$ αριθμός των επιτυχών (επανα)μεταδόσεων πακέτων δεδομένων στα N κανάλια δεδομένων, υπό την προϋπόθεση ότι συνέβησαν n επιτυχείς (επανα)μεταδόσεις στα v κανάλια ελέγχου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, $SB_k + SF_m = n$ για κάθε $SB_k + SF_m > 0$.

Η πιθανότητα $\Pr[SB_k = n]$ να συμβούν n επιτυχίες από τις k επαναμεταδόσεις στα v_b κανάλια ελέγχου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, δίνεται από τη σχέση (4.1) αντικαθιστώντας το N με το v_b .

Η πιθανότητα $\Pr[SF_m = s]$ να συμβούν s επιτυχίες από τις m μεταδόσεις στα v_f κανάλια ελέγχου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, δίνεται από τη σχέση (4.1) αντικαθιστώντας το N με το v_f .

Η πιθανότητα $\Pr[A_n = r]$ να συμβούν r επιτυχείς μεταδόσεις πακέτων δεδομένων στα N κανάλια δεδομένων, υπό την προϋπόθεση ότι συνέβησαν n επιτυχείς (επανα)μεταδόσεις στα n κανάλια ελέγχου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, δίνεται από τη σχέση (4.2).

Η συνάρτηση $\Phi(x, y, z, w, s)$ ορίζεται ως το γινόμενο της πιθανότητας να συμβούν y επιτυχείς από x επαναμεταδόσεις στα v_b κανάλια ελέγχου, επί την πιθανότητα να συμβούν w επιτυχείς από z μεταδόσεις στα v_f κανάλια ελέγχου επί την πιθανότητα να μεταδοθούν επιτυχώς s πακέτα δεδομένων στα N κανάλια δεδομένων κατά την διάρκεια ενός κύκλου. Έτσι:

$$\Phi(x, y, z, w, s) = \Pr[SB_x = y] \Pr[SF_z = w] \Pr[A_{y+w} = s] \quad (6.1)$$

Η μαρκοβιανή αλυσίδα $\{X_t, t = 0, 1, \dots\}$ είναι ομογενής, αperiοδική και ανάγωγη. Οι πιθανότητες μετάβασης ενός βήματος $P_{ij} = (\Pr[X_{t+1} = j \mid X_t = i])$ δίνονται από τις σχέσεις:

Περίπτωση A: Αν $j < i - N$ τότε:

$$P_{ij} = 0 \quad (6.2)$$

Περίπτωση B: Αν $j = i - N$ τότε:

$$P_{ij} = Q_{0i} \left(\sum_{n=N}^{\min(i, v_b)} q_{ni} \Phi(n, n, 0, 0, N) + \sum_{n=N+2}^i q_{ni} \sum_{y=N}^{\min(n-2, v_b-1)} \Phi(n, y, 0, 0, N) \right) \quad (6.3)$$

Περίπτωση C: Αν $i - N < j < i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} \sum_{n=i-j}^{\min(i, v_b)} q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i, N-i+j, v_f)} Q_{mi} \Phi(n, n, m, m, m+i-j) + \\ \sum_{n=i-j+2}^{\min(i, v_b)} q_{ni} \sum_{m=2}^{\min(M-i, N-i+j)} Q_{mi} \sum_{x=\max(0, m+i-j-n)}^{\min(m-2, v_f-1)} \Phi(n, n, m, x, m+i-j) + \\ \sum_{n=i-j+2}^i q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i, N-i+j, v_f) \min(n-2, v_b-1)} Q_{mi} \sum_{y=i-j}^{\min(m-2, v_f-1)} \Phi(n, y, m, m, m+i-j) + \\ \sum_{n=i-j+4}^i q_{ni} \sum_{m=2}^{\min(M-i, N-i+j) \min(n-2, v_b-1)} Q_{mi} \sum_{y=i-j}^{\min(m-2, v_f-1)} \sum_{x=\max(0, m+i-j-y)} \Phi(n, y, m, x, m+i-j) \end{cases} \quad (6.4)$$

Περίπτωση D: Αν $j = i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} q_{0i} Q_{0i} \Phi(0, 0, 0, 0, 0) + \sum_{n=2}^{\min(i, v_b)} q_{ni} \sum_{m=2}^{\min(M-i, N)} Q_{mi} \sum_{x=\max(0, m-n)}^{\min(m-2, v_f-1)} \Phi(n, n, m, x, m) + \\ Q_{0i} \sum_{n=2}^i q_{ni} \Phi(n, 0, 0, 0, 0) + \sum_{n=2}^i q_{ni} \sum_{m=1}^{\min(M-i, N, v_f)} Q_{mi} \sum_{y=0}^{\min(n-2, v_b-1)} \Phi(n, y, m, m, m) + \\ \sum_{n=0}^{\min(i, v_b)} q_{ni} \sum_{m=1}^{\min(M-i, N, v_f)} Q_{mi} \Phi(n, n, m, m, m) + \sum_{n=4}^i q_{ni} \sum_{m=2}^{\min(M-i, N)} Q_{mi} \sum_{y=0}^{\min(n-2, v_b-1) \min(m-2, v_f-1)} \sum_{x=\max(0, m-y)} \Phi(n, y, m, x, m) \end{cases} \quad (6.5)$$

Περίπτωση E: Αν $j > i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} Q_{j-i,i} \sum_{n=0, n \neq 1}^i q_{ni} \Phi(n, 0, j-i, 0, 0) + \sum_{n=0}^{\min(i, v_b)} q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i, v_f)} Q_{mi} \Phi(n, n, m, m, m+i-j) + \\ \sum_{n=0}^{\min(i, v_b)} q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i, N-i+j)} Q_{mi} \sum_{x=\max(0, m+i-j-n)}^{\min(m-2, v_f-1)} \Phi(n, n, m, x, m+i-j) + \\ \sum_{n=2}^i q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i, v_f)} Q_{mi} \sum_{y=0}^{\min(n-2, v_b-1)} \Phi(n, y, m, m, m+i-j) + \\ \sum_{n=2}^i q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i, N-i+j)} Q_{mi} \sum_{y=0}^{\min(n-2, v_b-1)} \sum_{x=\max(0, m+i-j-y)}^{\min(m-2, v_f-1)} \Phi(n, y, m, x, m+i-j) \end{cases} \quad (6.6)$$

όπου τα $q_{i,n}$ και $Q_{i,n}$ δίνονται από τις σχέσεις (4.9) και (4.10) αντίστοιχα .

6.2.1 Μέτρα αποδοτικότητας

Οι πιθανότητες μόνιμης κατάστασης υπολογίζονται επιλύοντας το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων (4.12) και (4.13) για το σύστημα που ασύμμετρης πρόσβασης στην MCA.

Η υπό συνθήκη διέλευση $S(i)$ ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή του ρυθμού εξόδου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, υπό την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των ενεργών σταθμών στην αρχή του κύκλου είναι i , δηλαδή $S(i)=E[A_t | X_t = i]$. Είναι:

$$S(i) = \begin{cases} \sum_{k=1}^N k \left(\sum_{n=\max(k, M-i)-(M-i)}^{\min(i, v_b)} q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i, v_f)} Q_{mi} \Phi(n, n, m, m, k) + \right. \\ \sum_{n=\max(k, M-i)-(M-i)}^{\min(i, v_b)} q_{ni} \sum_{m=0}^{M-i} Q_{mi} \sum_{x=0}^{\min(m-2, v_f-1)} \Phi(n, n, m, x, k) + \\ \sum_{n=\max(k, M-i)-(M-i)}^i q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i, v_f)} Q_{mi} \sum_{y=0}^{\min(n-2, v_b-1)} \Phi(n, y, m, m, k) + \\ \left. \sum_{n=\max(k, M-i)-(M-i)}^i q_{ni} \sum_{m=0}^{M-i} Q_{mi} \sum_{x=0}^{\min(m-2, v_f-1)} \sum_{y=\max(k-x, 0)}^{\min(n-2, v_b-1)} \Phi(n, y, m, x, k) \right) \end{cases} \quad (6.7)$$

Τα υπόλοιπα μέτρα αποδοτικότητας δίνονται από τις σχέσεις (5.8)-(5.10).

6.3 Ανάλυση πρωτοκόλλου συνυπολογίζοντας τις συγκρούσεις στον προορισμό

Όπως στην παράγραφο 6.2, το εξεταζόμενο σύστημα περιγράφεται από μια μαρκοβιανή αλυσίδα διακριτού χρόνου. Η κατάσταση του συστήματος δηλώνεται ως X_t , $t=1,2,\dots$, όπου η τυχαία μεταβλητή $X_t=0,1,\dots,M$ εκφράζει τον αριθμό των ενεργών σταθμών στην αρχή ενός κύκλου. Οι τυχαίες μεταβλητές H_t , A_t , SB_k , SF_m και A_n της παραγράφου 6.2 λαμβάνονται υπόψη. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη οι τυχαίες μεταβλητές C_r και C_t της παραγράφου 5.3.

Η πιθανότητα $\Pr[C_r = u]$ να παραληφθούν επιτυχώς από τον προορισμό u πακέτα δεδομένων, υπό την προϋπόθεση ότι μεταδόθηκαν επιτυχώς στα N κανάλια δεδομένων r πακέτα δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, δίνεται από τη σχέση (5.11).

Η συνάρτηση $\Phi_{rc}(x,y,z,w,s,r)$ ορίζεται ως το γινόμενο της συνάρτησης $\Phi(x,y,z,w,s)$ της σχέσης (6.1), επί την πιθανότητα να παραληφθούν επιτυχώς από τον προορισμό r πακέτα δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου. Είναι:

$$\Phi_{rc}(x,y,z,w,s,r) = \Pr[SB_x = y] \Pr[SF_z = w] \Pr[A_{y+w} = s] \Pr[C_s = r] \quad (6.8)$$

όπου: x, y, z, w, s ορίζονται στη σχέση (6.1) και r είναι ο αριθμός των πακέτων δεδομένων που παρελήφθησαν επιτυχώς από τον προορισμό κατά τη διάρκεια ενός κύκλου.

Η μαρκοβιανή αλυσίδα $\{X_t, t = 0, 1, \dots\}$ είναι ομογενής, απεριοδική και ανάγωγη. Οι πιθανότητες μετάβασης ενός βήματος $P_{ij} = (\Pr[X_{t+1} = j | X_t = i])$ δίνονται από τις σχέσεις:

Περίπτωση A: $\forall j < i - N$ τότε:

$$P_{ij} = 0 \quad (6.9)$$

Περίπτωση B: $\forall j = i - N$ τότε:

$$P_{ij} = Q_{0i} \left(\sum_{n=N}^{\min(i, v_b)} q_{ni} \Phi_{rc}(n, n, 0, 0, N, N) + \sum_{n=N+2}^i q_{ni} \sum_{y=N}^{\min(n-2, v_b-1)} \Phi_{rc}(n, y, 0, 0, N, N) \right) \quad (6.10)$$

Περίπτωση C: $\forall i - N < j < i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} \sum_{n=i-j}^{\min(i, v_a)} q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i, N-i+j, v_r)} Q_{mi} \sum_{l=m+i-j}^{\min(m+n, N)} \Phi_{rc}(n, n, m, m, l, m+i-j) + \\ \sum_{n=i-j+2}^{\min(i, v_a)} q_{ni} \sum_{m=2}^{\min(M-i, N-i+j)} Q_{mi} \sum_{x=\max(0, m+i-j-n)}^{\min(m-2, v_r-1)} \sum_{l=m+i-j}^{\min(x+n, N)} \Phi_{rc}(n, n, m, x, l, m+i-j) + \\ \sum_{n=i-j+2}^i q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i, N-i+j, v_r)} Q_{mi} \sum_{y=i-j}^{\min(n-2, v_a-1)} \sum_{l=m+i-j}^{\min(y+m, N)} \Phi_{rc}(n, y, m, m, l, m+i-j) + \\ \sum_{n=i-j+4}^i q_{ni} \sum_{m=2}^{\min(M-i, N-i+j)} Q_{mi} \sum_{y=i-j}^{\min(n-2, v_a-1)} \sum_{x=\max(0, m+i-j-y)}^{\min(m-2, v_r-1)} \sum_{l=m+i-j}^{\min(x+y, N)} \Phi_{rc}(n, y, m, x, l, m+i-j) \end{cases} \quad (6.11)$$

Περίπτωση D: $\forall j = i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} q_{0i} Q_{0i} \Phi_{rc}(0,0,0,0,0,0) + \sum_{n=0}^{\min(i,v_b)} q_{ni} \sum_{m=1}^{\min(M-i,v_f)} Q_{mi} \sum_{l=m}^{\min(n+m,N)} \Phi_{rc}(n,n,m,m,l,m) + \\ Q_{0i} \sum_{n=2}^i q_{ni} \Phi_{rc}(n,0,0,0,0,0) + \sum_{n=2}^i q_{ni} \sum_{m=2}^{\min(M-i,N)} Q_{mi} \sum_{x=\max(0,m-n)}^{\min(m-2,v_f-1)} \sum_{l=m}^{\min(x+n,N)} \Phi_{rc}(n,n,m,x,l,m) + \\ \sum_{n=2}^i q_{ni} \sum_{m=1}^{\min(M-i,N,v_f)} Q_{mi} \sum_{y=0}^{\min(n-2,v_b-1)} \sum_{l=m}^{\min(m+y,N)} \Phi_{rc}(n,y,m,m,l,m) + \\ \sum_{n=4}^i q_{ni} \sum_{m=2}^{\min(M-i,N)} Q_{mi} \sum_{y=0}^{\min(n-2,v_b-1)} \sum_{x=\max(0,m-y)}^{\min(m-2,v_f-1)} \sum_{l=m}^{\min(x+y,N)} \Phi_{rc}(n,y,m,x,l,m) \end{cases} \quad (6.12)$$

Περίπτωση Ε: Αν $j > i$ τότε:

$$P_{ij} = \begin{cases} Q_{j-i,i} \sum_{n=0,n \neq i}^i q_{ni} \Phi_{rc}(n,0,j-i,0,0,0) + \sum_{n=0}^{\min(i,v_b)} q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i,v_f)} Q_{mi} \sum_{l=m+i-j}^{\min(n+m,N)} \Phi_{rc}(n,n,m,m,l,m+i-j) + \\ \sum_{n=0}^{\min(i,v_b)} q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i,N-i+j)} Q_{mi} \sum_{x=\max(0,m+i-j-n)}^{\min(m-2,v_f-1)} \sum_{l=m+i-j}^{\min(n+x,N)} \Phi_{rc}(n,n,m,x,l,m+i-j) + \\ \sum_{n=2}^i q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i,v_f)} Q_{mi} \sum_{y=0}^{\min(n-2,v_b-1)} \sum_{l=m+i-j}^{\min(m+y,N)} \Phi_{rc}(n,y,m,m,l,m+i-j) + \\ \sum_{n=2}^i q_{ni} \sum_{m=j-i+1}^{\min(M-i,N-i+j)} Q_{mi} \sum_{y=0}^{\min(n-2,v_b-1)} \sum_{x=\max(0,m+i-j-y)}^{\min(m-2,v_f-1)} \sum_{l=m+i-j}^{\min(x+y,N)} \Phi_{rc}(n,y,m,x,l,m+i-j) \end{cases} \quad (6.13)$$

6.3.1 Μέτρα αποδοτικότητας

Οι πιθανότητες μόνιμης κατάστασης υπολογίζονται επιλύοντας το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων (4.12) και (4.13) για το σύστημα ασύμμετρης πρόσβασης στην MCA που λαμβάνει υπόψη του τις συγκρούσεις στον προορισμό.

Η υπό συνθήκη διέλευση $S_{rc}(i)$ ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή του ρυθμού εξόδου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, υπό την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των ενεργών σταθμών στην αρχή του κύκλου είναι i , δηλαδή $S_{rc}(i) = E[C_t | X_t = i]$. Είναι:

$$S_{rc}(i) = \begin{cases} \sum_{k=1}^N k \left(\sum_{n=\max(k,M-i)-(M-i)}^{\min(i,v_b)} q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i,v_f)} Q_{mi} \sum_{l=k}^{\min(n+m,N)} \Phi_{rc}(n,n,m,m,l,k) + \right. \\ \sum_{n=\max(k,M-i)-(M-i)}^{\min(i,v_b)} q_{ni} \sum_{m=0}^{M-i} Q_{mi} \sum_{x=0}^{\min(m-2,v_f-1)} \sum_{l=k}^{\min(n+x,N)} \Phi_{rc}(n,n,m,x,l,k) + \\ \sum_{n=\max(k,M-i)-(M-i)}^i q_{ni} \sum_{m=0}^{\min(M-i,v_f)} Q_{mi} \sum_{y=0}^{\min(n-2,v_b-1)} \sum_{l=k}^{\min(m+y,N)} \Phi_{rc}(n,y,m,m,l,k) + \\ \left. \sum_{n=\max(k,M-i)-(M-i)}^i q_{ni} \sum_{m=0}^{M-i} Q_{mi} \sum_{x=0}^{\min(m-2,v_f-1)} \sum_{y=0}^{\min(n-2,v_b-1)} \sum_{l=k}^{\min(x+y,N)} \Phi_{rc}(n,y,m,x,l,k) \right) \end{cases} \quad (6.14)$$

Τα υπόλοιπα μέτρα αποδοτικότητας δίνονται από τις σχέσεις (5.19)-(5.23).

6.4 Βελτιστοποίηση απόδοσης

Για την επίτευξη της βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος πραγματοποιούνται οι ακόλουθες διαπιστώσεις:

Η υπό συνθήκη διέλευση $S_{vb}(i)$ που προέρχεται από τα v_b κανάλια ελέγχου δίνεται από τη σχέση [43]:

$$S_{vb}(i) = ir \left(1 - \frac{r}{v_b}\right)^{i-1} \quad (6.15)$$

Όμοια, η υπό συνθήκη διέλευση $S_{vf}(i)$ που προέρχεται από τα v_f κανάλια ελέγχου δίνεται από τη σχέση:

$$S_{vb}(i) = (M - i)p \left(1 - \frac{p}{v_f}\right)^{M-i-1} \quad (6.16)$$

Συνολικά, η υπό συνθήκη διέλευση $S_v(i)$ που προέρχεται από τα v κανάλια ελέγχου ορίζεται ως το άθροισμα των υπό συνθήκη διελεύσεων $S_{vb}(i)$ και $S_{vf}(i)$ και δίνεται από τη σχέση:

$$S_v(i) = ir \left(1 - \frac{r}{v_b}\right)^{i-1} + (M - i)p \left(1 - \frac{p}{v_f}\right)^{M-i-1} \quad (6.17)$$

6.4.1 Προσεγγιστική ανάλυση πρωτοκόλλου αγνοώντας τις συγκρούσεις στον προορισμό

Έστω ότι μεταδίδονται επιτυχώς στα v κανάλια ελέγχου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου $SB_k(i) + SF_m(i) = n$ το πλήθος πακέτα ελέγχου, υπό την προϋπόθεση ότι η κατάσταση του συστήματος είναι i . Επίσης, έστω ότι τα αντίστοιχα μεταδιδόμενα πακέτα δεδομένων κατανέμονται ομοιόμορφα στα N κανάλια δεδομένων. Έτσι, η τυχαία κατανομή των n πακέτων ελέγχου στα N κανάλια δεδομένων δίνει N^n διατάξεις, καθεμιά με πιθανότητα εμφάνισης N^{-n} .

Η υπό συνθήκη πιθανότητα κανένα από τα n πακέτα δεδομένων να έχει επιλέξει να μεταδοθεί στο Z -στό κανάλι δεδομένων συμβολίζεται ως $P_{N0}(n,i)$. Στην περίπτωση αυτή, τα n πακέτα δεδομένων έχουν επιλέξει να μεταδοθούν στα υπόλοιπα $(N-1)$ κανάλια δεδομένων. Έτσι, η τυχαία κατανομή των n πακέτων στα $(N-1)$ κανάλια δεδομένων δίνει $(N-1)^n$ διατάξεις, καθεμιά με πιθανότητα εμφάνισης $(N-1)^{-n}$. Η $P_{N0}(n,i)$ δίνεται από τη σχέση:

$$P_{N0}(n,i) = \frac{1}{N^n} (N-1)^n = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^n \quad (6.18)$$

Στη μόνιμη κατάσταση ισχύει:

$$E[SB_k(i) + SF_m(i) = n] = S_v(i) \quad (6.19)$$

Έτσι, στη μόνιμη κατάσταση η σχέση (6.18) γράφεται:

$$P_{N0}(i) = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{S_v(i)} \quad (6.20)$$

Η υπό συνθήκη πιθανότητα να μεταδίδεται ένα πακέτο δεδομένων στο Z -στό κανάλι δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου στη μόνιμη κατάσταση συμβολίζεται ως $P_N(i)$. Με άλλα λόγια, η πιθανότητα $P_N(i)$ υποδηλώνει ότι τουλάχιστον ένα πακέτο δεδομένων έχει επιλέξει να μεταδοθεί στο Z -στό κανάλι δεδομένων. Σε αυτή την περίπτωση, ένα πακέτο δεδομένων κερδίζει στον ανταγωνισμό και μεταδίδεται στο Z -στό κανάλι δεδομένων, σύμφωνα με τον αλγόριθμο αποφυγής συγκρούσεων στα κανάλια δεδομένων. Έτσι, είναι:

$$P_N(i) = 1 - P_{N0}(i) = 1 - \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{S_v(i)} \quad (6.21)$$

Ως $H_N\{S_v(i)\}$ συμβολίζουμε τη τυχαία μεταβλητή που εκφράζει τον αριθμό των διαφορετικών καναλιών δεδομένων που έχουν επιλεγεί για μετάδοση, υπό την προϋπόθεση ότι ο υπό συνθήκη ρυθμός εξόδου των επιτυχών (επανα)μεταδόσεων πακέτων ελέγχου στα N κανάλια ελέγχου είναι $S_v(i)$ κατά τη διάρκεια ενός κύκλου στη μόνιμη κατάσταση. Έτσι, η υπό συνθήκη πιθανότητα $\Pr[H_N\{S_v(i)\} = x]$ να έχουν επιλεγεί x το πλήθος διαφορετικά κανάλια δεδομένων για μετάδοση κατά τη διάρκεια ενός κύκλου στη μόνιμη κατάσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\Pr[H_N\{S_v(i)\} = x] = \binom{N}{x} (P_N(i))^x (1 - P_N(i))^{N-x} \quad (6.22)$$

Επιπλέον, η υπό συνθήκη διέλευση $S_N(i)$ που προέρχεται από τα N κανάλια δεδομένων δίνεται από τη σχέση:

$$S_N(i) = E[\Pr[H_N\{S_v(i)\} = x]] = \sum_{x=1}^N x \Pr[H_N\{S_v(i)\} = x] = NP_N(i) \quad (6.23)$$

Τέλος, αντικαθιστώντας τη σχέση (6.21) στη σχέση (6.23) προκύπτει:

$$S_N(i) = N \left(1 - \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{S_v(i)}\right) \quad (6.24)$$

6.4.2 Προσεγγιστική ανάλυση πρωτοκόλλου συνυπολογίζοντας τις συγκρούσεις στον προορισμό

Η ανάλυση που συνυπολογίζει τις συγκρούσεις στον προορισμό βασίζεται στα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου. Επιπρόσθετα, έστω $A_n = s$ το πλήθος των πακέτων δεδομένων που μεταδίδονται επιτυχώς στα N κανάλια δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, υπό την προϋπόθεση ότι η κατάσταση του συστήματος είναι i . Τα πακέτα δεδομένων κατανέμονται ομοιόμορφα στους M σταθμούς προορισμού, θεωρώντας για λόγους απλότητας της ανάλυσης ότι ένας σταθμός δύναται να επιλέξει ως παραλήπτη του πακέτου δεδομένων τον εαυτό του. Έτσι, η τυχαία κατανομή των s πακέτων δεδομένων σε M σταθμούς προορισμού δίνει M^s διατάξεις, καθεμιά από τις οποίες έχει πιθανότητα εμφάνισης M^{-s} .

Η υπό συνθήκη πιθανότητα κανένα από τα s επιτυχώς μεταδιδόμενα πακέτα δεδομένων να έχει επιλέξει ως προορισμό το X -στό σταθμό συμβολίζεται ως $P_{M0}(s,i)$. Στην

περίπτωση αυτή, τα s πακέτα δεδομένων προορίζονται στους υπόλοιπους $(M-1)$ σταθμούς. Η τυχαία κατανομή των s πακέτων δεδομένων σε $(M-1)$ σταθμούς προορισμού δίνει $(M-1)^s$ διατάξεις, καθεμιά από τις οποίες έχει πιθανότητα εμφάνισης $(M-1)^{-s}$. Έτσι, η πιθανότητα $P_{M0}(s,i)$ δίνεται από τη σχέση [6]:

$$P_{M0}(s,i) = \frac{1}{M^s} (M-1)^s = \left(1 - \frac{1}{M}\right)^s \quad (6.25)$$

Στη μόνιμη κατάσταση ισχύει:

$$E[A_n = s] = S_N(i) \quad (6.26)$$

Επομένως, στη μόνιμη κατάσταση η σχέση (6.25) γράφεται:

$$P_{M0}(i) = \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{S_N(i)} \quad (6.27)$$

Η υπό συνθήκη πιθανότητα ένα πακέτο δεδομένων με προορισμό το X -στό σταθμό να παραληφθεί επιτυχώς χωρίς να απορριφθεί λόγω συγκρούσεων στον προορισμό συμβολίζεται ως $P_M(i)$ και δίνεται από τη σχέση:

$$P_M(i) = 1 - P_{M0}(i) = 1 - \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{S_N(i)} \quad (6.28)$$

Ως $H_M\{S_N(i)\}$ συμβολίζουμε τη τυχαία μεταβλητή που εκφράζει τον αριθμό των διαφορετικών σταθμών που επιλέχθηκαν ως προορισμοί, υπό την προϋπόθεση ότι ο υπό συνθήκη ρυθμός εξόδου επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων δεδομένων στα N κανάλια δεδομένων είναι $S_N(i)$ κατά τη διάρκεια ενός κύκλου στη μόνιμη κατάσταση. Η πιθανότητα $\Pr[H_M\{S_N(i)\} = y]$ ορίζεται ως η υπό συνθήκη πιθανότητα να έχουν επιλεγεί ως προορισμοί y το πλήθος διαφορετικοί σταθμοί κατά τη διάρκεια ενός κύκλου στη μόνιμη κατάσταση και δίνεται από τη σχέση:

$$\Pr[H_M\{S_N(i)\} = y] = \binom{M}{y} (P_M(i))^y (1 - P_M(i))^{M-y} \quad (6.29)$$

Επιπλέον, η υπό συνθήκη διέλευση $S_{RC}(i)$ στον προορισμό δίνεται από τη σχέση:

$$S_{RC}(i) = E[\Pr[H_M\{S_N(i)\} = y]] = MP_M(i) \quad (6.30)$$

Τέλος, αντικαθιστώντας τη σχέση (6.28) στη σχέση (6.30) προκύπτει:

$$S_{RC}(i) = M \left(1 - \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{S_N(i)}\right) \quad (6.31)$$

6.5 Βέλτιστα μέτρα αποδοτικότητας

Στην παράγραφο αυτή υπολογίζονται αναλυτικά οι τιμές των παραμέτρων αποδοτικότητας που βελτιστοποιούν την απόδοση του συστήματος, μεγιστοποιώντας τη διέλευση.

6.5.1 Βέλτιστη πιθανότητα επανεκπομπής r_{opt}

Στην περίπτωση αγνόησης των συγκρούσεων στον προορισμό, ο υπολογισμός της βέλτιστης πιθανότητας επανεκπομπής r_{opt} πραγματοποιείται θέτοντας την πρώτη παράγωγο της σχέσης (6.24) ως προς r ίση με μηδέν, δηλαδή:

$$\frac{\partial S_N(i)}{\partial r} = 0 \Rightarrow \frac{\partial S_v(i)}{\partial r} = 0 \quad (6.32)$$

Όμοια, στην περίπτωση συνυπολογισμού των συγκρούσεων στον προορισμό, ο υπολογισμός της βέλτιστης πιθανότητας επανεκπομπής r_{opt} πραγματοποιείται θέτοντας την πρώτη παράγωγο της σχέσης (6.31) ως προς r ίση με μηδέν, δηλαδή:

$$\frac{\partial S_{RC}(i)}{\partial r} = 0 \Rightarrow \frac{\partial S_N(i)}{\partial r} = 0 \Rightarrow \frac{\partial S_v(i)}{\partial r} = 0 \quad (6.33)$$

Αφού ισχύει: $0 \leq r_{opt} \leq 1$, και για τα δύο πρωτόκολλα προκύπτει:

$$r_{opt} = \begin{cases} \frac{v_b}{i}, & i > v_b \\ 1, & 0 < i \leq v_b \\ 0, & i = 0 \end{cases} \quad (6.34)$$

6.5.2 Βέλτιστος λόγος διαχωρισμού καναλιών ελέγχου v_f/v_b

Στην περίπτωση αγνόησης των συγκρούσεων στον προορισμό, ο υπολογισμός του βέλτιστου λόγου διαχωρισμού καναλιών ελέγχου v_f/v_b πραγματοποιείται θέτοντας την πρώτη παράγωγο της σχέσης (6.24) ως προς v_b ίση με μηδέν, δηλαδή:

$$\frac{\partial S_N(i)}{\partial v_b} = 0 \Rightarrow \frac{\partial S_v(i)}{\partial v_b} = 0 \quad (6.35)$$

Όμοια, στην περίπτωση συνυπολογισμού των συγκρούσεων στον προορισμό, ο υπολογισμός του βέλτιστου λόγου διαχωρισμού καναλιών ελέγχου v_f/v_b πραγματοποιείται θέτοντας την πρώτη παράγωγο της σχέσης (6.31) ως προς v_b ίση με μηδέν, δηλαδή:

$$\frac{\partial S_{RC}(i)}{\partial v_b} = 0 \Rightarrow \frac{\partial S_N(i)}{\partial v_b} = 0 \Rightarrow \frac{\partial S_v(i)}{\partial v_b} = 0 \quad (6.36)$$

Και για τα δύο πρωτόκολλα προκύπτει:

$$\frac{v_f}{v_b} = \frac{p}{r} \sqrt{\frac{(M-i)(M-i-1)}{i(i-1)}}, \quad i \neq 0,1 \quad (6.37)$$

Για τις εξαιρούμενες τιμές της σχέσης (6.37), ισχύει ότι ο αριθμός v_f και v_b των καναλιών ελέγχου είναι:

$$v_b = 1 \quad \text{και} \quad v_f = v - 1, \quad \text{αν} \quad i = 1 \quad (6.38)$$

$$v_b = 0 \quad \text{και} \quad v_f = v, \quad \text{αν} \quad i = 0 \quad (6.39)$$

6.5.3 Βέλτιστος αριθμός v_{f_opt} , v_{b_opt} καναλιών ελέγχου

Έστω ότι οι ενεργοί σταθμοί εκπέμπουν με τη βέλτιστη πιθανότητα επανεκπομπής Γ_{opt} που δίνεται στη σχέση (6.34). Ο βέλτιστος αριθμός v_{f_opt} ($v_{f_opt} \leq v$), v_{b_opt} ($v_{b_opt} \leq v$) των καναλιών ελέγχου υπολογίζεται αντικαθιστώντας τη σχέση (6.34) στις σχέσεις (6.37)-(6.39). Προκύπτει:

$$v_{f_opt} = \text{IntegerPart} \left(p \sqrt{\frac{(M-i)(M-i-1)}{i(i-1)}} \right), \quad i \neq 0,1 \quad (6.40)$$

Επίσης, για τις εξαιρούμενες τιμές ισχύει:

$$v_{f_opt} = \begin{cases} v, & i = 0 \\ v - 1, & i = 1 \end{cases} \quad (6.41)$$

Τέλος, σε όλες τις περιπτώσεις ισχύει:

$$v_{b_opt} = v - v_{f_opt} \quad (6.42)$$

6.6 Αριθμητικά αποτελέσματα

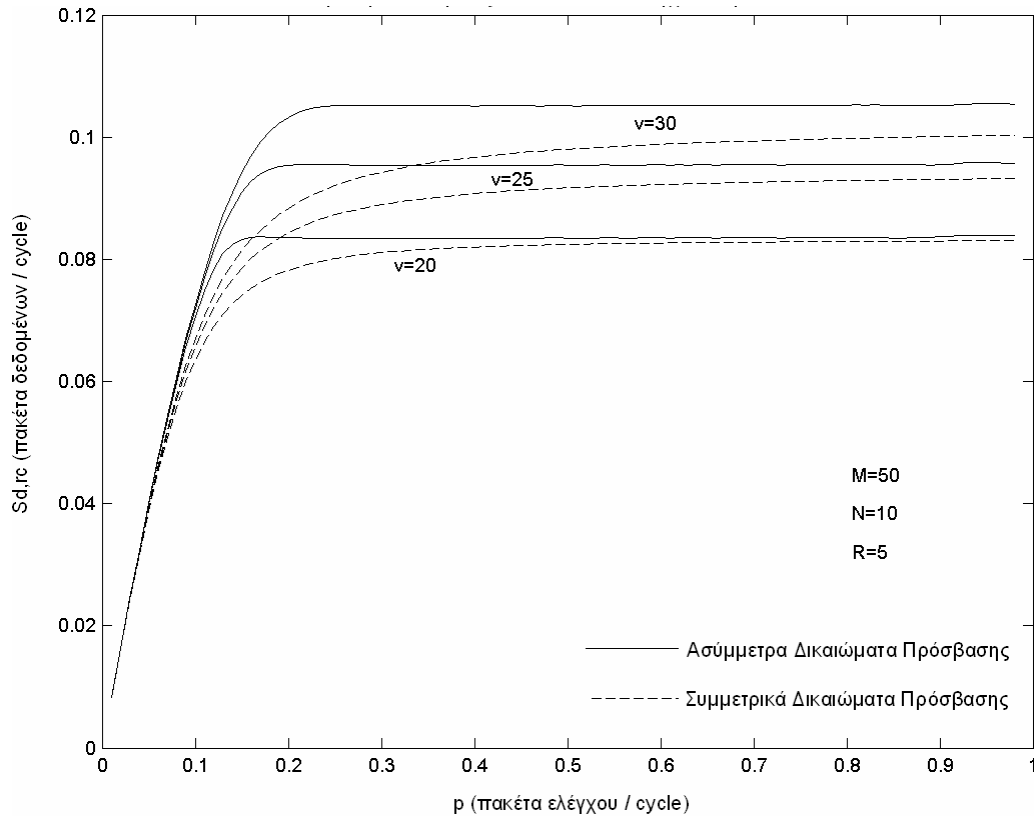
Για την επαλήθευση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της θεωρητικής ανάλυσης, αναπτύχθηκε ένα εξομοιωτικό μοντέλο της λειτουργίας του συστήματος βασιζόμενο στην γλώσσα υψηλού επιπέδου C. Το εξομοιωτικό πρόγραμμα υλοποιεί ένα μοντέλο εξομοίωσης διακριτών γεγονότων και χρησιμοποιεί ως επίπεδο εμπιστοσύνης $(1-\alpha)$ τη τιμή 99%, παρέχοντας ακριβή αντιστοιχία με το θεωρητικό μοντέλο όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-3 και στο Σχήμα 6-7.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα έχουν υπολογιστεί για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του πρωτοκόλλου Γ_{opt} , v_{f_opt} , v_{b_opt} . Ειδικότερα, για τους υπολογισμούς σε κάθε κύκλο καθορίστηκαν οι βέλτιστες τιμές των v_{f_opt} , v_{b_opt} διαχωρίζοντας δυναμικά το συνολικό αριθμό v των καναλιών ελέγχου σε δύο ομάδες καναλιών, σύμφωνα με τις σχέσεις (6.40)- (6.42). Στους ακόλουθους υπολογισμούς θεωρήθηκε ότι το κανονικοποιημένο μήκος του πακέτου δεδομένων είναι: $L=10$ χρονικές μονάδες.

Στα ακόλουθα σχήματα μελετάται η βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος που επιτυγχάνεται με το διαχωρισμό της MCA στις ομάδες v_{f_opt} , v_{b_opt} καναλιών ελέγχου. Για την παραστατική απεικόνιση της βελτίωσης, το σύστημα συγκρίνεται με το σύστημα συμμετρικής πρόσβασης στην MCA που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5. Επίσης, μελετάται η επίδραση του φαινομένου των συγκρούσεων στον προορισμό με τη βοήθεια της συγκριτικής παράθεσης των αντίστοιχων αριθμητικών αποτελεσμάτων του συστήματος που αγνοεί τις συγκρούσεις στον προορισμό και αυτού που τις συνυπολογίζει.

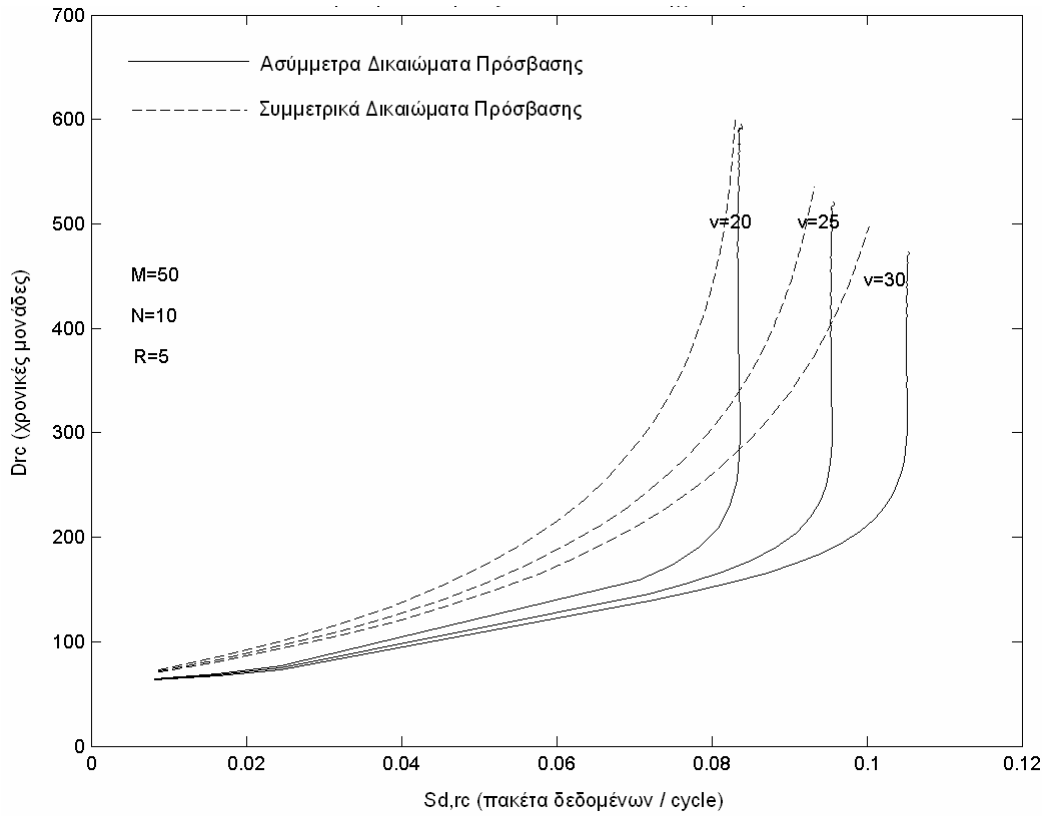
Το Σχήμα 6-1 παρουσιάζει τη διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p για $M=50$ σταθμούς, $R=5$ χρονικές σχισμές, $N=10$ κανάλια δεδομένων και Γ_{opt} , για $v=20,25,30$ κανάλια ελέγχου. Όπως φαίνεται στο σχήμα η προτεινόμενη αρχιτεκτονική ασύμμετρης πρόσβασης στην MCA αυξάνει σημαντικά τη $S_{d,rc}$ σε σχέση με το πρωτόκολλο συμμετρικής πρόσβασης που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 5 για όλες τις τιμές του v . Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι θεωρώντας τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων Γ_{opt} , v_{f_opt} , v_{b_opt} μειώνεται η πιθανότητα σύγκρουσης στα κανάλια ελέγχου, γεγονός που προκαλεί σημαντική αύξηση της $S_{d,rc}$. Επίσης, η βελτίωση της $S_{d,rc}$ λόγω των

ασύμμετρων δικαιωμάτων πρόσβασης στην MCA είναι μια αύξουσα συνάρτηση του αριθμού v . Και αυτό γιατί η αύξηση του αριθμού v προκαλεί μείωση της πιθανότητας σύγκρουσης στα κανάλια ελέγχου και συνεπακόλουθα μείωση του αριθμού των ενεργών σταθμών. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή της πιθανότητας επανεκπομπής r_{opt} είναι υψηλότερη σύμφωνα με τη σχέση (6.34) και η καθοριζόμενη τιμή των βέλτιστων παραμέτρων v_{f_opt} , v_{b_opt} σύμφωνα με τις σχέσεις (6.40)- (6.42) παρέχει υψηλότερες τιμές βελτίωσης της $S_{d,rc}$. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται, για παράδειγμα, για $p=0.18$ όπου η $S_{d,rc}$ βελτιώνεται για $v=30$ κατά 17%, για $v=25$ κατά 13% και για $v=20$ κατά 8%.

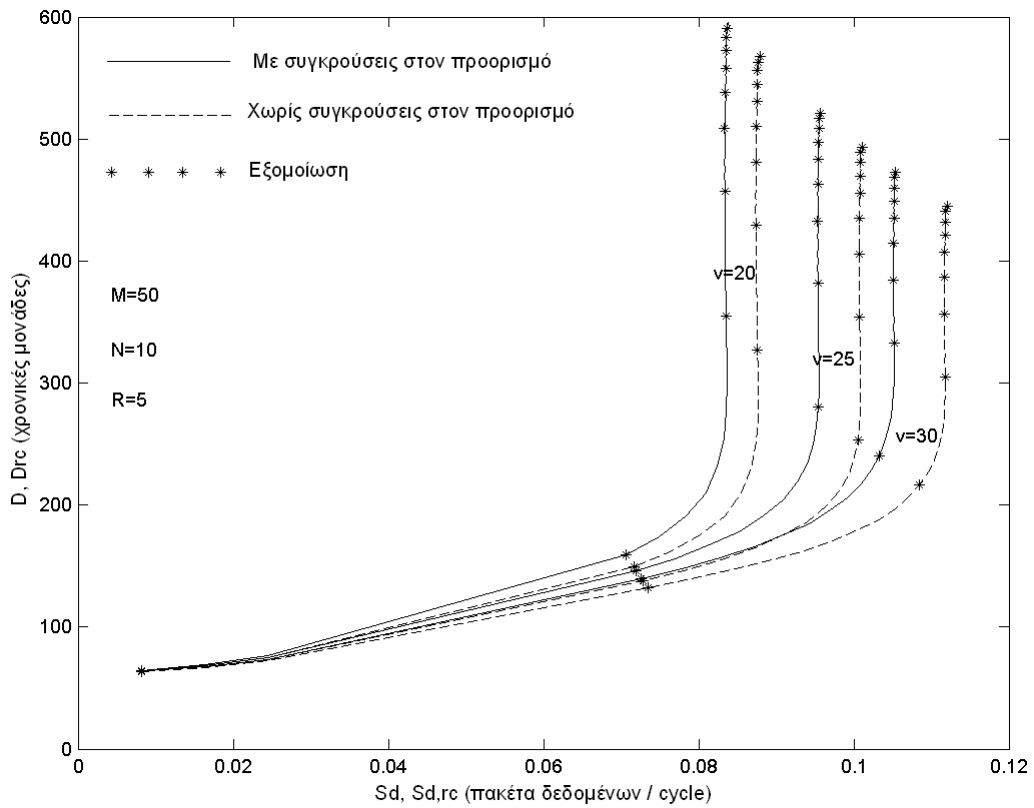


Σχήμα 6-1. Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $v=20,25,30$

Επίσης, η σημαντική βελτίωση της απόδοσης που επιτυγχάνεται λόγω των ασύμμετρων δικαιωμάτων πρόσβασης στην MCA μελετάται στο Σχήμα 6-2 που παρουσιάζει την καθυστέρηση D_{rc} ως συνάρτηση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$, για $M=50$, $R=5$, $N=10$ και r_{opt} , για $v=20,25,30$ κανάλια ελέγχου. Πράγματι, το προτεινόμενο πρωτόκολλο ασύμμετρης πρόσβασης παρέχει αρκετά υψηλότερες τιμές της $S_{d,rc}$ ενώ διατηρεί περίπου ίσες τιμές της D_{rc} , για όλες τις τιμές καναλιών ελέγχου v . Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται από το ότι ο βέλτιστος διαχωρισμός της MCA στις ομάδες v_{f_opt} , v_{b_opt} καναλιών αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της διέλευσης, όπως αποδεικνύεται από τις σχέσεις (6.33) και (6.36). Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η αύξηση του αριθμού v των καναλιών ελέγχου προκαλεί μείωση των συγκρούσεων στα κανάλια ελέγχου, γεγονός που αυξάνει το πλήθος των ελεύθερων σταθμών. Στην περίπτωση αυτή, η βελτιστοποίηση της απόδοσης επιτυγχάνεται καθορίζοντας τη τιμή της παραμέτρου v_{f_opt} που επιτρέπει την επιτυχή μετάδοση των ελεύθερων σταθμών και βελτιώνει ουσιαστικά τις τιμές της $S_{d,rc}$, ενώ δεν επηρεάζει τις τιμές της D_{rc} .



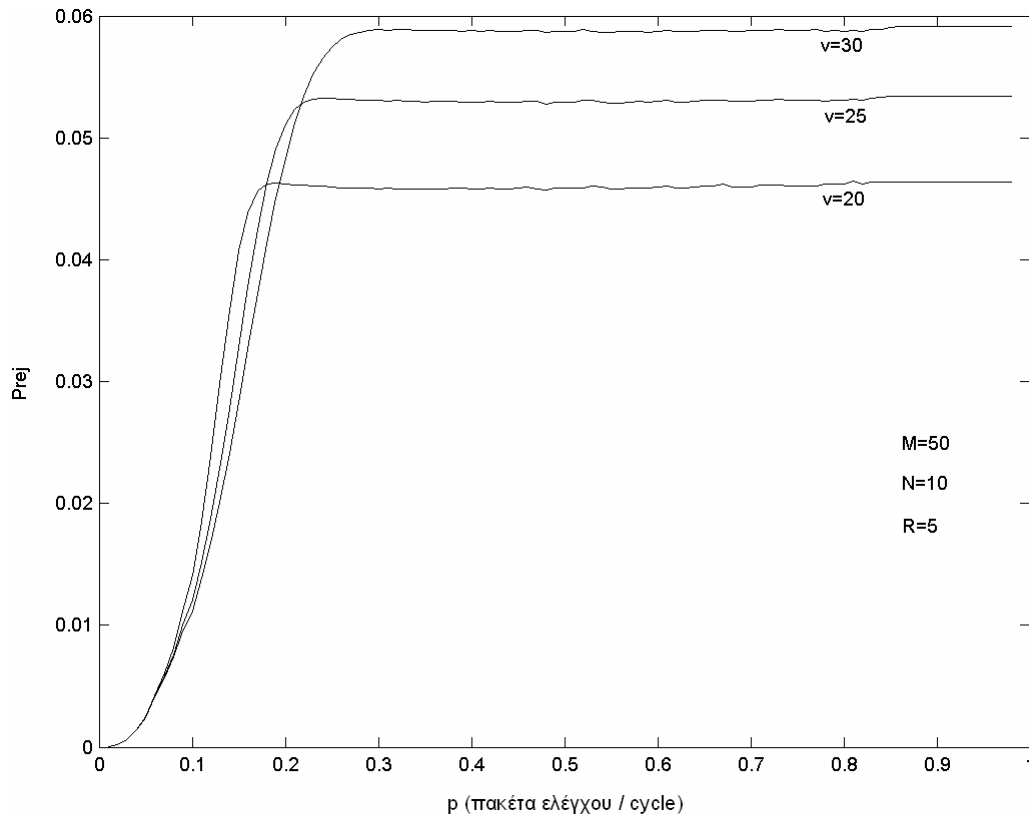
Σχήμα 6-2. Καθυστέρηση D_{rc} ως προς τη διέλευση $S_{d,rc}$ για $v=20,25,30$



Σχήμα 6-3. Καθυστέρηση D, D_{rc} ως προς τη διέλευση $S_d, S_{d,rc}$ για $v=20,25,30$

Η επίδραση των συγκρούσεων στον προορισμό στην απόδοση του συστήματος μελετάται στο Σχήμα 6-3. Το σχήμα αυτό παρουσιάζει την καθυστέρηση D_d , $D_{d,rc}$ ως συνάρτηση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων S_d , $S_{d,rc}$, για $M=50$, $N=10$, $R=5$, r_{opt} και $v=20,25,30$ κανάλια ελέγχου για το προτεινόμενο πρωτόκολλο ασύμμετρης πρόσβασης, τόσο για την περίπτωση που αγνοούνται οι συγκρούσεις στον προορισμό όσο και για την περίπτωση που συνυπολογίζονται. Όπως παρατηρείται για δεδομένη τιμή του R και για σταθερές τιμές των M , N και της καθυστέρησης, η διαφορά ανάμεσα στις καμπύλες S_d και $S_{d,rc}$ διευρύνεται καθώς ο αριθμός v αυξάνει. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι η αύξηση του αριθμού v προκαλεί αύξηση της πιθανότητας επιτυχούς μετάδοσης πακέτων δεδομένων, γεγονός που συνεπακόλουθα προκαλεί αύξηση των συγκρούσεων στον προορισμό. Επιπρόσθετα, στο σχήμα παρατίθενται τα αποτελέσματα της εξομοίωσης που παρουσιάζουν αντιστοιχία ένα-προς-ένα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

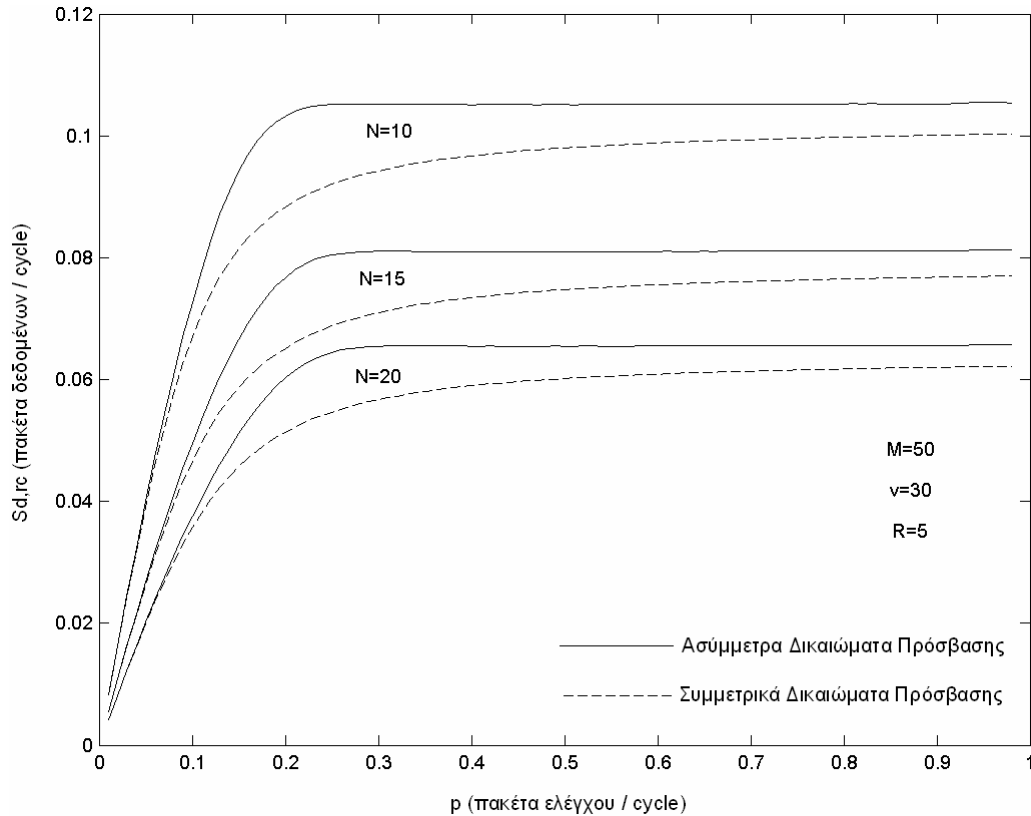
Τα παραπάνω συμπεράσματα επαληθεύονται στο Σχήμα 6-4 που παρουσιάζει τη μέση τιμή της πιθανότητας απόρριψης P_{rej} ως συνάρτηση της πιθανότητας p για $M=50$, $N=10$, $R=5$, r_{opt} και $v=20,25,30$ κανάλια ελέγχου. Πράγματι, η αύξηση του αριθμού v προκαλεί αύξηση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων, γεγονός που προκαλεί ταυτόχρονη αύξηση της P_{rej} .



Σχήμα 6-4. Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $v=20,25,30$

Παρόμοια, η μεταβολή του αριθμού των καναλιών δεδομένων N προκαλεί την ίδια συμπεριφορά. Με άλλα λόγια, το προτεινόμενο πρωτόκολλο ασύμμετρης πρόσβασης στην MCA αυξάνει σημαντικά την $S_{d,rc}$ σε σχέση με το πρωτόκολλο συμμετρικής πρόσβασης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, για όλες τις τιμές του N . Το γεγονός αυτό καταδεικνύεται στο Σχήμα 6-5 που παρουσιάζει τη διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p για $M=50$, $v=30$, $R=5$, r_{opt} και $N=10,15,20$ κανάλια δεδομένων. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι η θεώρηση των βέλτιστων παραμέτρων r_{opt} , v_{f_opt} , v_{b_opt}

μειώνει την πιθανότητα συγκρούσεων στα κανάλια ελέγχου, αυξάνοντας την πιθανότητα επιτυχών μεταδόσεων στα κανάλια δεδομένων. Το γεγονός αυτό αυξάνει σημαντικά την $S_{d,rc}$ σε σχέση με το πρωτόκολλο συμμετρικής πρόσβασης. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται, για παράδειγμα, για $\rho=0.21$ όπου η S_d βελτιώνεται για $N=10$ κατά 17%, για $N=15$ κατά 18% και για $N=20$ κατά 18%.

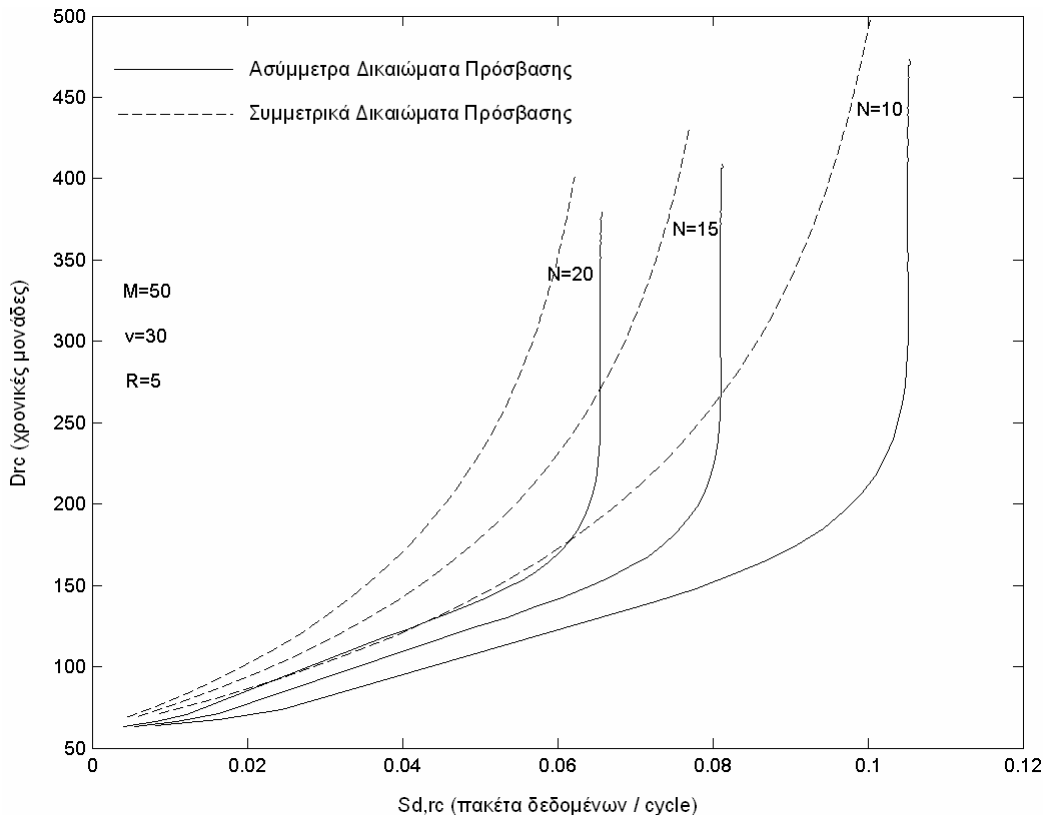


Σχήμα 6-5. Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $N=10,15,20$

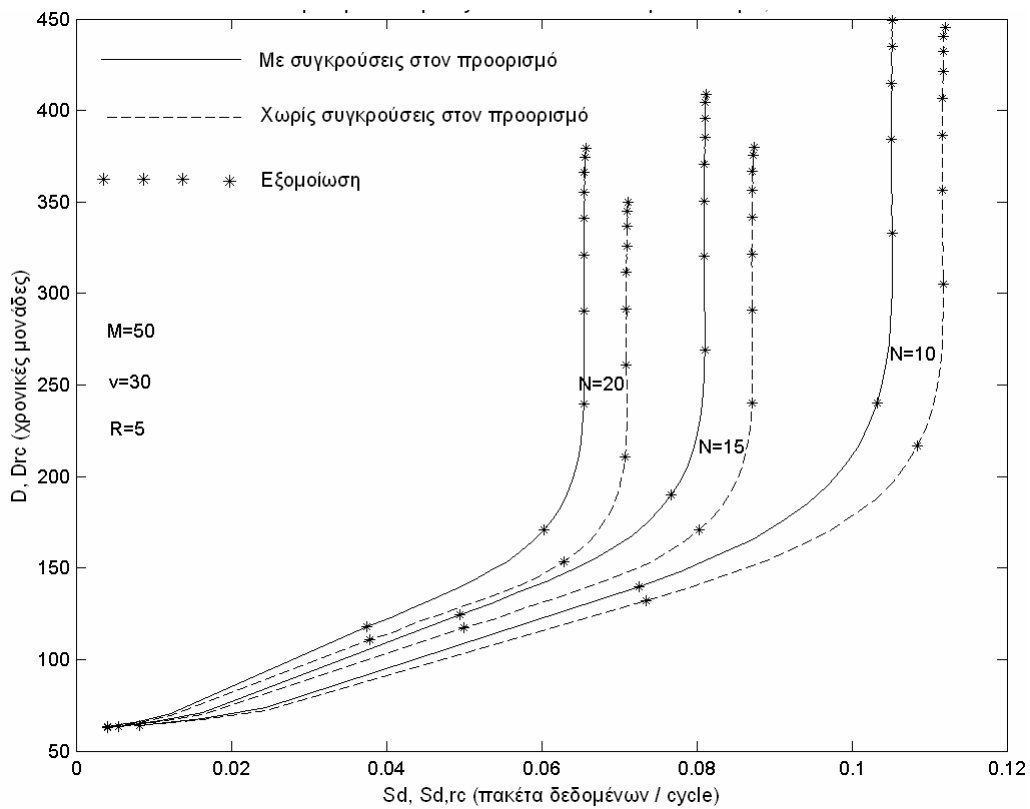
Επίσης, η βελτιστοποίηση της απόδοσης λόγω των ασύμμετρων δικαιωμάτων πρόσβασης μελετάται στο Σχήμα 6-6 που παρουσιάζει την καθυστέρηση D_{rc} ως συνάρτηση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$, για $M=50$, $R=5$, $\nu=30$ και τ_{opt} , για $N=10,15,20$ κανάλια δεδομένων. Όπως παρουσιάζεται, το προτεινόμενο πρωτόκολλο παρέχει μικρότερες τιμές καθυστέρησης D_{rc} ενώ επιτυγχάνει πολύ υψηλότερες τιμές διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$, για όλες τις τιμές του αριθμού N . Και αυτό γιατί ο βέλτιστος διαχωρισμός του αριθμού ν των καναλιών ελέγχου στις ομάδες των $\nu_{f,opt}$, $\nu_{b,opt}$ καναλιών μειώνει την πιθανότητα συγκρούσεων στα κανάλια ελέγχου, μειώνοντας σημαντικά το πλήθος των ενεργών σταθμών. Το γεγονός αυτό παρέχει μικρότερες τιμές D_{rc} ενώ εγγυάται την αύξηση της $S_{d,rc}$, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα.

Είναι προφανές ότι η αύξηση του αριθμού N προκαλεί συνεπακόλουθη αύξηση των επιτυχών μεταδόσεων στα κανάλια δεδομένων. Για το λόγο αυτό, η πιθανότητα απόρριψης ενός πακέτου δεδομένων εξαιτίας σύγκρουσης στον προορισμό αυξάνει. Επίσης, με την αύξηση του αριθμού N το πλήθος των ενεργών σταθμών αυξάνει εξαιτίας της αύξησης των συγκρούσεων στον προορισμό. Το γεγονός αυτό προκαλεί σημαντική αύξηση της καθυστέρησης D_{rc} , όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 6-7. Το σχήμα αυτό παρουσιάζει την καθυστέρηση D , D_{rc} ως συνάρτηση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων S_d , $S_{d,rc}$, για $M=50$, $\nu=30$, $R=5$ και τ_{opt} , για $N=10,15,20$ κανάλια δεδομένων για το προτεινόμενο πρωτόκολλο ασύμμετρης πρόσβασης, τόσο για την περίπτωση που αγνοούνται οι

συγκρούσεις στον προορισμό όσο και για την περίπτωση που συνυπολογίζονται. Επίσης, τα αριθμητικά αποτελέσματα της ανάλυσης επαληθεύονται από αυτά της εξομοίωσης.

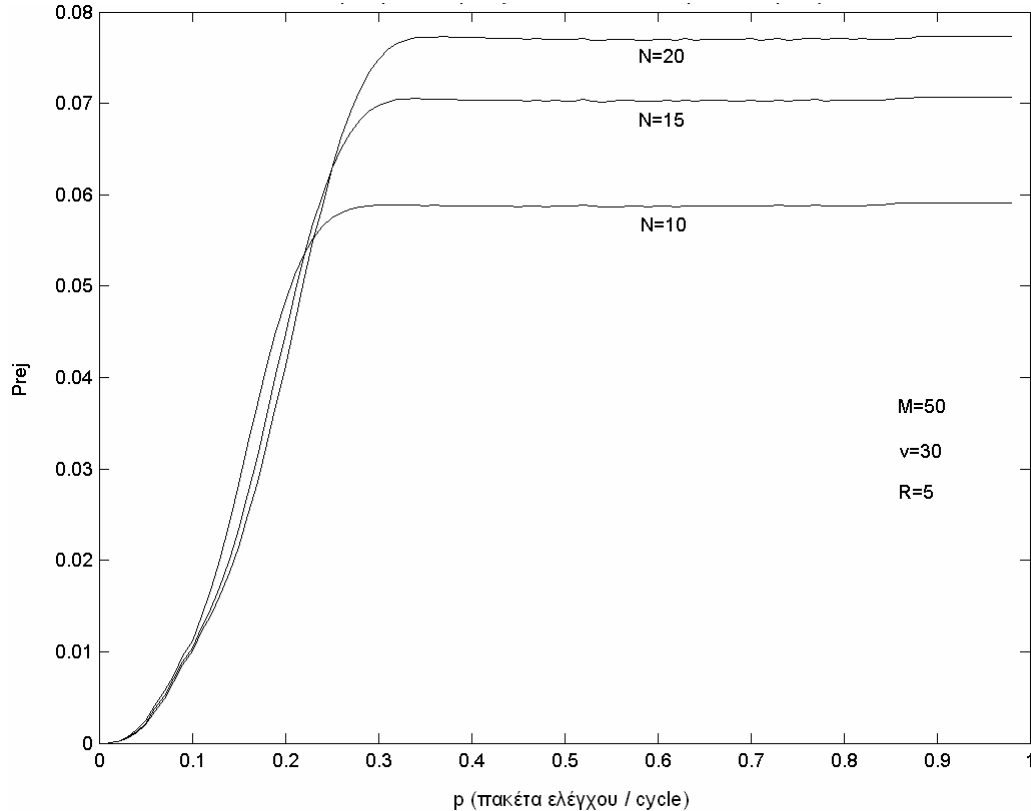


Σχήμα 6-6. Καθυστέρηση D_{rc} ως προς τη διέλευση $S_{d,rc}$ για $N=10,15,20$



Σχήμα 6-7. Καθυστέρηση D, D_{rc} ως προς τη διέλευση $S_d, S_{d,rc}$ για $N=10,15,20$

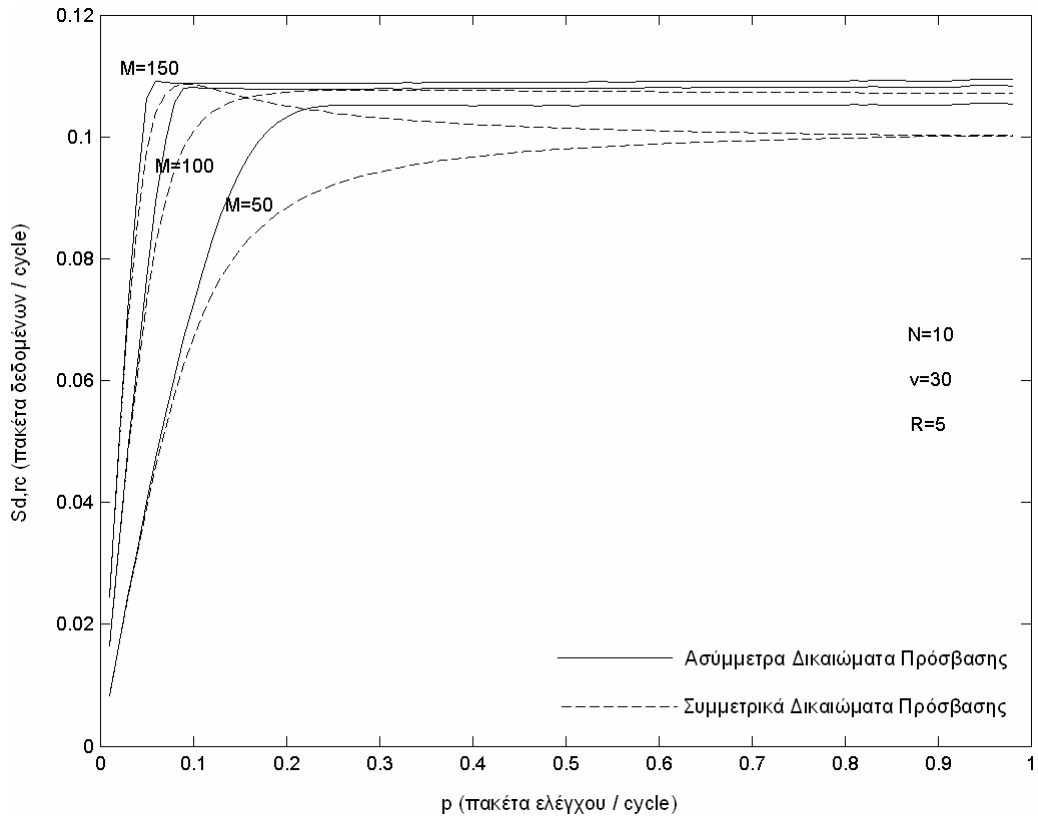
Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται στο Σχήμα 6-8 που παρουσιάζει τη μέση τιμή της πιθανότητας απόρριψης στον προορισμό P_{rej} ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p για $M=50$, $v=30$, $R=5$ και r_{opt} , για $N=10,15,20$ κανάλια δεδομένων. Όπως παρουσιάζεται, η αύξηση του αριθμού N προκαλεί μείωση της διέλευσης ανά κανάλι δεδομένων και συνεπακόλουθη αύξηση της P_{rej} .



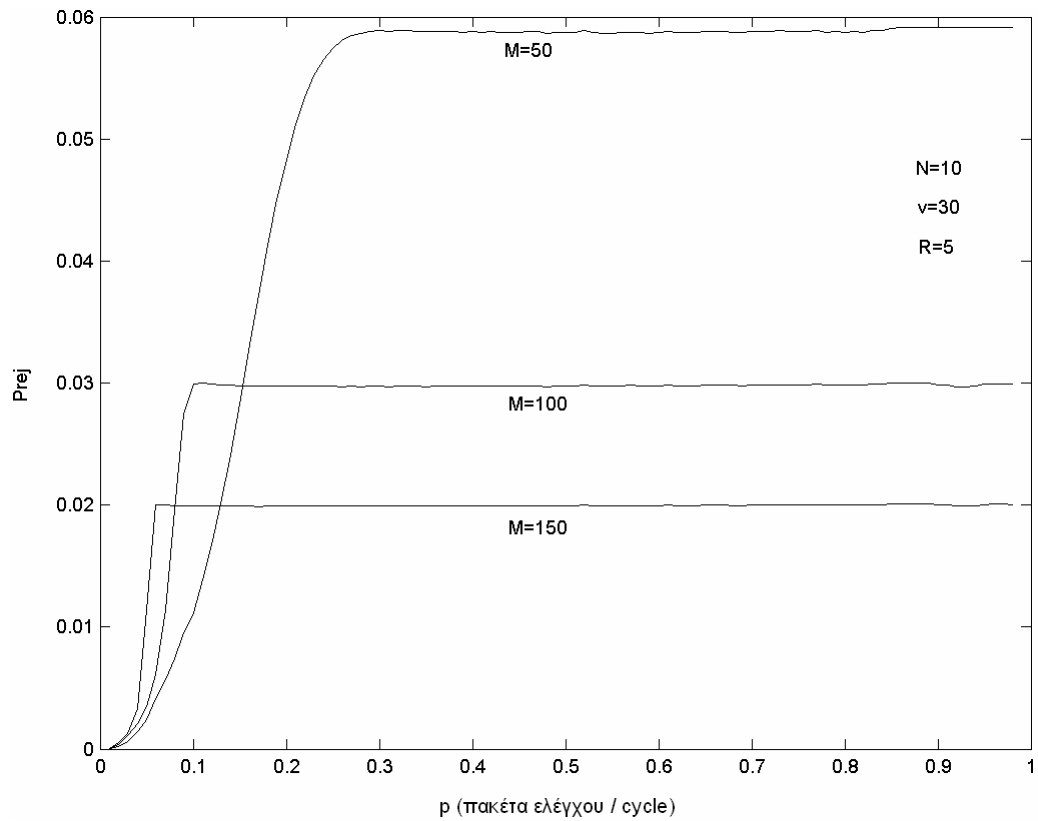
Σχήμα 6-8. Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $N=10,15,20$

Αντίθετα, η βελτιστοποίηση της διέλευσης λόγω της ασύμμετρης πρόσβασης στην MCA είναι λιγότερο εμφανής σε συστήματα μεγάλου πληθυσμού σταθμών. Το γεγονός αυτό μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 6-9 που παρουσιάζει τη διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p , για $N=10$, $v=30$, $R=5$, r_{opt} και $M=50,100,150$ σταθμούς. Πράγματι για δεδομένη τιμή του R και σταθερή τιμή των v , N και p , η αύξηση του αριθμού M προκαλεί αύξηση του προσφερόμενου φορτίου και επομένως αύξηση του αριθμού των ενεργών σταθμών. Στην περίπτωση αυτή, η βελτιστοποίηση του πρωτοκόλλου μεγιστοποιείται και η επίδραση των βέλτιστων παραμέτρων r_{opt} , $v_{f,opt}$, $v_{b,opt}$ στην απόδοση του συστήματος είναι πιο περιορισμένη. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται, για παράδειγμα, για $p=0.1$ όπου η $S_{d,rc}$ βελτιώνεται για $M=50$ κατά 8%, για $M=100$ κατά 7% και για $M=150$ κατά 2%.

Επιπλέον, η απόδοση συστημάτων που απασχολούν μεγάλο πληθυσμό σταθμών επηρεάζεται λιγότερο από τις συγκρούσεις στον προορισμό. Το γεγονός αυτό μελετάται στο Σχήμα 6-10 που παρουσιάζει τη μέση τιμή της πιθανότητας απόρριψης στον προορισμό P_{rej} ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης p , για $N=10$, $v=30$, $R=5$, r_{opt} και $M=50,100,150$ σταθμούς. Έτσι, η αύξηση του αριθμού M προκαλεί αύξηση του φορτίου, γεγονός που συνεπακόλουθα αυξάνει την πιθανότητα συγκρούσεων στα κανάλια ελέγχου. Επομένως, η διέλευση ανά κανάλι δεδομένων μειώνεται προκαλώντας μείωση του ρυθμού των συγκρούσεων εξαιτίας συγκρούσεων στον προορισμό.

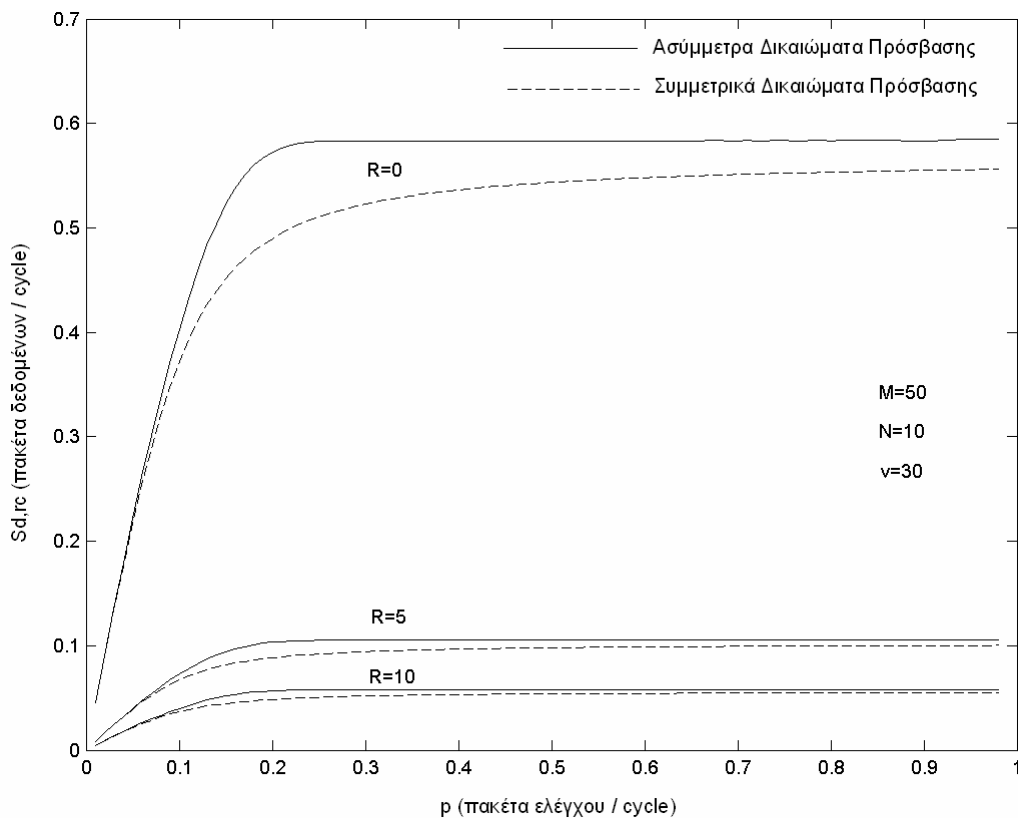


Σχήμα 6-9. Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $M=50,100,150$



Σχήμα 6-10. Πιθανότητα απόρριψης P_{rej} για $M=50,100,150$

Είναι προφανές ότι η βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος καθορίζεται από τη σχέση μεταξύ των μεγεθών ν , N και M , για δεδομένη τιμή του R . Η επίδραση της μεταβολής της τιμής της καθυστέρησης διάδοσης R στη βελτιστοποίηση της απόδοσης μελετάται στο Σχήμα 6-11. Το σχήμα αυτό παρουσιάζει τη διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ ως συνάρτηση της πιθανότητας γέννησης ρ , για $M=50$, $\nu=30$, r_{opt} , $N=10$ για $R=0,5,10$ χρονικές σχισμές. Όπως φαίνεται, με την αύξηση της τιμής του R η διαφορά των δύο γραφικών παραστάσεων διευρύνεται. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι η διάρκεια ενός κύκλου C είναι μια αύξουσα συνάρτηση του R και η $S_{d,rc}$ είναι μια αντιστρόφως ανάλογη συνάρτηση του C , όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 5. Με άλλα λόγια, το ποσοστό της διάρκειας ενός κύκλου που ένα κανάλι δεδομένων είναι απασχολημένο με επιτυχείς μεταδόσεις είναι μικρότερο. Το γεγονός αυτό προκαλεί μείωση της $S_{d,rc}$ και επομένως η αποδοτικότητα του συστήματος εξαρτάται σε μικρότερο βαθμό από τις βέλτιστες παραμέτρους Γ_{opt} , V_{f_opt} , V_{b_opt} .



Σχήμα 6-11. Διέλευση ανά κανάλι δεδομένων $S_{d,rc}$ για $R=0,5,10$

6.7 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται ένα πρωτόκολλο σύγχρονης μετάδοσης στα WDM κανάλια ενός τοπικού δικτύου τοπολογίας παθητικού αστέρα που εκμεταλλεύεται την πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου προκειμένου να εισάγει τον κατάλληλο διαχωρισμό των καναλιών ελέγχου και να παρέχει τη βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Το αντικείμενο της μελέτης συνίσταται στην κατάλληλη αξιοποίηση της πληροφορίας ελέγχου που μεταδίδεται μέσω της MCA και στη διατύπωση ενός αποδοτικού πρωτοκόλλου πρόσβασης στο δίκτυο παθητικού αστέρα. Έτσι, ο προτεινόμενος διαχωρισμός των καναλιών ελέγχου σε δύο ομάδες με ασύμμετρα δικαιώματα πρόσβασης των σταθμών σε αυτές ανάλογα με την κατάσταση τους (ελεύθεροι ή ενεργοί) βελτιστοποιεί την απόδοση του

δικτύου. Και αυτό γιατί ο προτεινόμενος διαχωρισμός της MCA επιτυγχάνει ελαχιστοποίηση των συγκρούσεων στα κανάλια ελέγχου και βελτιστοποίηση της αξιοποίησης του εύρους ζώνης της MCA, γεγονός που επιδρά καθοριστικά στη μεγιστοποίηση της διέλευσης.

Όπως στο Κεφάλαιο 5, το προτεινόμενο πρωτόκολλο πρόσβασης συνυπολογίζει την επίδραση της καθυστέρησης διάδοσης της οπτικής πληροφορίας στην απόδοση του δικτύου. Συγκεκριμένα, η μελέτη αξιοποιεί την καθυστέρηση διάδοσης ως χρόνο επιβεβαίωσης λήψης των πακέτων ελέγχου για την αποφυγή των συγκρούσεων στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό. Η τεχνική αυτή σε συνδυασμό με τα ασύμμετρα δικαιώματα πρόσβασης στην MCA, ως αποτέλεσμα του βέλτιστου διαχωρισμού των καναλιών ελέγχου σε δύο ομάδες, επιτυγχάνουν ακόμα καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και μεγιστοποίηση της διέλευσης.

Για τον υπολογισμό των μέτρων αποδοτικότητας του προτεινόμενου συστήματος αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα μαρκοβιανής ανάλυσης για δεδομένο πληθυσμό σταθμών που συνυπολογίζουν την καθυστέρηση διάδοσης. Το ένα μοντέλο μαρκοβιανής ανάλυσης αγνοεί τις συγκρούσεις στον προορισμό, ενώ το άλλο τις συνυπολογίζει. Η συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων των δύο μαρκοβιανών μοντέλων συμβάλει στην ποσοτικοποίηση της επίδρασης των συγκρούσεων στον προορισμό στην απόδοση του συστήματος. Σημαντική συμβολή στη διατύπωση των δύο μαρκοβιανών μοντέλων έχει η μαρκοβιανή ανάλυση της απόδοσης πολυδιαυλικών δικτύων ασύμμετρης πρόσβασης που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.

Επίσης, η μελέτη συμπληρώνεται με τη διεξοδική στατιστική ανάλυση για τον καθορισμό των αναλυτικών τύπων που παρέχουν τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του συστήματος που μεγιστοποιούν τη διέλευση σε κάθε χρονικό κύκλο, δηλαδή:

- της βέλτιστης πιθανότητας επανεκπομπής
- του βέλτιστου πλήθους των καναλιών ελέγχου με δικαίωμα πρόσβασης μόνο των ελεύθερων σταθμών
- του βέλτιστου πλήθους των καναλιών ελέγχου με δικαίωμα πρόσβασης μόνο των ενεργών σταθμών.

Τα αποτελέσματα της αναλυτικής μελέτης επιβεβαιώθηκαν από αυτά της εξομοίωσης που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια εξομοιωτικού μοντέλου διακριτών γεγονότων που αναπτύχθηκε. Τα αριθμητικά αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η απόδοση του προτεινόμενου δικτύου ασύμμετρης πρόσβασης εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους [J.1],[J.2],[C.2]:

- το συνολικό πλήθος v των καναλιών ελέγχου που συγκροτούν την MCA
- το βέλτιστο διαχωρισμό της MCA στις δύο ομάδες καναλιών, δηλαδή: το βέλτιστο πλήθος v_f των καναλιών ελέγχου με δικαίωμα πρόσβασης μόνο των ελεύθερων σταθμών, το βέλτιστο πλήθος v_b των καναλιών ελέγχου με δικαίωμα πρόσβασης μόνο των ενεργών σταθμών
- το πλήθος N των καναλιών δεδομένων
- το πλήθος M των σταθμών
- τη μέση τιμή της πιθανότητας απόρριψης πακέτων στον προορισμό P_{rej}
- την κανονικοποιημένη τιμή της καθυστέρησης διάδοσης R .

Όπως ισχύει για το σύστημα συμμετρικής πρόσβασης, η απόδοση του συστήματος ασύμμετρης πρόσβασης στην MCA επηρεάζεται καθοριστικά από τη τιμή του λόγου της

καθυστερήσης διάδοσης προς το χρόνο μετάδοσης του πακέτου δεδομένων. Συγκεκριμένα, η απόδοση του συστήματος περιορίζεται δραματικά με την αύξηση της τιμής του παραπάνω λόγου.

Όπως ήταν αναμενόμενο, τα αριθμητικά αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος ασύμμετρης πρόσβασης εξαρτάται από τις συγκρούσεις στον προορισμό. Επίσης, η μελέτη απέδειξε ότι τα συστήματα μικρού πληθυσμού σταθμών επηρεάζονται περισσότερο από τις απώλειες εξαιτίας συγκρούσεων στον προορισμό σε σχέση με συστήματα μεγαλύτερου πληθυσμού.

Τέλος, η συγκριτική μελέτη του συστήματος ασύμμετρης πρόσβασης στην MCA σε σχέση με το σύστημα συμμετρικής πρόσβασης κατέδειξε ότι ο βέλτιστος διαχωρισμός των καναλιών ελέγχου παρέχει σημαντική βελτίωση των μέτρων αποδοτικότητας, που σε πολλές περιπτώσεις ανέρχεται σε 18%.

Μέρος III:

Αρχιτεκτονικές Ελέγχου και Τεχνικές Μετάδοσης Μητροπολιτικών WDM Δικτύων Τοπολογίας Δακτυλίου: Μελέτη Απόδοσης σε Περιβάλλον Εκρηκτικής Κίνησης

Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1, οι σύγχρονες τάσεις στα WDM μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου υποδεικνύουν την αφιέρωση ενός συγκεκριμένου WDM καναλιού ανά σταθμό-κόμβο είτε για μετάδοση είτε για λήψη. Στα αντίστοιχα WDM πρωτόκολλα, η αποκλειστική αφιέρωση ενός καναλιού ανά σταθμό-κόμβο αποσκοπεί στην αντιμετώπιση των συγκρούσεων στα WDM κανάλια και στον προορισμό καθώς και στη βελτιστοποίηση της απόδοσης.

Στα μητροπολιτικά WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου που μελετώνται στα ακόλουθα κεφάλαια στο Μέρος III, ο κάθε σταθμός-κόμβος του δικτύου επιτελεί αυξημένες λειτουργίες όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια. Με δεδομένο ότι τα σύγχρονα μητροπολιτικά WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου λειτουργούν κυρίως ως δίκτυα κορμού, ο κάθε σταθμός-κόμβος του δικτύου συγκεντρώνει την κίνηση των τοπικών δικτύων τα οποία είναι συνδεδεμένα σε αυτόν και την προωθεί στον μητροπολιτικό δακτύλιο. Προκειμένου να τονιστούν οι αυξημένες λειτουργίες του σταθμού-κόμβου των μητροπολιτικών WDM δικτύων τοπολογίας δακτυλίου που παρουσιάζονται στο Μέρος III σε σχέση με αυτές του σταθμού των τοπικών WDM δικτύων τοπολογίας παθητικού αστέρα που παρουσιάζονται στο Μέρος II, επιλέγεται στο Μέρος III ο σταθμός-κόμβος να ονομάζεται απλά κόμβος. Άλλωστε η επιλογή αυτή συμμορφώνεται με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Συγκεκριμένα, τα WDM πρωτόκολλα μητροπολιτικών δικτύων τοπολογίας δακτυλίου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τη λειτουργία του αποκλειστικού καναλιού ανά κόμβο:

- στα WDM πρωτόκολλα στα οποία κάθε κόμβος διαθέτει ένα συγκεκριμένο WDM κανάλι για μετάδοση, αποφεύγοντας τις συγκρούσεις στα κανάλια [25]-[29]. Έτσι, κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με ένα σταθερά συντονισμένο εκπομπό και ένα συντονιζόμενο δέκτη. Αυτή η δικτυακή διεπαφή κόμβου συμβολίζεται ως FT-TR.
- στα WDM πρωτόκολλα στα οποία κάθε κόμβος διαθέτει ένα συγκεκριμένο WDM κανάλι για λήψη, αποφεύγοντας τις συγκρούσεις στον προορισμό [30]-[37]. Έτσι, κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με ένα συντονιζόμενο εκπομπό και ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη. Αυτή η δικτυακή διεπαφή κόμβου συμβολίζεται ως TT-FR.

Στα WDM πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν τόσο τη TT-FR όσο και τη FT-TR δικτυακή διεπαφή κόμβου εισάγεται ένας περιορισμός σχετικά με τον αριθμό των κόμβων γύρω στον οπτικό δακτύλιο. Ειδικότερα, τα πρωτόκολλα αυτά θεωρούν ότι ο αριθμός των κόμβων N είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο D του αριθμού των WDM καναλιών W στο δακτύλιο, δηλαδή: $D = N / W$.

Παρόλο που ο περιορισμός αυτός στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των συγκρούσεων, εισάγει σημαντικά προβλήματα στην ικανότητα κλιμάκωσης του δικτύου. Και αυτό γιατί:

- δυσχεραίνει και καθιστά ιδιαίτερα περίπλοκη τη συντήρηση του δικτύου σε περίπτωση απενεργοποίησης ενός κόμβου,
- καθιστά ανέφικτη την επιπλέον επέκταση του δικτύου κατά την πιθανή ανάγκη για εισαγωγή νέων κόμβων.

Επίσης, σε σύγχρονα WDM μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου, ο παραπάνω περιορισμός έχει ως άμεση συνέπεια πολλές χρονικές σχισμές στο δακτύλιο να

παραμένουν αχρησιμοποίητες, ακόμα και σε κατάσταση πολύ υψηλού φορτίου. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μη αποδοτική χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης, προκαλώντας σημαντικό περιορισμό της απόδοσης.

Στα επόμενα κεφάλαια μελετάται η μονοδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου μητροπολιτικών WDM δικτύων τοπολογίας δακτυλίου. Στη μελέτη χρησιμοποιείται μια νέα δικτυακή διεπαφή κόμβου η οποία δεν περιορίζει τη μετάδοση ή τη λήψη κάθε κόμβου σε συγκεκριμένο κανάλι. Επίσης, η προτεινόμενη μονοδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου και η νέα δικτυακή διεπαφή κόμβου συμπληρώνονται από ένα σύγχρονο WDMA πρωτόκολλο πρόσβασης στα πολλαπλά WDM κανάλια του δακτυλίου που αποφεύγει τις συγκρούσεις τόσο στα κανάλια όσο και στον προορισμό [J.7],[J.8],[C.5]-[C.7].

Το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου περιλαμβάνει πολλά WDM κανάλια για την επικοινωνία πακέτων δεδομένων και ένα ξεχωριστό WDM κανάλι ελέγχου για την ανταλλαγή πληροφοριών ελέγχου πριν από τη μετάδοση πακέτων δεδομένων. Επίσης, εφαρμόζεται ένας αποδοτικός αλγόριθμος πρόσβασης για την αποφυγή των συγκρούσεων τόσο στα κανάλια δεδομένων όσο και στον προορισμό.

Το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών που έχουν ικανότητα συντονισμού σε πολλά κανάλια. Έτσι, κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με ένα συντονιζόμενο εκπομπό και ένα συντονιζόμενο δέκτη για την προσπέλαση σε όλα τα κανάλια δεδομένων.

Επίσης στο προτεινόμενο μοντέλο δικτύου αρχιτεκτονικής ελέγχου, ο αριθμός των κόμβων γύρω από το δακτύλιο είναι ανεξάρτητος από τον αριθμό των WDM καναλιών. Αυτό επιτυγχάνεται αφού κάθε κόμβος μπορεί να μεταδώσει σε οποιοδήποτε από τα κανάλια που διαθέτουν ελεύθερες χρονικές σχισμές και να παραλάβει από οποιοδήποτε κανάλι. Έτσι, εξαλείφεται ο περιορισμός $D = N / W$ που θέτουν τα περισσότερα WDMA πρωτόκολλα που δίνονται στη βιβλιογραφία και παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.1.1.

Επομένως, το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου αρχιτεκτονικής ελέγχου μπορεί να εφαρμοστεί σε WDM μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου ανεξάρτητα από τον πληθυσμό των κόμβων. Επίσης, το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου παρέχει υψηλή ικανότητα κλιμάκωσης σε περίπτωση επέκτασης του δικτύου και υψηλής συντήρησης σε περίπτωση πιθανού δικτυακού σφάλματος.

Τέλος, ο εφαρμοζόμενος αλγόριθμος αποφυγής συγκρούσεων στα κανάλια και στον προορισμό επιτυγχάνει τη βελτιστοποίηση των μέτρων αποδοτικότητας, χωρίς τα μειονεκτήματα της υψηλής συνολικής καθυστέρησης που άλλα WDMA πρωτόκολλα εισάγουν, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.1.1. Η εκμετάλλευση της πληροφορίας ελέγχου προκειμένου να αποφευχθούν οι συγκρούσεις απαιτεί την επεξεργασία της πληροφορίας πριν από την επικοινωνία δεδομένων, ενώ παράλληλα διατηρείται ο απόλυτος συγχρονισμός των καναλιών δεδομένων και ελέγχου.

Στα ακόλουθα κεφάλαια, το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου μελετάται σε πολλαπλές εκδοχές του, με σκοπό τον προσδιορισμό των κατάλληλων τροποποιήσεων σε παραμέτρους του συστήματος προκειμένου να επιτευχθεί επιπλέον βελτιστοποίηση της απόδοσης. Σε κάθε τροποποίηση διαφοροποιείται ο αλγόριθμος πρόσβασης στα WDM κανάλια και η πληροφορία που εμπεριέχεται στο πακέτο ελέγχου. Αντίθετα, σε όλες τις τροποποιήσεις του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου η

μονοδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου και η συγχρονισμένη λειτουργία της με τα κανάλια δεδομένων παραμένει η ίδια.

Συγκεκριμένα:

- στο Κεφάλαιο 7 μελετάται η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου θεωρώντας ότι οι χρονικές σχισμές, μετά τη λήψη τους, αποδεσμεύονται από τον αποστολέα [J.8],[C.6],[C.7] .
- στο Κεφάλαιο 8 μελετάται η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου θεωρώντας ότι οι χρονικές σχισμές, μετά τη λήψη τους, αποδεσμεύονται από τον προορισμό [J.7],[C.5].
- στο Κεφάλαιο 9 η πληροφορία ελέγχου μεταβάλλεται προκειμένου το σύστημα να παρέχει ανοχή σε πιθανές δικτυακές καταστροφές, όπως σε απενεργοποίηση ή καταστροφή ενός αριθμού από τα κανάλια δεδομένων [J.7].
- στο Κεφάλαιο 10 μελετάται η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου για μεγάλο αριθμό καναλιών δεδομένων, με σκοπό τη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση του μεγάλου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας [J.7].

Για τη μελέτη του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου σε κάθε μια από τις παραπάνω τροποποιήσεις έχει αναπτυχθεί ένα θεωρητικό μοντέλο ανάλυσης για τον υπολογισμό της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο. Επίσης, για την ενδελεχή μελέτη του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου σε κάθε μια από τις παραπάνω τροποποιήσεις αναπτύχθηκε εξομοιωτικό μοντέλο διακριτών γεγονότων για τον υπολογισμό όχι μόνο της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο αλλά και των υπόλοιπων μέτρων αποδοτικότητας, δηλαδή:

- της μέσης τιμής της καθυστέρησης των πακέτων δεδομένων στους καταχωρητές εξόδου των κόμβων-αποστολέων.
- της μέσης τιμής της συνολικής καθυστέρησης των πακέτων δεδομένων, από τη στιγμή της γέννησης τους μέχρι τη λήψη τους από τους κόμβους-παραλήπτες.
- της μέσης τιμής της πιθανότητας απόρριψης ενός πακέτου δεδομένων στους καταχωρητές εξόδου των κόμβων-αποστολέων λόγω υπερχείλισης.
- της μέσης τιμής του φορτίου που είναι αποθηκευμένο στους καταχωρητές εξόδου των κόμβων-αποστολέων.

Σε όλες τις παραπάνω τροποποιήσεις, η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου υπολογίζεται εξομοιωτικά θεωρώντας δύο διαφορετικά μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Συγκεκριμένα, η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μελετάται για τις περιπτώσεις που η συνολική κίνηση των πακέτων δεδομένων στα δίκτυα πρόσβασης ακολουθεί:

- Poisson κατανομή
- Self-similar χαρακτηριστικά.

Για την μελέτη των πλεονεκτημάτων από τη χρήση συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών ανά κόμβο, συγκριτικά με τις FT-TR και TT-FR δικτυακές διεπαφές κόμβου, παρέχεται η σύγκριση του προτεινόμενου WDMA πρωτοκόλλου με τα πρωτόκολλα που παρουσιάζονται στη μελέτη [25]. Συγκεκριμένα, το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και το πρωτόκολλο πρόσβασης συγκρίνεται με:

- το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί τη FT-FR^x δικτυακή διεπαφή κόμβου, στο οποίο κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με έναν αριθμό σταθερά συντονισμένων δεκτών.
- το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί τη FT-TR δικτυακή διεπαφή κόμβου, στο οποίο σε κάθε κόμβο το πλήθος των σταθερά συντονισμένων δεκτών έχει αντικατασταθεί από ένα συντονιζόμενο δέκτη.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εξομοίωσης, που επαλήθευσαν τα συμπεράσματα της μελέτης [25], το FT-FR^x πρωτόκολλο αποφεύγει τις συγκρούσεις στον προορισμό αλλά εισάγει προβλήματα κλιμάκωσης, ενώ το FT-TR πρωτόκολλο βελτιώνει την ικανότητα κλιμάκωσης αλλά δεν αντιμετωπίζει τις συγκρούσεις στον προορισμό.

Παρόλο που η αντικατάσταση αυτή αποσκοπεί στη βελτίωση της ικανότητας κλιμάκωσης του συστήματος, οδηγεί σε σημαντικό περιορισμό της απόδοσης. Αντιθέτως, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εξομοίωσης που παρατίθενται συγκριτικά, το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και το πρωτόκολλο πρόσβασης όχι μόνο αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τα προβλήματα κλιμάκωσης και συντήρησης, αλλά επιπλέον επιτυγχάνει σημαντική βελτίωση της απόδοσης, ιδιαίτερα σε υψηλά φορτία. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και το πρωτόκολλο πρόσβασης αξιοποιεί αποτελεσματικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης της οπτικής ίνας ενώ εκμεταλλεύεται τα οφέλη από την ικανότητα συντονισμού των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών σε όλα τα κανάλια δεδομένων. Έτσι, το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου αρχιτεκτονικής ελέγχου και το πρωτόκολλο πρόσβασης παρέχουν μια αξιόπιστη υλοποίηση για αποδοτικά WDM μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου με ικανότητα κλιμάκωσης.

Κεφάλαιο 7 : Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου – Στρατηγική Αποδέσμευσης Χρονικών Σχισμών στον Αποστολέα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και το WDMA πρωτόκολλο πρόσβασης για μητροπολιτικά WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου.

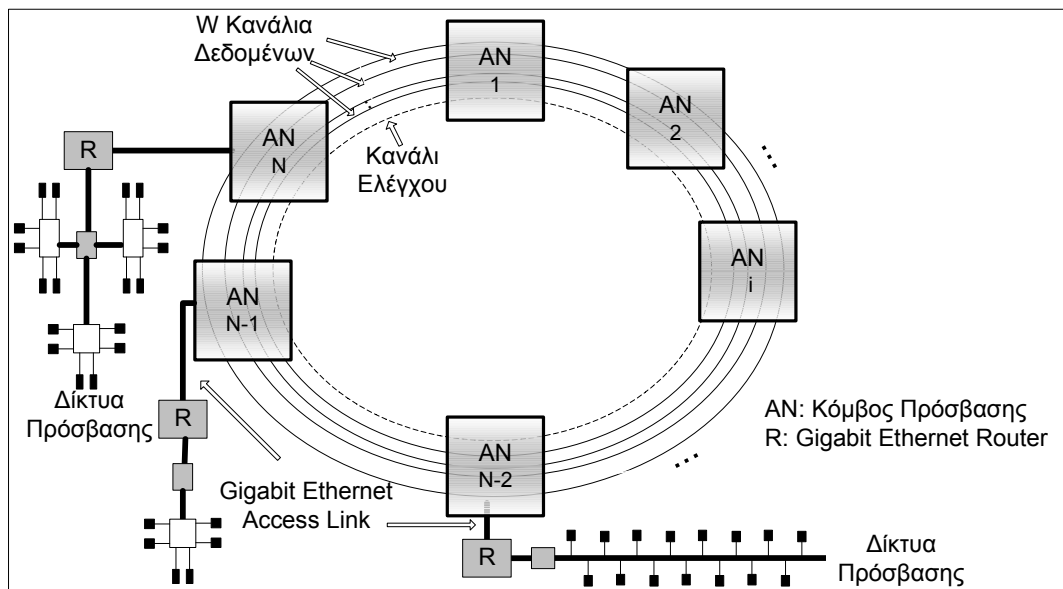
Η μετάδοση των πακέτων δεδομένων στα κανάλια του δακτυλίου πραγματοποιείται με σύγχρονο τρόπο με τη βοήθεια χρονικών σχισμών που περιστρέφονται στα κανάλια του δακτυλίου. Για τη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων, ο κόμβος-αποστολέας δεσμεύει μια χρονική σχισμή σε κάποιο κανάλι του δακτυλίου [J.7],[J.8],[C.6],[C.7].

Στο κεφάλαιο αυτό θεωρείται ότι μετά τη λήψη του πακέτου από τον προορισμό η αποδέσμευση της χρονικής σχισμής πραγματοποιείται από τον αποστολέα. Σε αυτή την περίπτωση η ακολουθούμενη στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών ονομάζεται source stripping.

7.1 Μοντέλο δικτύου

Το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου αρχιτεκτονικής ελέγχου είναι ένα σύγχρονο WDM δίκτυο τοπολογίας δακτυλίου που χρησιμοποιεί μία μονοκατευθυντική οπτική ίνα. Το δίκτυο χρησιμοποιεί $(W+1)$ το πλήθος μήκη κύματος και διασυνδέει N το πλήθος κόμβους. Οι κόμβοι απέχουν μεταξύ τους αρκετά συγκροτώντας ένα μητροπολιτικό δίκτυο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-1.

Τα μήκη κύματος $\lambda_1, \dots, \lambda_w$ χρησιμοποιούνται για την μετάδοση πακέτων δεδομένων και ονομάζονται κανάλια δεδομένων. Όμοια, το μήκος κύματος λ_c χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή πληροφοριών ελέγχου και ονομάζεται κανάλι ελέγχου.



Σχήμα 7-1. Μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου

Κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με ένα συντονιζόμενο εκπομπό και ένα συντονιζόμενο δέκτη που έχουν τη δυνατότητα να συντονιστούν στα W κανάλια δεδομένων.

Ο χρόνος συντονισμού του συντονιζόμενου εκπομπού και του συντονιζόμενου δέκτη συμβολίζονται ως t_{s-t} και t_{s-r} αντίστοιχα. Με δεδομένο ότι οι τεχνολογικές εξελίξεις μέχρι σήμερα δεν εγγυώνται αξιοπιστία στο χρόνο συντονισμού του συντονιζόμενου δέκτη, στη μελέτη λαμβάνεται υπόψη επιπλέον χρονικό διάστημα ασφαλείας t_g για την εξασφάλιση συντονισμού.

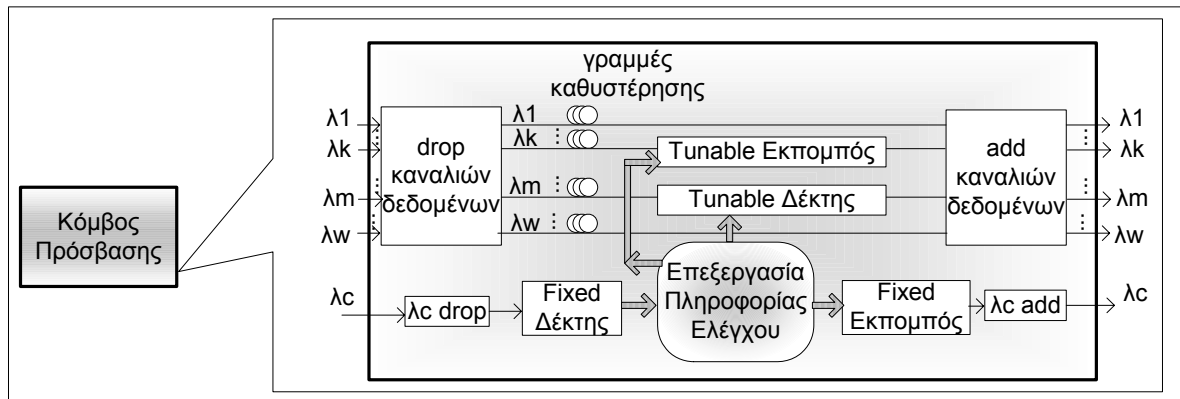
Επίσης, κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με ένα σταθερά συντονισμένο εκπομπού και ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη που είναι μόνιμα συντονισμένοι στο κανάλι ελέγχου λ_c . Έτσι, η προτεινόμενη δικτυακή διεπαφή του κάθε κόμβου ονομάζεται FT-FR-TT-TR.

Κάθε κόμβος έχει ικανότητα για οπτική προσθαιρητική πολύπλεξη (add-drop multiplexing) προκειμένου να προσπελάσει τον οπτικό δακτύλιο. Επίσης, κάθε κόμβος είναι συνδεδεμένος με ένα ή περισσότερα δίκτυα πρόσβασης.

Κάθε κόμβος διατηρεί ένα μοναδικό καταχωρητή εξόδου χωρητικότητας B πακέτων δεδομένων στον οποίο αποθηκεύει τα εισερχόμενα πακέτα δεδομένων από τα δίκτυα πρόσβασης. Εφόσον η πλειονότητα των τοπικών δικτύων πρόσβασης είναι τεχνολογίας Ethernet, θεωρείται ότι τα δίκτυα πρόσβασης γεννούν πακέτα δεδομένων σταθερού μεγέθους L που ισούται με το μέγεθος της μέγιστης μονάδας μεταφοράς σε Ethernet δίκτυα, δηλαδή $L = 12\ 000$ bits.

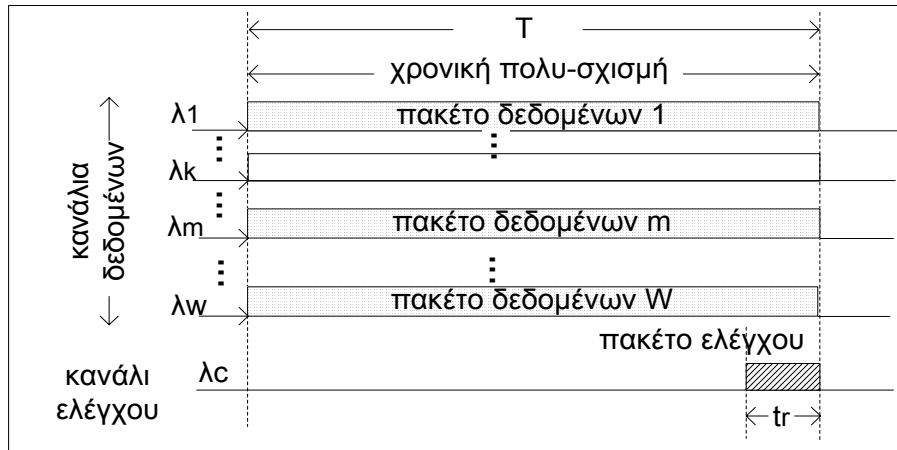
Σε κάθε κόμβο λειτουργεί ένα σύνολο από W παράλληλες γραμμές καθυστέρησης (delay lines), όπου κάθε γραμμή καθυστέρησης αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κανάλι δεδομένων. Η εφικτότητα της υλοποίησης αυτής προτείνεται στη μελέτη [95], όπου οι γραμμές καθυστέρησης είναι πολύ μακριές και η συνολική καθυστέρηση πολύ υψηλή. Αντίθετα με τη [95], η προτεινόμενη υλοποίηση προκαλεί μικρότερη καθυστέρηση ανά κόμβο και παρέχει μια οικονομική και αποδοτική πρόταση.

Η λογική αρχιτεκτονική του κόμβου παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-2.



Σχήμα 7-2. Λογική αρχιτεκτονική κόμβου

Όλα τα κανάλια του οπτικού δακτυλίου είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους. Ο άξονας του χρόνου διαιρείται σε χρονικές σχισμές σταθερού μήκους που η διάρκειά τους ισούται με το χρόνο μετάδοσης T του πακέτου δεδομένων στο δακτύλιο. Ένα σύνολο από W παράλληλες χρονικές σχισμές στα κανάλια δεδομένων συγκροτούν μια νέα χρονική δομή που ονομάζεται χρονική πολυ-σχισμή, όπως δείχνει το Σχήμα 7-3.



Σχήμα 7-3. Δομή της χρονικής πολυ-σχισμής

7.2 Δομή πακέτου ελέγχου

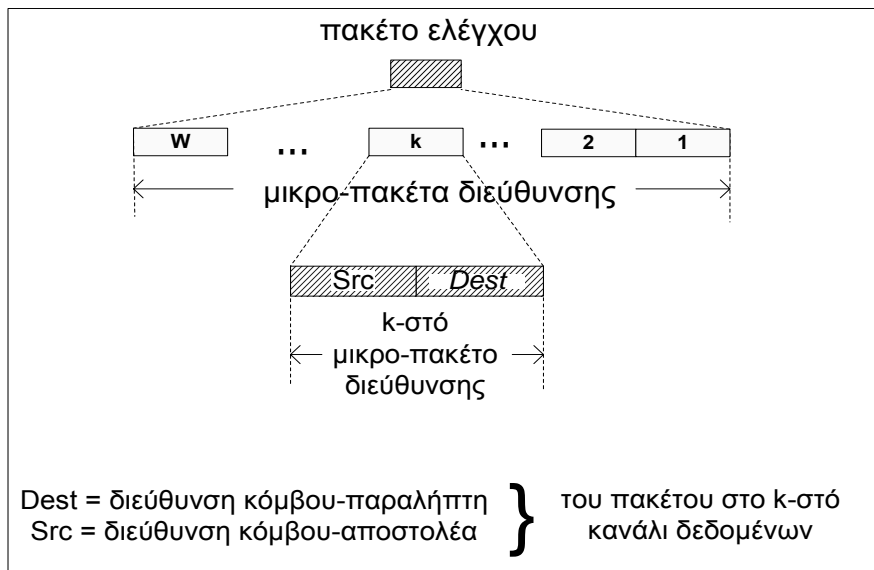
Στην αρχή κάθε χρονικής πολυ-σχισμής, το κανάλι ελέγχου μεταφέρει ένα πακέτο ελέγχου. Ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου ελέγχου συμβολίζεται ως t_r , όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-3. Το πακέτο ελέγχου αποτελείται από W το πλήθος μικρο-πακέτα διεύθυνσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-4. Κάθε ένα από τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης αντιστοιχεί σε ένα κανάλι δεδομένων. Επίσης, κάθε ένα από τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης έχει μέγεθος $(2 \times n)$ bits, $2^n \geq N > 2^{n-1}$ [96].

Κάθε μικρο-πακέτο διεύθυνσης διαιρείται σε δύο πεδία κάθε ένα από τα οποία έχει μέγεθος n bits, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-4. Έτσι, το k -στό $k \in \{1, 2, \dots, W\}$ μικρο-πακέτο διεύθυνσης μεταφέρει σε δυαδική μορφή:

- στο πρώτο πεδίο, τη διεύθυνση του κόμβου-αποστολέα του πακέτου δεδομένων που μεταδίδεται στο k -στό κανάλι δεδομένων της χρονικής πολυ-σχισμής.
- στο δεύτερο πεδίο, τη διεύθυνση του κόμβου-προορισμού, του πακέτου δεδομένων που μεταδίδεται στο k -στό κανάλι δεδομένων της χρονικής πολυ-σχισμής.

Στην περίπτωση που το k -στό μικρο-πακέτο διεύθυνσης είναι άδειο, τότε το k -στό κανάλι δεδομένων είναι ελεύθερο για μετάδοση.

Η δομή του πακέτου ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-4.



Σχήμα 7-4. Δομή πακέτου ελέγχου

7.3 Στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα

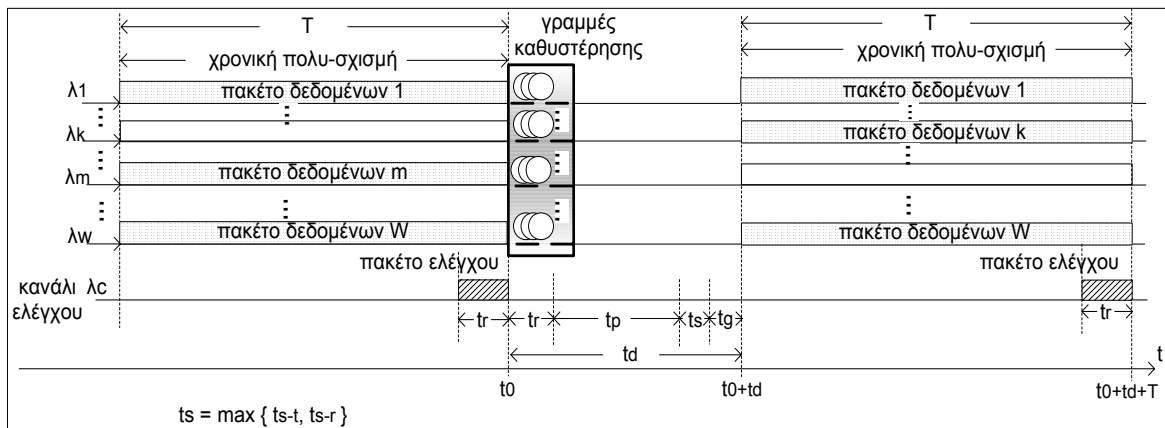
Για τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων στον οπτικό δακτύλιο ακολουθείται η στρατηγική επαναχρησιμοποίησης των χρονικών σχισμών. Έτσι, ο αποστολέας του πακέτου δεδομένων δεσμεύει μια χρονική σχισμή για τη μετάδοση του πακέτου ως τον προορισμό. Μετά τη λήψη του πακέτου, η σχισμή αποδεσμεύεται και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Κριτήριο για την αποδοτικότητα του WDMA πρωτοκόλλου αποτελεί ο καθορισμός του κόμβου που αποδεσμεύει τη χρονική σχισμή μετά τη λήψη του πακέτου: ο κόμβος-αποστολέας ή ο κόμβος-παραλήπτης.

Ανεξάρτητα με τον κόμβο αποδέσμευσης της χρονικής σχισμής, στο προτεινόμενο πρωτόκολλο πρόσβασης του μοντέλου δικτύου αρχιτεκτονικής ελέγχου απαγορεύεται η άμεση επαναχρησιμοποίηση μιας χρονικής σχισμής που μόλις έχει αποδεσμευτεί. Έτσι, επιβάλλεται στον κόμβο που μόλις έχει αποδεσμεύσει μια χρονική σχισμή να παραχωρήσει την ελεύθερη πια χρονική σχισμή στον επόμενο κόμβο [25]. Η στρατηγική αυτή παρέχει δίκαιη πρόσβαση των κόμβων στο δακτύλιο, χωρίς να απαιτεί επιπλέον χρόνο επεξεργασίας και χωρίς να εισάγει κόστος καθυστέρησης.

Στο κεφάλαιο αυτό θεωρείται ότι η αποδέσμευση των χρονικών σχισμών πραγματοποιείται από τον αποστολέα. Σύμφωνα με τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα, ο αποστολέας ενός πακέτου δεδομένων είναι υπεύθυνος να αποδεσμεύσει μια χρονική σχισμή, κατά την επάνοδο της στον κόμβο μετά από μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον οπτικό δακτύλιο.

7.4 Πρωτόκολλο πρόσβασης

Έστω ότι τη χρονική στιγμή t_0 μία χρονική πολυ-σχισμή φτάνει σε ένα κόμβο όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-5. Τότε ο κόμβος ακολουθεί την ακόλουθη διαδικασία:



Σχήμα 7-5. Αφιξη και αναχώρηση μιας χρονικής πολυ-σχισμής σε ένα κόμβο

Καθυστέρηση των πακέτων δεδομένων και διαχείριση της πληροφορίας ελέγχου

Τη χρονική στιγμή t_0 τα αφιχθέντα πακέτα δεδομένων εισέρχονται στις W γραμμές καθυστέρησης, όπου παραμένουν για χρονικό διάστημα t_d . Το χρονικό διάστημα t_d ισούται με το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη διαχείριση της πληροφορίας ελέγχου και αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια:

- *Λήψη του πακέτου ελέγχου:* τη χρονική στιγμή t_0 το αφιχθέν πακέτο ελέγχου αρχίζει να παραλαμβάνεται από το σταθερά συντονισμένο δέκτη του κόμβου. Η λήψη του πακέτου ελέγχου διαρκεί χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο μετάδοσης του t_r .
- *Επεξεργασία του πακέτου ελέγχου:* τη χρονική στιγμή $(t_0 + t_r)$, ο κόμβος έχει παραλάβει το πακέτο ελέγχου και το έχει απορροφήσει από το κανάλι ελέγχου. Αφού το πακέτο ελέγχου είναι σε οπτική μορφή, ο κόμβος το μετατρέπει σε ηλεκτρονική μορφή και το επεξεργάζεται τοπικά. Η μετατροπή αυτή ονομάζεται οπτο-ηλεκτρονική μετατροπή. Από την επεξεργασία του πακέτου ελέγχου, ο κόμβος εξάγει πληροφορίες σχετικά:
 - τα ελεύθερα κανάλια δεδομένων για μετάδοση, προκειμένου να αποφύγει τις συγκρούσεις στα κανάλια δεδομένων.
 - τη διεύθυνση προορισμού των πακέτων δεδομένων που μεταδίδονται στα κανάλια δεδομένων, προκειμένου να αποφύγει τις συγκρούσεις στον προορισμό.
 - τη διεύθυνση του αποστολέα των πακέτων δεδομένων που μεταδίδονται στα κανάλια δεδομένων, προκειμένου ο αποστολέας μιας χρονικής σχισμής να δύναται να την αποδεσμεύσει μετά από μια πλήρη περιστροφή της.

Με βάση τις πληροφορίες αυτές, ο κόμβος εκτελεί τους ακόλουθους αλγόριθμους μετάδοσης και λήψης:

Αλγόριθμος μετάδοσης

Στην περίπτωση που ο κόμβος θέλει να μεταδώσει ένα πακέτο δεδομένων εξετάζει τα εξής ενδεχόμενα:

- αν υπάρχουν ελεύθερα κανάλια δεδομένων για τη μετάδοση, και

- αν κανένα από τα μεταδιδόμενα πακέτα δεδομένων δεν έχει τον ίδιο προορισμό με το δικό του πακέτο δεδομένων.

Αν οι παραπάνω συνθήκες ικανοποιούνται, ο κόμβος επιλέγει τυχαία ένα από τα ελεύθερα κανάλια δεδομένων για τη μετάδοση, έστω το k -στό κανάλι δεδομένων. Αλλιώς, η μετάδοση αναβάλλεται για την επόμενη χρονική πολυ-σχισμή. Οι παραπάνω προϋποθέσεις εξασφαλίζουν ότι κατά τον αλγόριθμο μετάδοσης αποφεύγονται οι συγκρούσεις πακέτων δεδομένων τόσο στα κανάλια δεδομένων όσο και στον προορισμό.

Αλγόριθμος λήψης

Έστω ότι ο κόμβος ανιχνεύει ότι ένα πακέτο δεδομένων προορίζεται για αυτόν και μεταδίδεται στο m -στό $\in \{1,2..W\}$ κανάλι δεδομένων.

Μετά την εκτέλεση των παραπάνω αλγορίθμων πρόσβασης, ο κόμβος τοπικά αναγεννά σε ηλεκτρονική μορφή ένα νέο πακέτο ελέγχου. Δηλαδή, ο κόμβος αναγεννά τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης που έχει παραλάβει στην αρχή της χρονικής πολυ-σχισμής και τροποποιεί μόνο τα πεδία του k -στού μικρο-πακέτου διεύθυνσης γράφοντας:

- στο πρώτο πεδίο, τη δική διεύθυνση ως διεύθυνση του κόμβου-αποστολέα
- στο δεύτερο πεδίο, τη διεύθυνση προορισμού του δικού του πακέτου δεδομένων.

Επίσης, στην περίπτωση που ο κόμβος ανιχνεύσει ότι μια χρονική σχισμή στο z -στό $\in \{1,2..W\}$ κανάλι δεδομένων, στην οποία έχει ο ίδιος μεταδώσει ένα πακέτο δεδομένων, έχει επανέλθει πίσω μετά από μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον δακτύλιο, τότε ο κόμβος δηλώνει ως ελεύθερο το z -στό μικρο-πακέτο διεύθυνσης, σύμφωνα με τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα.

Στη συνέχεια, ο κόμβος μετατρέπει το νέο πακέτο δεδομένων (δηλαδή τα W νέα μικρο-πακέτα διεύθυνσης) σε οπτική μορφή. Η μετατροπή αυτή ονομάζεται ηλεκτρο-οπτική μετατροπή. Το συνολικό χρονικό διάστημα επεξεργασίας του πακέτου ελέγχου συμβολίζεται ως t_p , όπως δείχνει το Σχήμα 7-5.

- *Συντονισμός των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών:* τη χρονική στιγμή ($t_0 + t_r + t_p$) ο κόμβος αρχίζει να συντονίζει το συντονιζόμενο εκπομπό στο k -στό κανάλι δεδομένων για τη μετάδοση, καθώς επίσης και το συντονιζόμενο δέκτη στο m -στό κανάλι δεδομένων για τη λήψη. Το συνολικό χρονικό διάστημα συντονισμού των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών είναι $t_s = \max\{t_{s-t}, t_{s-r}\}$.
- *Χρόνος ασφαλείας:* ένα επιπλέον χρονικό διάστημα ασφαλείας t_g θεωρείται πριν την αποχώρηση της χρονικής πολυ-σχισμής από τον κόμβο. Το χρονικό διάστημα αυτό είναι απαραίτητο εξαιτίας της έλλειψης αξιοπιστίας αναφορικά με το χρόνο απόκρισης των ηλεκτρονικών στοιχείων στον οπτικό δίκτυο για την εξασφάλιση του συντονισμού.

Η καθυστέρηση των πακέτων δεδομένων στις γραμμές καθυστέρησης ισούται με το συνολικό χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη διαχείριση της πληροφορίας ελέγχου, δηλαδή:

$$t_d = t_r + t_p + \max\{t_{s-t_s}, t_{s-r}\} + t_g \quad (7.1)$$

Αναχώρηση της χρονικής πολυ-σχισμής από τον κόμβο

Τη χρονική στιγμή $(t_0 + t_d)$ η χρονική πολυ-σχισμή αρχίζει να αναχωρεί από τον κόμβο. Όπως δείχνει το Σχήμα 7-5, τη χρονική στιγμή $(t_0 + t_d)$ ξεκινούν ταυτόχρονα οι ακόλουθες διαδικασίες:

- *Μετάδοση και λήψη των πακέτων δεδομένων:* τη χρονική στιγμή $(t_0 + t_d)$ ο κόμβος ξεκινά: a) τη μετάδοση του πακέτου δεδομένων του στο k -στό κανάλι δεδομένων χρησιμοποιώντας το συντονιζόμενο εκπομπό, b) τη λήψη του πακέτου δεδομένων του στο m -στό κανάλι δεδομένων χρησιμοποιώντας το συντονιζόμενο λήπτη. Η μετάδοση και λήψη των πακέτων δεδομένων διαρκεί χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο μετάδοσης T του πακέτου δεδομένων στον οπτικό δακτύλιο.
- *Μετάδοση του νέου πακέτου ελέγχου:* τη χρονική στιγμή $(t_0 + t_d)$ ο κόμβος ξεκινά τη μετάδοση του νέου πακέτου ελέγχου που αναγέννησε χρησιμοποιώντας τον σταθερά συντονισμένο εκπομπό. Η μετάδοση του πακέτου ελέγχου διαρκεί χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο μετάδοσης του πακέτου ελέγχου στον οπτικό δακτύλιο t_r .
- *Έξοδος από τις γραμμές καθυστέρησης:* τη χρονική στιγμή $(t_0 + t_d)$ τα πακέτα δεδομένων -εκτός από αυτό του m -στού καναλιού δεδομένων που παραλαμβάνεται από τον δέκτη του κόμβου- ξεκινούν να εξέρχονται από τις W γραμμές καθυστέρησης του κόμβου.

Η παραπάνω διαδικασία εξασφαλίζει τον απόλυτο συγχρονισμό των καναλιών δεδομένων και ελέγχου μεταξύ τους.

7.5 Ανάλυση

Η καθυστέρηση διάδοσης T_p της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον οπτικό δακτύλιο δίνεται από τη σχέση:

$$T_p = \frac{L_R}{v_g} \quad (7.2)$$

όπου: L_R είναι η περίμετρος του οπτικού δακτυλίου και v_g είναι η ταχύτητα της δέσμης φωτός στην οπτική ίνα.

Αφού η διάδοση ενός πακέτου δεδομένων καθυστερεί σε κάθε κόμβο χρονικό διάστημα t_d , το χρονικό διάστημα T_c που απαιτείται για μια πλήρη περιστροφή μιας χρονικής σχισμής γύρω από το δακτύλιο δίνεται από τη σχέση:

$$T_c = T_p + N \times t_d \quad (7.3)$$

Η απόσταση μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους γειτονικών κόμβων στον οπτικό δακτύλιο θεωρείται σταθερή. Το χρονικό διάστημα T_a που μεσολαβεί από την αναχώρηση του πακέτου δεδομένων από ένα κόμβο μέχρι την έξοδο του από τη γραμμή καθυστέρησης στο γειτονικό κόμβο δίνεται από τη σχέση:

$$T_a = \frac{T_c}{N} \quad (7.4)$$

Το χρονικό διάστημα T_x που μεσολαβεί από την αναχώρηση του πακέτου δεδομένων από τον αποστολέα μέχρι την επάνοδό του μετά από μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον οπτικό δακτύλιο δίνεται από τη σχέση:

$$T_x = N \times T_a \quad (7.5)$$

Σύμφωνα με τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα που ακολουθείται, αν μια χρονική σχισμή στην οποία μετάδωσε ο κόμβος-αποστολέας επανέρχεται στον κόμβο μετά από μια πλήρη περιστροφή της γύρω από το δακτύλιο, τότε αυτή δηλώνεται ως ελεύθερη από τον κόμβο. Επίσης, η ελεύθερη πια σχισμή δεδομένων δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί αμέσως από τον αποστολέα για μετάδοση. Έτσι, στην περίπτωση αυτή η ελεύθερη πια χρονική σχισμή αφήνεται αχρησιμοποίητη στο γειτονικό κόμβο. Το χρονικό διάστημα T_r που μεσολαβεί από την αναχώρηση του πακέτου δεδομένων από τον αποστολέα μέχρις ότου η χρονική σχισμή που το μεταφέρει να δύναται να επαναχρησιμοποιηθεί, δίνεται από τη σχέση:

$$T_r = T_x + T_a \quad (7.6)$$

Από τις σχέσεις (7.3)-(7.6) προκύπτει:

$$T_r = (T_p + N \times t_d) \times \left(1 + \frac{1}{N}\right) \quad (7.7)$$

Η μέγιστη διέλευση S_{slot} ανά χρονική σχισμή και ανά κανάλι δεδομένων ορίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός των επιτυχών μεταδόσεων πακέτων δεδομένων από μια χρονική σχισμή σε ένα κανάλι δεδομένων, κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής γύρω από τον οπτικό δακτύλιο, δηλαδή:

$$S_{slot} = \frac{T_c}{T_r} \quad (7.8)$$

Από τις σχέσεις (7.3), (7.7), (7.8), προκύπτει:

$$S_{slot} = \frac{N}{N+1} \quad (7.9)$$

Ο ρυθμός μετάδοσης σε κάθε κανάλι δηλώνεται ως R_w σε μονάδες Gb/s. Η μέγιστη διέλευση S_w ανά κανάλι δεδομένων ορίζεται ως:

$$S_w = S_{slot} \times R_w \quad (7.10)$$

Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων R σε όλα τα κανάλια δεδομένων του οπτικού δακτυλίου θα είναι: $R=W \times R_w$ σε μονάδες Gb/s. Η μέγιστη διέλευση S σε όλα τα κανάλια δεδομένων του οπτικού δακτυλίου σε μονάδες Gb/s, δίνεται από τη σχέση:

$$S = W \times S_w \quad (7.11)$$

Για λόγους απλούστευσης της ανάλυσης, χωρίς όμως περιορισμό της γενικότητας, θεωρείται ότι όλοι οι κόμβοι μεταδίδουν με τον ίδιο ρυθμό. Έτσι, η μέγιστη διέλευση S_{max} ανά κόμβο σε όλα τα κανάλια δεδομένων του οπτικού δακτυλίου σε μονάδες Gb/s, δίνεται από τη σχέση:

$$S_{max} = \frac{S}{N} \quad (7.12)$$

Από τις σχέσεις (7.9)-(7.12) προκύπτει:

$$S_{\max} = \frac{R}{N + 1} \quad (7.13)$$

Σχολιασμός αναλυτικών συμπερασμάτων

Αξιοσημείωτα είναι τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη σχέση (7.13) που δίνει τη μέγιστη διέλευση S_{\max} ανά κόμβο σε όλα τα κανάλια δεδομένων του οπτικού δακτυλίου σε μονάδες Gb/s. Έτσι, παρατηρούμε ότι η διέλευση S_{\max} είναι ανεξάρτητη από την περίμετρο L_R του οπτικού δακτυλίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η περίμετρος L_R του οπτικού δακτυλίου επηρεάζει μόνο την καθυστέρηση διάδοσης T_p της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον οπτικό δακτύλιο όπως δείχνει η σχέση (7.1). Αντίθετα, η διέλευση S_{\max} εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των κόμβων N και το συνολικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων R .

Επίσης, παρατηρούμε ότι η διέλευση S_{\max} είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των κόμβων N . Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι η αύξηση του αριθμού N προκαλεί αύξηση του προσφερόμενου στο δακτύλιο φορτίου. Έτσι, η πιθανότητα ανίχνευσης μιας ελεύθερης χρονικής σχισμής μειώνεται προκαλώντας ταυτόχρονη μείωση της διέλευσης S_{\max} .

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της σχέσης (7.13) παραμένουν σε ισχύ και στην περίπτωση που δεν ισχύουν οι υποθέσεις που τέθηκαν κατά την ανάλυση. Έτσι, τα αποτελέσματα της σχέσης (7.13) ισχύουν και στην περίπτωση που οι κόμβοι δεν ισαπέχουν στην περίμετρο του δακτυλίου. Στην περίπτωση αυτή, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την αναχώρηση του πακέτου δεδομένων από τον αποστολέα μέχρι την πλήρη λήψη του από το γειτονικό κόμβο-προορισμό είναι κατά μέσο όρο (και όχι ακριβώς) ίσο με T_a .

7.6 Μοντέλο και παράμετροι εξομοίωσης

Μοντέλο εξομοίωσης

Τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης επαληθεύτηκαν από τα αποτελέσματα εκτενούς εξομοίωσης της συμπεριφοράς του συστήματος. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα μοντέλο εξομοίωσης διακριτών γεγονότων για τη μοντελοποίηση των γεγονότων στο προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και την εξαγωγή των μέτρων αποδοτικότητας.

Με το μοντέλο εξομοίωσης διακριτών γεγονότων, η λειτουργία του δικτύου ορίζεται ως μια αλληλουχία διακριτών μεταξύ τους γεγονότων τα οποία περιγράφουν απόλυτα και λεπτομερώς τη συμπεριφορά του συστήματος. Επομένως, στο μοντέλο εξομοίωσης διακριτών γεγονότων θεωρείται ότι μεταξύ των γεγονότων δεν λαμβάνει χώρα καμία αξιοσημείωτη λειτουργία που πρέπει να εξομοιωθεί.

Συγκεκριμένα, η περιστροφή των χρονικών σχισμών γύρω από τον οπτικό δακτύλιο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα σύνολο διακριτών γεγονότων κατά τη διάρκεια καθενός εκ των οποίων πραγματοποιούνται όλες οι λειτουργίες ενός κόμβου:

- η μετάδοση των πακέτων δεδομένων στον οπτικό δακτύλιο
- η λήψη των πακέτων δεδομένων από τον οπτικό δακτύλιο
- η λήψη των πακέτων δεδομένων από τα δίκτυα πρόσβασης

- η αποθήκευση των πακέτων δεδομένων στον καταχωρητή εξόδου
- η απόρριψη των πακέτων δεδομένων στον καταχωρητή εξόδου λόγω υπερχειλίσισης.

Η ανάπτυξη του μοντέλου εξομοίωσης του δικτύου πραγματοποιήθηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού C. Η επιλογή της γλώσσας βασίστηκε στο γεγονός ότι η γλώσσα C είναι μια ευέλικτη, αξιόπιστη και γρήγορη γλώσσα υψηλού επιπέδου. Επίσης, η γλώσσα προγραμματισμού C επιτρέπει την περιγραφή διαφορετικών οντοτήτων που σχετίζονται μεταξύ τους μέσω των ιδιοτήτων τους, συγκροτώντας ένα πολύπλοκο σύστημα όπως είναι το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου.

Στο μοντέλο εξομοίωσης, το σύγχρονο πολυδιαυλικό δίκτυο των W καναλιών δεδομένων και του ενός καναλιού ελέγχου μοντελοποιείται ως ένα σύνολο από $(W+1)$ συγχρονισμένες οντότητες που συγκροτούν τη χρονική πολυ-σχισμή και περιστρέφονται γύρω από τον οπτικό δακτύλιο. Κατά τη διάρκεια κάθε διακριτού γεγονότος, σε κάθε κόμβο φτάνει μία χρονική πολυ-σχισμή. Τα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα σε κάθε κόμβο κατά τη διάρκεια μιας χρονικής πολυ-σχισμής είναι:

- η αναγνώριση της πληροφορίας ελέγχου, δηλαδή της κατάστασης κάθε χρονικής σχισμής σε κάθε κανάλι δεδομένων (ελεύθερη ή κατειλημμένη)
- η επεξεργασία της πληροφορίας ελέγχου σύμφωνα με τους αλγόριθμους μετάδοσης και λήψης. Από την επεξεργασία προκύπτει η απόφαση για πιθανή μετάδοση πακέτου δεδομένων σε ένα κανάλι δεδομένων και για πιθανή λήψη πακέτου δεδομένων από ένα άλλο κανάλι δεδομένων
- η δημιουργία του νέου πακέτου ελέγχου
- η συγχρονισμένη αναχώρηση της χρονικής πολυ-σχισμής από τον κόμβο
- η άφιξη στον καταχωρητή εξόδου του κόμβου νέων πακέτων δεδομένων από τα δίκτυα πρόσβασης τα οποία συνδέονται με αυτόν
- η εξαγωγή στατιστικών τιμών για τον υπολογισμό των μέτρων αποδοτικότητας.

Επειδή τα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα σε όλους τους κόμβους κατά τη διάρκεια μιας χρονικής πολυ-σχισμής είναι απόλυτα συγχρονισμένα και η χρονική τους διάρκεια είναι αυστηρά καθορισμένη, η πάροδος του χρόνου σε όλο το δίκτυο είναι ενιαία. Επομένως, το εξομοιωτικό μοντέλο θεωρεί μια κοινή σε όλο το δίκτυο μεταβλητή αύξησης του χρόνου εξομοίωσης, σε κάθε διακριτό βήμα αύξησης της οποίας κάθε κόμβος εκτελεί τις παραπάνω λειτουργίες.

Αντίθετα με τη θεωρητική ανάλυση που προσδιορίζει μόνο τη μέγιστη διέλευση ανά κόμβο στον οπτικό δακτύλιο, το εξομοιωτικό μοντέλο παρέχει πιο πλήρη εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Συγκεκριμένα, το μοντέλο εξομοίωσης υπολογίζει:

- τη μέγιστη τιμή της διέλευσης ανά κόμβο
- τη μέση τιμή της διέλευσης ανά κόμβο
- τη μέση τιμή της καθυστέρησης των πακέτων δεδομένων στον καταχωρητή εξόδου του κόμβου
- τη μέση τιμή του φορτίου στον καταχωρητή εξόδου ανά κόμβο
- τη μέση τιμή της πιθανότητας απόρριψης πακέτων από τον καταχωρητή εξόδου λόγω υπερχειλίσισης

- τη μέση τιμή της συνολικής καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων (από τη στιγμή της γέννησης τους ως την λήψη τους από τον κόμβο προορισμού).

Για τον καθορισμό των παραπάνω μέτρων αποδοτικότητας το μοντέλο εξομοίωσης διατηρεί αρχεία στα οποία καταχωρούνται οι τιμές των κατάλληλων μετρητών εξομοίωσης σε κάθε διακριτό βήμα αύξησης του χρόνου.

Το εξομοιωτικό μοντέλο παρουσιάζει επίπεδο αξιοπιστίας $(1 - \alpha) = 97\%$. Επίσης, τα αποτελέσματα της εξομοίωσης αποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο πρόσβασης εξασφαλίζει τη δίκαιη πρόσβαση των κόμβων στα κανάλια δεδομένων. Το γεγονός αυτό καθιστά το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και το πρωτόκολλο πρόσβασης μια αξιόπιστη επιλογή για οπτικά μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου.

Συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της εξομοίωσης για όλα τα μέτρα αποδοτικότητας αποδεικνύουν ότι οι αντίστοιχες τιμές διαφέρουν μεταξύ τους:

- κατά 0.6%, στην περίπτωση Poisson μοντέλου γέννησης κίνησης
- λιγότερο από 8%, στην περίπτωση self-similar μοντέλου γέννησης κίνησης.

Στο εξομοιωτικό μοντέλο η κίνηση των πακέτων δεδομένων στα δίκτυα πρόσβασης κάθε κόμβου γεννιέται πριν την εξομοίωση της συμπεριφοράς του οπτικού δακτυλίου, τόσο στην περίπτωση Poisson μοντέλου κίνησης όσο και στην περίπτωση self-similar κίνησης. Σε κάθε περίπτωση, τα νέα πακέτα δεδομένων οργανώνονται σε αρχεία και ταξινομούνται ανάλογα με το χρόνο γέννησης τους. Η γέννηση της κίνησης πριν την εξομοίωση της κίνησης του δακτυλίου πραγματοποιείται για λόγους προγραμματιστικούς, εξαιτίας των περιορισμών που θέτει η γεννήτρια τυχαίων αριθμών σε κάθε κόμβο.

Το εξομοιωτικό μοντέλο περιγράφει κάθε δομική οντότητα του συστήματος ως διαφορετικό δομοστοιχείο (module) στη γλώσσα προγραμματισμού C. Κάθε δομοστοιχείο διαθέτει ένα σύνολο παραμέτρων που περιγράφουν τις ιδιότητες της οντότητας.

Ο Πίνακας 7-1 παρουσιάζει τα δομοστοιχεία και τις ιδιότητες τους που υλοποιούνται στο εξομοιωτικό μοντέλο.

Όνομα module	Οντότητα	Ιδιότητες
NODE	κόμβος	id, καταχωρητής εξόδου
DATA_PACKET	πακέτο δεδομένων	χρόνος γέννησης, διεύθυνση προορισμού, κανάλι μετάδοσης
ADDRESS_MINI_PACKET	μικρο-πακέτο διεύθυνσης	id, διεύθυνση προορισμού, διεύθυνση εκπομπού (σε περίπτωση source stripping)
BUFFER	καταχωρητής εξόδου	id, μέγεθος, φορτίο, απορριφθέντα πακέτα δεδομένων, στοίβα πακέτων δεδομένων
DATA_CHANNEL	κανάλι δεδομένων	id, ρυθμός, μήκος, καθυστέρηση διάδοσης, κατάσταση, μέγεθος χρονικής σχισμής, πλήθος χρονικών πολυ-σχισμών, δομή χρονικών πολυ-σχισμών
CONTROL_CHANNEL	κανάλι ελέγχου	ρυθμός, μήκος, καθυστέρηση διάδοσης, κατάσταση, μέγεθος πακέτου ελέγχου, μέγεθος μικρο-πακέτου διεύθυνσης, μικρο-πακέτο διεύθυνσης, δομή πακέτων ελέγχου

Πίνακας 7-1. Δομοστοιχεία μοντέλου εξομοίωσης

Το κυριότερο δομοστοιχείο είναι ο κόμβος (NODE). Τα υπόλοιπα δομοστοιχεία σχετίζονται με το δομοστοιχείο NODE για την περιγραφή των λειτουργιών του.

Στο εξομοιωτικό μοντέλο το δομοστοιχείο NODE σχετίζεται με ένα καταχωρητή εξόδου. Το δομοστοιχείο BUFFER υλοποιείται με μία First-In-First-Out (FIFO) ουρά πακέτων δεδομένων που περιμένουν να μεταδοθούν.

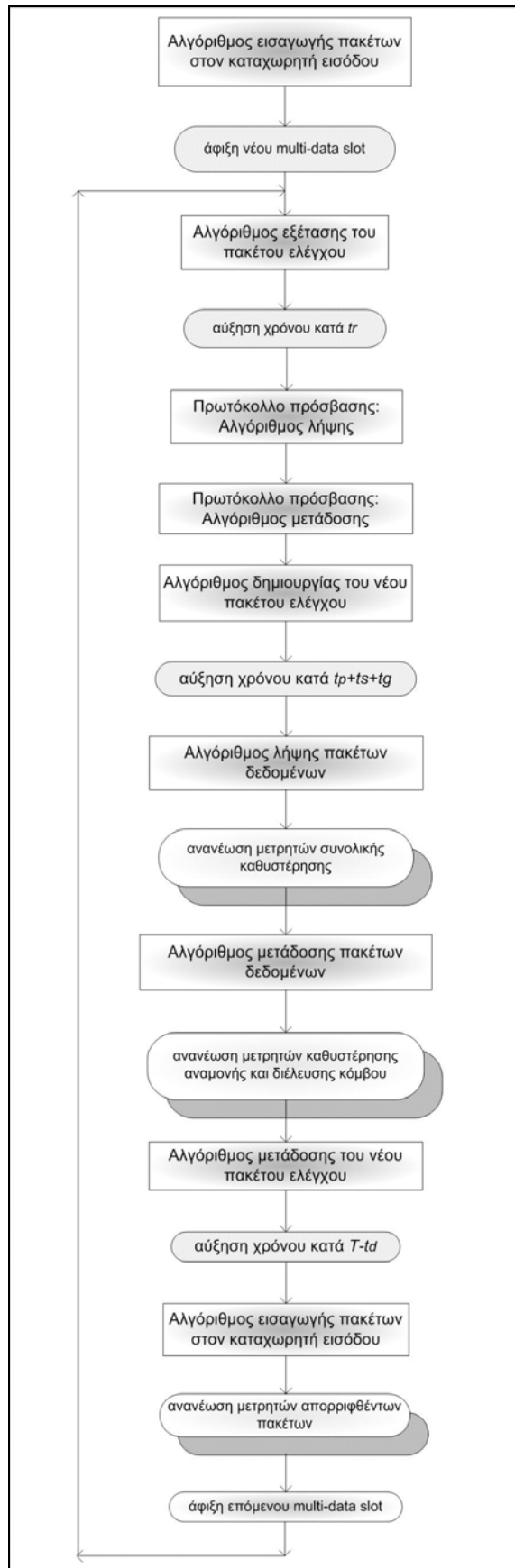
Το δομοστοιχείο BUFFER διατηρεί αρχείο των απορριφθέντων λόγω υπερχείλισης πακέτων δεδομένων για τον υπολογισμό της μέσης πιθανότητας απόρριψης ανά κόμβο. Επίσης, το δομοστοιχείο BUFFER διατηρεί ξεχωριστό αρχείο με το τρέχον φορτίο που είναι αποθηκευμένο στον καταχωρητή εξόδου, και κατ' επέκταση με τα πακέτα δεδομένων που μεταδίδει ο κόμβος, για τον υπολογισμό της μέσης διέλευσης ανά κόμβο.

Το δομοστοιχείο DATA_PACKET διατηρεί το χρόνο γέννησης του πακέτου δεδομένων για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης στον καταχωρητή εξόδου και της μέσης συνολικής καθυστέρησης μετάδοσης ανά κόμβο.

Το δομοστοιχείο ADDRESS_MINI_PACKET προσδιορίζεται από την ταυτότητα του (id) που αντιστοιχεί στο κανάλι δεδομένων και μεταφέρει τη διεύθυνση προορισμού του πακέτου δεδομένων (ή NULL).

Το δομοστοιχείο DATA_CHANNEL περιγράφεται από μία δομή χρονικών πολυσχισμών η οποία περιστρέφεται γύρω από τον οπτικό δακτύλιο και πάνω στην οποία οι κόμβοι μεταδίδουν και λαμβάνουν τα πακέτα δεδομένων.

Στο εξομοιωτικό μοντέλο, κάθε δομοστοιχείο σχετίζεται με ένα σύνολο αλγορίθμων που περιγράφουν τη λειτουργία του. Η ακολουθία των αλγορίθμων που εκτελεί κάθε κόμβος μετά την άφιξη μιας χρονικής πολυσχιμής και κατά τη διάρκεια της παρουσιάζονται στο Σχήμα 7-6.



Σχήμα 7-6. Διάγραμμα εξομοίωσης των ενεργειών που εκτελεί ένας κόμβος κατά την άφιξη μιας χρονικής πολυ-σχισμής

Παράμετροι εξομοίωσης

Για τη μελέτη της απόδοσης του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και την ποσοτικοποίηση της βελτίωσης που παρέχει, συγκρίνουμε τα μέτρα αποδοτικότητας της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής με τα αντίστοιχα μεγέθη υπαρχόντων μητροπολιτικών δικτύων τοπολογίας δακτυλίου. Έτσι, για λόγους σύγκρισης, οι παράμετροι του δικτύου προσδιορίζονται ως εξής:

Η περίμετρος του οπτικού δακτυλίου είναι $L_R = 138\ 240$ m. Το πλήθος N των κόμβων γύρω από το δακτύλιο επιλέχθηκε έτσι ώστε η μέγιστη τιμή της διέλευσης ανά κόμβο S_{max} να είναι μικρότερη από το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα δίκτυα πρόσβασης: 1 Gb/s. Έτσι, $N = 20$. Το πλήθος των καναλιών δεδομένων είναι $W = 4$, ενώ λειτουργεί ένα επιπλέον ξεχωριστό κανάλι ελέγχου.

Εφόσον κάθε μικρο-πακέτο διεύθυνσης μεταφέρει τη διεύθυνση του κόμβου-αποστολέα και τη διεύθυνση του κόμβου-παραλήπτη, το μέγεθος του είναι: $(2 \times n) = 10$ bits, όπου $n = 5$ bits και $2^{n-1} < N \leq 2^n$ [96]. Επομένως, το μέγεθος του πακέτου ελέγχου είναι $(W \times 2 \times n) = 40$ bits.

Η χωρητικότητα του καταχωρητή εξόδου κάθε κόμβου είναι $B = 100$ πακέτα δεδομένων. Ο ρυθμός μετάδοσης σε κάθε κανάλι του δακτυλίου είναι $R_w = 2.5$ Gb/s. Έτσι, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στα κανάλια ελέγχου είναι $R = W \times R_w = 10$ Gb/s. Ο χρόνος μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων είναι $T = L / R_w = 4.8$ μ s. Όμοια, ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου ελέγχου είναι $t_r = (W \times 2 \times n) / R_w = 0.016$ μ s. Τέλος, το πλήθος των χρονικών πολυ-σχισμών γύρω από το δακτύλιο είναι $M = T_p / T = 144$. Ο Πίνακας 7-2 παρουσιάζει συνοπτικά τις παραμέτρους του μοντέλου εξομοίωσης του προτεινόμενου δικτύου.

Παράμετρος δικτύου	Τιμή
Περίμετρος δακτυλίου L_R	138 240 m
Ταχύτητα φωτός στην οπτική ίνα v_g	2×10^8 m/s
Καθυστέρηση διάδοσης T_p	691.2 μ s
Πλήθος καναλιών δεδομένων W	4
Πλήθος καναλιών ελέγχου	1
Χωρητικότητα καταχωρητή εξόδου B	100
Μέγεθος πακέτου δεδομένων L	12 000 bits
Μέγεθος μικρο-πακέτου διεύθυνσης $(2 \times n)$	10 bits
Μέγεθος πακέτου ελέγχου	40 bits
Πλήθος κόμβων N	20
Ρυθμός μετάδοσης στα κανάλια R_w	2.5 Gb/s
Ρυθμός μετάδοσης σε όλα τα κανάλια δεδομένων R	10 Gb/s
Χρόνος μετάδοσης πακέτου δεδομένων T	4.8 μ s
Χρόνος μετάδοσης πακέτου ελέγχου t_r	0.016 μ s
Διάρκεια χρονικής πολυ-σχισμής	4.8 μ s
Πλήθος χρονικών πολυ-σχισμών M	144

Πίνακας 7-2. Παράμετροι μοντέλου εξομοίωσης

Για την εξομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, πραγματοποιούνται οι ακόλουθες υποθέσεις σχετικά με τον προσδιορισμό του χρόνου επεξεργασίας του πακέτου ελέγχου t_p , του χρόνου συντονισμού των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών $\max\{t_{s-t}, t_{s-r}\}$ και του χρόνου ασφαλείας t_g :

- το χρονικό διάστημα $t_p + \max\{t_{s-t}, t_{s-r}\}$ είναι 1 μ s [59], δηλαδή:

$$t_p + \max\{t_{s-t}, t_{s-r}\} = 1 \mu\text{s} \quad (7.14)$$

- ο χρόνος ασφαλείας t_g είναι 50 ns [60], δηλαδή:

$$t_g = 50 \text{ ns} \quad (7.15)$$

7.7 Αριθμητικά αποτελέσματα

Για τη μελέτη της απόδοσης του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου και τον υπολογισμό της βελτίωσης που παρέχει σε σχέση με άλλα WDM πρωτόκολλα για μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά τα προβλήματα κλιμάκωσης και συντήρησης, επιλέγουμε να το συγκρίνουμε με τα δύο πρωτόκολλα που παρουσιάζονται στη μελέτη [25]:

- με το FT-FR⁴ πρωτόκολλο, όπου κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με τέσσερις (αριθμό ίσο με τον αριθμό των καναλιών W) σταθερά συντονισμένους δέκτες αποφεύγοντας τις συγκρούσεις στον προορισμό.
- με το FT-TR πρωτόκολλο, όπου το σύνολο των σταθερά συντονισμένων δεκτών έχει αντικατασταθεί από ένα συντονιζόμενο δέκτη.

Παρόλο που το FT-FR⁴ πρωτόκολλο αποφεύγει τις συγκρούσεις στον προορισμό, εισάγει προβλήματα κλιμάκωσης, που περιορίζουν δραματικά την αποτελεσματική αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Αντίθετα, στο FT-TR πρωτόκολλο αντιμετωπίζει τα προβλήματα κλιμάκωσης με την αντικατάσταση των σταθερά συντονισμένων δεκτών από ένα συντονιζόμενο δέκτη, αλλά δεν αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τις συγκρούσεις στον προορισμό περιορίζοντας την απόδοση. Και αυτό γιατί τα συγκρουόμενα στον προορισμό πακέτα δεδομένων περιστρέφονται συνεχώς γύρω στον οπτικό δακτύλιο μέχρι τη λήψη τους, καταναλώνοντας μη-αποτελεσματικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Αντίθετα, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο όχι μόνο αντιμετωπίζει πλήρως τα προβλήματα κλιμάκωσης, αλλά ταυτόχρονα αποφεύγει τις συγκρούσεις τόσο στα κανάλια δεδομένων όσο και στον προορισμό. Έτσι, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο παρέχει σημαντική βελτίωση της απόδοσης ιδιαίτερα σε υψηλά φορτία. Η βελτίωση της απόδοσης έγκειται στο γεγονός ότι το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο αξιοποιεί αποτελεσματικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης εκμεταλλευόμενο τόσο την πληροφορία ελέγχου, όσο και τα πλεονεκτήματα της ικανότητας συντονισμού των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών σε όλα τα κανάλια δεδομένων.

Η επιλογή για τη σύγκριση του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου με το FT-TR πρωτόκολλο βασίστηκε στο γεγονός ότι για το τελευταίο είναι ευκολότερος ο υπολογισμός του πλήθους των κόμβων N, σε σχέση με το TT-FR πρωτόκολλο. Παρόλα, αυτά, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο πλεονεκτεί σε σχέση και με το TT-FR πρωτόκολλο, αφού τα FT-TR και TT-FR πρωτόκολλα παρουσιάζουν παρόμοια απόδοση [61].

Σύγκριση αποτελεσμάτων για τα μοντέλα κίνησης Poisson και self-similar

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 11, η παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της απόδοσης του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και του πρωτοκόλλου πρόσβασης είναι το μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την συνολική κίνηση που προσφέρουν τα δίκτυα πρόσβασης στον οπτικό δακτύλιο.

Στη βιβλιογραφία, πολλές μελέτες [97],[98] μοντελοποιούν την κίνηση φωνής, και κατ' επέκταση την κίνηση δεδομένων στα LANs, με διαδικασίες Poisson. Και αυτό γιατί οι διαδικασίες Poisson διαθέτουν ήδη γνωστά και αναπτυγμένα θεωρητικά μοντέλα που μπορούν να υπολογίσουν τα μέτρα αποδοτικότητας μέσω μαθηματικής ανάλυσης.

Παρόλα αυτά, τελευταίες μελέτες αποδεικνύουν ότι η κίνηση στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και ειδικότερα η κίνηση πακέτων Internet στα LANs και MANs χαρακτηρίζεται από υψηλή μεταβλητότητα και εκρηκτικότητα και μοντελοποιείται καλύτερα από διαδικασίες self-similar [99]-[102].

Έτσι, η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και του πρωτοκόλλου πρόσβασης μελετάται ενδελεχώς για μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα δίκτυα πρόσβασης που περιγράφονται τόσο από διαδικασίες Poisson όσο και από self-similar διαδικασίες.

Η συγκριτική παράθεση των αριθμητικών αποτελεσμάτων των μέτρων αποδοτικότητας για τα δύο μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης συμβάλει στην αξιολόγηση των μοντέλων αυτών. Στα σχήματα που παρουσιάζονται στην παράγραφο των αριθμητικών αποτελεσμάτων εμφανίζεται με παραστατικό τρόπο η επίδραση του self-similar μοντέλου κίνησης σε σχέση με το Poisson μοντέλο, τόσο για το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο όσο και για τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα.

Σε όλες τις περιπτώσεις πρωτοκόλλων, το self-similar μοντέλο κίνησης παρέχει χειρότερη απόδοση σε σχέση με αυτή του Poisson μοντέλου. Η συμπεριφορά αυτή είναι πιο εμφανής σε υψηλές τιμές προσφερόμενου φορτίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη φύση του Poisson μοντέλου κίνησης, στο οποίο ο ρυθμός μετάδοσης σε υψηλά φορτία γίνεται πιο σταθερός όσο το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών αφίξεων μειώνεται. Έτσι, σε κατάσταση κορεσμού παρατηρείται σχεδόν σταθερός ρυθμός άφιξης νέων πακέτων δεδομένων και οι καταχωρητές εξόδου των κόμβων είναι σχεδόν πλήρεις. Το γεγονός αυτό προκαλεί στο Poisson μοντέλο κίνησης απότομη αύξηση των μέτρων αποδοτικότητας για υψηλές τιμές προσφερόμενου φορτίου.

Αντίθετα, η εκρηκτική φύση του self-similar μοντέλου κίνησης αυξάνει με ομαλό τρόπο το φορτίο των καταχωρητών εξόδου, παρέχοντας μικρότερες τιμές της μέσης διέλευσης ανά κόμβο και υψηλότερες τιμές της μέσης συνολικής καθυστέρησης. Έτσι στο self-similar μοντέλο κίνησης η κατάσταση κορεσμού πραγματοποιείται πιο ομαλά με την αύξηση του προσφερόμενου φορτίου, παρέχοντας λιγότερο απότομη μεταβολή των μέτρων αποδοτικότητας.

Υπολογισμός βέλτιστου προσφερόμενου φορτίου

Αν και η παρουσίαση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της εξομοίωσης δίνονται στη συνέχεια, επιλέγεται η παρουσίαση ορισμένων παρατηρήσεων εκ των προτέρων για την καλύτερη κατανόηση τους. Έτσι, από τη μελέτη των αριθμητικών αποτελεσμάτων για τη μέση διέλευση ανά κόμβο που δίνονται στη συνέχεια, παρατηρούμε ότι υπάρχει μία τιμή προσφερόμενου φορτίου G_{max} στην οποία το σύστημα παρουσιάζει συμφόρηση και η μέση διέλευση ανά κόμβο έχει τιμή S_{max} . Για τιμές προσφερόμενου φορτίου μεγαλύτερες του G_{max} η μέση διέλευση ανά κόμβο διατηρεί τη μέγιστη τιμή S_{max} .

Για τον καθορισμό της τιμής προσφερόμενου φορτίου G_{max} , ορίζουμε τον κανονικοποιημένο χρόνο $t = 1$ ως τη χρονική διάρκεια για μια πλήρη περιστροφή γύρω από το δακτύλιο. Ο χρόνος T_b ορίζεται ως ο κανονικοποιημένος χρόνος που απαιτείται για μία

χρονική σχισμή προκειμένου να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί μετά την αρχική χρησιμοποίησή της.

Θεωρώντας ότι οι κόμβοι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι γύρω από τον δακτύλιο, ο κανονικοποιημένος χρόνος που απαιτείται από μία χρονική σχισμή για να μεταδοθεί μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων είναι: $1/N$. Εφόσον μία χρονική σχισμή δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί αμέσως μετά την αποδέσμευσή της αλλά αφήνεται για τον γειτονικό κόμβο, ο κανονικοποιημένος χρόνος T_b δίνεται από τη σχέση:

$$T_b = 1 + \frac{1}{N} \quad (7.16)$$

Επίσης, ορίζουμε την παράμετρο T_f ως την ελάχιστη τιμή του κανονικοποιημένου χρόνου που απαιτείται μεταξύ δύο διαδοχικών αφίξεων δύο ελεύθερων χρονικών σχισμών σε έναν κόμβο σε οποιαδήποτε κανάλια δεδομένων.

Για τον υπολογισμό της οριακής τιμής προσφερόμενου φορτίου, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή ο κανονικοποιημένος ρυθμός άφιξης G_{\max_n} πακέτων δεδομένων στους καταχωρητές των κόμβων δίνεται από τη σχέση:

$$G_{\max_n} = \frac{1}{T_f} \quad (7.17)$$

Από την ανάλυση, είναι προφανές ότι για προσφερόμενο φορτίο G_{\max} ο ελάχιστος κανονικοποιημένος χρόνος που απαιτείται μεταξύ δύο διαδοχικών αφίξεων δύο ελεύθερων χρονικών σχισμών σε έναν κόμβο στο ίδιο κανάλι δεδομένων ισούται με τον κανονικοποιημένο χρόνο ($T_b \times N$). Έτσι, ο ρυθμός άφιξης G_{\max} ισούται με το μέγιστο ρυθμό σε Gb/s με τον οποίο φτάνουν σε ένα κόμβο ελεύθερες χρονικές σχισμές σε οποιοδήποτε κανάλι δεδομένων. Ισχύει:

$$G_{\max} = \frac{1}{T_b} \times \frac{R_w \times W}{N} \quad (7.18)$$

Από τις σχέσεις (7.16)-(7.18), προκύπτει:

$$G_{\max} = \frac{R}{N+1} \quad (7.19)$$

Όμως, η σχέση (7.19) ισούται με τη μέγιστη διέλευση ανά κόμβο που δίνεται από τη σχέση (7.13), δηλαδή:

$$G_{\max} = S_{\max} \quad (7.20)$$

Επομένως, η τιμή προσφερόμενου φορτίου G_{\max} στην οποία το σύστημα παρουσιάζει συμφόρηση ισούται με τη μέγιστη διέλευση ανά κόμβο S_{\max} . Όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια, η μέση διέλευση ανά κόμβο για τιμές μικρότερες από G_{\max} είναι ίσες με τη τιμή του προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο. Η ερμηνεία δίνεται στο σχολιασμό για το Σχήμα 7-7.

Αριθμητικά αποτελέσματα

Στο Σχήμα 7-7 παρουσιάζεται η μέση τιμή της διέλευσης ανά κόμβο ως συνάρτηση της μέσης τιμής του προσφερόμενου φορτίου από τα δίκτυα πρόσβασης ανά κόμβο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-7, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο μπορεί να εξυπηρετήσει όλο το προσφερόμενο φορτίο από τα δίκτυα πρόσβασης μέχρι την τιμή των

480 Mb/s. Αυτό σημαίνει ότι σε αυτή την περιοχή τιμών προσφερόμενου φορτίου, το σύνολο των πακέτων δεδομένων από τα δίκτυα πρόσβασης μπορούν να προσπελάσουν τον οπτικό δακτύλιο χωρίς να απορριφθούν στους καταχωρητές εξόδου των κόμβων. Έτσι, για αυτές τις τιμές προσφερόμενου φορτίου, το μέσο προσφερόμενο φορτίο ανά κόμβο ισούται με τη μέση διέλευση ανά κόμβο, όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα.

Για μεγαλύτερες τιμές προσφερόμενου φορτίου, το σύστημα παρουσιάζει συμφόρηση. Και αυτό γιατί σε αυτή την περιοχή τιμών, το συνεχώς αυξανόμενο προσφερόμενο φορτίο σταδιακά αξιοποιεί όλες τις διαθέσιμες χρονικές σχισμές. Συνεπακόλουθα, παρατηρείται αύξηση της μέσης τιμής της καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου και βαθμιαία υπερχείλιση των καταχωρητών, που οδηγεί σε αύξηση των απορρίψεων πακέτων δεδομένων.

Όπως δείχνει το Σχήμα 7-7 για τιμές προσφερόμενου φορτίου μεγαλύτερες των 480 Mb/s το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο επιτυγχάνει τη μέγιστη αξιοποίηση των χρονικών σχισμών και παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της διέλευσης $S_{\max} = 480$ Mb/s, που συμπίπτει με την αντίστοιχη τιμή της θεωρητικής ανάλυσης της σχέσης (7.13).

Επίσης, η μέση διέλευση ανά κόμβο για τιμές μέχρι την S_{\max} είναι μια ταυτοτική συνάρτηση του μέσου προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο. Αυτό σημαίνει ότι το συνολικό προσφερόμενο φορτίο μέχρι τη τιμή G_{\max} έχει άμεση πρόσβαση στο δακτύλιο χωρίς να συναντά καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου των κόμβων. Με άλλα λόγια, για τιμές προσφερόμενου φορτίου μικρότερες της G_{\max} , κατά την άφιξη ενός πακέτου δεδομένων από το δίκτυο πρόσβασης στον καταχωρητή εξόδου του κόμβου υπάρχει τουλάχιστον μία ελεύθερη χρονική σχισμή σε κάποιο κανάλι δεδομένων για τη μετάδοση.

Η βελτίωση που παρέχει το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο σε σχέση με τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα της μελέτης [25] απεικονίζεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 7-7. Πράγματι, τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα μπορούν να εξυπηρετήσουν χωρίς να παρουσιάσουν συμφόρηση, το προσφερόμενο φορτίο για τιμές μικρότερες των 380 Mb/s και 360 Mb/s αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο βελτιώνει κατά 26.3% και 33.3% σε σύγκριση με τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα αντίστοιχα τη μέγιστη τιμή του προσφερόμενου φορτίου G_{\max} που μπορεί να προσπελάσει το δακτύλιο χωρίς να απορριφθεί στους καταχωρητές εξόδου.

Επίσης, όπως είναι αναμενόμενο από την ανάλυση, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο επιτυγχάνει σημαντική βελτίωση της μέγιστης τιμής της διέλευσης. Για παράδειγμα, για μέσο προσφερόμενο φορτίο ανά κόμβο 1 Gb/s το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο παρουσιάζει $S_{\max} = 480$ Mb/s, ενώ τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα παρουσιάζουν 415 Mb/s και 390 Mb/s αντίστοιχα.

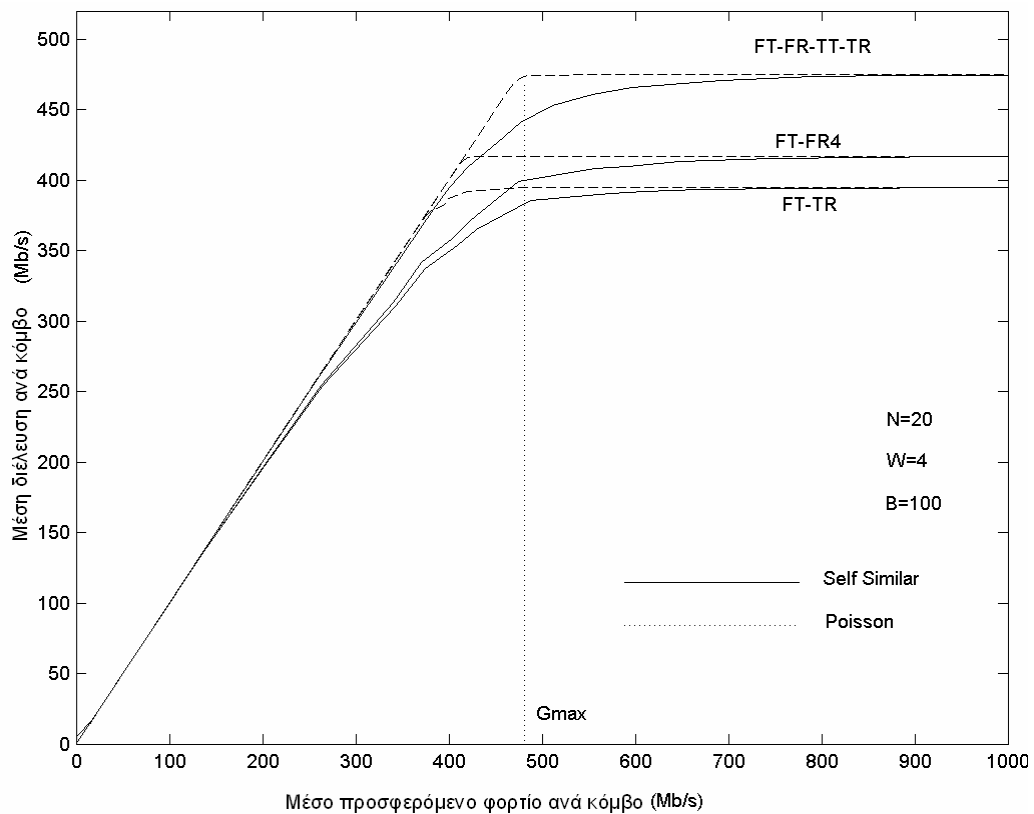
Ο περιορισμός της απόδοσης ερμηνεύεται από το γεγονός ότι τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα περιορίζουν τη μετάδοση πακέτων δεδομένων σε ένα μόνο κανάλι δεδομένων, παρόλο που μπορεί να υπάρχουν ελεύθερες χρονικές σχισμές στα υπόλοιπα κανάλια δεδομένων. Επίσης, στην περίπτωση του FT-TR πρωτοκόλλου ο περιορισμός της απόδοσης οφείλεται στον αναποτελεσματικό μηχανισμό που ακολουθείται για την αντιμετώπιση των συγκρούσεων στον προορισμό, αφού τα συγκρουόμενα στο προορισμό πακέτα περιφέρονται συνεχώς γύρω από το δακτύλιο μέχρι τη λήψη τους σπαταλώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Αντίθετα, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο επιτρέπει τη μετάδοση πακέτων δεδομένων σε οποιοδήποτε κανάλι δεδομένων και εκμεταλλεύεται τις ελεύθερες χρονικές σχισμές σε οποιοδήποτε από αυτά. Επίσης, ο εφαρμοζόμενος αλγόριθμος αποφυγής συγκρούσεων τόσο στα κανάλια δεδομένων όσο και στον προορισμό συμβάλλει καθοριστικά στην αποτελεσματική αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και στη βελτίωση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο. Έτσι, η μέση τιμή της καθυστέρησης στους

καταχωρητές εξόδου των κόμβων είναι μικρότερη, ιδιαίτερα σε υψηλά φορτία, όπως δείχνει το Σχήμα 7-8. Επομένως, τα πακέτα δεδομένων που περιμένουν στους καταχωρητές εξόδου μπορούν να προσπελάσουν το δακτύλιο πιο γρήγορα, παρέχοντας υψηλότερες τιμές S_{max} .

Επίσης, στο Σχήμα 7-7 παρουσιάζεται η επίδραση στην απόδοση από την αντικατάσταση της FT-FR⁴ δικτυακής διεπαφής κόμβου από την FT-TR που προτείνεται στη μελέτη [25]. Παρόλο που η αντικατάσταση αποσκοπεί στη βελτίωση της ικανότητας κλιμάκωσης, δεν είναι η καλύτερη πρόταση αφού προκαλεί σημαντική μείωση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο για όλες τις τιμές προσφερόμενου φορτίου.

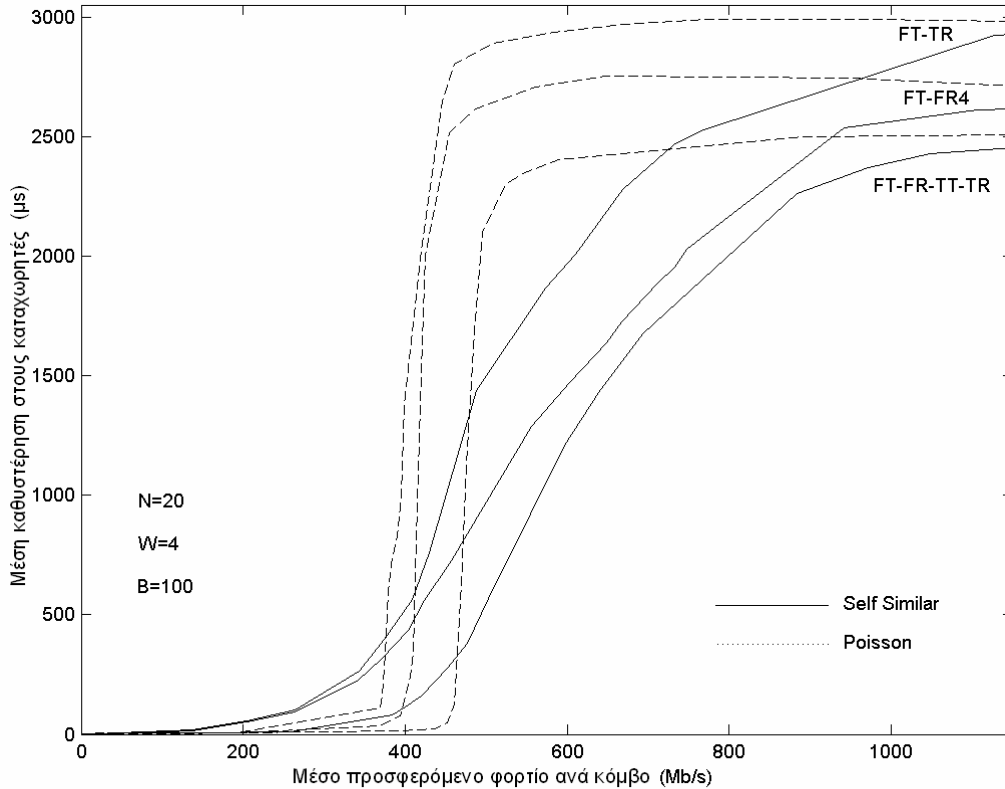
Αντίθετα, η προτεινόμενη FT-FR-TT-TR δικτυακή διεπαφή κόμβου αντιμετωπίζει τα προβλήματα κλιμάκωσης και ταυτόχρονα παρέχει σημαντική βελτίωση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο για όλες τις τιμές προσφερόμενου φορτίου. Και αυτό γιατί η προτεινόμενη FT-FR-TT-TR δικτυακή διεπαφή κόμβου σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο αποφυγής των συγκρούσεων στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό αξιοποιούν κατάλληλα την πληροφορία ελέγχου και εκμεταλλεύονται όλα τα κανάλια δεδομένων για επικοινωνία.



Σχήμα 7-7. Μέση διέλευση ανά κόμβο για $N=20$, $W=4$, $B=100$

Το Σχήμα 7-8 παρουσιάζει τη μέση τιμή της καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου ως συνάρτηση της μέσης τιμής του προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο. Όπως φαίνεται, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο παρέχει πολύ χαμηλές (σχεδόν μηδενικές) τιμές μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές για τιμές προσφερόμενου φορτίου μικρότερες από $G_{max} = 480$ Μbps. Και αυτό γιατί για αυτές τις τιμές προσφερόμενου φορτίου, υπάρχουν αρκετές ελεύθερες χρονικές σχισμές σε όλα τα κανάλια δεδομένων για να εξυπηρετήσουν την εισερχόμενη κίνηση. Σε συνθήκες υψηλότερου προσφερόμενου φορτίου, η μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου αυξάνει απότομα. Αυτό συμβαίνει επειδή το σύστημα φτάνει σε συνθήκες μέγιστης αξιοποίησης των χρονικών σχισμών.

Αντίθετα, τα πρωτόκολλα της μελέτης [25] διατηρούν χαμηλές τιμές μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου μόνο σε συνθήκες μικρού προσφερόμενου φορτίου, δηλαδή μέχρι 380 Mb/s και 360 Mb/s για τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα αντίστοιχα. Για μεγαλύτερες τιμές, τα πρωτόκολλα της μελέτης [25] παρουσιάζουν συμφόρηση και αύξηση της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου.

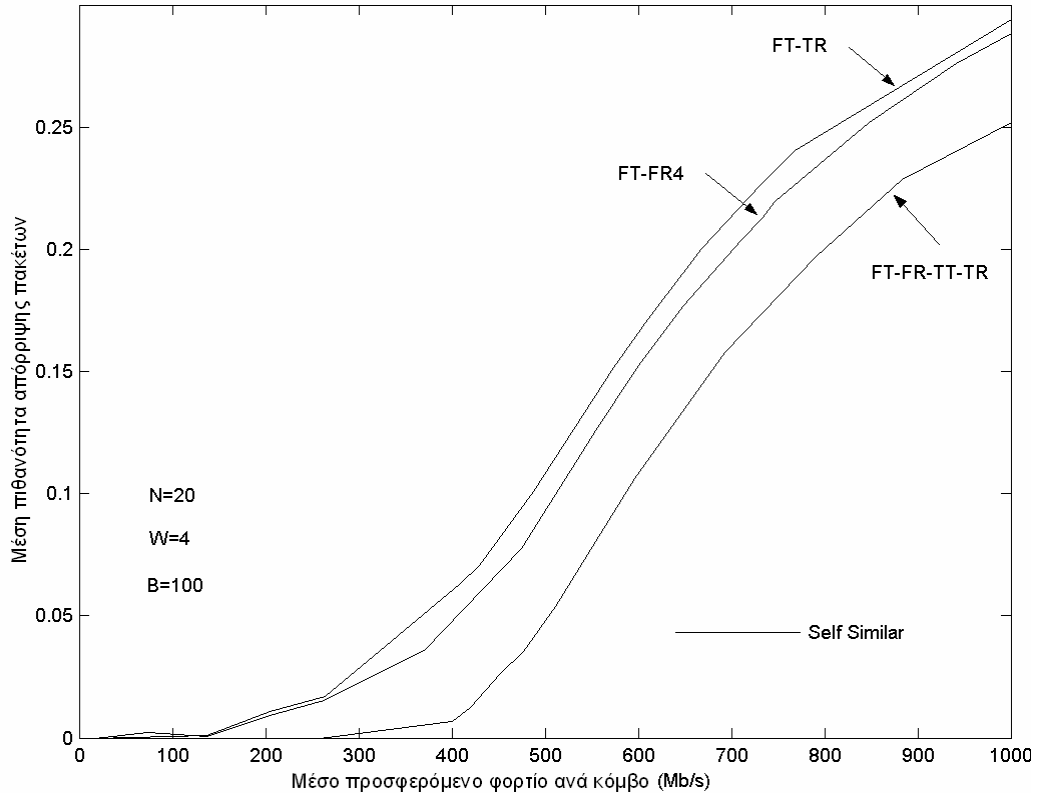


Σχήμα 7-8. Μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου για $N=20$, $W=4$, $B=100$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-8, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο επιτυγχάνει αρκετά μικρότερες τιμές μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές για όλες τις τιμές προσφερόμενου φορτίου. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι τα πρωτόκολλα της μελέτης [25] περιορίζουν τη μετάδοση σε ένα συγκεκριμένο κανάλι δεδομένων παρόλο που μπορεί να υπάρχουν ελεύθερες χρονικές σχισμές στα υπόλοιπα κανάλια δεδομένων για μετάδοση. Τη δυνατότητα αυτή εκμεταλλεύεται αποτελεσματικά το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο που επιτρέπει τη μετάδοση σε όλα τα κανάλια δεδομένων.

Επίσης, σε αντίθεση με το FT-TR πρωτόκολλο που υποχρεώνει τα συγκρουόμενα στον προορισμό πακέτα δεδομένων να περιστρέφονται συνεχώς γύρω από το δακτύλιο μέχρι τη λήψη τους, παρέχοντας υψηλές τιμές καθυστέρησης μετάδοσης, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο αποφεύγει τις συγκρούσεις στον προορισμό με έναν αποτελεσματικό αλγόριθμο εκμεταλλευόμενο την πληροφορία ελέγχου πριν τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων. Το γεγονός αυτό παρέχει βέλτιστη αξιοποίηση των χρονικών σχισμών με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου, της μέσης συνολικής καθυστέρησης και της μέσης πιθανότητας απόρριψης στους καταχωρητές. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί για παράδειγμα, για προσφερόμενο φορτίο 400 Mb/s όπου η μείωση της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου είναι περίπου 167000% και 545% σε σύγκριση με τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα αντίστοιχα.

Τέλος, για το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο, η μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου για όλες τις τιμές προσφερόμενου φορτίου είναι περίπου 920 μ s. Η τιμή αυτή είναι δύσκολα αποδεκτή για μητροπολιτικά δίκτυα. Έτσι, σε επόμενη παράγραφο προτείνεται η βελτίωση του πρωτοκόλλου χρησιμοποιώντας τη στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό.



Σχήμα 7-9. Μέση πιθανότητα απόρριψης για $N=20$, $W=4$, $B=100$

Η βελτίωση της απόδοσης που παρέχει το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 7-9 που παρουσιάζει τη μέση τιμή της πιθανότητας απόρριψης ενός πακέτου δεδομένων στον καταχωρητή εξόδου λόγω υπερχείλισης ως συνάρτηση της μέσης τιμής του προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο. Η ουσιαστική μείωση της μέσης πιθανότητας απόρριψης μπορεί να εκτιμηθεί σε συνδυασμό με τη μείωση της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου.

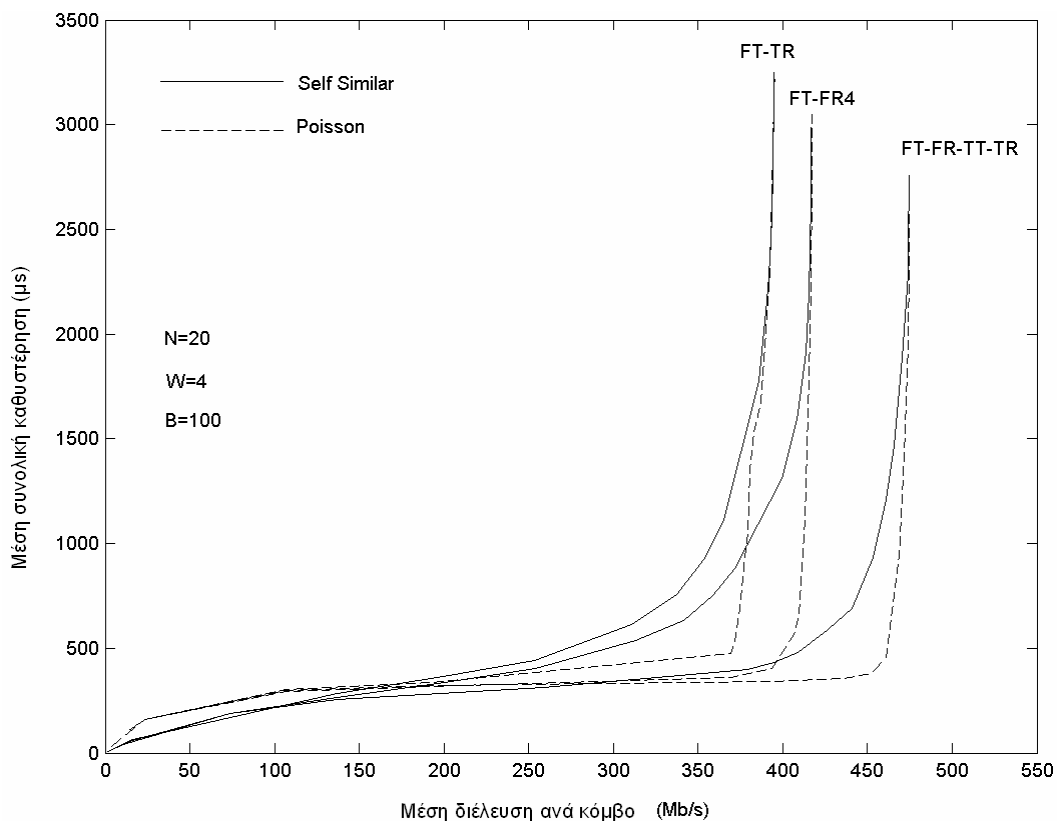
Πράγματι, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο παρέχει πολύ χαμηλές (σχεδόν μηδενικές) τιμές μέσης πιθανότητας απόρριψης για τιμές προσφερόμενου φορτίου μικρότερες από $G_{\max} = 480$ Mb/s. Σε αυτή την περιοχή προσφερόμενου φορτίου, η μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές διατηρεί πολύ χαμηλές τιμές, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω. Για μεγαλύτερες τιμές προσφερόμενου φορτίου, η μέση πιθανότητα απόρριψης σταδιακά αυξάνει ως αποτέλεσμα της σταδιακής αύξησης της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές.

Αντίθετα, τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα της μελέτης [25] διατηρούν χαμηλές τιμές μέσης πιθανότητας απόρριψης για τιμές προσφερόμενου φορτίου μικρότερες από 415 Mb/s και 380 Mb/s αντίστοιχα, ενώ για υψηλότερες τιμές φορτίου η μέση πιθανότητα απόρριψης αυξάνει. Η βελτίωση της απόδοσης μπορεί να παρατηρηθεί για παράδειγμα, για προσφερόμενο φορτίο 600 Mb/s, όπου η μείωση της μέσης πιθανότητας απόρριψης είναι 33.3% και 41.2% σε σύγκριση με τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα αντίστοιχα. Η εξήγηση

βασίζεται στη μεταβολή της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου. Έτσι, οι καταχωρητές αδειάζουν πιο γρήγορα και είναι ικανοί να κρατήσουν μεγαλύτερο αριθμό πακέτων δεδομένων παρέχοντας λιγότερες απορρίψεις.

Είναι αξιοσημείωτο ότι για το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο η μέση πιθανότητα απόρριψης για όλες τις τιμές προσφερόμενου φορτίου είναι περίπου 0.03. Αυτό σημαίνει ότι κατά μέσο όρο το 3% των εισερχόμενων πακέτων δεδομένων απορρίπτονται λόγω υπερχείλισης στους καταχωρητές εξόδου. Η τιμή αυτή δεν είναι αποδεκτή για μητροπολιτικά δίκτυα επειδή προκαλείται μεγάλος αριθμός επαναμεταδόσεων πακέτων δεδομένων που προστίθενται στην κανονική κίνηση. Η απόδοση του συστήματος βελτιώνεται όταν ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό, όπως μελετάται στο Κεφάλαιο 8.

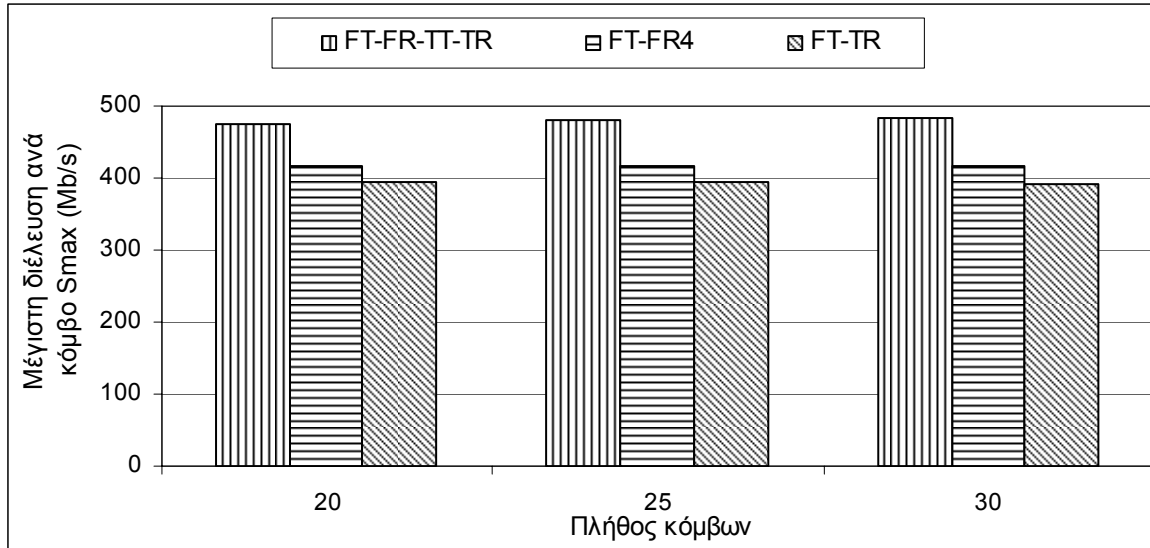
Η συνολική συμπεριφορά του συστήματος παρουσιάζεται αντιπροσωπευτικά στο Σχήμα 7-10 που παρουσιάζει τη μέση συνολική καθυστέρηση ως συνάρτηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο. Πράγματι, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο επιτυγχάνει σε συνθήκες υψηλού προσφερόμενου φορτίου αύξηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο κατά 15.7% και 23.1%, ενώ μειώνει τη μέση συνολική καθυστέρηση κατά 10% και 15.9% σε σύγκριση με τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα αντίστοιχα. Επίσης, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά υπό συνθήκες πολύ υψηλού προσφερόμενου φορτίου, ενώ τόσο το FT-FR⁴ όσο και το FT-TR πρωτόκολλο παρουσιάζουν συμφόρηση σε ιδιαίτερα χαμηλό προσφερόμενο φορτίο.



Σχήμα 7-10. Μέση συνολική καθυστέρηση για N=20, W=4, B=100

Τέλος, είναι προφανές ότι η αποδοτικότητα του συστήματος εξαρτάται σημαντικά από το πλήθος των κόμβων N και το πλήθος των καναλιών δεδομένων W. Η εξάρτηση αυτή μελετάται στο Σχήμα 7-11, που παρουσιάζει τη S_{max} για το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο σε σύγκριση με τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα, για διάφορες τιμές των N

και W . Εφόσον τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα προϋποθέτουν ότι ο λόγος N / W ισούται με ένα σταθερό ακέραιο αριθμό, για παράδειγμα $N / W = 5$, οι δικτυακές παράμετροι για τη σύγκριση είναι: $N = 20, 25, 30$, $W = N / 5$ και $B = 100$. Είναι αξιοσημείωτο ότι σε όλες τις περιπτώσεις το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο επιτυγχάνει υψηλότερες τιμές S_{max} σε σύγκριση με τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα, ενώ το ποσοστό της βελτίωσης παραμένει σταθερό, δηλαδή 13.9% και 20% αντίστοιχα.



Σχήμα 7-11. Μέγιστη διέλευση ανά κόμβο

Μελέτη των παραμέτρων απόδοσης του πρωτοκόλλου

Η απόδοση του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου εξαρτάται από τις ακόλουθες δικτυακές παραμέτρους:

- τη χωρητικότητα των καταχωρητών εξόδου B
- το πλήθος των κόμβων N στο δακτύλιο
- το πλήθος των καναλιών δεδομένων W .

Η σχέση μεταξύ αυτών των παραμέτρων καθορίζει την αποδοτικότητα του συστήματος. Με άλλα λόγια, η χωρητικότητα των καταχωρητών εξόδου B σχετίζεται με τις απορρίψεις πακέτων λόγω υπερχείλισης των καταχωρητών, ο αριθμός W καθορίζει τις συγκρούσεις στα κανάλια δεδομένων, ενώ ο συνδυασμός των N και W καθορίζει τις συγκρούσεις στον προορισμό.

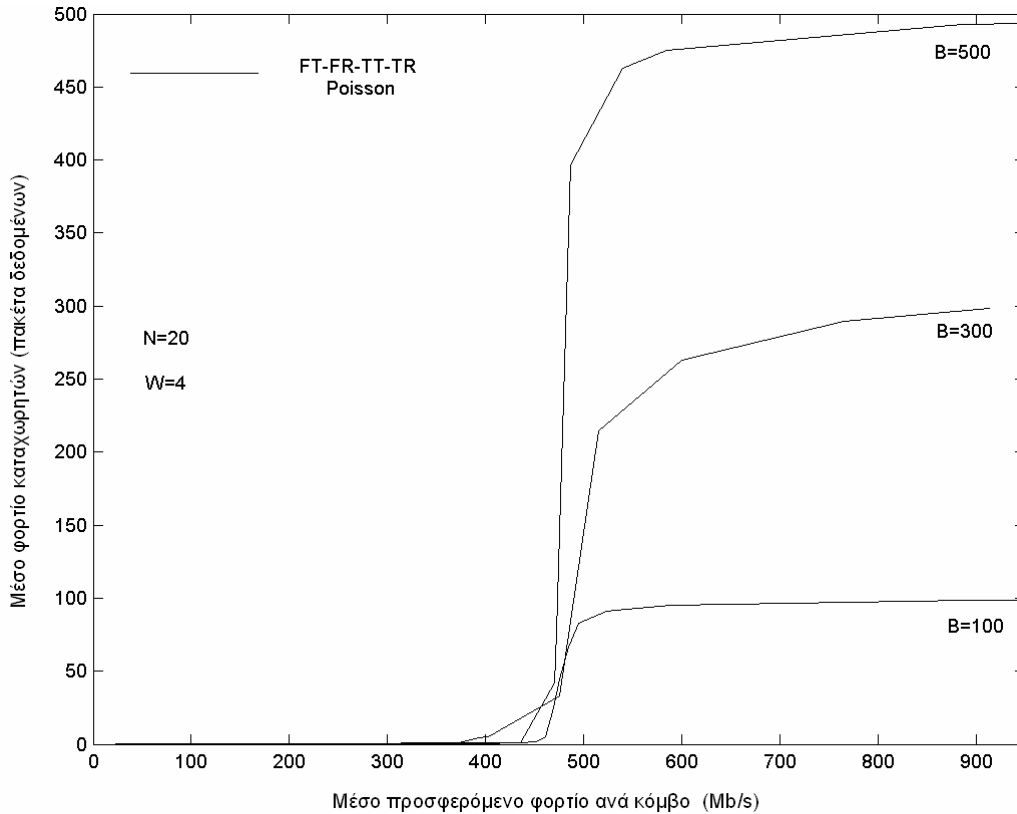
Μεταβολή της χωρητικότητας των καταχωρητών εξόδου

Η επίδραση της μεταβολής της χωρητικότητας B στην απόδοση του συστήματος μελετάται στο Σχήμα 7-12 που παρουσιάζει το μέσο φορτίο των καταχωρητών ως συνάρτηση του μέσου προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο για διάφορα μεγέθη χωρητικότητας καταχωρητή B .

Όπως παραστατικά φαίνεται, για όλες τις τιμές του B , ο αριθμός των πακέτων δεδομένων που βρίσκονται στον καταχωρητή εξόδου είναι κατά μέσο όρο μηδενικός για τιμές προσφερόμενου φορτίου μικρότερες από G_{max} . Η εξήγηση έγκειται στο γεγονός ότι για αυτές τις τιμές προσφερόμενου φορτίου το σύστημα δεν έχει φτάσει ακόμα σε κορεσμό και δεν έχει επιτύχει τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων χρονικών σχισμών, όπως

αναφέρθηκε προηγούμενα. Έτσι, το συνολικό εισερχόμενο προσφερόμενο φορτίο μπορεί να προσπελάσει τα κανάλια δεδομένων, χωρίς να απορριφθεί στους καταχωρητές.

Αντίθετα, για υψηλότερες τιμές προσφερόμενου φορτίου, παρατηρείται απότομη αύξηση του προσφερόμενου φορτίου. Και αυτό γιατί παρατηρείται μεγιστοποίηση της αξιοποίησης των χρονικών σχισμών, γεγονός που προκαλεί την απότομη υπερχείλιση των καταχωρητών. Με άλλα λόγια, η αύξηση της χωρητικότητας του καταχωρητή B επιδρά στην απόδοση του συστήματος για τιμές προσφερόμενου φορτίου μεγαλύτερες από G_{max} .

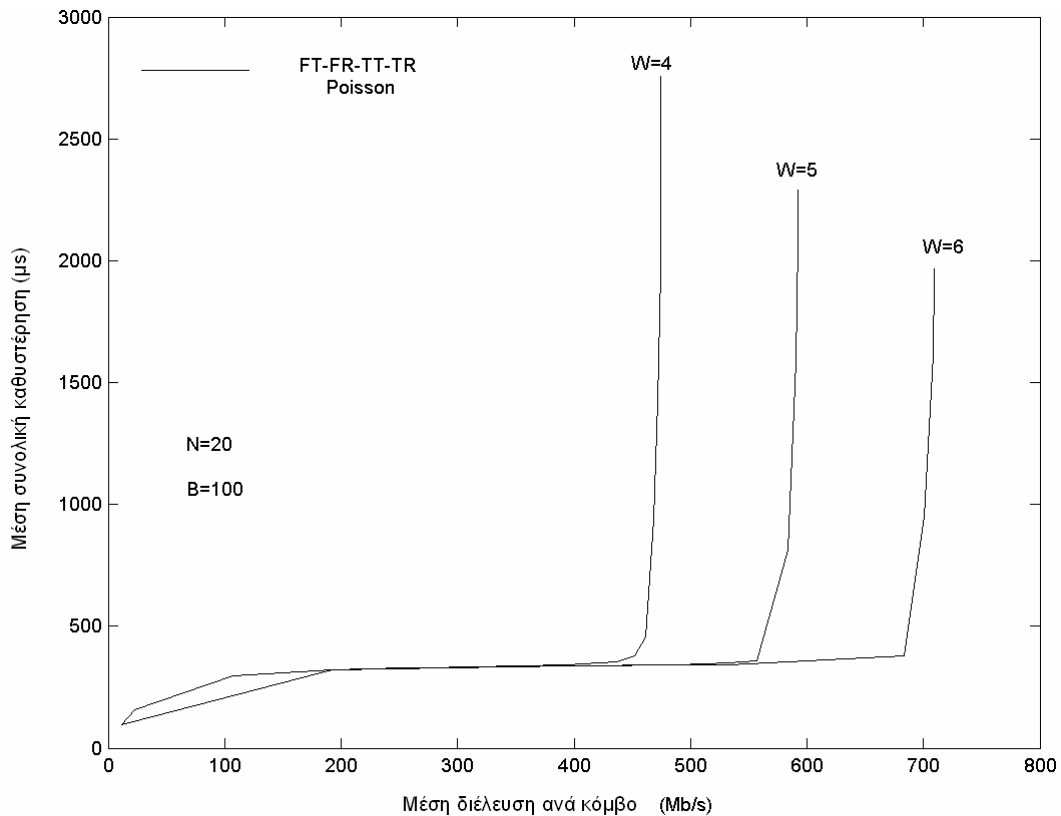


Σχήμα 7-12. Μέσο φορτίο καταχωρητών για $N=20$, $W=4$, $B=100,300,500$

Μεταβολή του πλήθους των καναλιών δεδομένων

Η επίδραση της μεταβολής του πλήθους W των καναλιών δεδομένων στην απόδοση του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-13, που εμφανίζει τη μέση συνολική καθυστέρηση ως συνάρτηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο για διάφορες τιμές του W .

Όπως παρατηρείται, η μέση συνολική καθυστέρηση είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του αριθμού W . Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι με την αύξηση του αριθμού W το πλήθος των ελεύθερων χρονικών σχισμών αυξάνει. Με άλλα λόγια, το χρονικό διάστημα που ένα πακέτο δεδομένων περιμένει στον καταχωρητή εξόδου προκειμένου να μεταδοθεί είναι μικρότερο. Το γεγονός αυτό προκαλεί μικρότερες τιμές μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου, καθώς και μικρότερες τιμές μέσης συνολικής καθυστέρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-13. Ως άμεση συνέπεια, με την αύξηση του αριθμού W η S_{max} αυξάνει. Για παράδειγμα, η μέγιστη διέλευση ανά κόμβο είναι $S_{max} = 474$ Mb/s για $W = 4$, ενώ αυξάνει σε $S_{max} = 591$ Mb/s για $W = 5$ και σε $S_{max} = 707$ Mb/s για $W = 6$.



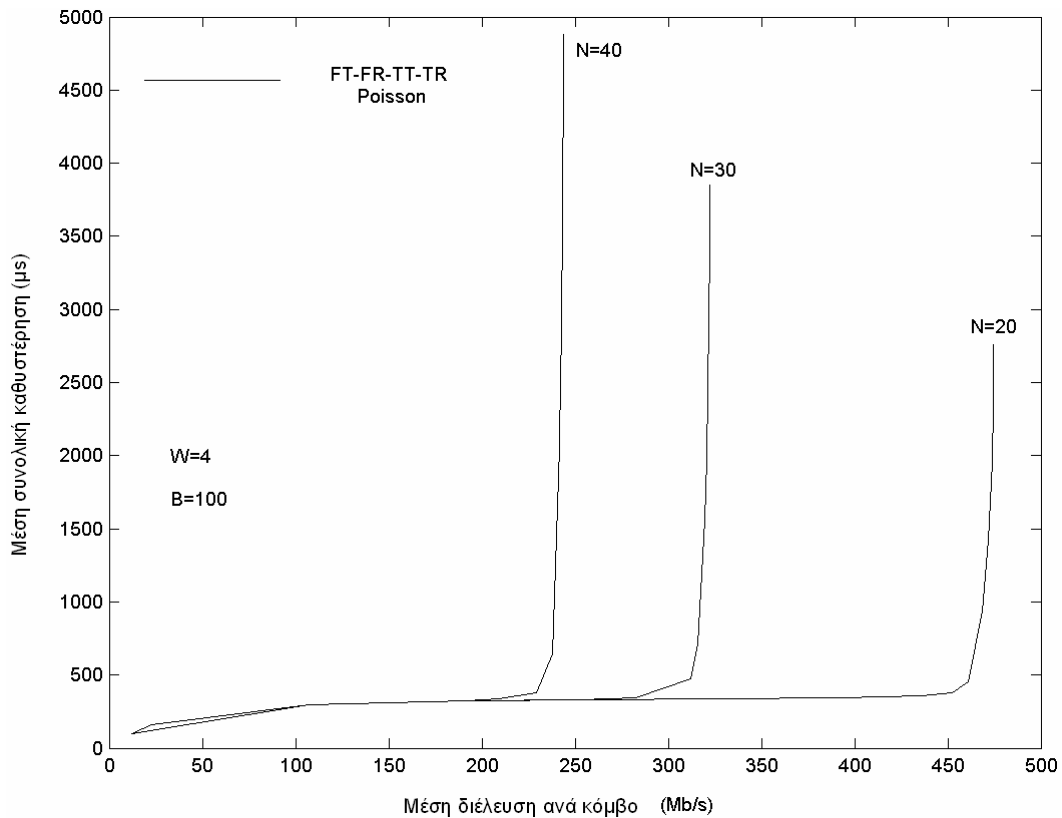
Σχήμα 7-13. Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=20$, $B=100$, $W=4,5,6$

Μεταβολή του πλήθους των κόμβων

Τέλος, η επίδραση της μεταβολής του πλήθους N των κόμβων στην απόδοση του συστήματος μελετάται στο Σχήμα 7-14 που παρουσιάζει τη μέση συνολική καθυστέρηση ως συνάρτηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο για διάφορες τιμές του N .

Όπως παρατηρείται για την ίδια τιμή μέσης διέλευσης ανά κόμβο, η μέση συνολική καθυστέρηση είναι μια αύξουσα συνάρτηση του N . Και αυτό γιατί με την αύξηση του N , η εισερχόμενη στο δακτύλιο κίνηση είναι μεγαλύτερη παρέχοντας λιγότερες ελεύθερες χρονικές σχισμές. Αυτός είναι ο λόγος για την αύξηση της καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου, καθώς και για την αύξηση της συνολικής καθυστέρησης.

Επίσης, είναι αξιοσημείωτο ότι με την αύξηση του N , η μέγιστη διέλευση ανά κόμβο S_{\max} ελαττώνεται. Η ερμηνεία αποτελεί άμεση συνέπεια των προηγούμενων διαπιστώσεων. Πράγματι, με την αύξηση του N ο μέγιστος αριθμός πακέτων δεδομένων που ένας κόμβος μπορεί να μεταδώσει στο δακτύλιο είναι μικρότερος, εξαιτίας του αυξανόμενου προσφερόμενου φορτίου. Το γεγονός αυτό προκαλεί μείωση της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο S_{\max} παρέχοντας σημαντικό περιορισμό της απόδοσης. Για παράδειγμα, η μέγιστη διέλευση ανά κόμβο είναι: $S_{\max} = 474$ Mb/s για $N = 20$, ενώ μειώνεται σε: $S_{\max} = 322$ Mb/s για $N = 30$ και σε: $S_{\max} = 243$ Mb/s για $N = 40$.



Σχήμα 7-14. Μέση συνολική καθυστέρηση για $W=4$, $B=100$, $N=20,30,40$

7.8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου για μητροπολιτικά WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου. Το μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου συγκροτείται από ένα πλήθος WDM καναλιών δεδομένων για τη μετάδοση αποκλειστικά πακέτων δεδομένων και από ένα ξεχωριστό κανάλι ελέγχου για την ανταλλαγή πακέτων ελέγχου πριν από την μετάδοση δεδομένων.

Το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου συμπληρώνεται από έναν αλγόριθμο πρόσβασης στα κανάλια δεδομένων για την αποφυγή των συγκρούσεων στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό. Έτσι, η πληροφορία ελέγχου που ανταλλάσσεται πριν τη μετάδοση δεδομένων εξασφαλίζει την χωρίς απώλειες επικοινωνία στον οπτικό δακτύλιο.

Κάθε κόμβος του δικτύου είναι εξοπλισμένος με:

- ένα ζεύγος ενός σταθερά συντονισμένου εκπομπού και ενός σταθερά συντονισμένου δέκτη, για την επικοινωνία στο κανάλι ελέγχου.
- ένα επιπλέον ζεύγος ενός συντονιζόμενου εκπομπού και ενός συντονιζόμενου δέκτη, για την επικοινωνία στα κανάλια δεδομένων.

Η μελέτη ακολουθεί τη στρατηγική επαναχρησιμοποίησης των χρονικών σχισμών στο δακτύλιο. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό θεωρήθηκε ότι η αποδέσμευση μιας χρονικής σχισμής, μετά τη λήψη της, πραγματοποιείται από τον αποστολέα [J.7],[J.8],[C.6],[C.7].

Ένα αναλυτικό μοντέλο αναπτύσσεται για τον υπολογισμό του αναλυτικού τύπου που παρέχει τη μέγιστη διέλευση ανά κόμβο στο δακτύλιο. Επίσης, τα αναλυτικά αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν από τα αποτελέσματα ενός μοντέλου εξομοίωσης διακριτών γεγονότων που

αναπτύχθηκε. Η εξομοίωση πραγματοποιήθηκε μοντελοποιώντας την κίνηση των δικτύων πρόσβασης σύμφωνα τόσο με Poisson όσο και με self-similar διαδικασία γέννησης. Έτσι, τα αποτελέσματα της εξομοίωσης που χρησιμοποιεί το self-similar μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κίνησης συντελούν στην αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου δικτύου σε περιβάλλον εκρηκτικής κίνησης.

Η συγκριτική μελέτη της απόδοσης του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και του WDMA πρωτοκόλλου πρόσβασης με την απόδοση άλλων WDMA πρωτοκόλλων μητροπολιτικών δικτύων τοπολογίας δακτυλίου καταδεικνύει ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική παρέχει ικανότητα κλιμάκωσης και συντήρησης του δικτύου, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει βελτιστοποίηση της απόδοσης, ιδιαίτερα σε πολύ υψηλά φορτία. Συγκεκριμένα το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερες τιμές μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο και αρκετά μικρότερες τιμές μέσης συνολικής καθυστέρησης.

Κεφάλαιο 8 : Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου – Στρατηγική Αποδέσμευσης Χρονικών Σχισμών στον Προορισμό

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η απόδοση του μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7, τροποποιώντας τη στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών έτσι ώστε αυτή να πραγματοποιείται στον προορισμό [J.7],[C.5]. Η στρατηγική αυτή αναφέρεται ως destination stripping. Η τροποποίηση αυτή αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου σε σχέση με τη στρατηγική αποδέσμευσης στον αποστολέα.

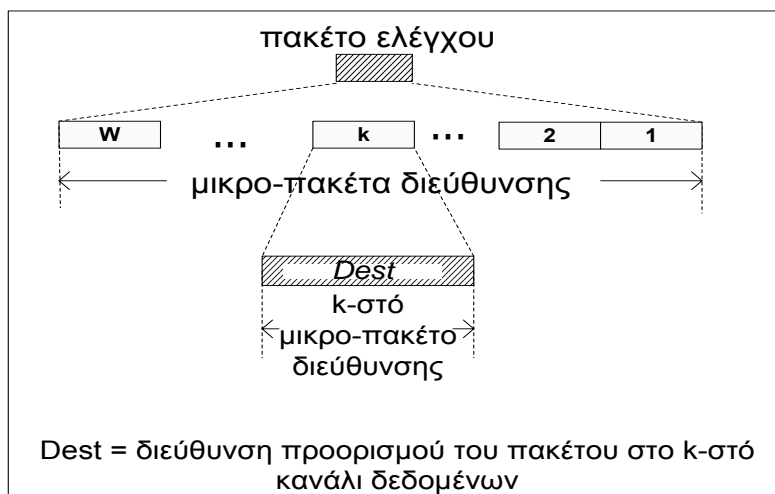
8.1 Μοντέλο δικτύου

Στο κεφάλαιο αυτό θεωρούμε το μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7. Επίσης, θεωρούμε την ίδια αρχιτεκτονική κόμβου που περιλαμβάνει τη FT-FR-TT-TR δικτυακή διεπαφή, όπως μελετήθηκε στο κεφάλαιο αυτό.

8.2 Δομή πακέτου ελέγχου

Στην αρχή κάθε χρονικής πολυ-σχισμής, το κανάλι ελέγχου μεταφέρει ένα πακέτο ελέγχου που αποτελείται από W μικρο-πακέτα διεύθυνσης. Η δομή του πακέτου ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 8-1.

Ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου ελέγχου συμβολίζεται ως t_r . Κάθε ένα από τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης αντιστοιχεί σε ένα κανάλι δεδομένων. Επίσης, το μέγεθος κάθε ενός από τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης έχει μέγεθος n bits, $2^n \geq N > 2^{n-1}$ [96].



Σχήμα 8-1. Δομή πακέτου ελέγχου

Έτσι, το k -στό $\in \{1, 2, \dots, W\}$ μικρο-πακέτο διεύθυνσης μεταφέρει σε δυαδική μορφή τη διεύθυνση προορισμού του πακέτου δεδομένων που μεταδίδεται στο k -στό κανάλι δεδομένων της χρονικής πολυ-σχισμής. Στην περίπτωση που το k -στό μικρο-πακέτο διεύθυνσης είναι άδειο, τότε το k -στό κανάλι δεδομένων είναι ελεύθερο για μετάδοση.

8.3 Στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό

Σε αντίθεση με το Κεφάλαιο 7, στο κεφάλαιο αυτό ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό. Η στρατηγική αυτή ονομάζεται *destination stripping*. Σύμφωνα με αυτή, ο κόμβος-παραλήπτης ενός πακέτου δεδομένων είναι υπεύθυνος να αποδεσμεύσει μια χρονική σχισμή, αμέσως μετά τη λήψη του πακέτου δεδομένων που μεταφέρει.

Η στρατηγική επαναχρησιμοποίησης των χρονικών σχισμών που ακολουθείται απαγορεύει την άμεση επαναχρησιμοποίηση μιας χρονικής σχισμής που μόλις έχει δηλωθεί ως ελεύθερη, επιβάλλοντας στον κόμβο που μόλις έχει παραλάβει ένα πακέτο δεδομένων να παραχωρήσει την ελεύθερη πια χρονική σχισμή στον επόμενο κόμβο [25]. Η στρατηγική αυτή παρέχει δίκαιη πρόσβαση των κόμβων στα κανάλια δεδομένων, χωρίς να απαιτείται επιπλέον χρόνος επεξεργασίας και επιπρόσθετο κόστος καθυστέρησης.

8.4 Πρωτόκολλο πρόσβασης

Το πρωτόκολλο πρόσβασης στα κανάλια του οπτικού δακτυλίου είναι παρόμοιο με αυτό που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7. Η μόνη διαφοροποίηση αφορά τη διαφορετική στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών.

Έτσι, έστω ότι κατά τον αλγόριθμο μετάδοσης ένας κόμβος αποφασίζει να αποστείλει ένα πακέτο δεδομένων στο k -στό κανάλι δεδομένων. Επίσης, έστω ότι κατά τον αλγόριθμο λήψης ο κόμβος ανιχνεύει ότι ένα πακέτο δεδομένων προορίζεται για αυτόν και μεταδίδεται στο m -στό $\in \{1,2..W\}$ κανάλι δεδομένων. Τότε ο κόμβος αναγεννά σε ηλεκτρονική μορφή ένα νέο πακέτο ελέγχου ως εξής: αναγεννά τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης που έχει παραλάβει στην αρχή της χρονικής πολυ-σχισμής και τροποποιεί μόνο τα πεδία των:

- k -στού μικρο-πακέτου διεύθυνσης γράφοντας τη διεύθυνση προορισμού του δικού του πακέτου δεδομένων.
- m -στού μικρο-πακέτου διεύθυνσης αποδεσμεύοντας το, σύμφωνα με το σχήμα αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό.

8.5 Ανάλυση

Στο αναλυτικό μοντέλο που αναπτύσσεται για τον υπολογισμό της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο θεωρούμε τις ακόλουθες παραμέτρους που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 7:

- το χρονικό διάστημα T_c που απαιτείται για την πλήρη περιστροφή μιας χρονικής σχισμής γύρω από το δακτύλιο, που δίνεται από τη σχέση (7.3).
- το χρονικό διάστημα T_a που μεσολαβεί από την αναχώρηση του πακέτου δεδομένων από τον αποστολέα μέχρι την πλήρη λήψη του από το γειτονικό κόμβο-προορισμό, που δίνεται από τη σχέση (7.4).

Γενικά, ο αποστολέας μεταδίδει ένα πακέτο δεδομένων στον προορισμό χρησιμοποιώντας μια ελεύθερη χρονική σχισμή. Το πλήθος των ενδιάμεσων κόμβων μεταξύ του αποστολέα και του προορισμού είναι z ($0 \leq z < N$) κόμβοι. Στη γενική αυτή περίπτωση, το χρονικό διάστημα T_x που μεσολαβεί από την αναχώρηση του πακέτου δεδομένων από τον αποστολέα μέχρι την πλήρη λήψη του από τον προορισμό δίνεται από τη σχέση:

$$T_x = (z + 1) \times T_a \quad (8.1)$$

Θεωρείται ότι κάθε κόμβος μεταδίδει ισοπίθανα προς οποιονδήποτε από τους υπόλοιπους κόμβους, με πιθανότητα $1/(N-1)$. Έτσι, η μέση τιμή \overline{T}_x του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί από την αναχώρηση του πακέτου δεδομένων από τον αποστολέα μέχρι την πλήρη λήψη του από τον προορισμό δίνεται από τη σχέση:

$$\overline{T}_x = (1 + 2 + \dots + N - 1) \times \frac{1}{(N - 1)} \times T_a \quad (8.2)$$

Ο πρώτος παράγοντας της σχέσης (8.2) είναι το άθροισμα των στοιχείων μιας αριθμητικής προόδου. Επομένως, από τις σχέσεις (7.3), (7.4), (8.2), προκύπτει:

$$\overline{T}_x = \frac{T_p + N \times t_d}{2} \quad (8.3)$$

Μια χρονική σχισμή που μεταφέρει ένα πακέτο δεδομένων που παραλαμβάνεται από τον προορισμό και δηλώνεται ως ελεύθερη, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμέσως από τον προορισμό για μετάδοση, σύμφωνα με το σχήμα επαναχρησιμοποίησης χρονικών σχισμών που ακολουθείται. Έτσι, στην περίπτωση αυτή η ελεύθερη πια χρονική σχισμή αφήνεται αχρησιμοποίητη στο γειτονικό κόμβο.

Η μέση τιμή \overline{T}_r του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί από την αναχώρηση του πακέτου δεδομένων από τον αποστολέα μέχρι η χρονική σχισμή να δύναται να επαναχρησιμοποιηθεί, δίνεται από τη σχέση:

$$\overline{T}_r = \overline{T}_x + T_a \quad (8.4)$$

Από τις σχέσεις (7.3), (7.4), (8.3), (8.4), προκύπτει:

$$\overline{T}_r = (T_p + N \times t_d) \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{N} \right) \quad (8.5)$$

Η μέγιστη διέλευση S_{slot} ανά χρονική σχισμή και ανά κανάλι δεδομένων ορίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός των επιτυχών μεταδόσεων πακέτων δεδομένων από μια χρονική σχισμή σε ένα κανάλι δεδομένων, κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής γύρω από τον οπτικό δακτύλιο, δηλαδή:

$$S_{slot} = \frac{T_c}{\overline{T}_r} \quad (8.6)$$

Από τις σχέσεις (7.3), (8.5) και (8.6), προκύπτει:

$$S_{slot} = \frac{2 \times N}{N + 2} \quad (8.7)$$

Σύμφωνα με την ανάλυση που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7 και τη σχέση (7.12), η μέγιστη διέλευση S_{max} ανά κόμβο σε όλα τα κανάλια δεδομένων του οπτικού δακτυλίου σε μονάδες Gb/s, δίνεται από τη σχέση:

$$S_{max} = \frac{W \times S_{slot} \times R_w}{N} = \frac{S}{N} \quad (8.8)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (8.7) στη σχέση (8.8) προκύπτει:

$$S_{max} = \frac{2 \times R}{N + 2} \quad (8.9)$$

Σχολιασμός αναλυτικών συμπερασμάτων

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη σχέση (8.9) που δίνει τη μέγιστη διέλευση S_{\max} ανά κόμβο σε όλα τα κανάλια δεδομένων του οπτικού δακτυλίου είναι παρόμοια με αυτά της ανάλυσης που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7.

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της σχέσης (8.9) παραμένουν σε ισχύ και στην περίπτωση που δεν ισχύουν οι υποθέσεις που τέθηκαν κατά την ανάλυση. Έτσι, τα αποτελέσματα της σχέσης (8.9) ισχύουν και στην περίπτωση που οι κόμβοι δεν ισαπέχουν στην περίμετρο του δακτυλίου. Στην περίπτωση αυτή, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την αναχώρηση του πακέτου δεδομένων από τον αποστολέα μέχρι την πλήρη λήψη του από το γειτονικό κόμβο-προορισμό είναι κατά μέσο όρο (και όχι ακριβώς) ίσο με T_a .

Επίσης, τα αποτελέσματα της σχέσης (8.9) ισχύουν και στην περίπτωση που οι κόμβοι δεν μεταδίδουν με τον ίδιο ρυθμό. Το γεγονός αυτό ισχύει επειδή κάθε κόμβος μεταδίδει ισοπίθανα σε οποιονδήποτε από τους υπόλοιπους κόμβους με πιθανότητα $1/(N-1)$. Έτσι, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι μια μόλις αποδεσμευμένη χρονική σχισμή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμέσως αλλά αντίθετα αφήνεται ελεύθερη για το γειτονικό κόμβο, ο μέσος αριθμός των ελεύθερων χρονικών σχισμών που φτάνουν σε ένα κόμβο είναι ίδιος για όλους τους κόμβους, παρέχοντας ίσες πιθανότητες μετάδοσης.

8.6 Μοντέλο και παράμετροι εξομοίωσης

Μοντέλο εξομοίωσης

Το μοντέλο εξομοίωσης του προτεινόμενου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που ακολουθεί τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό είναι το ίδιο με αυτό που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7.

Παράμετροι εξομοίωσης

Για λόγους συγκριτικής αξιολόγησης της απόδοσης του πρωτοκόλλου που ακολουθεί τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό σε σχέση με αυτό που ακολουθεί τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7, διατηρούμε τις ίδιες παραμέτρους δικτύου.

Παρόλα αυτά, κάποιες τροποποιήσεις επιβάλλονται εξαιτίας της διαφοροποίησης της πληροφορίας ελέγχου. Συγκεκριμένα, στο πρωτόκολλο που ακολουθεί τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό κάθε μικρο-πακέτο διεύθυνσης μεταφέρει τη διεύθυνση του προορισμού.

Επομένως το μέγεθος κάθε μικρο-πακέτου διεύθυνσης είναι: $n = 5$ bits και $2^{n-1} < N \leq 2^n$ [96]. Έτσι, το μέγεθος του πακέτου ελέγχου είναι: $(W \times n) = 20$ bits. Τέλος, ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου ελέγχου είναι: $t_r = (W \times n) / R_w = 0.008$ μ s.

Για την εξομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, πραγματοποιούνται οι ακόλουθες υποθέσεις:

- σχετικά με το χρόνο επεξεργασίας t_p του πακέτου ελέγχου και το χρόνο συντονισμού των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών $\max\{t_{s-t}, t_{s-r}\}$ ακολουθούμε τη σχέση (7.14)
- σχετικά με το χρόνο ασφαλείας t_g ακολουθούμε τη σχέση (7.15).

Ο Πίνακας 8-1 παρουσιάζει συνολικά τις παραμέτρους του δικτύου.

Παράμετρος δικτύου	Τιμή
Περίμετρος δακτυλίου L_R	138 240 m
Ταχύτητα φωτός στην οπτική ίνα v_g	2×10^8 m/s
Καθυστέρηση διάδοσης T_p	691.2 μ s
Πλήθος καναλιών δεδομένων W	4
Πλήθος καναλιών ελέγχου	1
Χωρητικότητα καταχωρητή εξόδου B	100
Μέγεθος πακέτου δεδομένων L	12 000 bits
Μέγεθος μικρο-πακέτου διεύθυνσης n	5 bits
Μέγεθος πακέτου ελέγχου	20 bits
Πλήθος κόμβων N	20
Ρυθμός μετάδοσης στα κανάλια R_w	2.5 Gb/s
Ρυθμός μετάδοσης σε όλα τα κανάλια δεδομένων R	10 Gb/s
Χρόνος μετάδοσης πακέτου δεδομένων T	4.8 μ s
Χρόνος μετάδοσης πακέτου ελέγχου t_r	0.008 μ s
Διάρκεια χρονικής πολυ-σχισμής	4.8 μ s
Πλήθος χρονικών πολυ-σχισμών M	144

Πίνακας 8-1. Παράμετροι μοντέλου εξομοίωσης

8.7 Αριθμητικά αποτελέσματα

Υπολογισμός βέλτιστου προσφερόμενου φορτίου

Αν και η παρουσίαση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της εξομοίωσης δίνονται στη συνέχεια, επιλέγεται η παρουσίαση ορισμένων παρατηρήσεων εκ των προτέρων για την καλύτερη κατανόηση τους. Έτσι όπως και στο Κεφάλαιο 7, από τη μελέτη των αριθμητικών αποτελεσμάτων για τη μέση διέλευση ανά κόμβο που δίνονται στη συνέχεια, παρατηρούμε ότι υπάρχει μία τιμή προσφερόμενου φορτίου G_{max} στην οποία το σύστημα παρουσιάζει συμφόρηση και η μέση διέλευση ανά κόμβο έχει τιμή S_{max} . Για τιμές προσφερόμενου φορτίου μεγαλύτερες του G_{max} η μέση διέλευση ανά κόμβο διατηρεί τη μέγιστη τιμή S_{max} .

Θεωρούμε τον κανονικοποιημένο χρόνο $t = 1$ ως τη χρονική διάρκεια για μια πλήρη περιστροφή γύρω από το δακτύλιο. Ο χρόνος T_b ορίζεται ως ο κανονικοποιημένος χρόνος που απαιτείται για μία χρονική σχισμή προκειμένου να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί μετά την αρχική χρησιμοποίησή της.

Θεωρείται ότι ένας κόμβος μεταδίδει σε οποιονδήποτε άλλο κόμβο ισοπίθανα, με πιθανότητα $1/(N-1)$. Εφόσον μία χρονική σχισμή δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί αμέσως μετά την αποδέσμευσή της αλλά αφήνεται για τον γειτονικό κόμβο, ο κανονικοποιημένος χρόνος T_b δίνεται από τη σχέση:

$$T_b = \frac{1}{2} + \frac{1}{N} \quad (8.10)$$

Επίσης, ορίζουμε την παράμετρο T_f ως την ελάχιστη τιμή του κανονικοποιημένου χρόνου που απαιτείται μεταξύ δύο διαδοχικών αφίξεων δύο ελεύθερων χρονικών σχισμών σε έναν κόμβο σε οποιαδήποτε κανάλια δεδομένων.

Όμοια με το Κεφάλαιο 7, η τιμή G_{\max} ισούται με το μέγιστο ρυθμό σε μονάδες Gb/s κατά τον οποίο ανιχνεύονται ελεύθερες χρονικές σχισμές από ένα κόμβο. Ισχύει:

$$G_{\max} = \frac{1}{T_b} \times \frac{R_w \times W}{N} \quad (8.11)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (8.10) στη σχέση (8.11), προκύπτει:

$$G_{\max} = \frac{2 \times R}{N + 2} = S_{\max} \quad (8.12)$$

Επομένως, η τιμή προσφερόμενου φορτίου G_{\max} στην οποία το σύστημα παρουσιάζει συμφόρηση ισούται με τη μέγιστη διέλευση ανά κόμβο S_{\max} . Όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια, η μέση διέλευση ανά κόμβο για τιμές μικρότερες από G_{\max} είναι ίσες με τη τιμή του προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο. Η ερμηνεία δίνεται στο σχολιασμό για το Σχήμα 8-2.

Αριθμητικά αποτελέσματα

Η χρήση της στρατηγικής αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου σε σχέση με τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7.

Πράγματι, όπως παρουσιάζεται στα ακόλουθα σχήματα το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο μπορεί να εξυπηρετήσει χωρίς περιορισμό της απόδοσης το προσφερόμενο φορτίο μέχρι την τιμή των 850 Mb/s, λόγω της γρηγορότερης στρατηγικής επαναχρησιμοποίησης των χρονικών σχισμών. Η τιμή αυτή είναι 77.1% βελτιωμένη σε σχέση με τη στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα. Επίσης για αρκετά υψηλές τιμές προσφερόμενου φορτίου, όπως για παράδειγμα 920 Mb/s, η μέση διέλευση ανά κόμβο ανέρχεται στα 870 Mb/s όταν ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό, έναντι μόλις 480 Mb/s όταν ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα.

Το Σχήμα 8-2 παρουσιάζει τη μέση διέλευση ανά κόμβο ως συνάρτηση του μέσου προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο. Γίνεται φανερό ότι η μεταβολή της μέσης διέλευσης ανά κόμβο για τιμές μικρότερες της μέγιστης τιμής S_{\max} είναι μια ταυτοτική γραμμική συνάρτηση του μέσου προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο. Αυτό σημαίνει ότι για τιμές προσφερόμενου φορτίου μικρότερες από G_{\max} , κατά την άφιξη ενός πακέτου δεδομένων στον καταχωρητή εξόδου του κόμβου από το δίκτυο πρόσβασης υπάρχει τουλάχιστον ένα κανάλι δεδομένων με ελεύθερη χρονική σχισμή για τη μετάδοση.

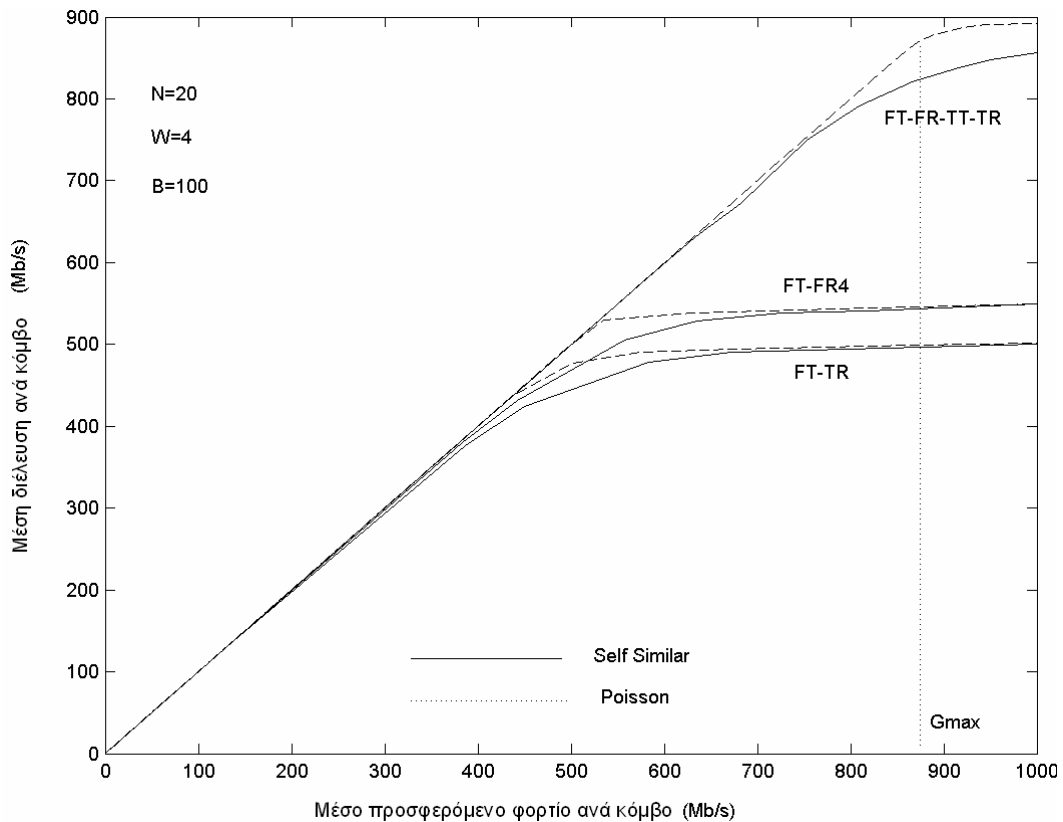
Έτσι, στο Σχήμα 8-2 παρατηρούμε ότι υπάρχει μία οριακή τιμή προσφερόμενου φορτίου G_{\max} στην οποία η μέση διέλευση ανά κόμβο μεγιστοποιείται, ενώ για τιμές μεγαλύτερες από G_{\max} η μέση διέλευση ανά κόμβο διατηρείται σταθερή. Η τιμή προσφερόμενου φορτίου G_{\max} δίνεται από τη σχέση (8.12).

Επίσης, από το Σχήμα 8-2 παρατηρείται ότι το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο μπορεί να εξυπηρετήσει, χωρίς να φτάσει σε κορεσμό, το προσφερόμενο φορτίο μέχρι την τιμή των $G_{\max} \approx 880$ Mb/s.

Αντίθετα, οι αντίστοιχες τιμές για τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα της μελέτης [25] είναι μόλις 530 Mb/s και 440 Mb/s αντίστοιχα. Η ερμηνεία είναι όμοια με την περίπτωση της

στρατηγικής αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα. Για μεγαλύτερες τιμές προσφερόμενου φορτίου υπάρχουν λιγότερες ελεύθερες χρονικές σχισμές, με αποτελέσματα η μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου να αυξάνει, όπως καταδεικνύει το Σχήμα 8-3. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται με βάση το γεγονός ότι το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο επιτρέπει την επικοινωνία αξιοποιώντας όλα τα κανάλια δεδομένων που διαθέτουν ελεύθερες χρονικές σχισμές, σε συνδυασμό με τον ακολουθούμενο αλγόριθμο αποφυγής συγκρούσεων τόσο στα κανάλια δεδομένων όσο και στον προορισμό.

Τέλος, η μέγιστη τιμή της διέλευσης S_{max} του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου είναι 890 Mb/s και συμμορφώνεται με τα θεωρητικά αποτελέσματα της σχέσης (8.9). Οι αντίστοιχες τιμές για τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα είναι σημαντικά μικρότερες, δηλαδή 553 Mb/s και 505 Mb/s αντίστοιχα.

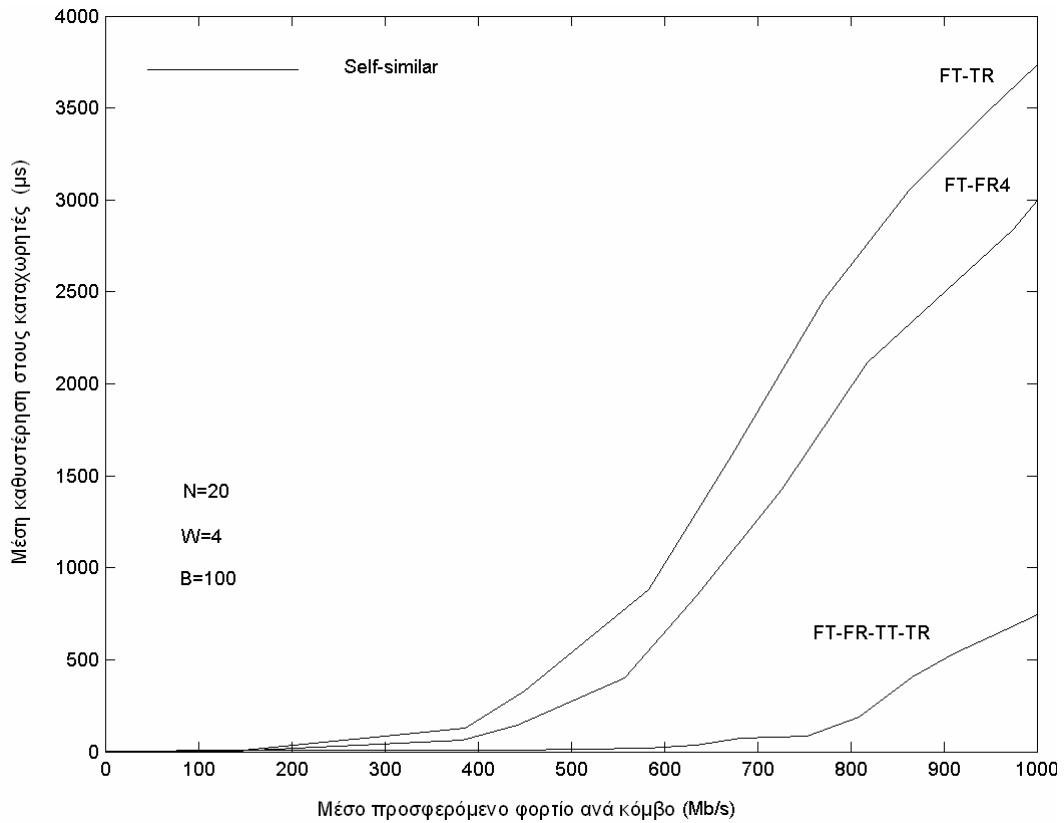


Σχήμα 8-2. Μέση διέλευση ανά κόμβο για $N=20$, $W=4$, $B=100$

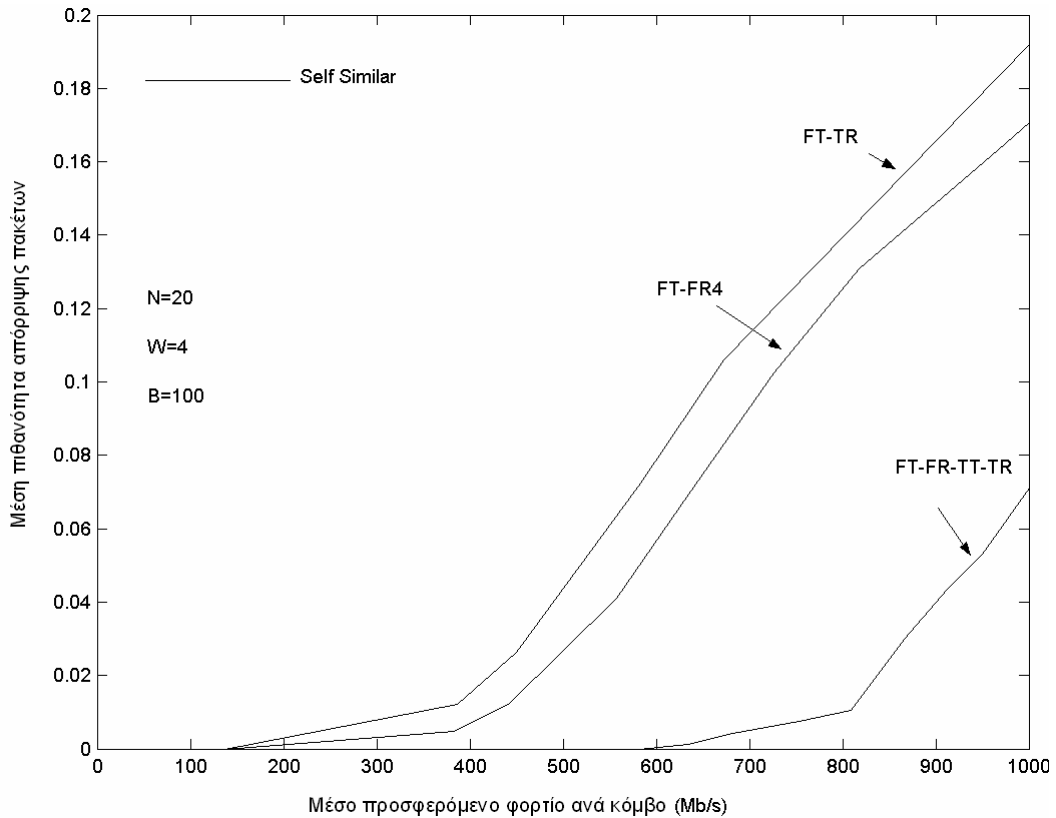
Το Σχήμα 8-3 παρουσιάζει τη μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου ως συνάρτηση του μέσου προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο. Είναι αξιοσημείωτο ότι για το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο, η μέση τιμή της καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου είναι μικρότερη από 200 μ s. Η τιμή αυτή είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή που παρατηρείται όταν ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα. Έτσι η χρήση της στρατηγικής αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό παρέχει εξαιρετική απόδοση ως προς τη μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές και μπορεί να ικανοποιήσει περιπτώσεις τηλεπικοινωνιακής κίνησης πραγματικού χρόνου (πχ. video).

Επίσης, η χρήση της στρατηγικής αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό περιορίζει ουσιαστικά τη μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου στο προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο. Αυτό παρατηρείται για παράδειγμα για προσφερόμενο φορτίο 870 Mb/s όπου η μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές είναι 210 μ s όταν ακολουθείται η

στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό ενώ αυτή ανέρχεται στα 2330 μs όταν ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα.



Σχήμα 8-3. Μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές για $N=20$, $W=4$, $B=100$



Σχήμα 8-4. Μέση πιθανότητα απώρευσης για $N=20$, $W=4$, $B=100$

Η μέση πιθανότητα απόρριψης πακέτων λόγω υπερχειλίσης των καταχωρητών εξόδου ως συνάρτηση του μέσου προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο παρουσιάζεται στο Σχήμα 8-4. Είναι φανερό ότι η στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό παρέχει κατά μέσο όρο 0.8% πιθανότητα απόρριψης των πακέτων δεδομένων. Η τιμή αυτή είναι κατά 73.3% μικρότερη σε σχέση με τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα. Η μείωση αποτελεί άμεσο αποτέλεσμα της αυξημένης δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης χρονικών σχισμών που παρατηρείται στη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό.

Η απόδοση του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου μπορεί να σχολιασθεί με τη βοήθεια της συνδυαστικής μελέτης των ακόλουθων σχημάτων: Σχήμα 8-2, Σχήμα 8-3 και Σχήμα 8-4.

Έτσι όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 8-3, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο παρέχει πολύ χαμηλές (σχεδόν μηδενικές) τιμές της μέσης καθυστέρησης για τιμές προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο μικρότερες από $G_{max} \approx 880$ Mb/s. Για αυτές τις τιμές, το συνολικό προσφερόμενο φορτίο ανά κόμβο μπορεί να προσπελάσει τον οπτικό δακτύλιο χωρίς το δίκτυο να φτάσει σε κορεσμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-2. Και αυτό γιατί υπάρχουν πολλές ελεύθερες χρονικές σχισμές για μετάδοση στο δακτύλιο, γεγονός που βοηθά οι καταχωρητές εξόδου να διατηρούνται σχεδόν άδειοι. Έτσι, η μέση πιθανότητα απόρριψης πακέτων στους καταχωρητές εξόδου διατηρείται σε πολύ χαμηλή (σχεδόν μηδενική) τιμή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-4.

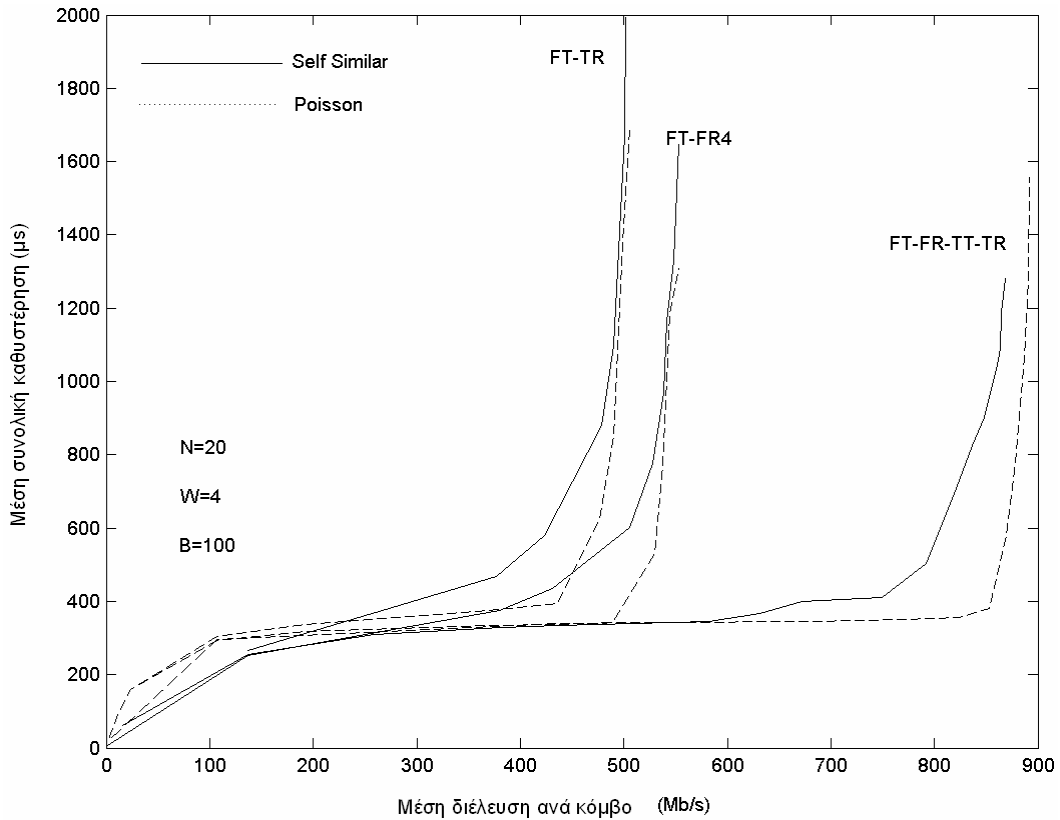
Για τιμές προσφερόμενου φορτίου μεγαλύτερες από G_{max} , η μέση τιμή της καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου βαθμιαία αυξάνει, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 8-3. Σε αυτή την περίπτωση, η αξιοποίηση των χρονικών σχισμών είναι βέλτιστη και το σύστημα επιτυγχάνει τη μέγιστη τιμή της διέλευσης S_{max} , όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-2. Και αυτό γιατί δεν υπάρχουν αρκετές ελεύθερες χρονικές σχισμές για μετάδοση, με αποτέλεσμα να παρατηρείται αύξηση της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου. Το γεγονός αυτό ερμηνεύει την βαθμιαία αύξηση της μέσης πιθανότητας απόρριψης στους καταχωρητές για αυτές τις τιμές προσφερόμενου φορτίου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 8-4.

Αντίθετα, τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα της μελέτης [25] παρέχουν χαμηλές τιμές μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές για πολύ μικρότερες τιμές προσφερόμενου φορτίου, δηλαδή 500 Mb/s και 440 Mb/s αντίστοιχα, όπως δείχνει το Σχήμα 8-3. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτή την περιοχή, το προσφερόμενο φορτίο μπορεί να εξυπηρετηθεί, χωρίς να απορριφθεί στους καταχωρητές εξόδου και να προσπελάσει σχεδόν άμεσα στον οπτικό δακτύλιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-2. Ως άμεσο αποτέλεσμα, για αυτές τις τιμές προσφερόμενου φορτίου η μέση πιθανότητα απόρριψης λόγω υπερχειλίσης των καταχωρητών διατηρεί πολύ χαμηλές τιμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-4.

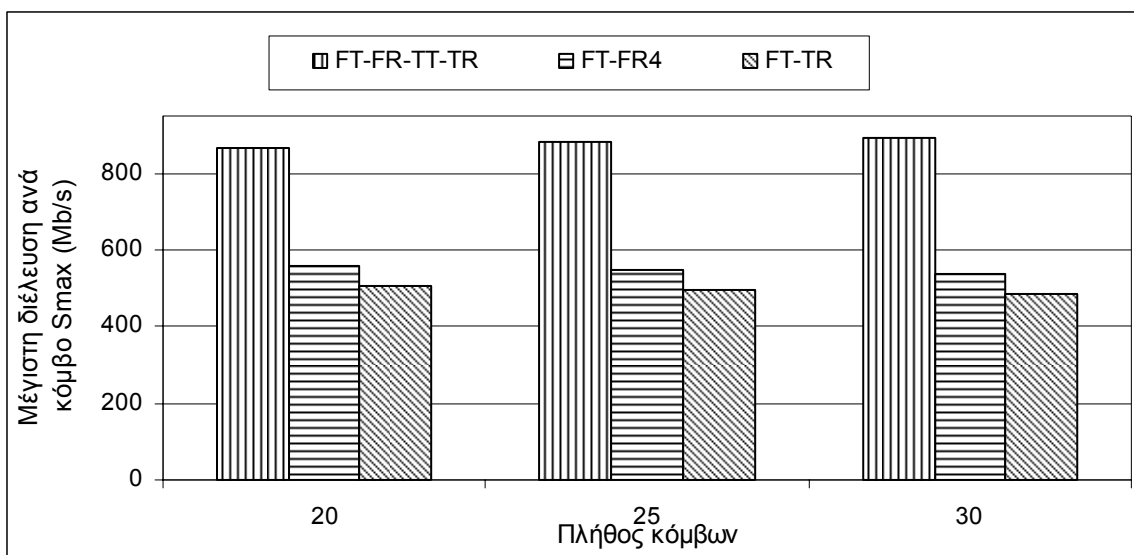
Για μεγαλύτερες τιμές προσφερόμενου φορτίου, η μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου βαθμιαία αυξάνει. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι οι ελεύθερες χρονικές σχισμές λιγοστεύουν. Έτσι στην περιοχή αυτή, τα πρωτόκολλα φτάνουν στη μέγιστη αξιοποίηση των χρονικών σχισμών και επιτυγχάνουν τη μέγιστη διέλευση ανά κόμβο, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 8-2. Επίσης, το γεγονός αυτό προκαλεί τη βαθμιαία υπερχειλίση των καταχωρητών εξόδου, που συνεπακόλουθα οδηγεί στη βαθμιαία αύξηση της μέσης πιθανότητας απόρριψης.

Η βελτίωση της απόδοσης που παρέχει το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο παρατηρείται, για παράδειγμα, για προσφερόμενο φορτίο 870 Mb/s, όπου η μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου είναι 12.4 και 15.2 φορές μικρότερη συγκρινόμενη με τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα αντίστοιχα. Επίσης, για προσφερόμενο φορτίο 870 Mb/s η μέση πιθανότητα απόρριψης είναι 70 και 75 φορές μικρότερη αντίστοιχα.

Η σημαντική βελτίωση παρουσιάζεται εμφανώς στο Σχήμα 8-5 που εμφανίζει τη μέση συνολική καθυστέρηση ως συνάρτηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο. Πράγματι, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο για υψηλά φορτία κατορθώνει αύξηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο κατά 60.9% και 76.2%, ενώ καταφέρνει μείωση της μέσης συνολικής καθυστέρησης κατά 19.3% και 24.4%, σε σχέση με τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα αντίστοιχα.



Σχήμα 8-5. Μέση συνολική καθυστέρηση για N=20, W=4, B=100



Σχήμα 8-6. Μέγιστη διέλευση ανά κόμβο

Τέλος, το Σχήμα 8-6 παρουσιάζει τη μέγιστη διέλευση ανά κόμβο S_{\max} για το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο σε σύγκριση με τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα, για διάφορες τιμές του N και W . Όπως στο Κεφάλαιο 7, οι δικτυακές παράμετροι είναι: $N=20,25,30$, $W=N/5$ και $B=100$. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά στο Κεφάλαιο 7. Έτσι, για όλες τις εξεταζόμενες τιμές N και W , το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο παρέχει 55.9% και 71.2% υψηλότερες τιμές S_{\max} σε σύγκριση με τα FT-FR⁴ και FT-TR πρωτόκολλα αντίστοιχα.

Μελέτη των Παραμέτρων Απόδοσης του Πρωτοκόλλου

Η μελέτη της απόδοσης του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου κατά τη μεταβολή των δικτυακών παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση του (B , W , N) οδηγεί σε παρόμοια συμπεράσματα με την περίπτωση στρατηγικής αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα, που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7. Συγκεκριμένα:

Μεταβολή της χωρητικότητας των καταχωρητών εξόδου

Στο Σχήμα 8-7 παρουσιάζεται η μέση συνολική καθυστέρηση ως συνάρτηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο για διάφορα μεγέθη χωρητικότητας καταχωρητών εξόδου. Για τιμές μέσης διέλευσης ανά κόμβο μικρότερες από 650 Mb/s, η αύξηση του B δεν επηρεάζει την απόδοση του πρωτοκόλλου. Το γεγονός αυτό παρατηρείται γιατί το σύστημα δεν έχει φτάσει στη βέλτιστη αξιοποίηση των ελεύθερων χρονικών σχισμών και η συνολική προσφερόμενη κίνηση μπορεί να προσπελάσει άμεσα το δακτύλιο.

Για μεγαλύτερες τιμές, η αύξηση του B προκαλεί μείωση της μέσης πιθανότητας απόρριψης λόγω υπερχειλίσσης των καταχωρητών εξόδου και επομένως αύξηση της μέσης συνολικής καθυστέρησης.

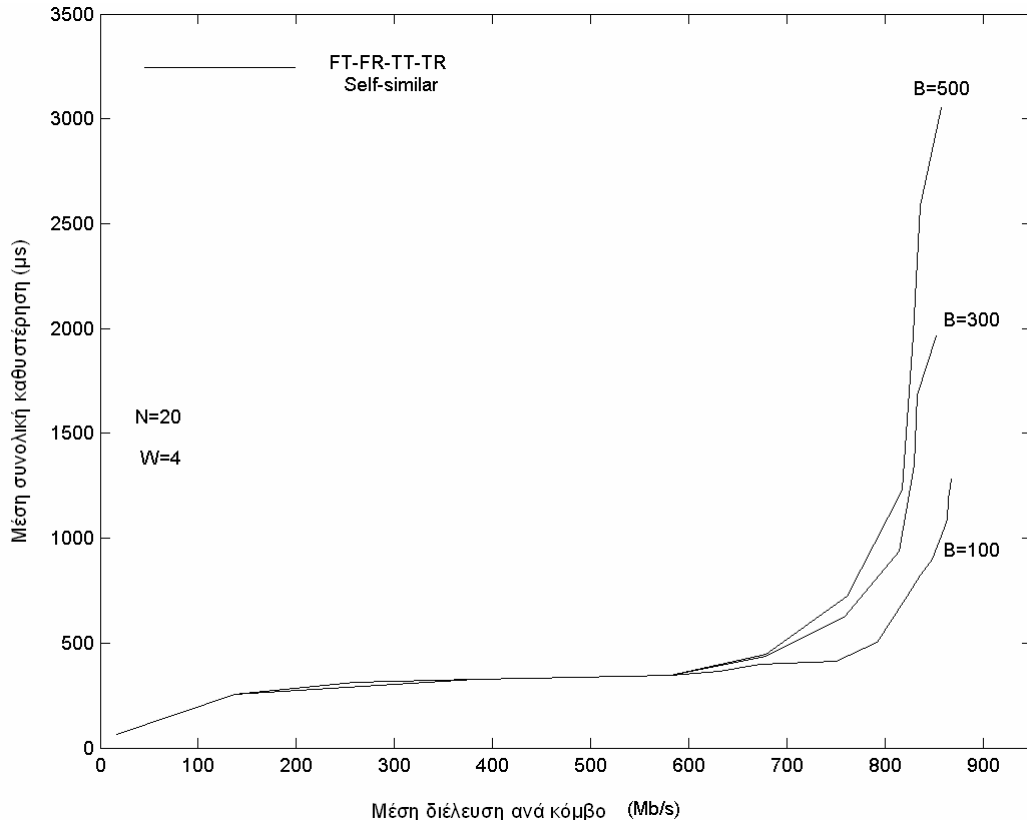
Μεταβολή του πλήθους των καναλιών δεδομένων

Η επίδραση της μεταβολής του πλήθους W των καναλιών δεδομένων στην απόδοση του πρωτοκόλλου μελετάται στο Σχήμα 8-8, που παρουσιάζει τη μέση καθυστέρηση ως συνάρτηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο για διάφορες τιμές του W . Όπως φαίνεται, η μέση συνολική καθυστέρηση είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του W . Και αυτό γιατί η αύξηση του W προκαλεί αύξηση του αριθμού των ελεύθερων χρονικών σχισμών και επομένως μείωση του χρόνου αναμονής ενός πακέτου στον καταχωρητή εξόδου προκειμένου να προσπελάσει το δακτύλιο. Το γεγονός αυτό προκαλεί μείωση της μέσης συνολικής καθυστέρησης και αύξηση της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-8. Έτσι, η τιμή της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο είναι $S_{\max} = 870$ Mb/s για $W = 4$, ενώ αυξάνει σε $S_{\max} = 967$ Mb/s για $W = 5$ και σε $S_{\max} = 973$ Mb/s για $W = 6$.

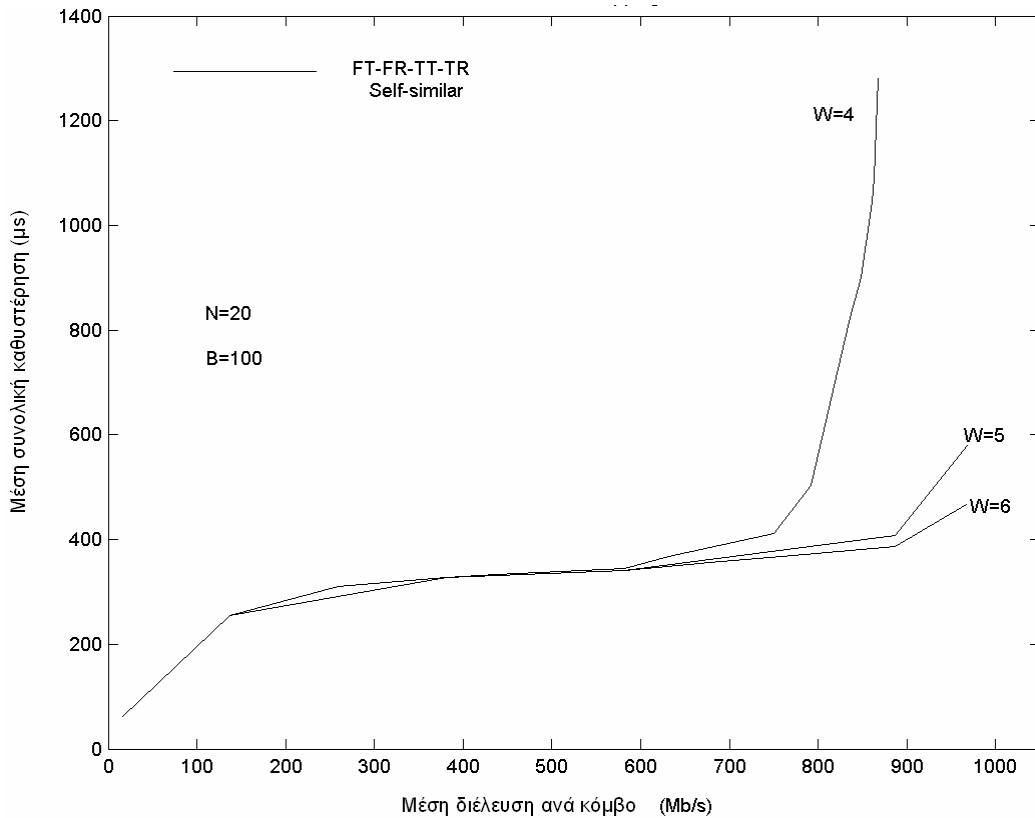
Μεταβολή του πλήθους των κόμβων

Η επίδραση της μεταβολής του πλήθους N των κόμβων στην απόδοση του συστήματος μελετάται στο Σχήμα 8-9 που παρουσιάζει τη μέση συνολική καθυστέρηση ως συνάρτηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο για διάφορες τιμές του N . Όπως είναι φανερό, για την ίδια τιμή διέλευσης ανά κόμβο, η συνολική καθυστέρηση είναι μια αύξουσα συνάρτηση του N , λόγω της αύξησης της προσφερόμενης κίνησης. Επίσης, είναι αξιοσημείωτο ότι με την αύξηση του N η μέγιστη διέλευση ανά κόμβο S_{\max} μειώνεται, εξαιτίας της μείωσης των ελεύθερων χρονικών σχισμών για μετάδοση. Για παράδειγμα, η

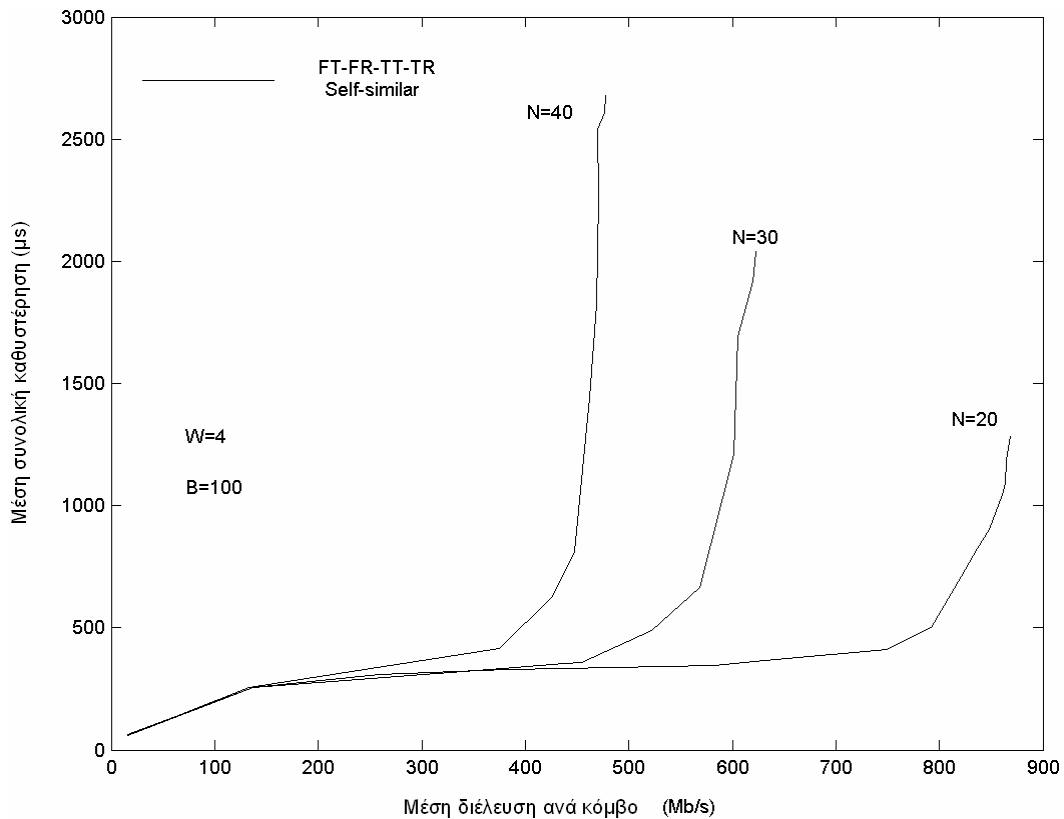
τιμή της μέγιστης διέλευσης είναι $S_{\max} = 870 \text{ Mb/s}$ για $N = 20$, ενώ μειώνεται σε $S_{\max} = 623 \text{ Mb/s}$ για $N = 30$ και σε $S_{\max} = 476 \text{ Mb/s}$ για $N = 40$.



Σχήμα 8-7. Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=20$, $W=4$, $B=100,300,500$



Σχήμα 8-8. Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=20$, $B=100$, $W=4,5,6$



Σχήμα 8-9. Μέση συνολική καθυστέρηση για $W=4$, $B=100$, $N=20,30,40$

8.8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται το μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου για μητροπολιτικά WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου, που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7. Η μελέτη του πρωτοκόλλου πρόσβασης πραγματοποιείται ακολουθώντας τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών, μετά τη λήψη τους, στον προορισμό [J.7],[C.5].

Όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7, το μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου συγκροτείται από ένα πλήθος WDM καναλιών δεδομένων για την μετάδοση αποκλειστικά πακέτων δεδομένων και από ένα ξεχωριστό κανάλι ελέγχου για την ανταλλαγή πακέτων ελέγχου πριν από την μετάδοση δεδομένων.

Το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου συμπληρώνεται από έναν αλγόριθμο πρόσβασης στα κανάλια δεδομένων για την αποφυγή των συγκρούσεων στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό. Έτσι, η πληροφορία ελέγχου που ανταλλάσσεται πριν τη μετάδοση δεδομένων εξασφαλίζει την χωρίς απώλειες επικοινωνία στον οπτικό δακτύλιο.

Κάθε κόμβος του δικτύου είναι εξοπλισμένος με:

- ένα ζεύγος ενός σταθερά συντονισμένου εκπομπού και ενός σταθερά συντονισμένου δέκτη, για την επικοινωνία στο κανάλι ελέγχου.
- ένα επιπλέον ζεύγος ενός συντονιζόμενου εκπομπού και ενός συντονιζόμενου δέκτη, για την επικοινωνία στα κανάλια δεδομένων.

Ένα αναλυτικό μοντέλο αναπτύσσεται για τον υπολογισμό του αναλυτικού τύπου που παρέχει τη μέγιστη διέλευση ανά κόμβο στο δακτύλιο. Επίσης, τα αναλυτικά αποτελέσματα

επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα ενός μοντέλου εξομοίωσης διακριτών γεγονότων που αναπτύχθηκε. Η εξομοίωση πραγματοποιήθηκε μοντελοποιώντας την κίνηση των δικτύων πρόσβασης σύμφωνα τόσο με Poisson όσο και με self-similar διαδικασία γέννησης. Έτσι, τα αποτελέσματα της εξομοίωσης που χρησιμοποιεί το self-similar μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κίνησης συντελούν στην αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου δικτύου σε περιβάλλον εκρηκτικής κίνησης.

Η συγκριτική μελέτη της απόδοσης του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και του WDMA πρωτοκόλλου πρόσβασης με την απόδοση άλλων WDMA πρωτοκόλλων μητροπολιτικών δικτύων τοπολογίας δακτυλίου καταδεικνύει ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική παρέχει ικανότητα κλιμάκωσης και συντήρησης του δικτύου, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει βελτιστοποίηση της απόδοσης, ιδιαίτερα σε πολύ υψηλά φορτία. Συγκεκριμένα το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο παρουσιάζει αρκετά υψηλότερες τιμές μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο και αρκετά χαμηλότερες τιμές μέσης συνολικής καθυστέρησης.

Τέλος, τα αριθμητικά αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό επιτυγχάνει σημαντική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος σε σχέση με τη στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα, που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 7. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό προκαλεί πιο γρήγορη αποδέσμευση των χρονικών σχισμών, βελτιώνοντας σημαντικά την αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η σημαντική βελτίωση παρέχεται σε όλα τα μέτρα αποδοτικότητας και μπορεί να διασφαλίσει την ποιότητα της υπηρεσίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου (πχ. video).

Κεφάλαιο 9 : Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου - Ανοχή σε Δικτυακές Καταστροφές

Οι σύγχρονες μελέτες και υλοποιήσεις μητροπολιτικών WDM δικτύων υποδεικνύουν την ανάγκη ανάπτυξης μηχανισμών ανίχνευσης πιθανών δικτυακών σφαλμάτων και αλγορίθμων διασφάλισης της λειτουργίας τους σε περίπτωση πιθανού σφάλματος. Η ανάγκη αυτή εδράζει στη χαμηλή αξιοπιστία που παρέχει ο σύγχρονος τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός οπτικής τεχνολογίας και στην αυξημένη αστοχία που εμφανίζουν οι σύγχρονες υλοποιήσεις μητροπολιτικών WDM δικτύων σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας.

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται το μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7 και τροποποιείται έτσι ώστε να παρέχει ανοχή σε πιθανές καταστροφές του δικτύου [J.7]. Η βασική αρχή της τροποποίησης του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου παραμένει η ίδια, ανεξάρτητα από τη στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών που ακολουθείται (στον αποστολέα ή στον προορισμό).

Έτσι, η προτεινόμενη τροποποίηση αποσκοπεί στην ενσωμάτωση στο πρωτόκολλο πρόσβασης της δυνατότητας παροχής πληροφορίας ελέγχου αναφορικά με πιθανά δικτυακά σφάλματα που καθιστούν ανενεργά ορισμένα από τα WDM κανάλια δεδομένων. Στη μελέτη μας, η ανίχνευση των δικτυακών σφαλμάτων πραγματοποιείται από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του κόμβου.

Στην περίπτωση ανίχνευσης πιθανού δικτυακού σφάλματος, ο κόμβος μεταδίδει μια επιπλέον πληροφορία ελέγχου, τροποποιώντας κατάλληλα το πακέτο ελέγχου. Η επιπλέον αυτή πληροφορία ελέγχου αποσκοπεί στην ενημέρωση των υπόλοιπων κόμβων σχετικά με τη μη λειτουργία των απενεργοποιημένων καναλιών δεδομένων, συντελώντας στον κατάλληλο σχεδιασμό του αλγορίθμου μετάδοσης και την αποφυγή μετάδοσης σε ανενεργά κανάλια.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση που ένας κόμβος ανιχνεύει ως ενεργό ένα κανάλι δεδομένων που ήταν χαρακτηρισμένο ως ανενεργό, τροποποιεί κατάλληλα το πακέτο ελέγχου, αποσκοπώντας στην ενημέρωση των υπόλοιπων κόμβων για την επαναλειτουργία του καναλιού δεδομένων.

Η τροποποίηση αυτή του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου για την ανοχή στην πιθανότητα δικτυακού σφάλματος, αυξάνει την αξιοπιστία του και διασφαλίζει τη συνέχεια της λειτουργίας του σε πραγματικές συνθήκες.

9.1 Μοντέλο δικτύου

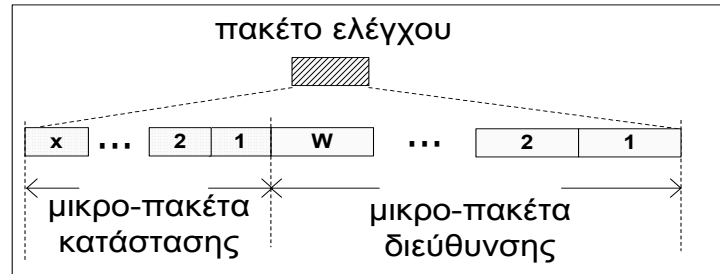
Στο κεφάλαιο αυτό θεωρούμε το μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7. Επίσης, θεωρούμε την ίδια αρχιτεκτονική κόμβου που περιλαμβάνει τη FT-FR-TT-TR δικτυακή διεπαφή, όπως μελετήθηκε στο κεφάλαιο αυτό.

9.2 Δομή πακέτου ελέγχου

Στην αρχή κάθε χρονικής πολυ-σχισμής, το κανάλι ελέγχου μεταφέρει ένα πακέτο ελέγχου που αποτελείται από:

- W μικρο-πακέτα διεύθυνσης
- έναν ακέραιο αριθμό $x \in \{1, 2, \dots, W\}$ μικρο-πακέτων κατάστασης

Η δομή του πακέτου ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 9-1. Ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου ελέγχου συμβολίζεται ως t_r .



Σχήμα 9-1. Δομή πακέτου ελέγχου

Δομή μικρο-πακέτων διεύθυνσης

Κάθε ένα από τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης αντιστοιχεί σε ένα κανάλι δεδομένων. Το μέγεθος και η πληροφορία που μεταφέρει κάθε ένα μικρο-πακέτο διεύθυνσης, εξαρτάται από την ακολουθούμενη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών. Συγκεκριμένα:

- για τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα: το μέγεθος κάθε ενός από τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης είναι: $(2 \times n)$ bits, $2^n \geq N > 2^{n-1}$ [96]. Κάθε μικρο-πακέτο διεύθυνσης διαιρείται σε δύο πεδία κάθε ένα από τα οποία έχει μέγεθος n bits. Έτσι, το k -στό $\in \{1, 2, \dots, W\}$ μικρο-πακέτο διεύθυνσης μεταφέρει σε δυαδική μορφή:
 - στο πρώτο πεδίο, τη διεύθυνση του αποστολέα του πακέτου δεδομένων που μεταδίδεται στο k -στό κανάλι δεδομένων της χρονικής πολυ-σχισμής.
 - στο δεύτερο πεδίο, τη διεύθυνση του προορισμού του πακέτου δεδομένων που μεταδίδεται στο k -στό κανάλι δεδομένων της χρονικής πολυ-σχισμής.
- για τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό: το μέγεθος κάθε ενός από τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης είναι: n bits, $2^n \geq N > 2^{n-1}$ [96]. Έτσι, το k -στό $\in \{1, 2, \dots, W\}$ μικρο-πακέτο διεύθυνσης μεταφέρει σε δυαδική μορφή τη διεύθυνση προορισμού του πακέτου δεδομένων που μεταδίδεται στο k -στό κανάλι δεδομένων της χρονικής πολυ-σχισμής.

Ανεξάρτητα από τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών, αν το k -στό μικρο-πακέτο διεύθυνσης είναι άδειο, τότε το k -στό κανάλι δεδομένων είναι ελεύθερο για μετάδοση.

Δομή μικρο-πακέτων κατάστασης

Κάθε ένα από τα x μικρο-πακέτα κατάστασης μεταφέρει σε δυαδική μορφή τον αριθμό που αντιστοιχεί στο κανάλι δεδομένων που είναι ανενεργό σε περίπτωση δικτυακής καταστροφής. Το μέγεθος κάθε ενός από τα x μικρο-πακέτα κατάστασης είναι y bits, $2^y \geq W > 2^{y-1}$ [96].

Ο αριθμός x καθορίζει το μέγιστο αριθμό των καναλιών ελέγχου που είναι πιθανό να είναι ταυτόχρονα ανενεργά.

9.3 Στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών

Η τροποποίηση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου προκειμένου να παρέχει ανοχή σε πιθανές δικτυακές καταστροφές μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε από τις στρατηγικές αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών: είτε στον αποστολέα, είτε στον προορισμό.

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα, η χρονική σχισμή αποδεσμεύεται από τον αποστολέα, μετά τη λήψη της. Αντίθετα, στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό, η χρονική σχισμή αποδεσμεύεται από τον προορισμό, μετά τη λήψη της. Οι στρατηγικές αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα και στον προορισμό παρουσιάζονται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 7 και στο Κεφάλαιο 8 αντίστοιχα.

9.4 Πρωτόκολλο πρόσβασης

Το πρωτόκολλο πρόσβασης στα WDM κανάλια δεδομένων του δακτυλίου εξαρτάται από τη στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών που ακολουθείται. Στο Κεφάλαιο 7 και στο Κεφάλαιο 8 μελετάται το πρωτόκολλο πρόσβασης για την στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα και στον προορισμό αντίστοιχα, για το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου. Η μελέτη των κεφαλαίων αυτών αποτελεί τη βάση του πρωτόκολλου πρόσβασης για την τροποποίηση της αρχιτεκτονικής προκειμένου να παρέχει ανοχή σε δικτυακές καταστροφές.

Τόσο στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα όσο και στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό, η διαφοροποίηση των πρωτοκόλλων πρόσβασης που δίνονται στο Κεφάλαιο 7 και στο Κεφάλαιο 8 προκύπτει από την αξιοποίηση της πληροφορίας των x μικρο-πακέτων κατάστασης.

Συγκεκριμένα, κατά την επεξεργασία του πακέτου ελέγχου ο κόμβος εξάγει πληροφορίες σχετικά με:

- τα ελεύθερα και ενεργά κανάλια δεδομένων για μετάδοση, προκειμένου να αποφευχθούν οι συγκρούσεις στα κανάλια δεδομένων και η εκπομπή σε πιθανά ανενεργό κανάλι δεδομένων.
- τη διεύθυνση προορισμού των πακέτων δεδομένων που μεταδίδονται στα κανάλια δεδομένων, προκειμένου να αποφευχθούν οι συγκρούσεις στον προορισμό.

Αλγόριθμος μετάδοσης

Στην περίπτωση που ο κόμβος θέλει να μεταδώσει ένα πακέτο δεδομένων, εξετάζει τα εξής:

- αν υπάρχουν ελεύθερα και ενεργά κανάλια δεδομένων για τη μετάδοση, και
- αν κανένα από τα μεταδιδόμενα πακέτα δεδομένων δεν έχει τον ίδιο προορισμό με το δικό του πακέτο δεδομένων.

Αν οι παραπάνω συνθήκες ικανοποιούνται, ο κόμβος επιλέγει τυχαία ένα από τα ελεύθερα και ενεργά κανάλια δεδομένων για τη μετάδοση. Έστω ότι επιλέγει το k -στό κανάλι δεδομένων. Αλλιώς, η μετάδοση αναβάλλεται για την επόμενη χρονική πολυ-σχισμή.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις εξασφαλίζουν ότι κατά τον αλγόριθμο μετάδοσης αποφεύγονται οι συγκρούσεις πακέτων δεδομένων τόσο στα κανάλια δεδομένων όσο και στον προορισμό.

Αλγόριθμος λήψης

Έστω ότι ο κόμβος ανιχνεύει ότι ένα πακέτο δεδομένων προορίζεται για αυτόν και μεταδίδεται στο m -στό $\in \{1, 2, \dots, W\}$ κανάλι δεδομένων.

Μετά την εκτέλεση των παραπάνω αλγορίθμων μετάδοσης και λήψης, ο κόμβος τοπικά αναγεννά σε ηλεκτρονική μορφή ένα νέο πακέτο ελέγχου. Δηλαδή, ο κόμβος αναγεννά τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης και τα x μικρο-πακέτα κατάστασης που έχει παραλάβει στην αρχή της χρονικής πολυ-σχισμής και τα τροποποιεί ως εξής:

Τροποποίηση των W μικρο-πακέτων διεύθυνσης

- για τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα: ο κόμβος αναγεννά τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης που έχει παραλάβει στην αρχή της χρονικής πολυ-σχισμής και τροποποιεί μόνο τα πεδία του k -στού μικρο-πακέτου διεύθυνσης γράφοντας:
 - στο πρώτο πεδίο, τη δική διεύθυνση ως διεύθυνση του αποστολέα.
 - στο δεύτερο πεδίο, τη διεύθυνση προορισμού του δικού του πακέτου δεδομένων.
- Επίσης, στην περίπτωση που ο κόμβος ανιχνεύσει ότι μια χρονική σχισμή στο z -στό $\in \{1, 2, \dots, W\}$ κανάλι δεδομένων, στην οποία έχει ο ίδιος μεταδώσει ένα πακέτο δεδομένων, έχει επανέλθει πίσω μετά από μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον δακτύλιο, τότε ο κόμβος δηλώνει ελεύθερο το z -στό μικρο-πακέτο διεύθυνσης, σύμφωνα με τη στρατηγική αποδέσμευσης στον αποστολέα.
- για τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό: ο κόμβος αναγεννά τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης που έχει παραλάβει στην αρχή της χρονικής πολυ-σχισμής και τροποποιεί μόνο τα πεδία:
 - του k -στού μικρο-πακέτου διεύθυνσης γράφοντας τη διεύθυνση προορισμού του δικού του πακέτου δεδομένων.
 - του m -στού μικρο-πακέτου διεύθυνσης, αποδεσμεύοντας το, σύμφωνα με τη στρατηγική αποδέσμευσης στον προορισμό.

Τροποποίηση των x μικρο-πακέτα κατάστασης

Τόσο στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα όσο και στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό, ο κόμβος αναγεννά τα x μικρο-πακέτα κατάστασης που έχει παραλάβει στην αρχή της χρονικής πολυ-σχισμής.

Αν ο κόμβος ανιχνεύσει ένα κανάλι δεδομένων ως ανενεργό, ενώ το ίδιο κανάλι ήταν δηλωμένο ως ενεργό στα x μικρο-πακέτα κατάστασης που παραλήφθησαν στην αρχή της χρονικής πολυ-σχισμής, τότε ο κόμβος τροποποιεί το πρώτο ελεύθερο μικρο-πακέτο κατάστασης, γράφοντας τον αριθμό του ανενεργού καναλιού δεδομένων που ανίχνευσε.

Όμοια, αν ο κόμβος ανιχνεύσει ένα κανάλι δεδομένων ως ενεργό, ενώ το ίδιο κανάλι ήταν δηλωμένο ως ανενεργό στα x μικρο-πακέτα κατάστασης που παραλήφθησαν στην αρχή της χρονικής πολυ-σχισμής, τότε ο κόμβος τροποποιεί το αντίστοιχο μικρο-πακέτο κατάστασης, διαγράφοντας τον αριθμό του ενεργού καναλιού δεδομένων που ανίχνευσε.

9.5 Ανάλυση

Η ανάλυση της απόδοσης του πρωτοκόλλου εξαρτάται από τη στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών που ακολουθείται.

Τόσο στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα όσο και στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό, ο υπολογισμός του αναλυτικού τύπου της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο δεν εξαρτάται από το μέγεθος του πακέτου ελέγχου όπως αποδεικνύεται από τις σχέσεις (7.13) και (8.9) αντίστοιχα. Επομένως, η προσθήκη των x μικρο-πακέτων κατάστασης στο πακέτο ελέγχου δεν επηρεάζει την τιμή της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο.

Συνεπώς, στην τροποποίηση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που παρέχει ανοχή στις πιθανές δικτυακές καταστροφές, η τιμή της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο S_{max} :

- για τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα: δίνεται από τη σχέση (7.13).
- για τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό: δίνεται από τη σχέση (8.9).

9.6 Μοντέλο και παράμετροι εξομοίωσης

Μοντέλο εξομοίωσης

Στη τροποποίηση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου χρησιμοποιούμε το μοντέλο εξομοίωσης που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7. Για την εξομοίωση της λειτουργίας των x μικρο-πακέτων κατάστασης, το μοντέλο εξομοίωσης συμπληρώνεται με ένα επιπλέον δομοστοιχείο, το STATUS_MINI_PACKET.

Ειδικότερα, το δομοστοιχείο STATUS_MINI_PACKET προσδιορίζεται από το μέγιστο αριθμό των καναλιών δεδομένων που είναι δυνατό να είναι ταυτόχρονα ανενεργά και χαρακτηρίζεται από την κατάσταση του (ενεργό ή ανενεργό).

Ο Πίνακας 9-1 παρουσιάζει τα δομοστοιχεία και τις ιδιότητες τους που υλοποιούνται στο εξομοιωτικό μοντέλο που συνυπολογίζει την πιθανότητα δικτυακών σφαλμάτων.

Όνομα module	Οντότητα	Ιδιότητες
NODE	κόμβος	id, καταχωρητής εξόδου
DATA_PACKET	πακέτο δεδομένων	χρόνος γέννησης, διεύθυνση προορισμού, κανάλι μετάδοσης
ADDRESS_MINI_PACKET	μικρο-πακέτο διεύθυνσης	id, διεύθυνση προορισμού, διεύθυνση εκπομπού (σε περίπτωση source stripping)
STATUS_MINI_PACKET	μικρο-πακέτο κατάστασης	κατάσταση, μέγιστος αριθμός ανενεργών καναλιών δεδομένων
BUFFER	καταχωρητής εξόδου	id, μέγεθος, φορτίο, απορριφθέντα πακέτα δεδομένων, στοίβα πακέτων δεδομένων
DATA_CHANNEL	κανάλι δεδομένων	id, ρυθμός, μήκος, καθυστέρηση διάδοσης, κατάσταση, μέγεθος χρονικής σχισμής, πλήθος χρονικών πολυ-σχισμών, δομή χρονικών πολυ-σχισμών
CONTROL_CHANNEL	κανάλι ελέγχου	ρυθμός, μήκος, καθυστέρηση διάδοσης, κατάσταση, μέγεθος πακέτου ελέγχου, μέγεθος μικρο-πακέτου διεύθυνσης, μέγεθος μικρο-πακέτου κατάστασης, μικρο-πακέτο διεύθυνσης, μικρο-πακέτο κατάστασης, δομή πακέτων ελέγχου

Πίνακας 9-1. Δομοστοιχεία μοντέλου εξομοίωσης

Παράμετροι εξομοίωσης

Για λόγους συγκριτικής αξιολόγησης, στη τροποποίηση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που παρέχει ανοχή στις πιθανές δικτυακές καταστροφές διατηρούμε τις παραμέτρους δικτύου που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7 και στο Κεφάλαιο 8.

Παρόλα αυτά, κάποιες τροποποιήσεις επιβάλλονται λόγω της διαφοροποίησης του πακέτου ελέγχου. Συγκεκριμένα, στη τροποποίηση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που παρέχει ανοχή στις πιθανές δικτυακές καταστροφές κάθε πακέτο ελέγχου περιλαμβάνει, εκτός από τα W μικρο-πακέτα διεύθυνσης, και x μικρο-πακέτα κατάστασης για την ανταλλαγή πληροφοριών ελέγχου σχετικά με την κατάσταση των καναλιών δεδομένων.

Ο αριθμός $x \in \{1, 2, \dots, W\}$ εκφράζει το μέγιστο αριθμό των καναλιών δεδομένων που μπορούν να είναι ταυτόχρονα ανενεργά. Στο εξομοιωτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε θεωρήθηκε ότι το ποσοστό των καναλιών δεδομένων που μπορούν να είναι ταυτόχρονα ανενεργά είναι 4% του συνόλου των καναλιών δεδομένων.

Έτσι, ο αριθμός x εκφράζει ένα ποσοστό του αριθμού των καναλιών δεδομένων W . Επομένως, για μικρές τιμές του W ο αριθμός x είναι περίπου μηδενικός. Για την αποφυγή της περίπτωσης αυτής και προκειμένου να έχει έννοια η τροποποίηση του πρωτοκόλλου, θεωρείται ότι ο αριθμός x δεν μπορεί να είναι μικρότερος της μονάδας. Δηλαδή:

$$x = W \times 0.04 \quad \text{και} \quad x \geq 1 \quad (10.1)$$

Διατηρώντας τις δικτυακές παραμέτρους που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7 και στο Κεφάλαιο 8, ο αριθμός των καναλιών δεδομένων είναι: $W = 4$. Επομένως, ο μέγιστος αριθμός των καναλιών δεδομένων μπορεί να είναι ταυτόχρονα ανενεργά είναι: $x = 1$.

Επίσης, κάθε μικρο-πακέτο κατάστασης μεταφέρει σε δυαδική μορφή τον αριθμό ενός καναλιού δεδομένων. Έτσι, το μέγεθος κάθε μικρο-πακέτου κατάστασης είναι: $y = 2$ bits, όπου $2^y = W$.

Το μέγεθος του πακέτου ελέγχου εξαρτάται από τη στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών. Έτσι:

- για τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα: κάθε μικρο-πακέτο διεύθυνσης μεταφέρει τη διεύθυνση του αποστολέα και του προορισμού. Επομένως το μέγεθος κάθε μικρο-πακέτου διεύθυνσης είναι: $(2 \times n) = 10$ bits, όπου $n=5$ bits και $2^{n-1} < N \leq 2^n$ [96]. Το μέγεθος του πακέτου ελέγχου είναι: $(W \times 2 \times n + y) = 42$ bits. Τέλος, ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου ελέγχου είναι $t_r = (W \times 2 \times n + y) / R_w = 0.168$ μ s.
- για τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό: κάθε μικρο-πακέτο διεύθυνσης μεταφέρει τη διεύθυνση του προορισμού. Επομένως το μέγεθος κάθε μικρο-πακέτου διεύθυνσης είναι: $n = 5$ bits και $2^{n-1} < N \leq 2^n$ [96]. Το μέγεθος του πακέτου ελέγχου είναι: $(W \times n + y) = 22$ bits. Τέλος, ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου ελέγχου είναι $t_r = (W \times n + y) / R_w = 0.088$ μ s.

Για την εξομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, πραγματοποιούνται οι ακόλουθες υποθέσεις:

- σχετικά με το χρόνο επεξεργασίας t_p του πακέτου ελέγχου και το χρόνο συντονισμού των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών $\max\{t_{s-t}, t_{s-r}\}$ ακολουθούμε τη σχέση (7.14)
- σχετικά με το χρόνο ασφαλείας t_g ακολουθούμε τη σχέση (7.15)

Ο Πίνακας 9-2 παρουσιάζει τις παραμέτρους του δικτύου.

Παράμετρος δικτύου	Τιμή	
Περίμετρος δακτυλίου L_R	138 240 m	
Ταχύτητα φωτός στην οπτική ίνα v_g	2×10^8 m/s	
Καθυστέρηση διάδοσης T_p	691.2 μ s	
Πλήθος καναλιών δεδομένων W	4	
Πλήθος καναλιών ελέγχου	1	
Χωρητικότητα καταχωρητή εξόδου B	100	
Μέγεθος πακέτου δεδομένων L	12 000 bits	
Πλήθος κόμβων N	20	
Ρυθμός μετάδοσης στα κανάλια R_w	2.5 Gb/s	
Ρυθμός μετάδοσης σε όλα τα κανάλια δεδομένων R	10 Gb/s	
Χρόνος μετάδοσης πακέτου δεδομένων T	4.8 μ s	
Διάρκεια χρονικής πολυ-σχισμής	4.8 μ s	
Πλήθος χρονικών πολυ-σχισμών M	144	
	Source stripping	Destination stripping
Μέγεθος μικρο-πακέτου διεύθυνσης n	10 bits	5 bits
Πλήθος μικρο-πακέτων κατάστασης x	1	1
Μέγεθος μικρο-πακέτου κατάστασης y	2 bits	2 bits
Μέγεθος πακέτου ελέγχου	42 bits	22 bits
Χρόνος μετάδοσης πακέτου ελέγχου t_r	0.168 μ s	0.088 μ s

Πίνακας 9-2. Παράμετροι μοντέλου εξομοίωσης

9.7 Αριθμητικά αποτελέσματα

Η τροποποίηση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που παρέχει ανοχή στις πιθανές δικτυακές καταστροφές αποσκοπεί στην αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Τόσο στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα όσο και στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό, η τροποποίηση του πρωτοκόλλου δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την απόδοση σε σχέση με τα αρχικά πρωτόκολλα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7 και στο Κεφάλαιο 8.

Και αυτό γιατί διατηρώντας τις δικτυακές παραμέτρους που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7 και στο Κεφάλαιο 8, ο αριθμός των καναλιών δεδομένων είναι $W = 4$ και ο μέγιστος αριθμός των καναλιών δεδομένων μπορεί να είναι ταυτόχρονα ανενεργά είναι $x=1$. Επομένως, η προσθήκη ενός μικρο-πακέτου κατάστασης με μέγεθος μόλις 2 bits, στο πακέτο ελέγχου των αρχικών πρωτοκόλλων προκαλεί αύξηση του χρόνου καθυστέρησης στις γραμμές καθυστέρησης κάθε κόμβου κατά μόλις 0.8 ns.

Συνεπώς, η τροποποίηση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που παρέχει ανοχή στις πιθανές δικτυακές καταστροφές δεν μεταβάλλει ουσιαστικά τα μέτρα αποδοτικότητας. Έτσι, τα αριθμητικά αποτελέσματα παραμένουν τα ίδια, όπως στο Κεφάλαιο 7 και στο Κεφάλαιο 8.

Κεφάλαιο 10 : Μελέτη Απόδοσης Αρχιτεκτονικής Ελέγχου – Αξιοποίηση Πολλαπλών Καναλιών Δεδομένων

Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκε η συμπεριφορά του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και του πρωτοκόλλου πρόσβασης, τόσο για τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα όσο και στον προορισμό, ενώ μελετήθηκε η ανοχή του πρωτοκόλλου σε πιθανές δικτυακές καταστροφές. Στα προηγούμενα κεφάλαια, η μελέτη πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις δικτυακές παραμέτρους στα σημερινά οπτικά μητροπολιτικά δίκτυα. Έτσι, η μελέτη πραγματοποιήθηκε για σχετικά μικρό αριθμό καναλιών δεδομένων ($W = 4$) και ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε κάθε WDM κανάλι συμβατό με την υπάρχουσα οπτική τεχνολογία του τερματικού σταθμού ($R_w = 2.5 \text{ Gb/s}$).

Παρόλα αυτά, είναι δεδομένο ότι η μεγάλη χωρητικότητα των δικτύων οπτικών ινών αξιοποιείται περιορισμένα όταν αυτή διαμοιράζεται σε μικρό πλήθος καναλιών δεδομένων και όταν κάθε ένα από αυτά λειτουργεί με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με τη συνολική χωρητικότητα της οπτικής ίνας. Έτσι, οι σύγχρονες τάσεις για την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των δικτύων οπτικών ινών υποδεικνύουν την χρησιμοποίηση μεγαλύτερου πλήθους καναλιών δεδομένων με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης.

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η συμπεριφορά του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και του πρωτοκόλλου πρόσβασης που παρουσιάζεται στα προηγούμενα κεφάλαια, λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη μεγάλου πλήθους καναλιών δεδομένων και υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης [J.7].

Η τεχνολογία που είναι σήμερα διαθέσιμη για τα στοιχεία των οπτικών δικτύων και ειδικότερα για τα συντονιζόμενα φίλτρα θέτουν συγκεκριμένους περιορισμούς στην επέκταση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής σε οπτικά δίκτυα με μεγάλο πλήθος καναλιών δεδομένων. Έτσι, το εύρος ζώνης λειτουργίας καθώς και ο χρόνος συντονισμού ενός συντονιζόμενου δέκτη αποτελούν παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Ειδικότερα, οι υψηλές τιμές του χρόνου συντονισμού ενός συντονιζόμενου δέκτη που συντονίζεται σε μεγάλο εύρος ζώνης του οπτικού φάσματος καθιστούν τη χρήση του αναποτελεσματική σε δίκτυα οπτικών ινών που απαιτούν πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης και ακριβή συγχρονισμό.

Έτσι, στην τροποποίηση του πρωτοκόλλου για χρήση πολλαπλών καναλιών δεδομένων το σύνολο των καναλιών δεδομένων χωρίζεται σε ομάδες συχνοτήτων [J.7]. Κάθε κόμβος διαθέτει έναν αριθμό παράλληλων συντονιζόμενων δεκτών, κάθε ένας από τους οποίους λειτουργεί σε μια συγκεκριμένη από τις ζώνες συχνοτήτων. Έτσι, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική κόμβου παρέχει περιορισμένο χρόνο συντονισμού των συντονιζόμενων δεκτών στα πολλαπλά κανάλια δεδομένων. Το πλήθος των συντονιζόμενων δεκτών ανά κόμβο εξαρτάται από τον αριθμό W των καναλιών δεδομένων καθώς και από τον μέγιστο επιτρεπτό χρόνο συντονισμού του συντονιζόμενου δέκτη.

Συγκεντρωτικά, κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με ένα σταθερά συντονισμένο εκπομπό και ένα σταθερά συντονισμένο δέκτη που είναι μόνιμα συντονισμένοι στο κανάλι ελέγχου. Επίσης, κάθε κόμβος διαθέτει ένα συντονιζόμενο εκπομπό που μπορεί να συντονιστεί σε οποιοδήποτε από τα W κανάλια δεδομένων. Τέλος, κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με έναν αριθμό συντονιζόμενων δεκτών, κάθε ένας από τους οποίους μπορεί να συντονιστεί σε οποιοδήποτε από τα κανάλια δεδομένων της συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων στην οποία λειτουργεί.

10.1 Μοντέλο δικτύου

Στο κεφάλαιο αυτό θεωρούμε το μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7.

Στο πρωτόκολλο αυτό, τα W κανάλια δεδομένων διαιρούνται σε ζώνες οπτικών συχνοτήτων, κάθε μια από τις οποίες περιλαμβάνει τέσσερις συχνότητες [22]. Κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με έναν αριθμό παράλληλων συντονιζόμενων δεκτών, κάθε ένας από τους οποίους λειτουργεί σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων παρέχοντας περιορισμένο χρόνο συντονισμού.

Συνολικά, η δικτυακή διεπαφή κόμβου περιλαμβάνει:

- ένα ζεύγος ενός σταθερά συντονισμένου εκπομπού και ενός σταθερά συντονισμένου δέκτη που λειτουργούν στο κανάλι ελέγχου.
- ένα συντονιζόμενο εκπομπό που λειτουργεί σε οποιοδήποτε από τα κανάλια δεδομένων.
- ένα πλήθος παράλληλων συντονιζόμενων δεκτών, κάθε ένας από τους οποίους λειτουργεί σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων των καναλιών δεδομένων.

Η προτεινόμενη δικτυακή διεπαφή κόμβου ονομάζεται FT-FR-TT-TR.

Ο αριθμός των συντονιζόμενων δεκτών ανά κόμβο εξαρτάται από τον αριθμό W των καναλιών δεδομένων και τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του χρόνου συντονισμού των συντονιζόμενων δεκτών.

10.2 Δομή πακέτου ελέγχου

Στην αρχή κάθε χρονικής πολυ-σχισμής, το κανάλι ελέγχου μεταφέρει ένα πακέτο ελέγχου που αποτελείται από:

- W μικρο-πακέτα διεύθυνσης
- έναν ακέραιο αριθμό $x \in \{1, 2, \dots, W\}$ μικρο-πακέτων κατάστασης.

Η δομή του πακέτου ελέγχου είναι ίδια με αυτή που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 9, τόσο στην περίπτωση που ακολουθείται στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα όσο και στον προορισμό. Η δομή του πακέτου ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 9-1.

10.3 Στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών

Η τροποποίηση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου προκειμένου να αξιοποιεί πολλαπλά κανάλια δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε από τις στρατηγικές αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών: είτε στον αποστολέα, είτε στον προορισμό.

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα, η χρονική σχισμή αποδεσμεύεται από τον αποστολέα, μετά τη λήψη της. Αντίθετα, στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό, η χρονική σχισμή αποδεσμεύεται από τον προορισμό, μετά τη λήψη της. Στο κεφάλαιο αυτό

μελετώνται οι στρατηγικές αποδέσμευσης χρονικών σχισμών σύμφωνα με τη μελέτη στο Κεφάλαιο 9.

10.4 Πρωτόκολλο πρόσβασης

Το πρωτόκολλο πρόσβασης μπορεί:

- να ακολουθεί τη στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών είτε στον αποστολέα σύμφωνα με το Κεφάλαιο 7, είτε στον προορισμό σύμφωνα με το Κεφάλαιο 8.
- να παρουσιάζει ή όχι ανοχή σε δικτυακές καταστροφές σύμφωνα με το Κεφάλαιο 9.

10.5 Ανάλυση

Η ανάλυση της απόδοσης του πρωτοκόλλου εξαρτάται από τη στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών που ακολουθείται.

Τόσο στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα όσο και στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό, ο υπολογισμός του αναλυτικού τύπου της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο S_{\max} λαμβάνει υπόψη το συνολικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων R , όπως αποδεικνύεται από τις σχέσεις (7.13) και (8.9) αντίστοιχα. Επίσης όπως ισχύει και στο Κεφάλαιο 9, η προσθήκη των x μικρο-πακέτων κατάστασης στο πακέτο ελέγχου δεν επηρεάζει την τιμή της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο S_{\max} .

Συνεπώς, στην τροποποίηση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που αξιοποιεί πολλαπλά κανάλια δεδομένων, η τιμή της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο S_{\max} :

- για τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα: δίνεται από τη σχέση (7.13).
- για τη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό: δίνεται από τη σχέση (8.9).

10.6 Μοντέλο και παράμετροι εξομοίωσης

Μοντέλο εξομοίωσης

Το μοντέλο εξομοίωσης του προτεινόμενου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που αξιοποιεί πολλαπλά κανάλια δεδομένων είναι το ίδιο με αυτό που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 9.

Παράμετροι εξομοίωσης

Για λόγους συνολικής αξιολόγησης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, στην τροποποίηση του πρωτοκόλλου διατηρούνται οι βασικές παράμετροι δικτύου που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη η τεχνική για την

ανοχή του πρωτοκόλλου σε πιθανές απενεργοποιήσεις ορισμένων καναλιών δεδομένων, λόγω δικτυακών σφαλμάτων.

Στη μελέτη της τροποποίησης του δικτύου θεωρούμε ότι το πλήθος των καναλιών δεδομένων είναι μεγάλο, $W = 32$. Για την αποφυγή του απαγορευτικά υψηλού χρόνου συντονισμού του συντονιζόμενου δέκτη κάθε κόμβου στο ευρύ φάσμα συχνοτήτων συντονισμού, διαχωρίζουμε τα W κανάλια δεδομένων σε ζώνες συχνοτήτων, κάθε μια από τις οποίες περιλαμβάνει τέσσερα κανάλια δεδομένων [22]. Επίσης, θεωρούμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε κάθε ένα από τα $(W+1)$ κανάλια είναι $R_w = 10$ Gb/s.

Για την εξομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, πραγματοποιούνται οι ακόλουθες υποθέσεις:

- σχετικά με το χρόνο επεξεργασίας t_p του πακέτου ελέγχου και το χρόνο συντονισμού των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών $\max\{t_{s-t}, t_{s-r}\}$ ακολουθούμε τη σχέση (7.14)
- σχετικά με το χρόνο ασφαλείας t_g ακολουθούμε τη σχέση (7.15)

Ο Πίνακας 10-1 παρουσιάζει συνοπτικά τις παραμέτρους του δικτύου.

Παράμετρος δικτύου	Τιμή	
Περίμετρος δακτυλίου L_R	138 240 m	
Ταχύτητα φωτός στην οπτική ίνα v_g	2×10^8 m/s	
Καθυστέρηση διάδοσης T_p	691.2 μ s	
Πλήθος καναλιών δεδομένων W	32	
Πλήθος καναλιών ελέγχου	1	
Χωρητικότητα καταχωρητή εξόδου B	100	
Μέγεθος πακέτου δεδομένων L	12 000 bits	
Πλήθος κόμβων N	64	
Ρυθμός μετάδοσης στα κανάλια R_w	10 Gb/s	
Ρυθμός μετάδοσης σε όλα τα κανάλια δεδομένων R	320 Gb/s	
Χρόνος μετάδοσης πακέτου δεδομένων T	1.2 μ s	
Διάρκεια χρονικής πολυ-σχισμής	1.2 μ s	
Πλήθος χρονικών πολυ-σχισμών M	576	
	Source stripping	Destination stripping
Μέγεθος μικρο-πακέτου διεύθυνσης n	12 bits	6 bits
Πλήθος μικρο-πακέτων κατάστασης x	1	1
Μέγεθος μικρο-πακέτου κατάστασης y	5 bits	5 bits
Μέγεθος πακέτου ελέγχου	389 bits	197 bits
Χρόνος μετάδοσης πακέτου ελέγχου t_r	0.0389 μ s	0.0197 μ s.

Πίνακας 10-1. Παράμετροι μοντέλου εξομοίωσης

10.7 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στη συνέχεια μελετάται η απόδοση του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό και λαμβάνεται υπόψη η ανοχή σε δικτυακά σφάλματα. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση που το μοντέλο γέννησης κίνησης στα δίκτυα πρόσβασης ακολουθεί self-similar διαδικασία, σύμφωνα με το Κεφάλαιο 11. Τα εξαγόμενα συμπεράσματα ισχύουν και για την περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική

αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα και το μοντέλο γέννησης κίνησης στα δίκτυα πρόσβασης ακολουθεί Poisson διαδικασία.

Στο Σχήμα 10-1 παρουσιάζεται η μέση διέλευση ανά κόμβο ως συνάρτηση του μέσου προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο για διάφορες τιμές του πλήθους των κόμβων N . Όπως παρατηρείται για $N=64$, το προτεινόμενο πρωτόκολλο μπορεί να εξυπηρετήσει το συνολικό προσφερόμενο φορτίο ανά κόμβο μέχρι την τιμή 3050 Mb/s. Αυτό σημαίνει ότι για αυτές τις υψηλές τιμές προσφερόμενου φορτίου, η συνολική εισερχόμενη κίνηση μπορεί να προσπελάσει το δακτύλιο χωρίς να απορριφθεί λόγω υπερχείλισης των καταχωρητών εξόδου. Έτσι, η συνολική προσφερόμενη κίνηση ανά κόμβο μετατρέπεται σε διέλευση του κόμβου.

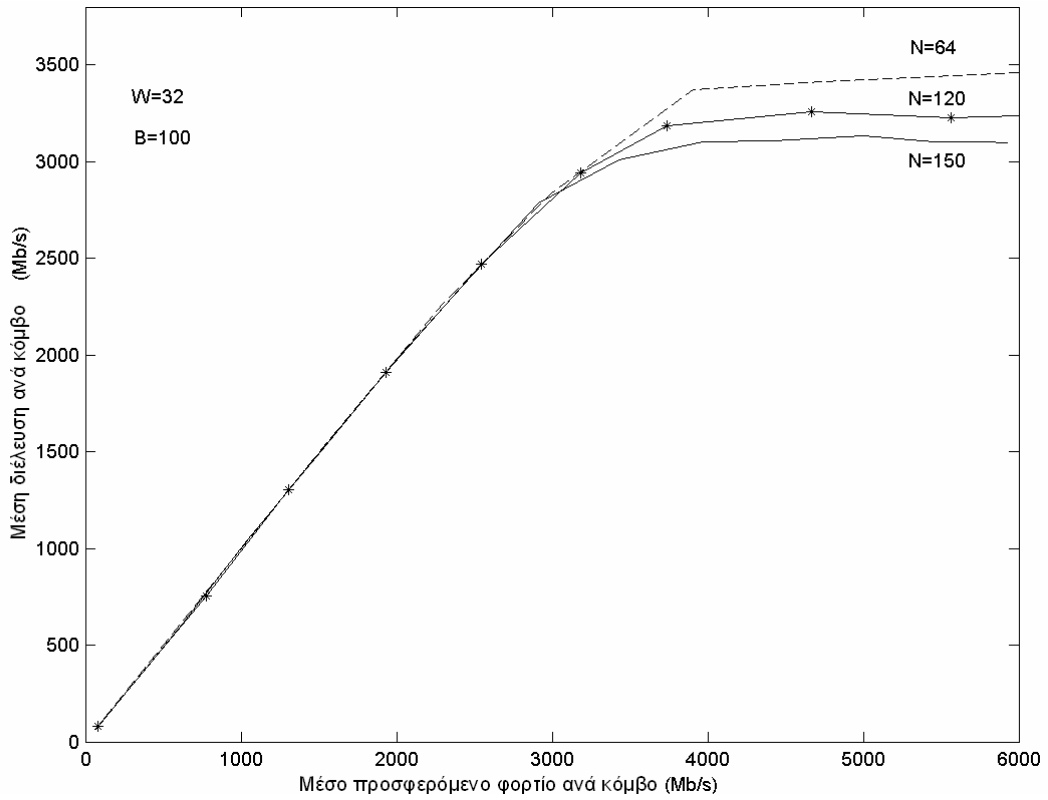
Για μεγαλύτερες τιμές προσφερόμενου φορτίου, το σύστημα εμφανίζει συμφόρηση. Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι το συνεχώς αυξανόμενο φορτίο αξιοποιεί βαθμιαία όλες τις διαθέσιμες χρονικές σχισμές, με αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου. Συνεπακόλουθα, παρατηρείται βαθμιαία συμφόρηση των καταχωρητών εξόδου που οδηγεί σε αύξηση των απορρίψεων λόγω υπερχείλισης. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 10-1, για τιμές προσφερόμενου φορτίου υψηλότερες από 3050 Mb/s το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο επιτυγχάνει τη μέγιστη αξιοποίηση των χρονικών σχισμών, με αποτέλεσμα η μέση διέλευση ανά κόμβο να ανέρχεται στα 3480 Mb/s.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η προτεινόμενη FT-FR-TT-TR διεπαφή κόμβου σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο αποφυγής συγκρούσεων στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό, παρέχει αποτελεσματική αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης ενώ παράλληλα αντιμετωπίζει τα προβλήματα κλιμάκωσης. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη:

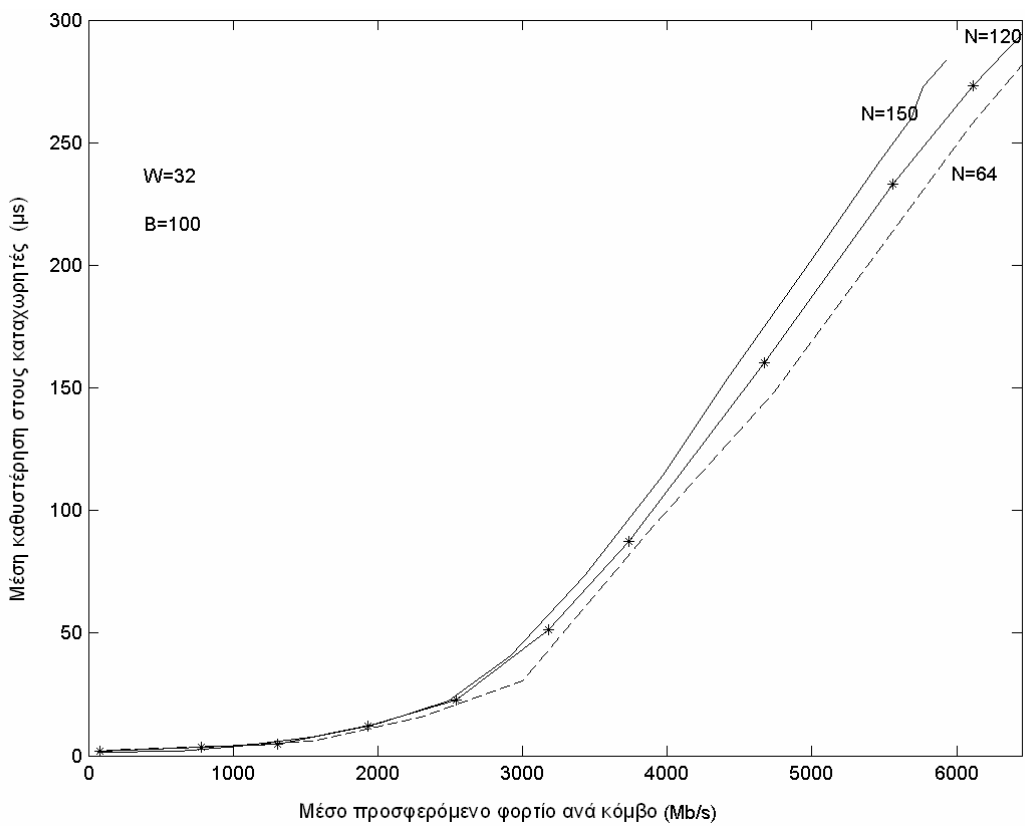
- στη δυνατότητα των κόμβων να μεταδίδουν και να λαμβάνουν από όλα τα κανάλια δεδομένων εκμεταλλευόμενοι τις ελεύθερες χρονικές σχισμές.
- τον αποδοτικό μηχανισμό αποφυγής των συγκρούσεων που εκμεταλλεύεται την πληροφορία ελέγχου.

Το Σχήμα 10-2 παρουσιάζει τη μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου ως συνάρτηση του μέσου προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο για διάφορες τιμές του πλήθους των κόμβων N . Όπως παρατηρείται για $N=64$, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο παρέχει πολύ χαμηλές (σχεδόν μηδενικές) τιμές μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου για τιμές προσφερόμενου φορτίου μικρότερες από 2000 Mb/s. Και αυτό γιατί για αυτές τις τιμές προσφερόμενου φορτίου υπάρχουν αρκετές χρονικές σχισμές σε όλα τα κανάλια δεδομένων για την εξυπηρέτηση της εισερχόμενης κίνησης.

Για υψηλότερες τιμές προσφερόμενου φορτίου, παρατηρείται αύξηση της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου και το σύστημα φτάνει στην μέγιστη αξιοποίηση των χρονικών σχισμών. Είναι αξιοσημείωτο ότι το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο κατορθώνει χαμηλές τιμές μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου για όλες τις τιμές προσφερόμενου φορτίου. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω του αποδοτικού αλγορίθμου αποφυγής συγκρούσεων τόσο στα κανάλια δεδομένων όσο και στον προορισμό, που αποφεύγει την κατανάλωση του εύρους ζώνης εξαιτίας της συνεχούς περιστροφής πακέτων δεδομένων. Έτσι ως άμεσο αποτέλεσμα, παρατηρούνται πολύ χαμηλές τιμές μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου, μέσης συνολικής καθυστέρησης καθώς και απορρίψεων πακέτων λόγω υπερχείλισης των καταχωρητών εξόδου. Για παράδειγμα για την υψηλή τιμή προσφερόμενου φορτίου 6000 Mb/s, η μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου είναι μόλις 250 μ s. Τέλος, η μέση τιμή της καθυστέρησης για όλες τις τιμές προσφερόμενου φορτίου είναι περίπου 67 μ s. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα μικρή για μητροπολιτικά δίκτυα και μπορεί να εξυπηρετήσει εφαρμογές πραγματικού χρόνου.



Σχήμα 10-1. Μέση διέλευση ανά κόμβο για $W=32$, $B=100$, $N=64,120,150$

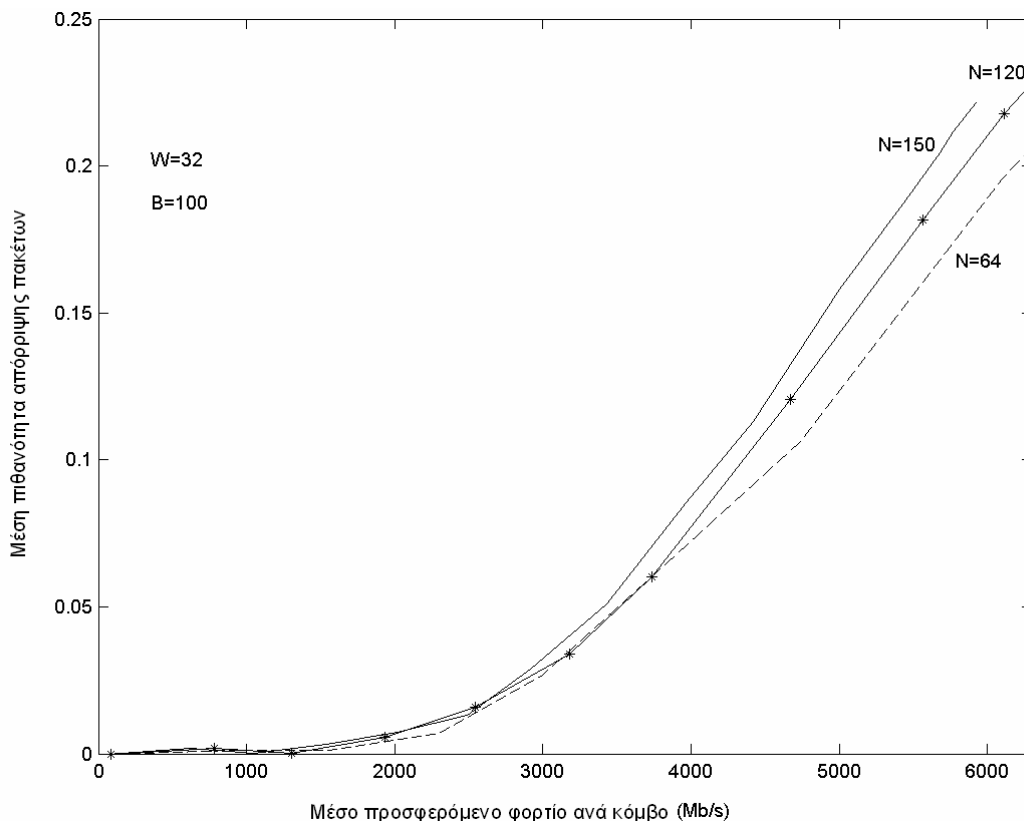


Σχήμα 10-2. Μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές για $W=32$, $B=100$, $N=64,120,150$

Στο Σχήμα 10-3 παρουσιάζεται η μέση πιθανότητα απόρριψης πακέτων δεδομένων λόγω υπερχειλίσης των καταχωρητών εξόδου ως συνάρτηση του μέσου προσφερόμενου φορτίου ανά κόμβο για διάφορες τιμές του πλήθους των κόμβων N . Η μεταβολή της μέσης πιθανότητας απόρριψης πακέτων εκτιμάται σε συνδυασμό με τη μεταβολή της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου.

Πράγματι, στην περίπτωση που $N=64$ το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο παρέχει πολύ χαμηλές (σχεδόν μηδενικές) τιμές πιθανότητας απόρριψης για τιμές προσφερόμενου φορτίου μικρότερες από 2000 Mb/s. Σε αυτή την περιοχή, η μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου διατηρεί πολύ χαμηλές τιμές, όπως αναφέρεται παραπάνω. Για μεγαλύτερες τιμές προσφερόμενου φορτίου, η μέση πιθανότητα απόρριψης λόγω υπερχειλίσης αυξάνει εξαιτίας της βαθμιαίας αύξησης της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου. Για παράδειγμα για $N=64$ και τιμή προσφερόμενου φορτίου 6000 Mb/s, η μέση πιθανότητα απόρριψης είναι 0.18. Και αυτό γιατί σε αυτή την περίπτωση το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο εμφανίζει μέση τιμή καθυστέρησης στους καταχωρητές μόλις 250 μ s. Έτσι, οι καταχωρητές εξόδου αδειάζουν πιο γρήγορα και μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερα εισερχόμενα πακέτα δεδομένων, παρέχοντας λιγότερες απορρίψεις.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για $N=64$ το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο εμφανίζει κατά μέσο όρο πιθανότητα απόρριψης περίπου 0.06 για όλες τις τιμές προσφερόμενου φορτίου. Αυτό σημαίνει ότι κατά μέσο όρο το 6% της εισερχόμενης κίνησης από τα δίκτυα πρόσβασης απορρίπτεται λόγω υπερχειλίσης των καταχωρητών. Η τιμή αυτή είναι δύσκολα αποδεκτή για μητροπολιτικά δίκτυα, αφού προκαλεί μεγάλο αριθμό επαναμεταδόσεων που προστίθενται στην υπόλοιπη κίνηση. Για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος προτείνεται η αύξηση της χωρητικότητας B των καταχωρητών εξόδου, που μελετάται στη συνέχεια.



Σχήμα 10-3. Μέση πιθανότητα απόρριψης για $W=32$, $B=100$, $N=64,120,150$

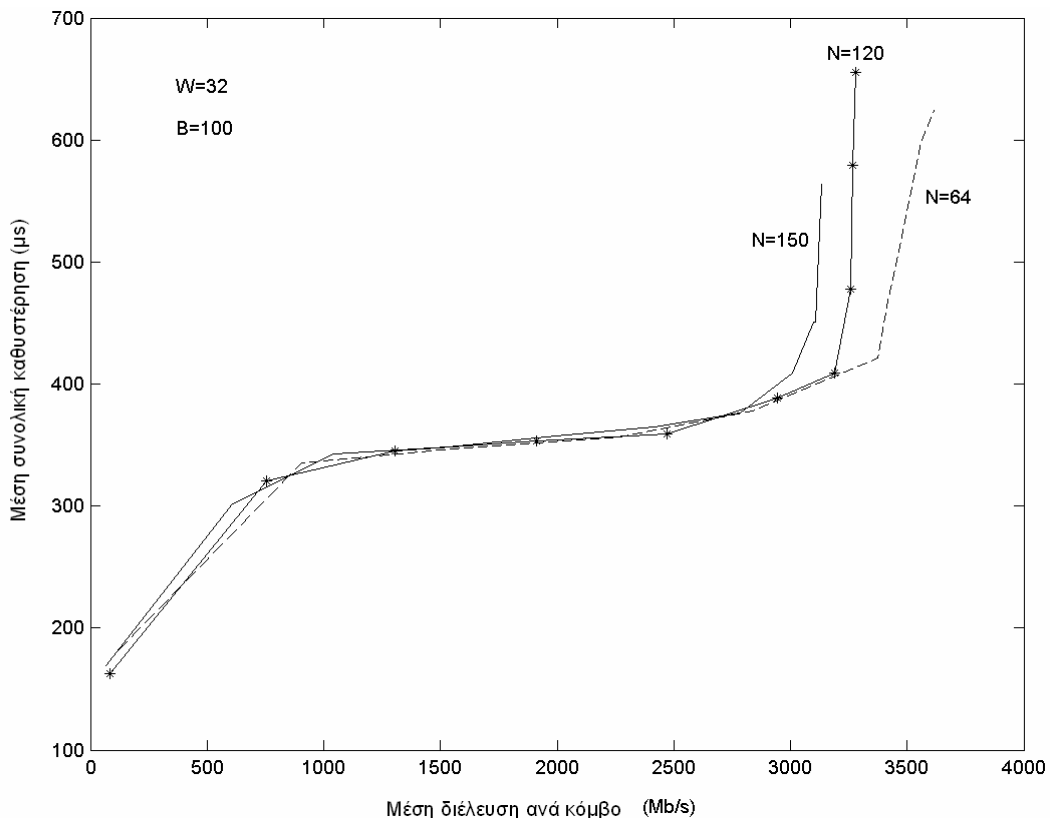
Η συνολική απόδοση του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου δίνεται παραστατικά στο Σχήμα 10-4 που παρουσιάζει τη μέση συνολική καθυστέρηση ως συνάρτηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο για διάφορες τιμές του πλήθους των κόμβων N . Πράγματι, το προτεινόμενο FT-FR-TT-TR πρωτόκολλο εμφανίζει κορεσμό σε σημαντικά υψηλές τιμές προσφερόμενου φορτίου, ενώ παρέχει επιτρεπτές τιμές μέσης συνολικής καθυστέρησης.

Μεταβολή του πλήθους των κόμβων

Η επίδραση της μεταβολής του πλήθους N των κόμβων στην απόδοση του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου μελετάται στο Σχήμα 10-1, Σχήμα 10-2, Σχήμα 10-3 και Σχήμα 10-4 που παρουσιάζουν τα μέτρα αποδοτικότητας για $N=64,120,150$ και $W=32, B=100$.

Στο Σχήμα 10-1 παρατηρείται ότι η μέγιστη διέλευση ανά κόμβο είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του αριθμού N . Το αποτέλεσμα αυτό ταυτίζεται με τα συμπεράσματα της θεωρητικής ανάλυσης της σχέσης (8.9). Ερμηνεύεται δε, με βάση την αύξηση της εισερχόμενης κίνησης στο δακτύλιο που παρατηρείται με την αύξηση του αριθμού N . Έτσι, η μέγιστη διέλευση ανά κόμβο που αντιστοιχεί σε συνθήκες κορεσμού είναι μικρότερη. Για παράδειγμα, για $N=64$ η μέγιστη διέλευση ανά κόμβο είναι 3480 Mb/s, ενώ για $N=120$ αυτή μειώνεται στα 3250 Mb/s και για $N=150$ στα 3075 Mb/s.

Επίσης για την ίδια τιμή μέσης διέλευσης ανά κόμβο, με την αύξηση του αριθμού N ο μέγιστος αριθμός των ελεύθερων για μετάδοση χρονικών σχισμών είναι μικρότερος. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η μέση καθυστέρηση στους καταχωρητές εξόδου, η μέση πιθανότητα απόρριψης λόγω υπερχείλισης των καταχωρητών και η μέση συνολική καθυστέρηση αυξάνουν σημαντικά, όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα.

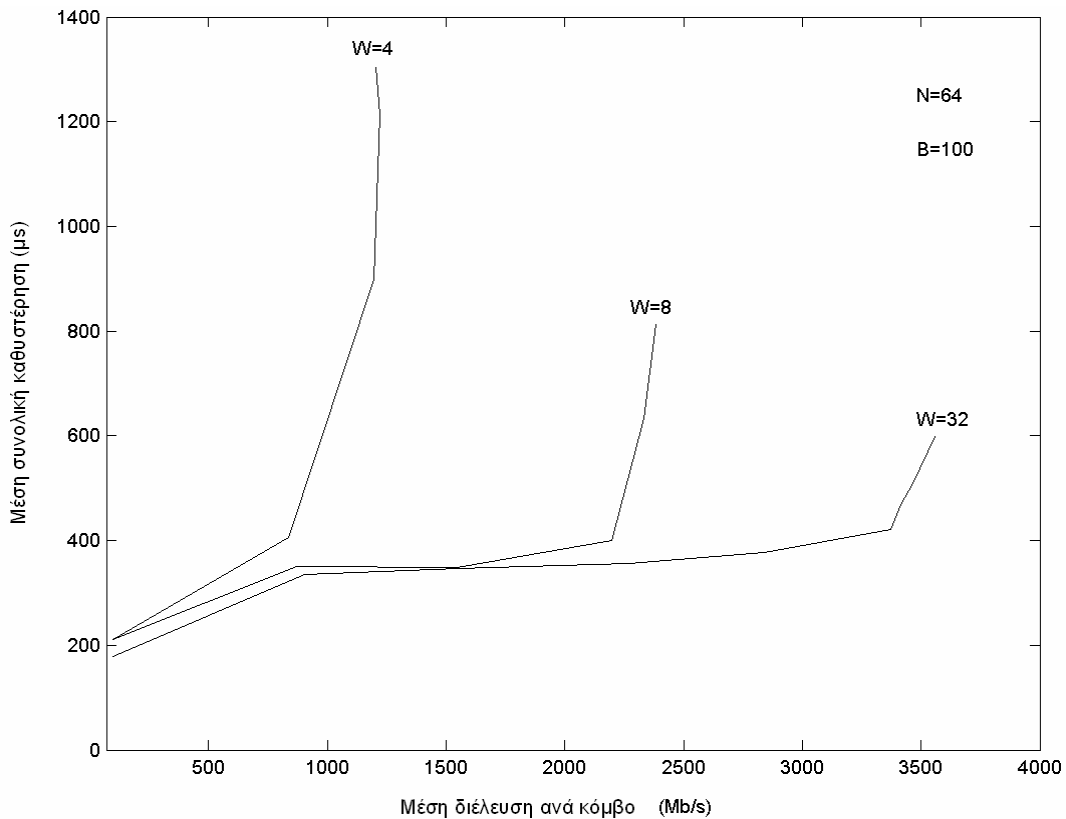


Σχήμα 10-4. Μέση συνολική καθυστέρηση για $W=32, B=100, N=64,120,150$

Μεταβολή του πλήθους των καναλιών δεδομένων

Επίσης, η επίδραση της μεταβολής του πλήθους W των καναλιών δεδομένων στην απόδοση του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου μελετάται στο Σχήμα 10-5 που παρουσιάζει τη μέση συνολική καθυστέρηση ως συνάρτηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο για $W = 4, 8, 32$ κανάλια δεδομένων (δηλαδή για 1, 2, 8 συντονιζόμενους δέκτες ανά κόμβο αντίστοιχα) και $N = 64$, $B = 100$.

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 10-5, για την ίδια τιμή μέσης διέλευσης ανά κόμβο η μέση συνολική καθυστέρηση είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του W . Και αυτό γιατί η αύξηση του W προκαλεί αύξηση των ελεύθερων χρονικών σχισμών για μετάδοση, με αποτέλεσμα το χρονικό διάστημα που έχει να περιμένει ένα πακέτο δεδομένων στον καταχωρητή εξόδου μέχρι να μεταδοθεί να είναι μικρότερο. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μείωση της μέσης καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου και της μέσης συνολικής καθυστέρησης, καθώς και σε αύξηση της μέγιστης διέλευσης ανά κόμβο. Για παράδειγμα, η μέγιστη διέλευση ανά κόμβο είναι 1200 Mb/s για $W = 4$, ενώ αυτή ανέρχεται σε 2350 Mb/s για $W = 8$, και σε 3500 Mb/s για $W = 32$.



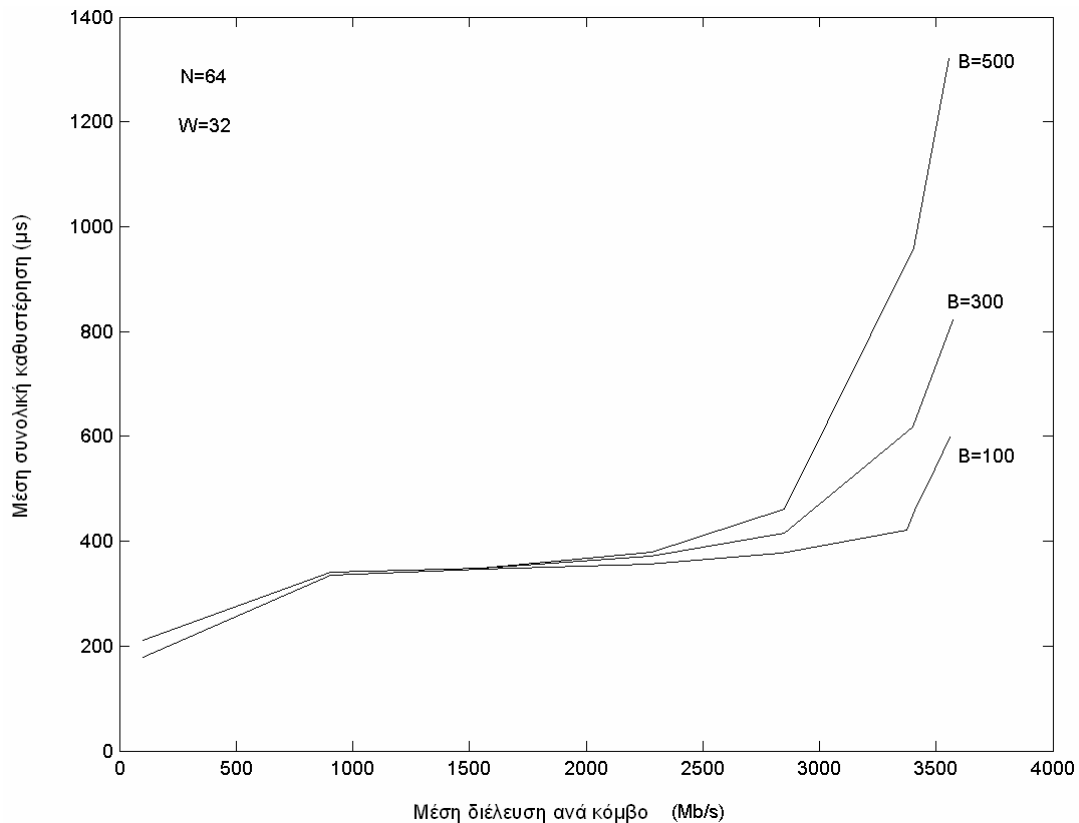
Σχήμα 10-5. Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=64$, $B=100$, $W=4, 8, 32$

Μεταβολή της χωρητικότητας των καταχωρητών εξόδου

Τέλος, η επίδραση της μεταβολής της χωρητικότητας B των καταχωρητών εξόδου στην απόδοση του προτεινόμενου FT-FR-TT-TR πρωτοκόλλου μελετάται στο Σχήμα 10-6 που παρουσιάζει τη μέση συνολική καθυστέρηση ως συνάρτηση της μέσης διέλευσης ανά κόμβο για $B = 100, 300, 500$ πακέτα δεδομένων και $N = 64$, $W = 32$. Όπως παρουσιάζεται, για τιμές μέσης διέλευσης ανά κόμβο μικρότερες από 2400 Mb/s, η αύξηση της χωρητικότητας B των καταχωρητών εξόδου δεν επηρεάζει τη μέση συνολική καθυστέρηση. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, το

σύστημα δεν έχει φτάσει ακόμα στην βέλτιστη αξιοποίηση των ελεύθερων χρονικών σχισμών και η συνολική εισερχόμενη κίνηση μπορεί να προσπελάσει το δακτύλιο χωρίς να απορριφθεί στους καταχωρητές.

Για μεγαλύτερες τιμές μέσης διέλευσης ανά κόμβο, το σύστημα οδηγείται βαθμιαία σε κορεσμό και η μέση συνολική καθυστέρηση καθώς και η μέση πιθανότητα απόρριψης αυξάνουν. Μολονότι στην περιοχή αυτή η αύξηση της χωρητικότητας B προκαλεί μείωση των απορρίψεων, οδηγεί αναπόφευκτα σε αύξηση της καθυστέρησης στους καταχωρητές εξόδου εξαιτίας της μέγιστης αξιοποίησης του εύρους ζώνης. Έτσι κατά την πιθανή υλοποίηση του συστήματος, η απόφαση για αύξηση της χωρητικότητας B προκειμένου να μειωθεί η μέση πιθανότητα απόρριψης οφείλει να συνυπολογίσει, εκτός από το επιπλέον οικονομικό κόστος, τη συνεπακόλουθη αύξηση της συνολικής καθυστέρησης.



Σχήμα 10-6. Μέση συνολική καθυστέρηση για $N=64$, $W=32$, $B=100,300,500$

Σημειώνεται ότι αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται και στην περίπτωση που αξιοποιούνται πολλαπλά κανάλια δεδομένων και ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7.

10.8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα σύγχρονο πρωτόκολλο πρόσβασης στα WDM κανάλια δεδομένων ενός μητροπολιτικού WDM δικτύου τοπολογίας δακτυλίου. Στη μελέτη, ο μητροπολιτικός δακτύλιος αξιοποιεί πολλαπλά κανάλια δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης με σκοπό τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας. Όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια, το μοντέλο δικτύου χρησιμοποιεί τη

μονοδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου προκειμένου να βελτιστοποιήσει την απόδοση και να αποφύγει τις συγκρούσεις στα κανάλια δεδομένων και στον προορισμό.

Έτσι, το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου χρησιμοποιεί ένα ξεχωριστό κανάλι ελέγχου για την ανταλλαγή πληροφορίας ελέγχου πριν τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων. Με βάση την πληροφορία ελέγχου, εφαρμόζεται ένας αποδοτικός αλγόριθμος αποφυγής συγκρούσεων στα πακέτα δεδομένων και στον προορισμό.

Κάθε κόμβος του δικτύου είναι εξοπλισμένος με:

- ένα ζεύγος ενός σταθερά συντονισμένου εκπομπού και ενός σταθερά συντονισμένου δέκτη, για την επικοινωνία στο κανάλι ελέγχου.
- ένα συντονιζόμενο εκπομπό για τη μετάδοση πακέτων σε οποιοδήποτε από τα κανάλια δεδομένων.
- ένα σύνολο από συντονιζόμενους δέκτες, κάθε ένας από τους οποίους μπορεί να μεταδώσει πακέτα σε οποιοδήποτε από τα κανάλια δεδομένων της αντίστοιχης ομάδας συχνοτήτων.

Χωρίς περιορισμό των συμπερασμάτων, στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου πολλαπλών καναλιών δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης, για την περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον προορισμό. Η μελέτη πραγματοποιείται θεωρώντας ότι το μοντέλο γέννησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης ακολουθεί τη self-similar διαδικασία, μοντελοποιώντας την εκρηκτικότητα της κίνησης στα σύγχρονα μητροπολιτικά δίκτυα. Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν και στην περίπτωση που ακολουθείται η στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών στον αποστολέα, σύμφωνα με το Κεφάλαιο 7.

Ανάλογα με την ακολουθούμενη στρατηγική αποδέσμευσης χρονικών σχισμών, ένα αναλυτικό μοντέλο αναπτύσσεται για τον υπολογισμό του αναλυτικού τύπου που παρέχει τη μέγιστη διέλευση ανά κόμβο στο δακτύλιο, σύμφωνα με το Κεφάλαιο 7 και το Κεφάλαιο 8. Επίσης, τα αναλυτικά αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα ενός μοντέλου εξομοίωσης διακριτών γεγονότων που αναπτύχθηκε.

Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό η μελέτη πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την τροποποίηση του μοντέλου προκειμένου να παρέχει ανοχή σε πιθανές δικτυακές καταστροφές, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 9.

Συμπερασματικά, η προτεινόμενη τροποποίηση του μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου για χρήση πολλαπλών καναλιών δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης αξιοποιεί με βέλτιστο τρόπο το διαθέσιμο εύρος ζώνης της οπτικής ίνας και ικανοποιεί τη σύγχρονη ανάγκη για μέγιστη εκμετάλλευση του. Επίσης, παρέχει ανοχή σε πιθανές δικτυακές καταστροφές, καθιστώντας το μοντέλο ιδανική πρόταση υλοποίησης μητροπολιτικού WDM δικτύου τοπολογίας δακτυλίου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Τέλος, ο ακολουθούμενος αλγόριθμος αποφυγής των συγκρούσεων τόσο στα πολλαπλά κανάλια δεδομένων όσο και στον προορισμό βελτιώνει ακόμα περισσότερο την απόδοση του δικτύου, ιδιαίτερα σε συνθήκες πολύ υψηλού φορτίου.

Συμπεράσματα – Στοιχεία Μελλοντικής Έρευνας

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται σύγχρονες τάσεις για την ανάπτυξη οπτικών WDM δικτύων και προτείνει αποδοτικές αρχιτεκτονικές ελέγχου και τεχνικές μετάδοσης για δίκτυα τόσο τοπικής όσο και μητροπολιτικής κλίμακας.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής προτείνεται η πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου για τοπικά WDM δίκτυα τοπολογίας παθητικού αστέρα και η μονοδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου για μητροπολιτικά WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου. Σε κάθε περίπτωση αρχιτεκτονικής ελέγχου διατυπώνονται σύγχρονα πρωτόκολλα πρόσβασης και αναπτύσσονται αποτελεσματικοί αλγόριθμοι πρόσβασης που αποφεύγουν τις συγκρούσεις πακέτων τόσο στα WDM κανάλια όσο και στον προορισμό.

Η διδακτορική έρευνα αξιοποιεί την επίδραση παραμέτρων απόδοσης οπτικών WDM δικτύων, όπως της καθυστέρησης διάδοσης της οπτικής ακτινοβολίας καθώς και του χρόνου και του εύρους συντονισμού των συντονιζόμενων εκπομπών και δεκτών, προκειμένου να διατυπώσει αποδοτικά πρωτόκολλα που βελτιστοποιούν την απόδοση.

Σημαντική συνεισφορά της διδακτορικής έρευνας αποτελεί η αναλυτική μοντελοποίηση της απόδοσης των προτεινόμενων πρωτοκόλλων τοπικών WDM δικτύων με χρήση μαρκοβιανής ανάλυσης και ο καθορισμός αυστηρών μαθηματικών τύπων για τα μέτρα αποδοτικότητας. Επίσης, ο εκρηκτικός χαρακτήρας της τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα σύγχρονα μητροπολιτικά δίκτυα συνυπολογίζεται στην ανάλυση, παρέχοντας μια πιο ακριβή εκτίμηση της αποδοτικότητας.

Τα συμπεράσματα της διδακτορικής έρευνας καταδεικνύουν ότι οι προτεινόμενες αρχιτεκτονικές ελέγχου σε συνδυασμό με τα πρωτόκολλα πρόσβασης επιτυγχάνουν σημαντική βελτίωση της απόδοσης, ιδιαίτερα σε υψηλά φορτία, αξιοποιώντας αποτελεσματικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης της οπτικής ίνας. Επίσης, οι προτεινόμενες αρχιτεκτονικές ελέγχου για μητροπολιτικά δίκτυα παρέχουν υψηλή ικανότητα κλιμάκωσης και συντήρησης, καθώς και ανοχή σε δικτυακά σφάλματα.

Τα διδακτορικά αποτελέσματα αποσκοπούν στο να συνεισφέρουν στη διεθνή ερευνητική μελέτη για ανάπτυξη σύγχρονων οπτικών WDM δικτύων και στη βελτιστοποίηση της απόδοσης τους.

Οι ερευνητικές κατευθύνσεις της διδακτορικής διατριβής θα μπορούσαν να αποτελέσουν σημαντικό εργαλείο μελλοντικής ανάλυσης της απόδοσης οπτικών WDM δικτύων, μελετώντας την επίδραση επιπλέον παραμέτρων που επιδρούν στην απόδοσή τους, όπως του μεταβλητού μεγέθους των πακέτων δεδομένων. Τέλος, τα συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για τη διατύπωση πολλαπλών νέων πρωτοκόλλων πρόσβασης και αρχιτεκτονικών ελέγχου που αποσκοπούν στην αντιμετώπιση των περιορισμών που θέτει η υπάρχουσα τεχνολογία οπτικών δικτύων.

Παράρτημα:

Μοντέλα εξομοίωσης τηλεπικοινωνιακής κίνησης

Κεφάλαιο 11 : Μοντέλα εξομοίωσης τηλεπικοινωνιακής κίνησης

Η παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της απόδοσης των προτεινόμενων αρχιτεκτονικών ελέγχου και των πρωτοκόλλων πρόσβασης είναι το μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συνολική προσφερόμενη κίνηση στα WDM δίκτυα που μελετώνται.

Στην περίπτωση της προτεινόμενης πολυδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που μελετάται στο Μέρος I για τοπικά WDM δίκτυα τοπολογίας παθητικού αστέρα, η προσφερόμενη κίνηση μοντελοποιείται θεωρώντας ότι η γέννηση των πακέτων πραγματοποιείται ανεξάρτητα σε κάθε σταθμό σύμφωνα με τη γεωμετρική κατανομή. Έτσι σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο Μέρος I (Κεφάλαιο 5, Κεφάλαιο 6), σε κάθε χρονικό κύκλο κάθε ελεύθερος σταθμός γεννά ένα πακέτο με πιθανότητα p , ενώ κάθε ενεργός σταθμός επιχειρεί επαναμετάδοση του πακέτου του με πιθανότητα p_1 . Αυτό το μοντέλο γέννησης της προσφερόμενης κίνησης παρέχει τη δυνατότητα αναλυτικού προσδιορισμού των μέτρων αποδοτικότητας και αξιολόγησης της απόδοσης.

Στην περίπτωση της προτεινόμενης μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου που μελετάται για μητροπολιτικά WDM δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου, η απόδοση των προτεινόμενων πρωτοκόλλων προσδιορίζεται δύσκολα αναλυτικά. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μέθοδοι εξομοίωσης και αναπτύσσονται εξομοιωτικά μοντέλα διακριτών γεγονότων για τον καθορισμό των μέτρων αποδοτικότητας, όπως παρουσιάζεται στο Μέρος II (Κεφάλαιο 7-Κεφάλαιο 10).

Η εκτίμηση της απόδοσης της προτεινόμενης μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και των πρωτοκόλλων πρόσβασης εξαρτάται καθοριστικά από το μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συνολική προσφερόμενη κίνηση από τα δίκτυα πρόσβασης στον οπτικό δακτύλιο.

Στη βιβλιογραφία, πολλές μελέτες [32],[97],[98] μοντελοποιούν την κίνηση φωνής, και κατ'επέκταση την κίνηση δεδομένων στα LANs, με διαδικασίες Poisson. Και αυτό γιατί οι διαδικασίες Poisson διαθέτουν ήδη γνωστά και αναπτυγμένα θεωρητικά μοντέλα που μπορούν να υπολογίσουν τα μέτρα αποδοτικότητας μέσω μαθηματικής ανάλυσης.

Παρόλα αυτά, τελευταίες μελέτες αποδεικνύουν ότι η κίνηση στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και ειδικότερα η κίνηση πακέτων Internet στα LANs και MANs χαρακτηρίζεται από υψηλή μεταβλητότητα και εκρηκτικότητα και μοντελοποιούνται καλύτερα από διαδικασίες self-similar [99]-[102].

Η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου δικτύου μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και των πρωτοκόλλων πρόσβασης που παρουσιάζονται στο Μέρος II (Κεφάλαιο 7-Κεφάλαιο 10), μελετάται για μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα δίκτυα πρόσβασης που περιγράφονται τόσο από διαδικασίες Poisson όσο και από self-similar διαδικασίες.

Στη συνέχεια δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο διαδικασιών γέννησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

11.1 Poisson διαδικασία γέννησης κίνησης

Στη βιβλιογραφία, η διαδικασία Poisson έχει χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσει διάφορες διαδικασίες αφίξεων όχι μόνο σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα, αλλά γενικότερα σε συστήματα εξυπηρέτησης.

Η διαδικασία Poisson έχει γνωστή μαθηματική μοντελοποίηση.

Έτσι, μια διαδικασία άθροισης $X(t)$ που περιγράφει το συνολικό αριθμό των γεγονότων που συμβαίνουν μέχρι τη χρονική στιγμή t , είναι διαδικασία Poisson αν [103]:

- έχει μηδενικές αρχικές συνθήκες, $N(0)=0$
- έχει ανεξάρτητες αυξήσεις, $\{N(t), t \geq 0\}$
- ο αριθμός των γεγονότων σε κάθε χρονικό διάστημα μήκους t έχει κατανομή Poisson με μέση τιμή $(\lambda_p \times t) \geq 0$ και σταθερό ρυθμό $\lambda_p \geq 0$. Με άλλα λόγια, η πιθανότητα να συμβούν k γεγονότα σε χρονικό διάστημα μήκους t (η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας) δίνεται από τη σχέση:

$$\Pr\{N(t+x) - N(t) = k\} = e^{-\lambda_p t} \frac{(\lambda_p t)^k}{k!}, \quad \forall x \geq 0 \quad (11.1)$$

11.1.1 Ιδιότητες της κατανομής Poisson

Έστω η συνεχής τυχαία μεταβλητή X , ($0 \leq X < \infty$) που ακολουθεί την κατανομή Poisson, με μέση τιμή $\lambda_p \geq 0$.

Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας

Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (Cumulative Distribution Function- CDF) της τυχαίας μεταβλητής X που ακολουθεί την κατανομή Poisson, δίνεται από τη σχέση:

$$F(x) = P[X \leq x] = \sum_{i=1}^x \frac{(\lambda_p)^i e^{-\lambda_p}}{i!} \quad (11.2)$$

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density function-PDF) της τυχαίας μεταβλητής X που ακολουθεί την κατανομή Poisson, δίνεται από τη σχέση:

$$f(x) = \frac{(\lambda_p)^x e^{-\lambda_p}}{x!} \quad (11.3)$$

Μέση τιμή

Η μέση τιμή της τυχαίας μεταβλητής X που ακολουθεί την κατανομή Poisson, είναι:

$$E(x) = \lambda_p \quad (11.4)$$

Διακύμανση

Η διακύμανση της τυχαίας μεταβλητής X που ακολουθεί την κατανομή Poisson, είναι:

$$V(x) = \lambda_p \quad (11.5)$$

Κατανομή χρόνων άφιξης και χρόνων μεταξύ διαδοχικών αφίξεων

Σημαντική ιδιότητα της διαδικασίας Poisson είναι η σχέση της με την εκθετική κατανομή. Συγκεκριμένα, τα χρονικά διαστήματα t_n $n=1,2,\dots$ μεταξύ διαδοχικών αφίξεων μιας διαδικασίας Poisson με ρυθμό λ_p είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν εκθετική κατανομή με μέση τιμή $\lambda = \frac{1}{\lambda_p}$.

Διαδικασία αφίξεων πολλαπλών διαδικασιών Poisson

Έστω k το πλήθος ανεξάρτητων διαδικασιών Poisson. Ο ρυθμός της i , $i = 1,2,\dots,k$ διαδικασίας Poisson συμβολίζεται ως λ_i . Η διαδικασία αφίξεων που προκύπτει από τη συγχώνευση των k ανεξάρτητων διαδικασιών Poisson είναι επίσης διαδικασία Poisson [103], με ρυθμό $\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k$.

11.1.2 Φορτίο συνολικής Poisson κίνησης

Έστω ότι ένα δίκτυο αποτελείται από M πηγές κίνησης οι οποίες παράγουν συνολική κίνηση πακέτων που ακολουθεί την κατανομή Poisson με μέση τιμή λ_s . Σύμφωνα με τα προηγούμενα, τα χρονικά διαστήματα t_n $n=1,2,\dots$ μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων από όλους τους σταθμούς στο δίκτυο είναι ανεξάρτητη τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί εκθετική κατανομή με μέση τιμή $\lambda = \frac{1}{\lambda_s}$.

Ο χρόνος μετάδοσης T_t ενός μοναδικού πακέτου μήκους L bits σε ένα δίαυλο χωρητικότητας C b/s δίνεται, σε μονάδες δευτερολέπτων (s), από τη σχέση:

$$T_t = \frac{L}{C} \quad (11.6)$$

Το συνολικό φορτίο L_t που προσφέρεται από όλους τους σταθμούς στο δίκτυο δίνεται από τη σχέση:

$$L_t = \frac{T_t}{T_t + \lambda} \quad (11.7)$$

11.1.3 Τυχαίες μεταβλητές για τη γέννηση Poisson κίνησης

Σε περιπτώσεις εξομοίωσης, η γέννηση κίνησης που ακολουθεί την κατανομή Poisson με μέση τιμή λ_s ισοδυναμεί με τη γέννηση της ακολουθίας των χρονικών διαστημάτων t_n $n=1,2,\dots$ μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων που κατανέμονται εκθετικά. Η γέννηση των χρονικών διαστημάτων t_n που κατανέμονται εκθετικά πραγματοποιείται με χρήση της μεθόδου αντίστροφου μετασχηματισμού (inverse transformation) [103].

Συγκεκριμένα, έστω η τυχαία μεταβλητή U που κατανέμεται ομοιόμορφα στο πεδίο τιμών $(0,1)$ και γεννιέται από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Τότε, η τυχαία μεταβλητή X που εκφράζει τα χρονικά διαστήματα t_n $n=1,2,\dots$ μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων και κατανέμεται εκθετικά υπολογίζεται από τη σχέση [103]:

$$X = -\frac{1}{\lambda_s} \log(U) \tag{11.8}$$

όπου $1 / \lambda_s$ είναι η μέση τιμή της εκθετικής κατανομής.

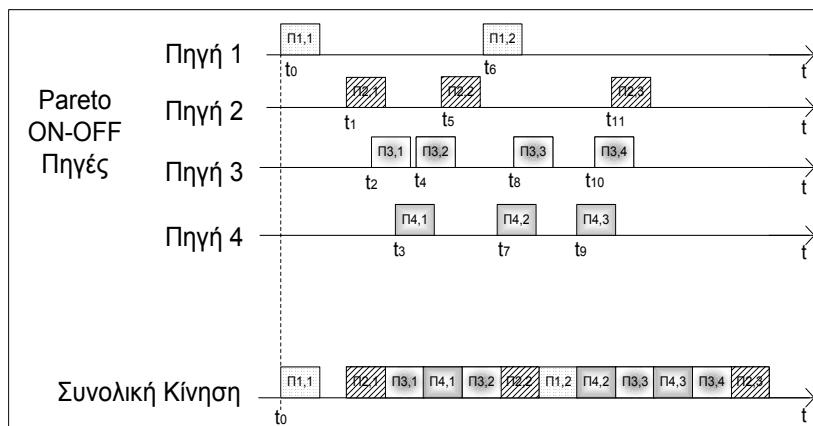
Επίσης, η γέννηση κίνησης σε διαφορετικά δίκτυα πρόσβασης πραγματοποιείται με τη χρήση διαφορετικού φύτρου κατά την αρχικοποίηση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών για κάθε δίκτυο πρόσβασης.

11.2 Self-similar διαδικασία γέννησης κίνησης

Τελευταίες μελέτες αποδεικνύουν ότι η κίνηση στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και ειδικότερα η κίνηση πακέτων Internet στα LANs και MANs χαρακτηρίζεται από υψηλή μεταβλητότητα και εκρηκτικότητα και μοντελοποιείται καλύτερα από διαδικασίες self-similar [99]-[102]. Οι διαδικασίες self-similar περιγράφονται από ιδιαίτερα πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις. Η μαθηματική μοντελοποίηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης με χρήση των ιδιοτήτων της self-similarity αποδεικνύεται ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα, με αποτέλεσμα η έρευνα να αποπροσανατολιστεί από το επίπεδο της μελέτης της απόδοσης της προτεινόμενης μονοδιαυλικής αρχιτεκτονικής ελέγχου, στο επίπεδο της μαθηματικής έρευνας και του φορμαλισμού.

Η μελέτη [102] κατέδειξε ότι η κίνηση ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου που παρουσιάζει ιδιότητες self-similarity μπορεί να μοντελοποιηθεί χωρίς τη χρήση πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων. Συγκεκριμένα, η self-similar κίνηση μπορεί να δημιουργηθεί από την πολυπλεγμένη συνολική κίνηση που προκαλούν πηγές των οποίων οι περίοδοι μετάδοσης (ON περίοδοι) και οι περίοδοι σιωπής (OFF περίοδοι) κατανέμονται σύμφωνα με την κατανομή Pareto.

Η συμπεριφορά αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 11-1 για 4 πηγές κίνησης.



Σχήμα 11-1. Συνολική self-similar κίνηση από 4 ON-OFF πηγές

Περίοδος μετάδοσης (ON περίοδος) ενός σταθμού ονομάζεται το χρονικό διάστημα συνεχούς και αδιάλειπτης μετάδοσης πακέτων, το ένα μετά το άλλο. Αντίστοιχα, περίοδος σιωπής (OFF περίοδος) ενός σταθμού ονομάζεται το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών περιόδων μετάδοσης του σταθμού.

Ειδικότερα, οι μελέτες [99]-[102] καταδεικνύουν ότι η κίνηση που παράγει κάθε σταθμός του δικτύου πρόσβασης μπορεί να γεννηθεί χρησιμοποιώντας δύο τυχαίες μεταβλητές που κατανέμονται κατά Pareto:

- τη τυχαία μεταβλητή T_{ON} που εκφράζει τις χρονικές στιγμές που ο σταθμός ξεκινά τη μετάδοση των διαδοχικών πακέτων.
- τη τυχαία μεταβλητή T_{OFF} που εκφράζει τις χρονικές στιγμές που ο σταθμός σταματά τη μετάδοση και ξεκινά να σιωπά.

11.2.1 Ιδιότητες της κατανομής Pareto

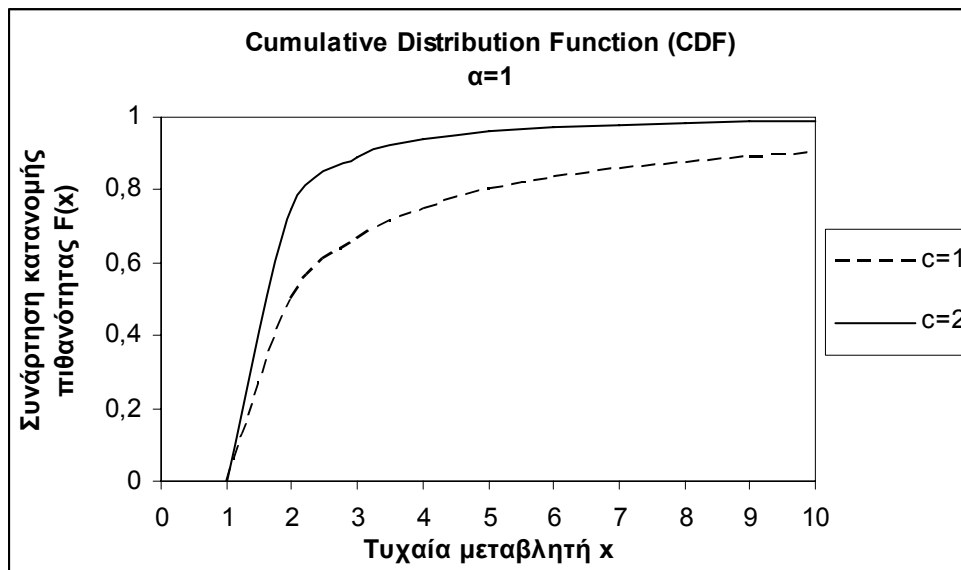
Έστω η συνεχής τυχαία μεταβλητή X , ($\alpha \leq X < \infty$) που ακολουθεί την κατανομή Pareto. Η παράμετρος α ($\alpha > 0$) ονομάζεται παράμετρος θέσης της κατανομής Pareto και καθορίζει την ελάχιστη τιμή της τυχαίας μεταβλητής. Επίσης, ορίζουμε την παράμετρο σχήματος $c > 0$ της κατανομής Pareto που καθορίζει τη μορφή της κατανομής, όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας

Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (Cumulative Distribution Function- CDF) της τυχαίας μεταβλητής X που ακολουθεί την κατανομή Pareto, δίνεται από τη σχέση:

$$F(x) = P[X \leq x] = 1 - \left(\frac{\alpha}{x}\right)^c, \quad c > 0 \quad (11.9)$$

Στο Σχήμα 11-2 παρουσιάζεται η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας για τιμές της παραμέτρου σχήματος $c = 1, 2$.



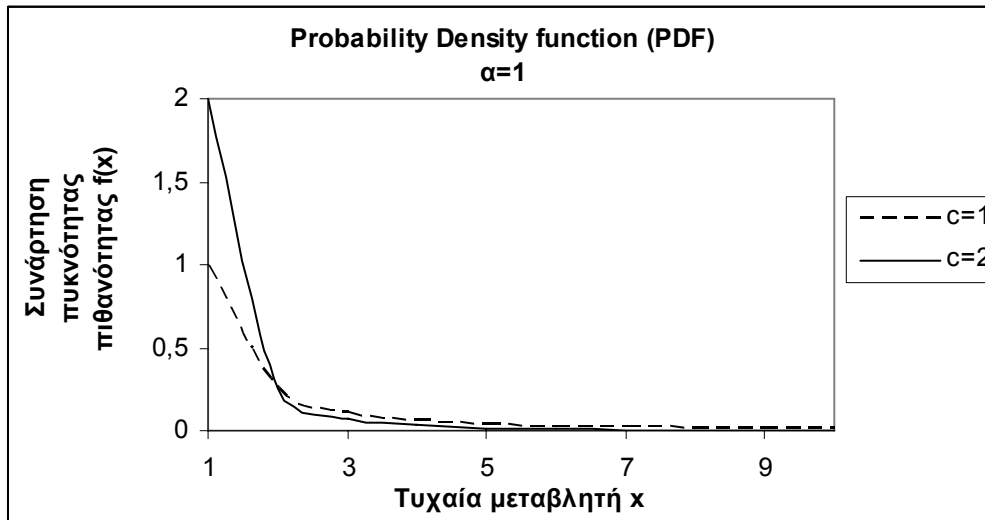
Σχήμα 11-2. Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας για $c=1,2$

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density function–PDF) της τυχαίας μεταβλητής X που ακολουθεί την κατανομή Pareto, δίνεται από τη σχέση:

$$f(x) = \frac{c\alpha^c}{x^{c+1}} \quad (11.10)$$

Στο Σχήμα 11-3 παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για τιμές της παραμέτρου σχήματος $c = 1, 2$.



Σχήμα 11-3. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για $c=1,2$

Αντίστροφη συνάρτηση κατανομής

Η αντίστροφη συνάρτηση κατανομής της τυχαίας μεταβλητής X που ακολουθεί την κατανομή Pareto, δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha(1 - p)^{\frac{-1}{c}} \quad (\text{για πιθανότητα } p) \quad (11.11)$$

Μέση τιμή

Η μέση τιμή της τυχαίας μεταβλητής X που ακολουθεί την κατανομή Pareto, δίνεται από τη σχέση:

$$E(x) = \begin{cases} \frac{c\alpha}{c-1}, & c > 1 \\ \infty, & 0 < c \leq 1 \end{cases} \quad (11.12)$$

Διακύμανση

Η διακύμανση της τυχαίας μεταβλητής X που ακολουθεί την κατανομή Pareto, δίνεται από τη σχέση:

$$V(x) = \begin{cases} \frac{c\alpha^2}{(c-1)^2(c-2)}, & c > 2 \\ \infty, & 0 < c \leq 2 \end{cases} \quad (11.13)$$

11.2.2 Φορτίο συνολικής self-similar κίνησης

Έστω ότι ένα δίκτυο αποτελείται από M πηγές κίνησης των οποίων οι περίοδοι μετάδοσης και σιωπής ακολουθούν την κατανομή Pareto. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η συνολική πολυπλεγμένη κίνηση των M σταθμών παρουσιάζει ιδιότητες self-similarity.

Έστω ότι L_i είναι το φορτίο που παράγει ο i , $i=1,2,\dots,M$ σταθμός. Συμβολίζουμε ως $\mu_{i,ON}$ και $\mu_{i,OFF}$ τη μέση τιμή των περιόδων μετάδοσης και σιωπής αντίστοιχα του i , $i=1,2,\dots,M$ σταθμού που κατανέμονται κατά Pareto. Ισχύει ότι:

$$L_i = \frac{\mu_{i,ON}}{\mu_{i,ON} + \mu_{i,OFF}} \quad (11.14)$$

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, υποθέτουμε ότι όλοι οι σταθμοί παράγουν ίσο μεταξύ τους φορτίο. Έτσι, υποθέτουμε ότι οι μέσες τιμές των περιόδων μετάδοσης όλων των σταθμών είναι ίσες μεταξύ τους και ίσες με τη τιμή μ_{ON} , δηλαδή:

$$\mu_{1,ON} = \mu_{2,ON} = \dots = \mu_{M,ON} = \mu_{ON} \quad (11.15)$$

Επίσης, η ίδια υπόθεση ισχύει για τις μέσες τιμές των περιόδων σιωπής όλων των σταθμών, δηλαδή:

$$\mu_{1,OFF} = \mu_{2,OFF} = \dots = \mu_{M,OFF} = \mu_{OFF} \quad (11.16)$$

Επομένως, το φορτίο L_i που παράγει ο κάθε σταθμός, δίνεται από τη σχέση:

$$L_i = \frac{\mu_{ON}}{\mu_{ON} + \mu_{OFF}} \quad (11.17)$$

Εφόσον όλοι οι σταθμοί παράγουν ίσο μεταξύ τους φορτίο L_i , το συνολικό φορτίο L_t που παράγεται από τη συνολική κίνηση των M σταθμών δίνεται από το άθροισμα των φορτίων των επιμέρους σταθμών, δηλαδή:

$$L_t = \sum_{i=1}^M L_i = M \times L_i \quad (11.18)$$

Από τις σχέσεις (11.17) και (11.18) προκύπτει:

$$\mu_{OFF} = \mu_{ON} \times \frac{(M - L_t)}{L_t} \quad (11.19)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (11.12) και (11.19), προκύπτει ότι η ελάχιστη τιμή α_{OFF} της OFF περιόδου των σταθμών δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha_{OFF} = \frac{c_{ON} \times \alpha_{ON}}{(c_{ON} - 1)} \times \frac{(c_{OFF} - 1)}{c_{OFF}} \times \frac{(M - L_t)}{L_t} \quad (11.20)$$

όπου: α_{ON} είναι η ελάχιστη τιμή της ON περιόδου των σταθμών, c_{ON} είναι η παράμετρος σχήματος της ON περιόδου των σταθμών και c_{OFF} είναι η παράμετρος σχήματος της OFF περιόδου των σταθμών.

Είναι προφανές ότι η ελάχιστη τιμή της ON περιόδου των σταθμών ισούται με το χρόνο μετάδοσης ενός μοναδικού πακέτου μήκους L bits σε ένα δίαυλο χωρητικότητας C b/s. Επομένως, σε μονάδες δευτερολέπτων (s) είναι:

$$\alpha_{ON} = \frac{L}{C} \quad (11.21)$$

Μέτρο της υψηλής εκρηκτικότητας της συνολικής πολυπλεγμένης κίνησης των πηγών των οποίων οι περίοδοι μετάδοσης και σιωπής κατανέμονται κατά Pareto, αποτελεί η παράμετρος Hurst H , που δίνεται από τη σχέση [102]:

$$H = \frac{3 - c}{2} \quad (11.22)$$

Ειδικότερα, για τις κατανομές των περιόδων μετάδοσης και σιωπής των σταθμών ισχύει ότι:

$$H_{ON} = \frac{3 - c_{ON}}{2} \quad (11.23)$$

και:

$$H_{OFF} = \frac{3 - c_{OFF}}{2} \quad (11.24)$$

Προκειμένου η συνολική κίνηση να είναι εκρηκτική θα πρέπει διακύμανση των κατανομών των περιόδων μετάδοσης και σιωπής των σταθμών να είναι άπειρη. Επομένως σύμφωνα με τη σχέση (11.13) η παράμετρος σχήματος c_{OFF} της κατανομής των περιόδων σιωπής θα πρέπει να παίρνει τιμές στο διάστημα:

$$1 < c_{OFF} \leq 2 \quad (11.25)$$

Από τις σχέσεις (11.24) και (11.25) προκύπτει ότι η παράμετρος Hurst H_{OFF} θα πρέπει να παίρνει τιμές στο διάστημα:

$$0.5 \leq H_{OFF} < 1 \quad (11.26)$$

Στη μελέτη μας, η τιμή της παραμέτρου Hurst H_{OFF} είναι [102]:

$$H_{OFF} = 0.9 \quad (11.27)$$

Επομένως, από τη σχέση (11.24) προκύπτει:

$$c_{OFF} = 1.2 \quad (11.28)$$

Όμοια, προκειμένου η συνολική κίνηση να είναι εκρηκτική θα πρέπει διακύμανση της κατανομής των περιόδων μετάδοσης των σταθμών να είναι άπειρη. Έτσι σύμφωνα με τη σχέση (11.13) η παράμετρος σχήματος c_{ON} της κατανομής των περιόδων μετάδοσης θα πρέπει να παίρνει τιμές στο διάστημα:

$$1 < c_{ON} \leq 2 \quad (11.29)$$

Από τις σχέσεις (11.23) και (11.29) προκύπτει ότι η παράμετρος Hurst H_{ON} θα πρέπει να παίρνει τιμές στο διάστημα:

$$0.5 \leq H_{ON} < 1 \quad (11.30)$$

Είναι προφανές ότι ισχύει: $c_{ON} > c_{OFF}$. Έτσι, από τις σχέσεις (11.23) και (11.24) προκύπτει:

$$H_{ON} \leq H_{OFF} \quad (11.31)$$

Έτσι, στη μετέπειτα μελέτη, η τιμή της παραμέτρου Hurst H_{OFF} είναι:

$$H_{ON}=0.8 \quad (11.32)$$

Επομένως, από τη σχέση (11.24) προκύπτει:

$$c_{ON} = 1.4 \quad (11.33)$$

11.2.3 Παράμετροι συνολικής self-similar κίνησης

Συμπερασματικά σε ένα δίκτυο M σταθμών που παράγουν συνολικό φορτίο L_t και συνολική κίνηση με ιδιότητες self-similarity, οι παράμετροι των περιόδων μετάδοσης και σιωπής όλων των σταθμών ακολουθούν την κατανομή Pareto με τιμές παραμέτρων:

Παράμετρος	Τιμή
c_{ON}	1.4
c_{OFF}	1.2
α_{ON}	Σχέση (11.21)
α_{OFF}	Σχέση (11.20)

Πίνακας 11-1. Τιμές παραμέτρων σχήματος και θέσης των Pareto κατανομών των ON-OFF πηγών

Η μόνη παράμετρος που πρέπει να υπολογιστεί είναι το πλήθος M των σταθμών προκειμένου η παραγόμενη κίνηση να έχει ιδιότητες self-similarity. Σύμφωνα με τη μελέτη [102], η μέθοδος προσδιορισμού του πλήθους M των σταθμών που παράγουν τη self-similar κίνηση είναι η εξέταση της διακύμανσης της παραγόμενης κίνησης. Συγκεκριμένα, η κλίση της $\log(\text{διακύμανση})$ σε σχέση με τη $\log(\text{πλήθος σταθμών})$ θα πρέπει να έχει σταθερή τιμή $(2H-2)$ [102].

11.2.4 Τυχαίες μεταβλητές για τη γέννηση self-similar κίνησης

Σε περιπτώσεις εξομοίωσης, η γέννηση self-similar συνολικής κίνησης ισοδυναμεί με τη γέννηση για κάθε ένα από τους M σταθμούς:

- της ακολουθίας των χρονικών στιγμών t_n $n=1,2,\dots$ έναρξης των διαδοχικών περιόδων μετάδοσης πακέτων που ακολουθούν την κατανομή Pareto με παραμέτρους που δίνει ο Πίνακας 11-1.
- της ακολουθίας των χρονικών στιγμών t_n' $n=1,2,\dots$ έναρξης των διαδοχικών περιόδων σιωπής που ακολουθούν την κατανομή Pareto με παραμέτρους που δίνει ο Πίνακας 11-1.

Η γέννηση των χρονικών διαστημάτων t_n και t_n' που κατανομούνται κατά Pareto πραγματοποιείται με χρήση της μεθόδου ανάστροφου μετασχηματισμού (inverse transformation) [103].

Συγκεκριμένα, έστω η τυχαία μεταβλητή U που κατανέμεται ομοιόμορφα στο πεδίο τιμών $(0,1)$ και γεννιέται από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Τότε, η τυχαία μεταβλητή X_{ON} που εκφράζει τις διαδοχικές χρονικές στιγμές μετάδοσης t_n $n=1,2,\dots$ ενός σταθμού και κατανέμεται κατά Pareto υπολογίζεται από τη σχέση [103]:

$$X_{ON} = \alpha_{ON} (1 - U)^{-\frac{1}{c_{on}}} \quad (11.34)$$

όπου: α_{ON} και c_{ON} είναι οι παράμετροι που δίνει ο Πίνακας 11-1.

Όμοια, η τυχαία μεταβλητή X_{OFF} που εκφράζει τις διαδοχικές χρονικές στιγμές σιωπής t_n , $n=1,2,\dots$ ενός σταθμού και κατανέμεται κατά Pareto υπολογίζεται από τη σχέση [103]:

$$X_{OFF} = \alpha_{OFF} (1 - U)^{-\frac{1}{c_{OFF}}} \quad (11.35)$$

όπου: α_{OFF} και c_{OFF} είναι οι παράμετροι που δίνει ο Πίνακας 11-1.

Επίσης, η γέννηση κίνησης σε διαφορετικά δίκτυα πρόσβασης πραγματοποιείται με τη χρήση διαφορετικού φύτρου κατά την αρχικοποίηση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών για κάθε δίκτυο πρόσβασης.

Ευρετήριο Συντομογραφιών

CDM (Code Division Multiplexing)	τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού κώδικα
CSMA (Carrier Sense Multiple Access)	πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση φέροντος
CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collisions Avoidance)	πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή συγκρούσεων
LAN (Local Area Network)	τοπικό δίκτυο
MAC (Medium Access Control)	έλεγχος πρόσβασης στο μέσο
MAN (Metropolitan Area Network)	μητροπολιτικό δίκτυο
MANET (Mobile Ad-Hoc Network)	ασύρματο Ad-Hoc δίκτυο
MCA (Multi-channel Control Architecture)	πολυδιαυλική αρχιτεκτονική ελέγχου
OBS (Optical Burst Switching)	τεχνολογία μεταγωγής οπτικού σήματος
TDM (Time Division Multiplexing)	τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού χρόνου
WAN (Wide Area Network)	δίκτυο ευρείας περιοχής
WDM (Wavelength Division Multiplexing)	τεχνική πολύπλεξης επιμερισμού συχνότητας

Ορολογία – Μετάφραση όρων

add-drop multiplexing	προσθαιρητική πολύπλεξη
data slot	χρονική σχισμή
destination stripping	στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον προορισμό
fairness	δίκαιη πρόσβαση στο δίκτυο
fixed-tuned	σταθερά συντονισμένος
module	δομοστοιχείο
multi-data slot	χρονική πολύ-σχισμή
scalability	ικανότητα κλιμάκωσης
source stripping	στρατηγική αποδέσμευσης των χρονικών σχισμών στον αποστολέα
tunable	συντονιζόμενος
unfairness	μη-δίκαιη πρόσβαση στο δίκτυο

Βιβλιογραφία

- [1] R. Ramaswami, K.N. Sivarajan: *Optical Networks: A Practical Perspective*, M. Kaufmann Publishers, Inc., pp. 1-2, USA, 1998.
- [2] P.E. Green: *Fiber Optic Networks*, Prentice-Hall, Inc., USA, 1993.
- [3] N. Mehravari: "Performance and Protocol Improvements for Very High Speed Optical Fiber Local Area Networks Using a Passive Star Topology", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 520-530, Apr. 1990.
- [4] J.C. Lu, L. Kleinrock: "A wavelength division multiple access protocol for high-speed local area networks with a passive star topology", *Performance Evaluation*, Vol. 16, pp. 223-239, 1992.
- [5] I.M.I. Habbab, M. Kavehrad, C.W. Sundberg: "Protocols for Very High-Speed Optical Fiber Local Area Networks Using a Passive Star Topology", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. LT-5, No. 12, pp. 1782-1794, Dec. 1987.
- [6] I.E. Pountourakis: "Performance Evaluation with Receiver Collisions Analysis in Very High-Speed Optical Fiber Local Area Networks Using Passive Star Topology", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 16, No. 12, pp. 2303-2310, Dec. 1998.
- [7] D.S. Kim, C.K. Un: "Performance of contention processing schemes for WDM networks with control channels", *Performance Evaluation*, Vol. 25, pp. 85-104, 1996.
- [8] I.E. Pountourakis: "A multiwavelength control architecture for electronic processing bottleneck reduction in WDMA lightwave networks", *Computer Communications*, Vol. 22, pp. 1468-1480, 1999.
- [9] I.E. Pountourakis: "Asynchronous transmission protocols for WDM LANs using multichannel control architecture", *Computer Communications*, Vol. 24, pp. 610-621, 2001.
- [10] I.E. Pountourakis, A. Stavdas: "A WDM control architecture and destination conflicts analysis", *International Journal of Communication Systems*, Vol. 15, pp. 161-174, 2001.
- [11] I.E. Pountourakis: "Multiwavelength control protocols for WDM networks with restricted data channel collision", *International Journal of Communication Systems*, Vol. 13, pp. 335-352, 2000.
- [12] I.E. Pountourakis: "Design and protocol analysis for passive star topology of a WDM network", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 25, No. 3, pp. 216-220, May 2000.
- [13] G.N.M. Sudhakar, N.D. Georganas, M. Kavehrad: "Slotted Aloha and Reservation Aloha Protocols for Very High-Speed Optical Fiber Local Area Networks Using Passive Star Topology", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 9, No. 10, pp. 1411-1422, Oct. 1991.
- [14] G.I. Papadimitriou: "Centralized Packet Filtering protocols: a new family of MAC protocols for WDM Star Networks", *Computer Communications*, Vol. 22, pp. 11-19, 1999.

- [15] F. Jia, B. Mukherjee, J. Iness: "Scheduling Variable-Length Messages in a Single-Hop Multichannel Local Lightwave Network", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 3, No. 4, Aug. 1995.
- [16] I.E. Pountourakis: "Multireceiver architecture analysis of a synchronous WDMA protocol", *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 339, pp. 145-159, 2002.
- [17] B. Mukherjee: *Optical Communication Networks*, *Mc Graw-Hill Companies, Inc.*, USA, 1997.
- [18] I.E. Pountourakis: "A WDM network architecture with multiple receivers and a synchronous transmission protocol with constraint of data channel collision", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 38, No. 2, pp. 104-108, July 2003.
- [19] G.I. Papadimitriou, A.S. Pomportsis: "A class of centralized high-performance protocols for single-hop lightwave networks", *International Journal of Communication Systems*, Vol. 12, pp. 363-374, 1999.
- [20] M. Herzog, M. Maier, M. Reisslein: "Metropolitan Area Packet-Switched WDM Networks: A Survey on Ring Systems", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 6, No. 2, pp. 2-20, Second Quarter 2004.
- [21] K. Bengi, H.R. van As: "Efficient QoS Support in a Slotted Multihop WDM Metro Ring", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 20, No. 1, pp. 216-227, Jan. 2002.
- [22] L. Dittmann, C. Develder, D. Chiaroni, F. Neri, F. Callegati, W. Koerber, A. Stavdas, M. Renaud, A. Rafel, J. Sole-Pareta, W. Cerroni, N. Leligou, L. Dembeck, B. Mortensen, M. Pickavet, N. Le Sauze, M. Mahony, G. Eilenberger: "The European IST Project DAVID: A Viable Approach Towards Optical Packet Switching", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 21, No. 7, pp. 1026-1040, Sept. 2003.
- [23] K.S. Kim, L.G. Kazovsky: "Design and performance evaluation of scheduling algorithms for unslotted CSMA/CA with backoff MAC protocol in multiple-access WDM ring networks", *Information Sciences*, Vol. 149, pp. 135-149, 2003.
- [24] L. Xu, H.G. Perros, G.N. Rouskas: "A Simulation Study of Access Protocols for Optical Burst-Switched Ring Networks", *NETWORKING 2002*, LNCS 2345, pp. 863-874, 2002.
- [25] C. Jelger, J. Elmirghani: "A Slotted MAC Protocol for Efficient Bandwidth Utilization in WDM Metropolitan Access Ring Networks", *IEEE Transactions on Selected Areas in Communications*, Vol. 21, pp. 1295-1305, 2003.
- [26] C. Jelger, J. Elmirghani: "Performance Evaluation of a new MAC Protocol for WDM Metropolitan Access Ring Networks", *International Journal of Communication Systems*, Vol. 15, pp. 191-202, 2001.
- [27] C. Jelger, J. Elmirghani: "Performance of a slotted MAC Protocol for WDM Metropolitan Access Ring Networks under Self-Similar traffic", in *Proc. ICC 02 International Conference on Communications*, Vol. 5, pp. 2806-2811, 2002.
- [28] M. Jiang, Q. Zeng, Y. Ouyang: "Access Protocol with Efficient Slot Reuse in WDM Metro Ring", *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E88-B, pp. 1685-1688, 2005.

- [29] H. Lin, W. Chang, H. Wu: “FARE: An efficient integrated MAC protocol for differentiated services in WDM metro rings”, *Computer Communications*, Vol. 30, pp. 1315-1330, 2007.
- [30] K. Bengi, H. R. van As: “Efficient QoS Support in a Slotted Multihop WDM Metro Ring”, *IEEE Transactions on Selected Areas in Communications*, Vol. 20, pp. 216-227, 2002.
- [31] K. Bengi: “Access protocols for an efficient and fair packet-switched IP-over-WDM metro network”, *Computer Networks*, Vol. 44, pp. 247-265, 2004.
- [32] M. Ajmone Marsan, A. Bianco, E. Leonardi, M. Meo, F. Neri: “On the capacity of MAC protocols for all-optical WDM multi-rings with tunable transmitters and fixed receivers”, in *Proc. IEEE INFOCOM 1996*, pp. 1206-1216, 1996.
- [33] M. Ajmone Marsan, A. Bianco, E. Leonardi, F. Neri, S. Toniolo: “An Almost Optimal MAC Protocol for All-Optical WDM Multi-Rings with Tunable Transmitters and Fixed Receivers”, in *Proc. ICC 97 International Conference on Communications*, pp. 437-442, 1997.
- [34] M. Ajmone Marsan, A. Bianco, E. Leonardi, E. Meo, F. Neri: “MAC Protocols and Fairness Control in WDM Multi-rings with Tunable Transmitters and Fixed Receivers”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, pp.1230–1244, 1996.
- [35] S. Bregni, D. Carzaniga, R. Gaudino, A. Pattavina: “Slot Synchronization of WDM Packet-Switched Slotted Rings: the WONDER Project”, in *Proc. ICC 06 International Conference on Communications*, pp. 2556-2561, 2006.
- [36] M. Herzog, M. Maier, M. Reisslein: “Metropolitan Area Packet-Switched WDM Networks: A Survey on Ring Systems”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol.6, pp. 2-20, 2004.
- [37] H. Yang, M. Herzog, M. Maier, M. Reisslein: “Metro WDM Networks: Performance Comparison of Slotted Ring and AWG Star Networks”, *IEEE Transactions on Selected Areas in Communications*, Vol. 22, pp. 1460-1473, 2004.
- [38] H.-S. Yang, M. Herzog, M. Maier, M. Reisslein: “Metro WDM Networks: Performance Comparison of Ring and Star Topologies”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 22, No. 8, pp. 1460-1473, Oct. 2004.
- [39] M.S. Chen, N.R. Dono, R. Ramaswami: “A Media-Access Protocol for Packet-Switched Wavelength Division Multiaccess Metropolitan Area Networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 8, No. 6, pp. 1048-1056, Aug. 1990.
- [40] B. Mukherjee: WDM-based local lightwave networks Part I: single-hop systems, *IEEE Network*, pp. 12-27, May 1992.
- [41] C.A. Brackett: “Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 8, No. 6, pp. 948-964, 1990.
- [42] W. Szpankowski: “Packet Switching in Multiple Radio Channels: Analysis and Stability of a Random Access System”, *Computer Networks*, Vol. 7, pp. 17-26, 1983.
- [43] I.E. Pountourakis, E.D. Sykas: “Analysis, stability and optimization of Aloha-type protocols for multichannel networks”, *Computer Communications*, Vol. 15, No.10, pp. 619-629, Dec. 1992.

- [44] I.E. Pountourakis, E.D. Sykas: “Multichannel Multiple Queue Protocols”, *Communication Networks*, Vol. 7, No. 6, pp. 553-563, Dec. 1996.
- [45] I.E. Pountourakis, E.D. Sykas, E.N. Protonotarios: “Stability and throughput optimization of multichannel slotted non-persistent CSMA Protocol”, *Computer Communications*, Vol. 18, No.12, pp. 949-958, Dec. 1995.
- [46] W. Yue, Y.Matsumoto: “Exact evaluation of multi-traffic for wireless PCS networks with multi-channel”, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1970, pp. 427-438, 2000.
- [47] Z. Liu, M. El Zarki: “Performance analysis of DS-CDMA with slotted ALOHA random access for packet PCNs”, *Wireless Networks*, Vol. 1, pp. 1-16, 1995.
- [48] M. Coupechoux, B. Baynat, C. Bonnet, V. Kumar: “Modeling of a slotted MAC protocol for MANETs”, *International Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MADNET 2003)*, Mar. 2003.
- [49] M. Ajmone Marsan, D.Roffinella: “Multichannel local area network Protocols”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, SAC-1, pp. 885-897, 1983.
- [50] M. Ajmone Marsan, F. A. Neri: “Simulation study of delay in multichannel CSMA/CD protocols”, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 39, pp. 1590-1603, 1991.
- [51] D.S. Park, C.K Un: “Performance of multichannel CSMA/CD protocol with detection of destination conflicts”, *Electronics Letters*, Vol. 25, pp. 1690-1692, 1989.
- [52] R. Garces, J.J. Garcia-Luna-Aceves: “Collision avoidance and resolution multiple access with transmission queues”, *Wireless Networks*, Vol. 5, pp. 95-109, 1999.
- [53] R. Garces, J.J. Garcia-Luna-Aceves: “Collision Avoidance and Resolution Multiple Access with Transmission Groups”, *IEEE INFOCOM '97*, April 1997.
- [54] R. Garces, J.J. Garcia-Luna-Aceves: “Collision Avoidance and Resolution Multiple Access for Multichannel Wireless Networks”, *IEEE INFOCOM 2000*, Mar. 2000.
- [55] S. Wiwatthanasaranrom, A. Phonphoem: “Multichannel MAC Protocol for Ad-Hoc Wireless Networks”, *7th National Computer Science and Engineering Conference (NCSEC 2003)*, pp. 115-120, Oct. 2003.
- [56] IEEE Std 802.11-1997: “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) specifications”, *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., USA*, 1997.
- [57] J. So, N. Vaidya: “Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver”, *MobiHoc 2004 - Fifth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, May 2004.
- [58] J.Q. Bao, L. Tong: “Performance Analysis of Slotted Aloha Random Access Ad-Hoc Networks with Multipacket Reception”, *MILCOM 1999 - IEEE Military Communications Conference*, No. 1, pp. 251 - 255, Oct. 1999.
- [59] H.-C. Leligou, J. Angelopoulos, C. Linardakis A. Stavdas: “A MAC protocol for efficient multiplexing QoS-sensitive and best-effort traffic in dynamically configurable WDM rings”, *Computer Networks*, Vol. 44, pp. 305-317, 2004.
- [60] K. Soo Kim, D. Gutierrez, Fu-Tai An, G. Kazovsky: “Batch Scheduling Algorithm for SUCCESS WDM-PON”, in *Proc. IEEE Globecom*, pp. 1835-1839, 2004.

- [61] S.M. Gemelos, I.M. White, D. Wonglumsom, K. Shrikhande, T. Ono, L.G. Kazovsky: “WDM Metropolitan Area Network Based on CSMA/CA Packet Switching”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, No. 11, pp. 1512-1514, Nov. 1999.
- [62] I.M. White, K. Shrikhande, M.S. Rogge, S.M. Gemelos, D. Wonglumsom, G. Desa, Y. Fukashiro, L.G. Kazovsky: “Architecture and Protocols for HORNET: A Novel Packet-over-WDM Multiple-Access MAN”, *GLOBECOM 2000*, Nov. 2000.
- [63] I.M. White, M.S. Rogge, K. Shrikhande, L.G. Kazovsky: “A Summary of the HORNET Project: A Next-Generation Metropolitan Area Network”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 21, No. 9, pp. 1478-1494, Nov. 2003.
- [64] I.M. White, M.S. Rogge, K. Shrikhande, L.G. Kazovsky: “Design of a control-channel-based media-access-control protocol for HORNET”, *Journal of Optical Networking*, Vol. 1, No. 12, pp. 460-473, Dec. 2002.
- [65] K. Shrikhande, A. Srivatsa, I.M. White, M.S. Rogge, D. Wonglumsom, S.M. Gemelos, L.G. Kazovsky: “CSMA/CA MAC Protocols for IP-HORNET: An IP over WDM Metropolitan Area Ring Network”, *GLOBECOM 2000*, Nov. 2000.
- [66] K. Shrikhande, I.M. White, D. Wonglumsom, S.M. Gemelos, M.S. Rogge, Y. Fukashiro, M. Avenarius, L.G. Kazovsky: “HORNET: A Packet-Over-WDM Multiple Access Metropolitan Area Ring Network”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No. 10, pp. 2004-2016, Oct. 2000.
- [67] I.M. White, D. Wonglumsom, K. Shrikhande, S.M. Gemelos, M.S. Rogge, L.G. Kazovsky: “The architecture of HORNET: A packet-over-WDM multiple-access optical metropolitan area ring network”, *Computer Networks*, Vol. 32, pp. 587-598, 2000.
- [68] D. Wonglumsom, I.M. White, K. Shrikhande, M.S. Rogge, S.M. Gemelos, F.-T. An, Y. Fukashiro, M. Avenarius, L.G. Kazovsky: “Experimental Demonstration of an Access Point for HORNET - A Packet-over-WDM Multiple-Access MAN”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 18, No. 12, pp. 1709-1716, Dec. 2000.
- [69] I.M. White, M.S. Rogge, K. Shrikhande, Y. Fukashiro, D. Wonglumsom, F.-T. An, L.G. Kazovsky: “Experimental Demonstration of a Novel Media Access Protocol for HORNET: A Packet-over-WDM Multiple-Access MAN Ring”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 12, No. 9, pp. 1264-1266, Sept. 2000.
- [70] D. Wonglumsom, I.M. White, S.M. Gemelos, K. Shrikhande, L.G. Kazovsky: “HORNET - A Packet-Switched WDM Network: Optical Packet Transmission and Recovery”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, No. 12, pp. 1692-1694, Dec. 1999.
- [71] I.M. White, Y. Fukashiro, K. Shrikhande, D. Wonglumsom, M.S. Rogge, M. Avenarius, L.G. Kazovsky: “Experimental Demonstration of a Media Access Protocol for HORNET: A WDM Multiple Access Metropolitan Area Ring Network”, *OFC 2000*, March 2000.
- [72] I.M. White, E. Shih-Tse Hu, Yu-Li Hsueh, K. Shrikhande, M.S. Rogge, L.G. Kazovsky: “Demonstration and System Analysis of the HORNET Architecture”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, pp. 2489-2498, 2003.
- [73] E. Hyytia, L. Nieminen: “Analytical Loss Models for MAC Protocols in Optical Ring Network Operating under a Static Traffic Load”, *2004 International Symposium on*

- Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS '04)*, July 2004.
- [74] R. Barry, P.A. Humblet: “Models of Blocking Probability in All-Optical Networks with and without Wavelength Changers”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, pp. 858-867, June 1996.
- [75] J.Y. Wei, J.L. Pastor, R.S. Ramamurthy, Y. Tsai: “Just-in-time optical burst switching for multi-wavelength networks”, *Proc. of 5th International Conference on Broadband Communications – BC '99*, pp. 339-352, 1999.
- [76] C. Qiao, M.Yoo: “Optical burst switching (OBS) – A new paradigm for an optical Internet”, *Journal of High Speed Networks*, Vol. 8, No. 1, pp. 69-84, Jan. 1999.
- [77] Z. Rosberg, H. Le Vu, M. Zukerman, J. White: “Blocking Probabilities of Optical Burst Switching Networks Based on Reduced Load Fixed Point Approximations”, *IEEE INFOCOM 2003*, April 2003.
- [78] N. Barakat, E.H. Sargent: “Performance Analysis of Optical Burst Switching Networks with and without Class Isolation”, *GLOBECOM 2003*, Dec. 2003.
- [79] Y. Wang, B. Ramamurthy: “CPQ: a Control Packet Queuing Optical Burst Switching Protocol for Supporting QoS”, *BROADNETS 2004 First Annual International Conference on Broadband Networks*, Oct. 2004.
- [80] M. de Vega Rodrigo, J. Gotz: “An Analytical Study of Optical Burst Switching Aggregation Strategies”, *BROADNETS 2004 First Annual International Conference on Broadband Networks*, Oct. 2004.
- [81] C. M. Gauger, M. Kohn, J. Scharf: “Comparison of Contention Resolution Strategies in OBS Network Scenarios”, *6th International Conference on Transparent Optical Networks ICTON 2004*, July 2004.
- [82] Y. Arakawa, N. Yamanaka, I. Sasase: “Performance of Optical Burst Switched WDM Ring Network with TFR System”, *First IFIP Optical Networks & Technologies Conference 2004 (OpNeTec2004)*, pp.95-102, Oct. 2004.
- [83] F. Xue, S.J. Ben Yoo, H. Yokoyama, Y. Horiuchi: “Performance comparison of optical burst and switched networks”, *Optical Fiber Communication Conference*, 2005.
- [84] A. Louridas, K. Panagiotidou, N. Gomes: “Simulation of Optical Burst Switching Protocol and Physical Layers”, *London Communications Symposium*, Sept. 2002.
- [85] A. Maach, G.v. Bochmann, H. Mouftah: “Contention avoidance in optical burst switching”, *ICN'04*, Feb. 2004.
- [86] J.C. Little: “A Proof of the Queueing Formula: $L=\lambda W$ ”, *Operations Research*, Vol. 9, pp. 383-387, 1961.
- [87] I. Kaminow, T. Koch, *Optical Fiber Telecommunications IIIA*, New York: Academic, 1997.
- [88] B. Mukherjee: “WDM optical communication networks: Progress and Challenges”, *IEEE Transactions on Selected Areas in Communications*, Vol.18, pp. 1810-1824, 2000.

- [89] T. Lee, K. Lee, S. Park: “Optimal routing and wavelength assignment in WDM ring networks”, *IEEE Transactions on Selected Areas in Communications*, Vol.18, pp. 2146-2154, 2000.
- [90] A. Bononi, Scaling WDM slotted ring networks, in *Proc. Of Information Sciences and Systems Conference*, Vol. 1, pp. 659-665, 1998.
- [91] M. MacGregor, D. Stamatelakis, R. Iraschko, The Relative Utility of Three Optical Network Properties in Future Dynamic Optical Networks, in *Proc. IASTED WOC 2002 Wireless and Optical Communications*, pp. 191-195, 2002.
- [92] A. K. Turuk, R. Kumar, QoS provisioning in WDM ring networks with tunable transceivers, *Journal of High Speed Networks*, Vol. 14, pp. 317 – 339, 2005.
- [93] A. K. Turuk, R. Kumar, R. Badrinath, A token-based distributed algorithm for medium access in an optical ring network, *Optics Communications*, Vol. 231, pp. 199–212, 2004.
- [94] A. K. Turuk, R. Kumar, A scalable and collision-free MAC protocol for all-optical ring networks, *Computer Communications*, Vol. 27, pp. 1453-1463, 2004.
- [95] M. Ajmone Marsan, A. Bianco, E. Gibert Abos and E. Leonardi, A comparison of access strategies in all-optical slotted WDM rings with switched delay lines, *Journal of High Speed Networks* 6, pp. 237–246, 1997.
- [96] M. Morris Mano, and M. D. Ciletti, *Digital design*. Fourth Edition, Pearson Prentice Hall, pp. 17-18, 2007.
- [97] J. Cai, and A. Fumagalli, “An analytical framework for performance comparison of bandwidth reservation schemes in WDM ring”, in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 41-47, 2002.
- [98] Cai, A. Fumagalli, and I. Chlamtac, “The Multitoken Interarrival Time (MTIT) access protocol for supporting variable size packets over WDM ring network”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.18, pp. 2094-2104, Oct. 2000.
- [99] W. Willinger, and V. Paxson, “Where mathematics meets the Internet”, *Notices of American Mathematical Society*, Vol. 45, pp. 961-970, Sep. 1998.
- [100] W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger, and D. Wilson, “On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 2, pp. 1-15, Feb. 1994.
- [101] V. Paxson, and S. Floyd, “Wide area traffic: The failure of Poisson modelling”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol..3, pp.226-244, Jun.1995.
- [102] W. Willinger, M. Taqqu, R. Sherman, and D. Wilson, “Self-similarity through high-variability: Statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 5, pp. 71-86, Feb. 1997.
- [103] M. Evans, N. Hastings, B. Peacock, “Statistical Distributions Third Edition”, *Wiley Editions*, 2000.

Δημοσιεύσεις – Βραβεύσεις

Δημοσιεύσεις σε Περιοδικά

- [J.1] I.E.Pountourakis, P.A.Baziana: “Multi-channel Multi-access Protocols with Receiver Collision Markovian Analysis”, *WSEAS Transactions on Communications, Issue 8, Vol. 4, ISSN 1109-2742, pp. 564-569, Aug. 2005.*
- [J.2] I.E.Pountourakis, P.A.Baziana: “Markovian Receiver Collision Analysis of High-Speed Multi-channel Networks”, *Mathematical Methods in the Applied Sciences Journal, Vol. 29, Issue 5, pp. 575-593, March 2006.*
- [J.3] P.A.Baziana, I.E.Pountourakis: “A Dynamic Procedure with Propagation Delay Analysis for Performance Optimization in WDM Networks”, *WSEAS Transactions on Computers Research, Issue 1, Vol. 1, ISSN 1991-8755, pp. 1-6, Nov. 2006.*
- [J.4] P.A.Baziana, I.E.Pountourakis: “A Reservation Protocol Analysis for Multi-Channel Wireless Networks”, *Journal of Communications Software and Systems (JCOMSS), Vol. 2, No. 4, pp. 340-346, Dec. 2006.*
- [J.5] I.E.Pountourakis, P.A.Baziana: “A Collision-free with Propagation Latency WDMA Protocol Analysis” *Optical Fiber Technology Journal, Vol. 13, Issue 2, pp. 160-169, April 2007.*
- [J.6] P.A.Baziana, I.E.Pountourakis: “Performance Optimization with Propagation Delay Analysis in WDM Networks” *Computer Communications Journal, Vol. 30, Issue 18, pp. 3572–3585, Dec 2007.*
- [J.7] P.A.Baziana, I.E.Pountourakis: “An Efficient Metropolitan WDM Ring Architecture for a Slotted Transmission Technique”, *IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 26, No. 19, pp. 3307-3317, October 1, 2008.*
- [J.8] P.A.Baziana, I.E.Pountourakis: “A Slotted Access Control Protocol for Metropolitan WDM Ring Networks”, *Elsevier Optical Fiber Technology Journal, Vol. 15, pp. 100-118, March 2009.*

Δημοσιεύσεις σε Συνέδρια με Κρίση Πλήρους Κειμένου

- [C.1] P.A.Baziana, I.E.Pountourakis: “Multi-channel MAC protocol: Performance mathematical analysis and comparison”, in: *Proc. of 12th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM 2004), pp. 146-150, October 10-13, Dubrovnik-Split-Venice.*
- [C.2] I.E.Pountourakis, P.A.Baziana: “Multi-channel Multi-access Protocols with Receiver Collision Markovian Analysis”, in: *Proc. of 9th WSEAS International Conference on COMMUNICATIONS, Vouliagmeni, CD-ROM paper No 497-351, July 11-16, 2005, Athens, Greece.*
- [C.3] I.Pountourakis, P.Baziana, G.Panagiotopoulos: “Propagation Delay and Receiver Collision Analysis in WDMA Protocols”, in: *Proc. of 5th International Symposium Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2006), pp. 120-124, July 19-21, 2006 Patra Greece.*

- [C.4] P.A.Baziana, I.E.Pountourakis: “A Dynamic Procedure with Propagation Delay Analysis for Performance Optimization in WDM Networks”, *in: Proc. of 4th WSEAS International Conference on APPLIED ELECTROMAGNETICS, WIRELESS and OPTICAL COMMUNICATIONS (ELECTROSCIENCE '06)*, pp. 11-16, CD-ROM paper No 539-480, Nov. 20-22, 2006, Venice, Italy.
- [C.5] P.A.Baziana, I.E.Pountourakis: “Study of an Optical Multi-Wavelength Slotted Ring Protocol with Tunable Transceivers”, *in: Proc. of Sixth IASTED International Conference on Communication, Systems and Networks (CSN 2007)*, pp. 132-137, ISBN Hardcopy 978-0-88986-695-9, Aug. 29-31, 2007, Palma de Mallorca, Spain.
- [C.6] P.A.Baziana, I.E.Pountourakis: “Control System Design of a Conflict-Free MAC Protocol for a WDM MAN”, *in: Proc. of 10th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2008)*, Vol. III, pp. 85-88, June 22-26, 2008, Athens, Greece.
- [C.7] P.A.Baziana, I.E.Pountourakis: “A Control Channel Architecture with Collisions Avoidance Strategy for Performance Improvement in WDM Ring Networks”, *in: Proc. of 12th WSEAS International Conference on COMMUNICATIONS*, pp. 141-146, July 22-25, 2008, Crete Island, Greece.

Βραβεύσεις

Best Student Paper Award for the paper: “Multi-channel Multi-access Protocols with Receiver Collision Markovian Analysis”, *WSEAS International Conference on COMMUNICATIONS, Vouliagmeni, July 2005*.