**ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΛΗΣΕΩΝ
ΠΟΛΥΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ
ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΕ
ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Γ. ΒΑΣΙΛΑΚΗ

Διπλωματούχου Μηχανικού Η/Υ & Πληροφορικής

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ: 264

ΙΟΥΛΙΟΣ 2011

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η παρούσα διδακτορική διατριβή με θέμα:

ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΛΗΣΕΩΝ ΠΟΛΥΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

του **Βασιλείου Γ. Βασιλάκη**, Διπλωματούχου Μηχανικού Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής (Πανεπιστήμιο Πατρών) παρουσιάστηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών (ΗΜ&ΤΥ) του Πανεπιστημίου Πατρών, στις 24 Νοεμβρίου 2010 και εξετάστηκε και εγκρίθηκε από την ακόλουθη Εξεταστική Επιτροπή:

Μιχαήλ Λογοθέτης, Καθηγητής (Τμήμα ΗΜ&ΤΥ, Παν. Πατρών), Επιβλέπων Καθηγητής.

Βασίλειος Μακίος, Ομότιμος Καθηγητής (Τμήμα ΗΜ&ΤΥ, Παν. Πατρών), Μέλος της Συμβουλευτικής Επιτροπής, Παν. Πατρών.

Σπύρος Δεναζής, Επίκουρος Καθηγητής (Τμήμα ΗΜ&ΤΥ, Παν. Πατρών), Μέλος της Συμβουλευτικής Επιτροπής, Παν. Πατρών.

Γεώργιος Κοκκινάκης, Ομότιμος Καθηγητής (Τμήμα ΗΜ&ΤΥ, Παν. Πατρών).

Ιωάννης Μοσχολιός, Λέκτορας (Τμήμα Επιστήμης & Τεχνολογίας Τηλ/νίων, Παν. Πελοποννήσου).

Ευστάθιος Συκάς, Καθηγητής (Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ).

Μιχαήλ Θεολόγου, Καθηγητής (Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ).

Πάτρα, 24 Νοεμβρίου, 2010

Ο Επιβλέπων Καθηγητής

Ο Πρόεδρος του Τμήματος

Α. Τζες

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ενσύρματης Τηλεπικοινωνίας, του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, του Πανεπιστημίου Πατρών στα πλαίσια της ερευνητικής δραστηριότητας του εργαστηρίου στην περιοχή των ασύρματων δικτύων και της τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Η παρούσα διατριβή συνοδεύεται από ένα CD, το οποίο περιλαμβάνει όλο το λογισμικό (υλοποίηση αναλυτικών μοντέλων και προσομοιώσεων) που έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια της διατριβής. Το CD βρίσκεται στη διάθεση του επιβλέποντος καθηγητή.

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με βοήθησαν, με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, στην ολοκλήρωση της διατριβής αυτής και ιδιαίτερα:

Τον καθηγητή κ. Μ. Λογοθέτη, πρόεδρο της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για την ανάθεση του θέματος, την ουσιαστική επίβλεψη και καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής, την άψογη συνεργασία μας και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια.

Τους καθηγητές κ. Β. Μακίό, κ. Σ. Δενάζη, κ. Γ. Κοκκινάκη, κ. Ι. Μοσχολιό, κ. Ε. Συκά και κ. Μ. Θεολόγου, μέλη της επταμελούς συμβουλευτικής επιτροπής για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους σε διάφορα σημεία της διατριβής.

Τους συναδέλφους Γ. Βαρδάκα, Γ. Κάλλο, Γ. Φάκο και Γ. Δασκαλόπουλο με τους οποίους είχα τη χαρά να συνεργαστώ όλα αυτά τα χρόνια.

Πάτρα, Ιούλιος 2011

Βασίλειος Γ. Βασιλάκης

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	5
Κατάλογος συντομεύσεων.....	13
Περίληψη.....	17
Abstract.....	18
Εισαγωγή.....	19

Ενότητα Α: Μοντέλα απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης με σταθερό ρυθμό μετάδοσης

1. Επισκόπηση Υφισταμένων Μοντέλων Απώλειας Κλήσεων για Ενσύρματα Συνδεσιμοστρεφή Δίκτυα	31
1.1. Το μοντέλο απωλειών κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, των Kaufman-Roberts (Erlang Multi-rate Loss Model - EMLM).....	31
1.1.1 Περιγραφή του Μοντέλου	31
1.1.2 Εξίσωση Τοπικής Ισορροπίας και Μερίδιο Εύρους Ζώνης.....	32
1.1.3 Πιθανότητες Καταστάσεων και Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων.....	33
1.1.4 Ένα Μικρό Παράδειγμα	34
1.2. Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (Connection Dependent Threshold Model - CDTM).....	36
1.2.1 Περιγραφή του Μοντέλου	36
1.2.2 Ένα Μικρό Παράδειγμα	37
1.2.3 Βασικές Προσεγγίσεις	38
1.2.4 Εξίσωση Τοπικής Ισορροπίας και Μερίδιο Εύρους Ζώνης.....	39
1.2.5 Πιθανότητες Καταστάσεων και Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων.....	40
1.2.6 Αριθμητικά Αποτελέσματα για τα EMLM και CDTM	41
2. Επισκόπηση Υφισταμένου Μοντέλου Απώλειας Κλήσεων για Ασύρματα Δίκτυα W-CDMA.....	45
2.1. Το μοντέλο απωλειών κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, W-EMLM (Wireless EMLM)	45

2.1.1	Περιγραφή του Μοντέλου	45
2.1.2	Πιθανότητες Τοπικής Απώλειας	48
2.1.3	Πιθανότητες Καταστάσεων	50
2.1.4	Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων	53
3.	Νέα Μοντέλα Απωλειών Κλήσεων για Ασύρματα Δίκτυα W-CDMA	55
3.1.	WH-EMLM (Wireless Handoff EMLM): Το μοντέλο απωλειών κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης σε ασύρματα δίκτυα W-CDMA, με κίνηση μεταπομπής.	55
3.1.1	Περιγραφή του Μοντέλου	55
3.1.2	Παρεμβολές και Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων	56
3.1.3	Παράγοντας Φορτίου και Φορτίο Κυψέλης.....	56
3.1.4	Πιθανότητες Τοπικής Απώλειας	57
3.1.5	Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων	58
3.1.6	Γενίκευση σε Πολλές Κατηγορίες	62
3.1.7	Αριθμητικά Αποτελέσματα (1 ^ο παράδειγμα).....	64
3.1.8	Αριθμητικά Αποτελέσματα (2 ^ο παράδειγμα).....	67
3.2.	W-CDTM (Wireless CDTM): Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης σε ασύρματα δίκτυα W-CDMA.	69
3.2.1	Περιγραφή του Μοντέλου	69
3.2.2	Ένα Μικρό Παράδειγμα	73
3.2.3	Βασικές Προσεγγίσεις	74
3.2.4	Πιθανότητες Τοπικής Απώλειας	75
3.2.5	Πιθανότητες Καταστάσεων	77
3.2.6	Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων	80
3.3.	Αριθμητικά Αποτελέσματα για το W-CDTM και W-EMLM	80
3.3.1	1 ^ο Παράδειγμα – Αποτελέσματα του W-EMLM.....	81
3.3.2	2 ^ο Παράδειγμα – Αποτελέσματα του W-CDTM	82
3.3.3	3 ^ο Παράδειγμα – Μεταβαλλόμενη διακυψελική παρεμβολή	84
3.3.4	4 ^ο Παράδειγμα – Τρεις Κατηγορίες Κίνησης	87
4.	Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα επί της ενότητας Α.....	91

Ενότητα Β: Μοντέλα απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης ψευδο-τυχαίας κίνησης με σταθερό ρυθμό μετάδοσης

5. Επισκόπηση Υφισταμένων Μοντέλων Απώλειας Κλήσεων για Ενσύρματα Συνδεσιμοστρεφή Δίκτυα	95
5.1. Το μοντέλο απωλειών ψευδο-τυχαίων κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, EnMLM (Engset Multirate Loss Model)	95
5.2. Το μοντέλο κατοφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης και πεπερασμένες πηγές κίνησης (Finite CDTM).....	97
5.3. Αριθμητικά Αποτελέσματα για τα EnMLM και F-CDTM.....	100
6. Νέα Μοντέλα Απωλειών Κλήσεων για Ασύρματα Δίκτυα W-CDMA	101
6.1. W-EnMLM (Wireless EnMLM): Το μοντέλο απωλειών ψευδο-τυχαίων κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, για ασύρματα δίκτυα W-CDMA.....	101
6.1.1 Αριθμητικά Αποτελέσματα.....	102
6.2. WH-EnMLM (Wireless Handoff EnMLM): Το μοντέλο απωλειών ψευδο-τυχαίων κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, για ασύρματα δίκτυα W-CDMA με κίνηση μεταπομπής.	105
6.2.1 Αριθμητικά Αποτελέσματα.....	107
6.3. WF-CDTM (Wireless Finite CDTM): Το μοντέλο κατοφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης και πεπερασμένες πηγές κίνησης, για ασύρματα δίκτυα W-CDMA.....	111
6.4. Αριθμητικά Αποτελέσματα για τα W-EnMLM και WF-CDTM	113
6.4.1 1 ^ο παράδειγμα – Αποτελέσματα του W-EnMLM.....	113
6.4.2 2 ^ο παράδειγμα – Αποτελέσματα του WF-CDTM.....	115
7. Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα επί της ενότητας Β.....	119

Ενότητα Γ: Μοντέλα απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης κίνησης με ελαστικό ρυθμό μετάδοσης σε ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα

8. Επισκόπηση Υφισταμένου Μοντέλου Απώλειας Κλήσεων για Τυχαία Κίνηση	125
8.1. E-MLM (Extended MLM): Το μοντέλο απωλειών για τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες.....	125
8.1.1 Περιγραφή του Μοντέλου	125
8.1.2 Υπολογισμός των πιθανοτήτων καταστάσεων	128
9. Νέα Μοντέλα Απωλειών Κλήσεων με Εναλλακτικές Απαιτήσεις Εξυπηρέτησης	133
9.1. E-CDTM (Extended CDTM): Το μοντέλο κατωφλίων για τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες.....	133
9.1.1 Περιγραφή του Μοντέλου	133
9.1.2 Υποθέσεις του Μοντέλου	134
9.1.3 Ένα Μικρό Παράδειγμα	137
9.1.4 Πιθανότητες Καταστάσεων	141
9.1.5 Μετρικές Απόδοσης.....	144
9.2. E-CDTM/BR (E-CDTM/Bandwidth Reservation): Το μοντέλο κατωφλίων, για τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες, με σύστημα δέσμευσης εύρους ζώνης.....	145
9.3. Προσδιορισμός των Παραμέτρων Δέλτα στο E-CDTM.....	147
9.4. Αριθμητικά Αποτελέσματα για το E-CDTM και το E-CDTM/BR	150
9.4.1 1 ^ο Παράδειγμα	150
9.4.2 2 ^ο Παράδειγμα	157
9.4.3 3 ^ο Παράδειγμα	159
9.5. EF-CDTM (Extended Finite CDTM): Το μοντέλο κατωφλίων για ψευδο-τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες.....	161
9.5.1 Περιγραφή του μοντέλου	161
9.5.2 Ένα μικρό παράδειγμα.....	164
10. Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα επί της ενότητας Γ	167
11. Εφαρμογές Μοντέλων Απωλειών Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης σε Οπτικά Δίκτυα.....	169

11.1.	Οπτικά δίκτυα πρόσβασης	169
11.2.	Εφαρμογή της TDMA τεχνολογίας στα PONs	170
11.2.1	ATM PONs	171
11.2.2	Ethernet PON (EPON)	171
11.2.3	Gigabit PON.....	173
11.3.	Εφαρμογή της OCDMA τεχνολογίας στα PONs	173
11.4.	Μοντέλο για υβριδικά παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης (Passive Optical Networks, PON), τεχνολογίας TDM-WDM (Time Division Multiplexing – Wavelength Division Multiplexing).....	175
11.4.1	Μοντέλο εξυπηρέτησης υβριδικού TDM-WDM PON.....	175
11.4.2	Μοντέλα για κατηγορίες κίνησης με άπειρο πλήθος πηγών κίνησης	176
11.4.3	Μοντέλα για κατηγορίες κίνησης με πεπερασμένο πλήθος πηγών κίνησης.....	179
11.5.	Μοντέλο για υβριδικά παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης, PON, τεχνολογίας WDM-OCDMA (Wavelength Division Multiplexing – Code Division Multiple Access).	181
11.5.1	Περιγραφή μοντέλου για το WDM-OCDMA PON	181
11.5.2	Πιθανότητα αποτυχίας σύνδεσης.....	182
11.5.3	Ρυθμός εξυπηρέτησης μήκους κύματος – Πιθανότητα Απώλειας Κλήσεων	183

Κατάλογος συντομεύσεων

APON	ATM Passive Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BER	Bit Error Rate
bps	bits per second
BPON	Broadband Passive Optical Network
BS	Base Station
CAC	Call Admission Control
CATV	Community Antenna Television
CBP	Call Blocking Probability
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CDTM	Connection-Oriented Threshold Model
CFP	Connection Failure Probability
dB	decibel
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
DSL	Digital Subscriber Line
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifiers
EnMLM	Engset Multi-rate Loss Model
EMLM	Erlang Multi-rate Loss Model
E-CDTM	Extended Connection-Oriented Threshold Model
E-CDTM/BR	E-CDTM/Bandwidth Reservation
EF-CDTM	Finite Connection-Oriented Threshold Model

EPON	Ethernet Passive Optical Network
F-CDTM	Extended Finite Connection-Oriented Threshold Model
GPON	Gigabit Passive Optical Network
Kbps	Kilobits per second
LAN	Local Area Network
LB	Local Blocking
LBF	Local Blocking Factor
LBP	Local Blocking Probability
MAC	Medium Access Control
MAI	Multiple Access Interference
NR	Noise Raise
OCDM	Optical Code Division Multiplexing
OCDMA	Optical Code Division Multiple Access
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Network Unit
PASTA	Poisson Arrivals See Time Averages
PF	Passage Factor
PMD	Physical Medium-Dependent
PON	Passive Optical Network
QoS	Quality of Service
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VDSL	Very high bit-rate DSL
VLAN	Virtual Local Area Network

W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
W-CDTM	Wireless Connection-Oriented Threshold Model
WDM	Wavelength Division Multiplexing
W-EMLM	Wireless Erlang Multi-rate Loss Model
W-EnMLM	Wireless Engset Multi-rate Loss Model
WF-CDTM	Wireless Finite Connection-Oriented Threshold Model
WH-EnMLM	Wireless Handoff Engset Multi-rate Loss Model
WH-EMLM	Wireless Handoff Erlang Multi-rate Loss Model

Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται την ανάλυση και προσομοίωση των συστημάτων απωλειών πολυδιάστατης τηλεπικοινωνιακής κίνησης, σε επίπεδο κλήσεων. Στα πλαίσια της διατριβής έχουν μελετηθεί ασύρματα δίκτυα τεχνολογίας W-CDMA, ενσύρματα συνδεσιμостρεφή δίκτυα και οπτικά δίκτυα. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα ασύρματα δίκτυα.

Η ανάλυση των συστημάτων απωλειών κίνησης εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις διαδικασίες άφιξης και εξυπηρέτησης των κλήσεων. Στην διδακτορική αυτή διατριβή προτείνονται οκτώ νέα μοντέλα απωλειών κλήσεων. Τα έξι από αυτά είναι κατάλληλα για την ανάλυση της απόδοσης σε επίπεδο κλήσεων των ασύρματων δικτύων τεχνολογίας W-CDMA. Τα υπόλοιπα δύο είναι γενικά μοντέλα, κατάλληλα για ενσύρματα συνδεσιμостρεφή τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και οπτικά δίκτυα.

Ανάλογα με την διαδικασία άφιξης των κλήσεων στο σύστημα, διακρίνουμε δύο είδη κίνησης: *τυχαία* και *ψευδο-τυχαία*. Η τυχαία κίνηση παράγεται όταν η διαδικασία άφιξης των κλήσεων στο σύστημα είναι Poisson. Αυτό αντιστοιχεί στην υπόθεση ότι έχουμε άπειρο πλήθος πηγών που παράγουν κλήσεις. Όταν το πλήθος των πηγών είναι πεπερασμένο, τότε παράγεται ψευδο-τυχαία κίνηση.

Ανάλογα με τις απαιτήσεις των κλήσεων σε πόρους και σε χρόνο εξυπηρέτησης κατά την άφιξή τους στο σύστημα, διακρίνουμε τρία είδη κίνησης: *σταθερή*, *ελαστική* και *προσαρμοζόμενη*. Η σταθερή κίνηση παράγεται από κλήσεις που έχουν σταθερές απαιτήσεις σε πόρους και σε χρόνο εξυπηρέτησης. Η ελαστική και η προσαρμοζόμενη κίνηση παράγεται από κλήσεις που μπορούν να έχουν διαφορετικές, εναλλακτικές απαιτήσεις σε πόρους, ανάλογα με την διαθεσιμότητα των πόρων στο σύστημα.

Ανάλογα με την συμπεριφορά των κλήσεων μετά την αποδοχή τους στο σύστημα, διακρίνουμε: α) κλήσεις που κατά την διάρκεια της εξυπηρέτησης δεν μπορούν να μεταβάλουν το εύρος ζώνης που τους έχει ανατεθεί (σταθερός ρυθμός μετάδοσης), και β) κλήσεις που κατά την διάρκεια της εξυπηρέτησης μπορούν να μεταβάλουν το εύρος ζώνης (ελαστικός ρυθμός μετάδοσης) προκειμένου το σύστημα να μπορεί να δεχτεί και άλλες κλήσεις.

Abstract

In this PhD dissertation new multi-rate teletraffic loss models are developed for the call-level analysis of wireless W-CDMA networks, connection-oriented networks and optical networks. The model's accuracy and consistency are verified by simulation and found to be very satisfactory.

The analysis of loss systems mainly depends on the call arrival and call service processes. Eight new teletraffic loss models are proposed. Six of them are suitable for the call-level performance analysis of W-CDMA networks, while the other two models are more general and suitable for the analysis of either connection-oriented networks or optical networks.

According to the call arrival process, we distinguish two types of traffic: *random* and *quasi-random*. Random traffic is generated when the call arrival process is Poisson. This coincides with the assumption that the number of traffic sources is infinite. When the number of traffic sources is finite, we have the so called quasi-random traffic.

According to the calls' resource and service time requirements, we distinguish three types of traffic: *stream*, *elastic* and *adaptive*. Stream traffic is generated by calls that have fixed resource and service time requirements. Elastic and adaptive traffic is generated by calls that may have alternative contingency resource requirements depending on the resource availability or the capacity of the system.

According to the calls' behaviour after their acceptance into the system, we distinguish: a) calls that during their service time are not able to change the number of allocated resources (constant transmission rate) and b) calls that during their service time are able to change the number of allocated resources (elastic transmission rate) in order for the system to be able to accept more calls.

Εισαγωγή

Τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα υποστηρίζουν εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας εξυπηρέτησης (Quality-of-Service, QoS), ενώ προσφέρουν στους χρήστες πολλές, διαφορετικές υπηρεσίες ήχου, εικόνων και δεδομένων [18], [37]. Καθοριστικός παράγων για την επίτευξη αυτή, είναι το πρωτόκολλο W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) Στην περίπτωση, παραδείγματος χάριν, των δικτύων UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), ως ραδιοδιεπαφή (air interface) χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο W-CDMA, σε συνδυασμό με την τεχνική DS-CDMA (Direct Sequence CDMA) και επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, μέχρι 2Mbps. Στα δίκτυα λοιπόν W-CDMA, η μοντελοποίηση της απόδοσης σε επίπεδο κλήσεων (call-level performance) είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, όχι μόνον λόγω της πολυδιάστατης κίνησης που υποστηρίζουν τα δίκτυα αυτά, αλλά και λόγω της παρουσίας των διακυψελικών (inter-cell) και ομοκυψελικών (intra-cell) παρεμβολών, καθώς και της δραστηριότητας του υπό εξυπηρέτηση χρήστη (user activity) [27].

Στα κυψελωτά (cellular) δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, η γεωγραφική περιοχή χωρίζεται σε κυψέλες, όπου κάθε κυψέλη ελέγχεται από έναν σταθμό βάσης (base station), που στα δίκτυα W-CDMA ονομάζεται Node B. Οι σταθμοί βάσης επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός δικτύου κορμού (core network). Όταν ένας κινητός χρήστης (mobile user) που βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κυψέλη επιθυμεί να επικοινωνήσει με έναν άλλο κινητό χρήστη (της ίδιας ή διαφορετικής κυψέλης), αυτή η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω των αντίστοιχων σταθμών βάσης. Η ζεύξη επικοινωνίας από τον κινητό χρήστη προς τον σταθμό βάσης αναφέρεται ως άνω ζεύξη (uplink), ενώ η ζεύξη επικοινωνίας από τον σταθμό βάσης προς τον κινητό χρήστη αναφέρεται ως κάτω ζεύξη (downlink). Οι ζεύξεις αυτές απαρτίζονται από κανάλια επικοινωνίας, πράγμα που επιτρέπει την επικοινωνία περισσότερων του ενός χρηστών με το σταθμό βάσης. Για την επικοινωνία αυτή, ένας κινητός χρήστης καταλαμβάνει ένα ή περισσότερα κανάλια ανάλογα με την υπηρεσία (κατηγορία κίνησης) που χρησιμοποιεί. Εάν δεν υπάρχει διαθέσιμο το απαιτούμενο πλήθος των καναλιών, τότε η κλήση απορρίπτεται εξ ολοκλήρου, δηλαδή έχουμε απώλεια κλήσης (call blocking). Διακρίνουμε δε δύο ειδών απώλειες κλήσεων: απώλειες νέων κλήσεων (new-call blocking) και απώλειες κλήσεων μεταπομπής (handoff-call

blocking). Το πρώτο είδος αναφέρεται στην αποτυχία της αρχικής εγκαθίδρυσης της σύνδεσης του κινητού χρήστη με το σταθμό βάσης. Το δεύτερο είδος αναφέρεται στην απόρριψη μιας κλήσης που έχει ήδη γίνει δεκτή στο σύστημα, όταν η κλήση μετακινείται από μια κυψέλη σε μια άλλη. Η πολιτική ελέγχου αποδοχής κλήσεων (call admission control, CAC) πρέπει να διασφαλίσει ότι η πιθανότητα απώλειας των κλήσεων μεταπομπής θα είναι πολύ χαμηλότερη από την πιθανότητα απώλειας των νέων κλήσεων (διότι η κλήση μεταπομπής είναι μια υφιστάμενη κλήση, και επομένως έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα εξυπηρέτησης από μια νέα κλήση).

Το αντικείμενο της διδακτορικής αυτής διατριβής είναι η κατασκευή μαθηματικών μοντέλων για την ανάλυση των συστημάτων απωλειών πολυδιάστατης τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε επίπεδο κλήσεων. Με τον όρο πολυδιάστατη κίνηση εννοούμε την κίνηση που προέρχεται από χρήστες που ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες κίνησης, με διαφορετικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης (πλήθος καναλιών).

Η ανάλυση των συστημάτων απωλειών εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις διαδικασίες άφιξης και εξυπηρέτησης των κλήσεων. Στην διδακτορική αυτή διατριβή παρουσιάζονται έξι υπάρχοντα μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης (παρούσα κατάσταση) και προτείνονται οκτώ νέα μοντέλα (συμβολή της διατριβής). Τα έξι από τα οκτώ νέα μοντέλα που προτείνονται στην παρούσα διατριβή, είναι κατάλληλα για την ανάλυση της απόδοσης σε επίπεδο κλήσεων των ασύρματων δικτύων τεχνολογίας W-CDMA. Το έβδομο και όγδοο μοντέλο είναι γενικά μοντέλα, κατάλληλα για ενσύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, προσανατολισμένα στη σύνδεση (connection-oriented).

Ανάλογα με την διαδικασία άφιξης των κλήσεων στο σύστημα, διακρίνουμε δύο είδη κίνησης: τυχαία (random) και ψευδο-τυχαία (quasi-random). Η τυχαία κίνηση παράγεται όταν η διαδικασία άφιξης των κλήσεων στο σύστημα είναι Poisson. Αυτό αντιστοιχεί στην υπόθεση ότι έχουμε άπειρο πλήθος πηγών που παράγουν κλήσεις. Όταν το πλήθος των πηγών είναι πεπερασμένο, τότε παράγεται ψευδο-τυχαία κίνηση [2].

Ανάλογα με τις απαιτήσεις των κλήσεων σε πόρους (εύρος ζώνης) και σε χρόνο εξυπηρέτησης κατά την άφιξή τους στο σύστημα (διαδικασία call setup), διακρίνουμε τρία είδη κίνησης: *σταθερή* (stream), *ελαστική* (elastic) και *προσαρμοζόμενη* (adaptive). Η *σταθερή* κίνηση παράγεται από κλήσεις που έχουν σταθερές απαιτήσεις σε πόρους και σε χρόνο εξυπηρέτησης (π.χ. τηλεφωνική μετάδοση, ή μετάδοση “streaming” βίντεο ή ήχου σε πραγματικό χρόνο). *Ελαστική* και *προσαρμοζόμενη*

κίνηση παράγεται από κλήσεις που μπορούν να έχουν διαφορετικές, εναλλακτικές απαιτήσεις σε πόρους, ανάλογα με την διαθεσιμότητα των πόρων στο σύστημα. Η διαφορά μεταξύ *ελαστικής* και *προσαρμοζόμενης* κίνησης έγκειται στο εξής. Ο χρόνος εξυπηρέτησης μιας *ελαστικής* κλήσης (π.χ. μετάδοση δεδομένων) σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα των πόρων που καταλαμβάνει, ενώ ο χρόνος εξυπηρέτησης μιας *προσαρμοζόμενης* κλήσης (π.χ. μετάδοση “adaptive video”) παραμένει πάντα σταθερός και ανεξάρτητος από την ποσότητα των πόρων που καταλαμβάνει η κλήση.

Ανάλογα με την συμπεριφορά των κλήσεων μετά την αποδοχή τους στο σύστημα, διακρίνουμε: α) κλήσεις που κατά την διάρκεια της εξυπηρέτησης δεν μπορούν να μεταβάλουν το εύρος ζώνης που τους έχει ανατεθεί (σταθερός ρυθμός μετάδοσης), και β) κλήσεις που κατά την διάρκεια της εξυπηρέτησης μπορούν να μεταβάλουν το εύρος ζώνης (ελαστικός ρυθμός μετάδοσης) προκειμένου το σύστημα να μπορεί να δεχτεί και άλλες κλήσεις.

Παρούσα κατάσταση (state of the art)

Για την ανάλυση ενός συστήματος απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης τηλεπικοινωνιακής κίνησης όπου υπάρχουν μόνο σταθερές κατηγορίες κίνησης Poisson, ήδη από το 1981 έχει προταθεί το Erlang Multi-rate Loss Model (EMLM) [22], [34]. Ένας αναδρομικός τύπος, που είναι γνωστός ως Kaufman-Roberts recursion, επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων (call blocking probabilities) στο EMLM. Το χαρακτηριστικό της αναδρομικότητας προσδίδει μεγάλη αξία στο μοντέλο αυτό γιατί το καθιστά εύκολα υλοποιήσιμο στον υπολογιστή και εφαρμόσιμο σε συστήματα πολύ μεγάλης χωρητικότητας. Η ακρίβεια δε του υπολογισμού βασίζεται στο γεγονός ότι η μαθηματική έκφραση για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων των καταστάσεων του συστήματος έχει την μορφή γινομένου (product form) [2]. Η λύση μορφής γινομένου, όπως λέγεται, αντικατοπτρίζεται στο διάγραμμα μεταβάσεων των καταστάσεων του συστήματος (state transition diagram) και επομένως η ύπαρξή της μπορεί να διαγνωσθεί. Σημειωτέον ότι έχουν γίνει αρκετές τροποποιήσεις-επεκτάσεις του EMLM για την ανάλυση ενσύρματων ([16], [23], [24], [29], [30], [33], [40]), οπτικών ([43], [46], [48], [50]) και ασύρματων δικτύων ([3], [12], [13], [15], [25], [32]).

Στο Connection-Dependent Threshold Model (CDTM) που αποτελεί επέκταση του EMLM, οι κλήσεις φτάνουν στο σύστημα (ζεύξη) με διαφορετικές, εναλλακτικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και επιλέγουν μια απαίτηση ανάλογα με τις συνθήκες

συμφόρησης στη ζεύξη, δηλαδή ανάλογα με την κατειλημμένη χωρητικότητα εύρους ζώνης του συστήματος. Η περιγραφή της κατειλημμένης χωρητικότητας γίνεται μέσω κατωφλίων που ορίζονται ξεχωριστά για κάθε κατηγορία κίνησης. Αν το σύστημα δεν μπορεί να εξυπηρετήσει μια κλήση με την μικρότερη απαίτησή της σε εύρος ζώνης, τότε η κλήση χαρακτηρίζεται ανεπιτυχής και αποχωρεί από το σύστημα. Ο υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσεων γίνεται προσεγγιστικά, διότι το μοντέλο δεν έχει λύση μορφής γινομένου. Μετά από την αρχική ανάθεση του εύρους ζώνης, οι κλήσεις που εξυπηρετούνται στο σύστημα δεν επιτρέπεται να το μεταβάλουν.

Το Extended Erlang Multi-rate Loss Model (E-EMLM) είναι μια επέκταση του EMLM όπου επιτρέπεται η μεταβολή (συμπίεση ή διαστολή) του εύρους ζώνης των κλήσεων που ήδη εξυπηρετούνται μέσα στο σύστημα. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπ' όψη και τις ελαστικές και τις προσαρμοζόμενες κατηγορίες κίνησης.

Το Engset Multi-rate Loss Model (EnMLM) έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το EMLM, με τη μόνη διαφορά ότι κάθε κατηγορία κίνησης έχει ένα πεπερασμένο πλήθος πηγών, δηλαδή θεωρεί την ψευδο-τυχαία διαδικασία άφιξης κλήσεων. Μια επέκταση του EnMLM και του CDTM είναι το Finite Connection-Dependent Threshold Model (F-CDTM), το οποίο συνδυάζει τα χαρακτηριστικά και των δύο μοντέλων. Δηλαδή στο F-CDTM επιτρέπονται διαφορετικές, εναλλακτικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης των «ψευδο-τυχαίων» κλήσεων, ανάλογα με το κατειλημμένο εύρος ζώνης, το οποίο δηλώνεται με την χρήση κατωφλίων.

Τα μοντέλα απωλειών που έχουν αναφερθεί παραπάνω είναι γενικά μοντέλα, κατάλληλα για ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα, και δεν λαμβάνουν υπ' όψη σημαντικές ιδιαιτερότητες των δικτύων W-CDMA. Το Wireless Erlang Multi-rate Loss Model (W-EMLM), είναι μια επέκταση του EMLM προσαρμοσμένη στα δίκτυα W-CDMA. Το μοντέλο αυτό θεωρεί διαδικασία άφιξης Poisson και κατηγορίες κίνησης μόνο με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης και ρυθμού μετάδοσης. Επίσης δεν κάνει διάκριση μεταξύ νέων κλήσεων και κλήσεων μεταπομπής.

Συμβολή της διατριβής – Πρωτότυπα Στοιχεία

A) Ασύρματα Δίκτυα W-CDMA

Προτείνονται πέντε νέα μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης για την ανάλυση σε επίπεδο κλήσεων των δικτύων W-CDMA. Όλα τα μοντέλα λαμβάνουν υπ' όψη

παραμέτρους με ιδιαίτερη βαρύτητα για τα ασύρματα δίκτυα όπως τις διακυψελικές και ομοκυψελικές παρεμβολές, τις τοπικές απώλειες (local blockings), την δραστηριότητα του χρήστη (user activity) καθώς και το γεγονός ότι δεν υπάρχει η έννοια της συγκεκριμένης χωρητικότητας σε εύρος ζώνης ενός συστήματος, αλλά η χωρητικότητα είναι μεταβλητή (soft capacity).

Μοντέλο 1: WH-EMLM

Για την περίπτωση της τυχαίας διαδικασίας άφιξης κλήσεων, σταθερής απαίτησης σε εύρος ζώνης και λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση μεταπομπής, προτείνεται το Wireless Handoff Erlang Multi-rate Loss Model (WH-EMLM). Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real-time) και για κυψέλες μεγάλου μεγέθους. Το τελευταίο οφείλεται στην υπόθεση της διαδικασίας άφιξης κλήσεων Poisson που προϋποθέτει άπειρο πλήθος πηγών κίνησης (χρηστών). Μια τέτοια υπόθεση δικαιολογείται μόνο σε κυψέλες μεγάλων διαστάσεων.

Μοντέλο 2: W-CDTM

Για την περίπτωση της τυχαίας διαδικασίας άφιξης κλήσεων και εναλλακτικής/προσαρμοζόμενης απαίτησης σε εύρος ζώνης προτείνεται το Wireless Connection-Dependent Threshold Model (W-CDTM). Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο για υπηρεσίες δεδομένων (data) και για κυψέλες μεγάλου μεγέθους.

Μοντέλο 3: W-EnMLM

Για την περίπτωση της ψευδο-τυχαίας διαδικασίας άφιξης κλήσεων και σταθερής απαίτησης σε εύρος ζώνης προτείνεται το Wireless Engset Multi-rate Loss Model (W-EnMLM). Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real-time) και για κυψέλες μικρού ή μεσαίου μεγέθους.

Μοντέλο 4: WH-EnMLM

Στην περίπτωση που η κίνηση μεταπομπής αποτελεί μεγάλο ποσοστό της συνολικώς προσφερομένης κίνησης τροποποιείται το προηγούμενο μοντέλο και δημιουργείται το Wireless Handoff Engset Multi-rate Loss Model (WH-EnMLM) ώστε να ληφθεί υπ' όψη η κίνηση μεταπομπής και να της δοθεί προτεραιότητα εξυπηρέτησης έναντι των νέων αφίξεων κλήσεων.

Μοντέλο 5: WF-CDTM

Για την περίπτωση της ψευδο-τυχαίας διαδικασίας άφιξης κλήσεων και εναλλακτικής/προσαρμοζόμενης απαίτησης σε εύρος ζώνης προτείνεται το Wireless Finite Connection-Dependent Threshold Model (WF-CDTM). Το μοντέλο αυτό είναι

κατάλληλο για υπηρεσίες δεδομένων (data) και για κυψέλες μικρού ή μεσαίου μεγέθους.

Η μαθηματική περιγραφή των παραπάνω μοντέλων βασίζεται σε μονοδιάστατες Μαρκοβιανές αλυσίδες. Η λύση της Μαρκοβιανής αλυσίδας οδηγεί σε μαθηματικούς τύπους για των υπολογισμό των πιθανοτήτων τοπικής απώλειας, των πιθανοτήτων καταστάσεων του συστήματος και των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων. Σε κάθε περίπτωση η ακρίβεια των υπολογισμών ελέγχεται με τη βοήθεια των προσομοιώσεων.

Τα παραπάνω μοντέλα περιγράφονται στα Κεφάλαια 3 και 6.

Από την ερευνητική προσπάθεια αυτή για τη μελέτη των ασύρματων δικτύων έχουν προκύψει οι ακόλουθες δημοσιεύσεις: 3, 5, 6, 11, 14, 16, 18, 20, 21, 23, 25, 28 και 30.

B) Ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα

Προτείνονται τρία νέα μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης για την ανάλυση σε επίπεδο κλήσεων των ενσύρματων συνδεσιμοστρεφών δικτύων.

Μοντέλο 1: E-CDTM

Για την περίπτωση της τυχαίας διαδικασίας άφιξης κλήσεων με εναλλακτικές απαιτήσεις εύρους ζώνης και δυνατότητα συμπίεσης/διαστολής του εύρους ζώνης κατά την εξυπηρέτηση προτείνεται το Extended Connection-Dependent Threshold Model (E-CDTM). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί αφενός μεν κατώφλια για να προσδιορίσει τις διαφορετικές, εναλλακτικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης των κλήσεων (ανά κατηγορία κίνησης) κατά την άφιξή τους στο σύστημα, αφετέρου δε, δίνεται η δυνατότητα της συμπίεσης/διαστολής του εύρους ζώνης των κλήσεων του συστήματος, προκειμένου να εξυπηρετηθούν περισσότερες νέες κλήσεις.

Μοντέλο 2: E-CDTM/BR

Στο E-CDTM εφαρμόζεται η πολιτική δέσμευσης του εύρους ζώνης (Bandwidth Reservation, BR) ώστε να επιτυγχάνεται εξισορρόπηση της πιθανότητας απώλειας των κλήσεων μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών κίνησης.

Μοντέλο 3: EF-CDTM

Για την περίπτωση της ψευδο-τυχαίας διαδικασίας άφιξης κλήσεων με εναλλακτικές απαιτήσεις εύρους ζώνης και δυνατότητα συμπίεσης/διαστολής του

εύρους ζώνης κατά την εξυπηρέτηση προτείνεται το Extended Finite Connection-Dependent Threshold Model (EF-CDTM).

Όπως και στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων, τα μοντέλα αυτά περιγράφονται μέσω μονοδιάστατων Μαρκοβιανών αλυσίδων, οι οποίες οδηγούν σε αναδρομικούς τύπους για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων καταστάσεων του συστήματος. Ακολουθώς, προκύπτουν μαθηματικοί τύποι για τον υπολογισμό της χρησιμοποίησης της ζεύξης, της διεκπεραιωτικής ικανότητας ανά κατηγορία και των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων. Η καλή ακρίβεια των υπολογισμών πιστοποιείται με τη βοήθεια των προσομοιώσεων.

Τα μοντέλα αυτά περιγράφονται στο Κεφάλαιο 9. Από τη δουλειά αυτή έχουν προκύψει οι ακόλουθες δημοσιεύσεις: 1, 7 – 10, 12, 27.

Γ) Εφαρμογές Μοντέλων Απωλειών Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης σε Οπτικά Δίκτυα

Σε συνεργασία με τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ι. Βαρδάκα διερευνήθηκε η εφαρμογή υφισταμένων μοντέλων απωλειών τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs), για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων αποτυχίας σύνδεσης (connection failure probabilities) και των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων με δυναμική ανάθεση μήκους κύματος. Πιο συγκεκριμένα η μελέτη επικεντρώθηκε στα υβριδικά δίκτυα TDM-WDM (Time Division Multiplexing – Wavelength Division Multiplexing) PONs. Η αποτυχία της σύνδεσης συμβαίνει όταν δεν είναι διαθέσιμο το μήκος κύματος (wavelength), ενώ η απώλεια κλήσεων συμβαίνει όταν δεν είναι διαθέσιμο το εύρος ζώνης μέσα σε ένα μήκος κύματος. Το μοντέλο λαμβάνει υπ' όψη και τη σταθερή και την ελαστική κίνηση. Ακολουθώς η μελέτη επεκτείνεται σε παθητικά υβριδικά οπτικά δίκτυα PON, με δυναμική ανάθεση μήκους κύματος, τεχνολογίας WDM-OCDMA (Wavelength Division Multiplexing – Optical Code Division Multiple Access). Η μαθηματική περιγραφή των μοντέλων αυτών βασίζεται σε μονοδιάστατες Μαρκοβιανές αλυσίδες.

Τα μοντέλα αυτά περιγράφονται στο Κεφάλαιο 11. Από την ερευνητική αυτή προσπάθεια έχουν προκύψει οι ακόλουθες δημοσιεύσεις στις οποίες συμμετέχω: 2, 4, 13, 15, 17, 19, 22, 24, 26, 29.

Η διάρθρωση της διατριβής έχει ως ακολούθως:

Διακρίνονται τρείς Ενότητες και ένα ανεξάρτητο κεφάλαιο. Η ενότητα Α περιλαμβάνει τα κεφάλαια 1 έως 4 και αναφέρεται στα μοντέλα απωλειών κλήσεων τυχαίας κίνησης με σταθερό ρυθμό μετάδοσης. Η ενότητα Β περιλαμβάνει τα κεφάλαια 5 έως 7 και αναφέρεται στα μοντέλα απωλειών κλήσεων ψευδο-τυχαίας κίνησης με σταθερό ρυθμό μετάδοσης. Η ενότητα Γ περιλαμβάνει τα κεφάλαια 8 έως 10 και αναφέρεται στα μοντέλα απωλειών κλήσεων τυχαίας κίνησης με σταθερό ρυθμό μετάδοσης. Το κεφάλαιο 11 είναι ανεξάρτητο και αναφέρεται στις εφαρμογές των μοντέλων απωλειών τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε οπτικά δίκτυα.

Αναλυτικότερα :

Ενότητα Α: Μοντέλα απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης με σταθερό ρυθμό μετάδοσης

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζουμε τα εξής μοντέλα απωλειών κλήσεων για ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα (state of the art):

- Το μοντέλο με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (EMLM).
- Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (CDTM).

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζουμε το εξής μοντέλο απωλειών κλήσεων για ασύρματα δίκτυα W-CDMA (state of the art):

- Το μοντέλο με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (W-EMLM).

Στο κεφάλαιο 3 προτείνουμε τα εξής νέα μοντέλα απωλειών κλήσεων για ασύρματα δίκτυα W-CDMA:

- Το μοντέλο με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, με κίνηση μεταπομπής (WH-EMLM).
- Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (W-CDTM).

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζουμε τα συμπεράσματα επί της ενότητας Α.

Ενότητα Β: Μοντέλα απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης ψευδο-τυχαίας κίνησης με σταθερό ρυθμό μετάδοσης

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζουμε τα εξής μοντέλα απωλειών κλήσεων για ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα (state of the art):

- Το μοντέλο με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (EnMLM).
- Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (F-CDTM).

Στο κεφάλαιο 6 προτείνουμε τα εξής νέα μοντέλα απωλειών κλήσεων για ασύρματα δίκτυα W-CDMA:

- Το μοντέλο με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (W-EnMLM).
- Το μοντέλο με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, με κίνηση μεταπομπής (WH-EnMLM).
- Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (WF-CDTM).

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζουμε τα συμπεράσματα επί της ενότητας Β.

Ενότητα Γ: Μοντέλα απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης κίνησης με ελαστικό ρυθμό μετάδοσης σε ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα

Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζουμε το εξής μοντέλο απωλειών κλήσεων με τυχαία κίνηση (state of the art):

- Το μοντέλο με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (E-EMLM).

Στο κεφάλαιο 9 προτείνουμε τα εξής νέα μοντέλα απωλειών κλήσεων με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης:

- Το μοντέλο κατωφλίων για τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες (E-CDTM).

- Το μοντέλο κατωφλίων για τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες, με σύστημα δέσμευσης εύρους ζώνης (E-CDTM/BR).
- Το μοντέλο κατωφλίων για ψευδο-τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες (EF-CDTM).

Στο κεφάλαιο 10 παρουσιάζουμε τα συμπεράσματα επί της ενότητας Γ.

Στο κεφάλαιο 11 προτείνουμε τα εξής νέα μοντέλα απωλειών τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε οπτικά δίκτυα:

- Το μοντέλο για υβριδικά παθητικά δίκτυα πρόσβασης, τεχνολογίας TDM-WDM.
- Το μοντέλο για υβριδικά παθητικά δίκτυα πρόσβασης, τεχνολογίας WDM-OCDMA.

Ενότητα Α:
Μοντέλα απωλειών κλήσεων
πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης
με σταθερό ρυθμό μετάδοσης

Κεφάλαιο 1

1. Επισκόπηση Υφισταμένων Μοντέλων Απώλειας Κλήσεων για Ενσύρματα Συνδεσιμοστρεφή Δίκτυα

1.1. Το μοντέλο απωλειών κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, των Kaufman-Roberts (Erlang Multi-rate Loss Model - EMLM)

1.1.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Το *Erlang Multi-rate Loss Model* (EMLM) ([22], [34]) έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της απόδοσης σε επίπεδο κλήσεων των ενσύρματων συνδεσιμοστρεφών δικτύων όπου υπάρχουν μόνο σταθερές κατηγορίες κίνησης Poisson. Στο μοντέλο αυτό θεωρούμε ένα σύστημα (ζεύξη) με χωρητικότητα C μονάδες εύρους ζώνης (bandwidth units - b.u.) στο οποίο καταφτάνουν κλήσεις από K ανεξάρτητες κατηγορίες κίνησης (υπηρεσίες) σύμφωνα με τη διαδικασία Poisson. Οι κλήσεις ανταγωνίζονται για το διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth) σύμφωνα με την *πολιτική πλήρους διάθεσης πόρων* (complete resource sharing policy) [2]. Κάθε κλήση της κατηγορίας k ($k=1, \dots, K$) κατά την άφιξη της στο σύστημα ζητάει b_k μονάδες εύρους ζώνης. Εάν οι μονάδες αυτές είναι διαθέσιμες, τότε η κλήση γίνεται δεκτή στο σύστημα και καταλαμβάνει τις b_k μονάδες εύρους ζώνης, που είχε ζητήσει, για χρονικό διάστημα, εκθετικά κατανομημένο με μέση τιμή μ_k^{-1} . Εάν οι μονάδες αυτές δεν είναι διαθέσιμες, τότε η κλήση απορρίπτεται και χάνεται (απώλεια κλήσης). Ο ρυθμός άφιξης των κλήσεων της κατηγορίας k συμβολίζεται με λ_k . Το *προσφερόμενο φορτίο κίνησης* (offered traffic-load) των κλήσεων της κατηγορίας k δίνεται από $a_k = \lambda_k \mu_k^{-1}$.

Με n_k συμβολίζουμε το πλήθος των κλήσεων της κατηγορίας k στο σύστημα. Το διάλυσμα μόνιμης κατάστασης συμβολίζεται με $\vec{n} = (n_1, n_2, \dots, n_K)$. Η πιθανότητα το σύστημα να είναι στην κατάσταση $\vec{n}$ συμβολίζεται με $P(\vec{n})$.

Το σύνολο όλων των δυνατών καταστάσεων συμβολίζεται με Ω . Στην περίπτωση της πολιτικής πλήρους διάθεσης του εύρους ζώνης του συστήματος (complete sharing policy), το σύνολο Ω ορίζεται ως εξής [66]:

$$\Omega = \{\vec{n} : 0 \leq \sum_{k=1}^K n_k b_k \leq C\} \quad (1-1)$$

Η (μακρο-)κατάσταση j ($j=0, \dots, C$) του συστήματος ορίζεται ως το συνολικό πλήθος των κατειλημμένων μονάδων εύρους ζώνης. Από δω και στο εξής, με τον όρο κατάσταση θα εννοούμε την (μακρο-)κατάσταση. Μια κατάσταση, j , συνδυάζει ένα ή περισσότερα διανύσματα μόνιμης κατάστασης $\vec{n}$, στα οποία το συνολικό πλήθος των κατειλημμένων πόρων από όλες τις κατηγορίες είναι ίσο με j . Η πιθανότητα το σύστημα να είναι στην κατάσταση j συμβολίζεται με $q(j)$.

Το EMLM έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την ανάλυση παραδοσιακών ενσύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων που υποστηρίζουν *σταθερή* (stream) κίνηση. Για παράδειγμα, εάν ορίσουμε μια μονάδα εύρους ζώνης να είναι ίση με τον ρυθμό μετάδοσης των 64 Kbps, τότε μια ζεύξη των 1.28 Mbps αποτελείται από $C=20$ μονάδες εύρους ζώνης. Μια κλήση ήχου (voice) των $R_1=64$ Kbps θα απαιτεί $b_1=1$ μονάδα εύρους ζώνης, ενώ μια κλήση βίντεο (video) των $R_2=256$ Kbps θα απαιτεί $b_2=4$ μονάδες εύρους ζώνης.

1.1.2 Εξίσωση Τοπικής Ισορροπίας και Μερίδιο Εύρους Ζώνης

Στο EMLM μεταξύ των γειτονικών καταστάσεων ισχύει η ακόλουθη *εξίσωση τοπικής ισορροπίας* (local balance equation) [22]:

$$\alpha_k q(j - b_k) = Y_k(j) q(j) \quad (1-2)$$

όπου με $Y_k(j)$ συμβολίζουμε το μέσο πλήθος των κλήσεων της κατηγορίας k στην κατάσταση j .

Η εξίσωση τοπικής ισορροπίας δείχνει τον ρυθμό με τον οποίο το σύστημα μεταβαίνει από μια κατάσταση σε μια άλλη (Σχήμα 1-1). Δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο το σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση $j - b_k$ στην κατάσταση j είναι ίσος με τον ρυθμό με τον οποίο το σύστημα επιστρέφει από την κατάσταση j στην κατάσταση $j - b_k$. Έτσι η (1-2) ονομάζεται και «ρυθμός ανόδου = ρυθμός καθόδου» («rate_up = rate_down»).

Σχήμα 1-1: Τοπική ισορροπία στο EMLM.

Ως *μερίδιο εύρους ζώνης* (bandwidth share) μιας κατηγορίας κίνησης ορίζουμε το ποσοστό του συνολικού κατειλημμένου εύρους ζώνης j που αντιστοιχεί σε κλήσεις της συγκεκριμένης αυτής κατηγορίας στην κατάσταση j ($j > 0$). Το *μερίδιο εύρους ζώνης* της κατηγορίας k στην κατάσταση j συμβολίζεται με $P_k(j)$ και ορίζεται ως:

$$P_k(j) = \frac{Y_k(j)b_k}{j} \quad (1-3)$$

Για να υπολογίσουμε το $P_k(j)$ ξεκινάμε από την (1-2) πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη με b_k και διαιρώντας με $jq(j)$. Οπότε προκύπτει:

$$\frac{a_k b_k q(j - b_k)}{jq(j)} = \frac{Y_k(j)b_k}{j} \quad (1-4)$$

Επομένως καταλήγουμε σε:

$$P_k(j) = \frac{a_k b_k q(j - b_k)}{jq(j)} \quad (1-5)$$

1.1.3 Πιθανότητες Καταστάσεων και Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων

Οι πιθανότητες των καταστάσεων, $P(\vec{n})$, υπολογίζονται από τον παρακάτω τύπο [66]:

$$P(\vec{n}) = \frac{\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!}}{\sum_{\vec{n} \in \Omega} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} \right)} \quad (1-6)$$

Η σχέση (1-6) για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων καταστάσεων δεν είναι εύχρηστη επειδή περιλαμβάνει υπολογισμό δυνάμεων και παραγοντικών. Αυτό είναι και ο λόγος που προτιμούμε τη σχέση (1-7) που παρουσιάζεται παρακάτω.

Οι πιθανότητες καταστάσεων, $q(j)$, υπολογίζονται από τον γνωστό αναδρομικό τύπο των Kaufman-Roberts [22]:

$$jq(j) = \sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) \text{ για } j = 1, \dots, C \text{ και } q(j)=0 \text{ για } j < 0 \quad (1-7)$$

μαζί με τη συνθήκη $\sum_{j=0}^C q(j) = 1$. Η συνθήκη αυτή θα βοηθήσει στον υπολογισμό της

$q(0)$. Θα εκφράσουμε τις πιθανότητες $q(j)$, $j = 1, 2, \dots, C$ συναρτήσει της $q(0)$ και μετά θα εξισώσουμε με 1 για να βρούμε την άγνωστη πιθανότητα $q(0)$.

Μια νέα κλήση που φτάνει στο σύστημα με απαίτηση b_k μονάδων εύρους ζώνης γίνεται δεκτή αν και μόνο αν $j \leq C - b_k$. Επομένως, για την κατηγορία k οι καταστάσεις $j = C - b_k + 1, \dots, C$ είναι καταστάσεις απώλειας, ενώ οι καταστάσεις $j = 0, 1, \dots, C - b_k$ είναι καταστάσεις μη-απώλειας (non-blocking states). Η πιθανότητα απώλειας κλήσεων (call blocking probability, CBP) της κατηγορίας k υπολογίζεται προσθέτοντας τις πιθανότητες όλων των καταστάσεων απώλειας:

$$B_k = \sum_{j=C-b_k+1}^C q(j) \quad (1-8)$$

1.1.4 Ένα Μικρό Παράδειγμα

Ως παράδειγμα θεωρείστε μια ζεύξη με χωρητικότητας $C=5$ μονάδων εύρους ζώνης, η οποία φιλοξενεί $K=3$ κατηγορίες κίνησης, με σταθερές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης ανά κλήση: $b_1=1$, $b_2=2$ και $b_3=3$. Στο Σχήμα 1-1 παρουσιάζουμε το *διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων* για το συγκεκριμένο αυτό παράδειγμα. Κάθε κατάσταση ορίζεται ως το συνολικό κατειλημμένο εύρος ζώνης, j , από όλες τις κλήσεις που βρίσκονται υπό εξυπηρέτηση στο σύστημα. Παρατηρούμε ότι το EMLM έχει *λύση μορφής γινομένου* λόγω της αντιστρεψιμότητας (reversibility) σε κάθε κατάσταση [66]. Η αντιστρεψιμότητα σε κάθε κατάσταση σημαίνει ότι για κάθε μετάβαση από μια συγκεκριμένη κατάσταση προς όλες τις άλλες καταστάσεις υπάρχει και μια αντίστοιχη μετάβαση από τις άλλες καταστάσεις προς τη συγκεκριμένη κατάσταση.

Και μάλιστα οι ρυθμοί μετάβασης ανάμεσα σε κάθε ζεύγος καταστάσεων είναι ίσοι, δηλαδή ισχύει η τοπική ισορροπία (βλ. σχέση (1-2)). Η κατάσταση $j=5$ είναι κατάσταση απώλειας (blocking state) για όλες τις κατηγορίες. Η κατάσταση $j=4$ είναι κατάσταση απώλειας για την 2^η και την 3^η κατηγορία, ενώ η κατάσταση $j=3$ είναι κατάσταση απώλειας μόνο για την 3^η κατηγορία.

Σχήμα 1-2: Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων στο EMLM.

Για την κατανόηση του Σχήματος 1-2 θα περιγράψουμε τι γίνεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση, π.χ. την κατάσταση $j=2$. Παρατηρούμε ότι από την κατάσταση 2 υπάρχουν μεταβάσεις (συμβολίζονται με βέλη) στις καταστάσεις 0, 1, 3 και 4. Επίσης υπάρχουν και οι μεταβάσεις από τις καταστάσεις 0, 1, 3 και 4 προς την κατάσταση 2. Π.χ. ο ρυθμός μετάβασης από την κατάσταση 2 στην κατάσταση 1 είναι $q(2)\mu_1 Y_1(2)$, ενώ ο ρυθμός μετάβασης από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 είναι $q(1)\lambda_1$. Λόγω της τοπικής ισορροπίας οι δύο αυτοί ρυθμοί είναι ίσοι, δηλαδή $q(2)\mu_1 Y_1(2) = q(1)\lambda_1$.

1.2. Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (Connection Dependent Threshold Model - CDTM)

1.2.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Το *Connection Dependent Threshold Model* (CDTM) ([29]) είναι μια επέκταση του EMLM και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα που υποστηρίζουν ελαστική κίνηση. Θεωρούμε και πάλι μια ζεύξη με χωρητικότητα C μονάδων εύρους ζώνης, πολιτική πλήρους διάθεσης των πόρων, K ανεξάρτητες κατηγορίες κίνησης και διαδικασία άφιξης κλήσεων Poisson. Ο ρυθμός άφιξης των κλήσεων της κατηγορίας k ($k = 1, \dots, K$) συμβολίζεται με λ_k και κάθε κλήση έχει S_k εναλλακτικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης b_{k_l} και σε χρόνο εξυπηρέτησης $\mu_{k_l}^{-1}$ ($l=1, \dots, S_k$), όπου $b_{k_{S_k}} < \dots < b_{k_l} < \dots < b_{k_2} < b_{k_1}$ και $\mu_{k_{S_k}}^{-1} > \dots > \mu_{k_l}^{-1} > \dots > \mu_{k_2}^{-1} > \mu_{k_1}^{-1}$. Ο χρόνος εξυπηρέτησης των κλήσεων θεωρείται εκθετικά κατανομημένος. Το ζεύγος $(b_{k_1}, \mu_{k_1}^{-1})$ χρησιμοποιείται από τις κλήσεις της κατηγορίας k όταν το πλήθος των κατειλημμένων μονάδων εύρους ζώνης στη ζεύξη κατά τη στιγμή της άφιξης είναι $j \leq J_{k_1}$, όπου J_{k_1} είναι το χαμηλότερο κατώφλι της κατηγορίας k . Το ζεύγος $(b_{k_l}, \mu_{k_l}^{-1})$ (για $l > 1$) χρησιμοποιείται από τις κλήσεις της κατηγορίας k όταν $J_{k_l} < j \leq J_{k_{l+1}}$, όπου J_{k_l} και $J_{k_{l+1}}$ είναι δύο διαδοχικά κατώφλια της κατηγορίας k . Το ζεύγος $(b_{k_{S_k}}, \mu_{k_{S_k}}^{-1})$ χρησιμοποιείται από τις κλήσεις της κατηγορίας k όταν $J_{k_{S_k-1}} < j \leq C - b_{k_{S_k}}$. Τέλος, μια κλήση της κατηγορίας k απορρίπτεται (δεν γίνεται δεκτή στο σύστημα) όταν $C - b_{k_{S_k}} < j \leq C$. Το προσφερόμενο φορτίο κίνησης των κλήσεων της κατηγορίας k με απαιτήσεις b_{k_l} ορίζεται ως: $a_{k_l} = \lambda_k \mu_{k_l}^{-1}$. Το συνολικό προσφερόμενο φορτίο κίνησης (total offered traffic load) είναι το ίδιο για κάθε ζεύγος $(b_{k_l}, \mu_{k_l}^{-1})$ και ορίζεται ως “γινόμενο του προσφερόμενου φορτίου κίνησης επί το απαιτούμενο εύρος ζώνης ανά κλήση”, $a_{k_l} b_{k_l}$. Όπως και στο EMLM, η παράμετρος j ($j=0, \dots, C$) εκφράζει την κατάσταση του συστήματος και οι πιθανότητες των καταστάσεων συμβολίζονται με $q(j)$.

Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στο CDTM μετά από την αρχική ανάθεση του εύρους ζώνης, οι κλήσεις που εξυπηρετούνται δεν επιτρέπεται να αλλάζουν το εύρος ζώνης που τους έχει ανατεθεί.

1.2.2 Ένα Μικρό Παράδειγμα

Παρουσιάζουμε τις βασικές αρχές του CDTM με τη βοήθεια ενός μικρού παραδείγματος. Το παράδειγμα αυτό είναι μια επέκταση του παραδείγματος της παραγράφου 1.1.3. Θεωρείστε ότι η 1^η κατηγορία δεν έχει κατώφλια, η 2^η κατηγορία έχει ένα κατώφλι ($J_{21}=2$) και δύο εναλλακτικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης ($b_{20}=2$, $b_{21}=1$), ενώ η 3^η κατηγορία έχει δύο κατώφλια ($J_{31}=2$, $J_{32}=3$) και τρεις εναλλακτικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης ($b_{30}=3$, $b_{31}=2$, $b_{32}=1$), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-3. Στο συγκεκριμένο αυτό παράδειγμα, μια κλήση απορρίπτεται όταν η ζεύξη είναι πλήρως κατειλημμένη. Αυτό ισχύει και για τις τρεις κατηγορίες κίνησης επειδή η ελάχιστη απαίτηση και για τις τρεις είναι 1 μονάδα εύρους ζώνης

Σχήμα 1-3: Βασικές Αρχές του CDTM.

Στο Σχήμα 1-4 παρουσιάζεται το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων για το παραπάνω παράδειγμα. Για να είναι το σχήμα ευανάγνωστο, δείχνουμε μόνο τις μεταβάσεις που αντιστοιχούν στις κλήσεις της 2^{ης} κατηγορίας. Με $Y_{20}(j)$ και $Y_{21}(j)$ συμβολίζουμε το μέσο πλήθος των κλήσεων της 2^{ης} κατηγορίας με απαιτήσεις σε εύρος ζώνης b_{20} and b_{21} , αντίστοιχα, στην κατάσταση j . Το σύστημα δεν έχει λύση μορφής γινομένου επειδή είναι μη αντιστρέψιμο. Αυτό ισχύει και όταν θεωρούμε ως κατάσταση το πλήθος των κλήσεων που εξυπηρετούνται στο σύστημα (μικρο-κατάσταση) και όταν θεωρούμε ως κατάσταση το j . Στην τελευταία περίπτωση η μη αντιστρεψιμότητα φαίνεται στο Σχήμα 1-4 από το γεγονός ότι για ορισμένες μεταβάσεις προς τα πίσω δεν υπάρχουν αντίστοιχες μεταβάσεις προς τα εμπρός.

Σχήμα 1-4: Διάγραμμα Μετάβασης Καταστάσεων στο CDTM (μόνο 2^η κατηγορία).

1.2.3 Βασικές Προσεγγίσεις

Με την εισαγωγή των ακόλουθων προσεγγίσεων ([29]), το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων του Σχήματος 1-4 τροποποιείται, έτσι ώστε αυτό να γίνει αντιστρέψιμο και να μπορεί να εξαχθεί ένας προσεγγιστικός, αλλά αναδρομικός τύπος για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων καταστάσεων $q(j)$:

- 1) *Τοπική ισορροπία* (local balance) ανάμεσα στις γειτονικές καταστάσεις (*rate up = rate down*).
- 2) *Προσέγγιση μετανάστευσης* (migration approximation): Το πλήθος των κλήσεων που έχουν γίνει δεκτές στο σύστημα με απαίτηση σε εύρος ζώνης διαφορετική από τη μέγιστη είναι αμελητέο μέσα σε έναν χώρο που ονομάζεται *χώρος μετανάστευσης* (migration space). Πιο συγκεκριμένα, το πλήθος των κλήσεων με απαίτηση εύρους ζώνης b_{k_l} ($l \neq 0$) στην κατάσταση j είναι αμελητέο όταν $0 < j < J_{k_l} + b_{k_l}$ και $J_{k_{l+1}} + b_{k_l} < j \leq C$.

- 3) *Προσέγγιση της εμπρός μετανάστευσης* (upward migration approximation): Το πλήθος των κλήσεων που έχουν γίνει δεκτές στο σύστημα με τη μέγιστη απαίτηση σε εύρος ζώνης είναι αμελητέο μέσα σε έναν χώρο που ονομάζεται *χώρος της εμπρός μετανάστευσης* (upward migration space). Πιο συγκεκριμένα, το πλήθος των κλήσεων με απαίτηση b_{k_0} στην κατάσταση j είναι αμελητέο όταν $J_1 + b_{k_0} < j \leq C$.

Στο παράδειγμα της παραγράφου 1.2.2, σύμφωνα με την *προσέγγιση μετανάστευσης*, το πλήθος των κλήσεων με απαίτηση $b_{2,1}$ στις καταστάσεις $j = 1, 2$ και 3 θεωρείται αμελητέο. Έτσι οι αντίστοιχες μεταβάσεις $3 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 1$ και $1 \rightarrow 0$ αγνοούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-5 με X πάνω στα βέλη. Ομοίως, λόγω της *προσέγγισης εμπρός μετανάστευσης* η μετάβαση $5 \rightarrow 3$ αγνοείται για τις κλήσεις με

απαίτηση b_{2_0} . Με βάση τα παραπάνω και λόγω της υπόθεσης της *τοπικής ισορροπίας* η Μαρκοβιανή αλυσίδα που προκύπτει γίνεται αντιστρέψιμη. Στο Σχήμα 1-6 παρουσιάζεται ο χώρος μετανάστευσης και ο χώρος της εμπρός μετανάστευσης για το συγκεκριμένο παράδειγμα.

Σχήμα 1-5: Τροποποιημένο Διάγραμμα Μετάβασης Καταστάσεων στο CDTM (μόνο 2^η κατηγορία).

Σχήμα 1-6: Ο χώρος μετανάστευσης και ο χώρος της εμπρός μετανάστευσης για την 2^η και 3^η κατηγορία.

1.2.4 Εξίσωση Τοπικής Ισορροπίας και Μερίδιο Εύρους Ζώνης

Λόγω των προσεγγίσεων της παραγράφου 1.2.3 ισχύει η ακόλουθη εξίσωση τοπικής ισορροπίας ανάμεσα στις γειτονικές καταστάσεις (Σχήμα 1-7) [67]:

$$\alpha_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l}) = Y_{k_l}(j) \delta_{k_l}(j) q(j) \quad (1-9)$$

όπου $q(j)$ είναι η πιθανότητα ότι το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση j . Συνεπώς, το μερίδιο εύρους ζώνης, $P_{k_l}(j)$, των κλήσεων της κατηγορίας k με απαιτήσεις b_{k_l} στην κατάσταση j ($j > 0$), δίνεται από:

$$\frac{a_{k_l} b_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l})}{jq(j)} = \frac{Y_{k_l}(j) b_{k_l} \delta_{k_l}(j)}{j} \Leftrightarrow \frac{a_{k_l} b_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l})}{jq(j)} = P_{k_l}(j) \quad (1-10)$$

Σχήμα 1-7: Τοπική ισορροπία στο CDTM.

1.2.5 Πιθανότητες Καταστάσεων και Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων

Χάρη στις βασικές προσεγγίσεις της παραγράφου 1.2.3, οι πιθανότητες καταστάσεων, $q(j)$, υπολογίζονται από τον παρακάτω αναδρομικό τύπο [29]:

$$jq(j) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{S_k} a_{k_l} b_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l}) \quad \text{για } j = 1, \dots, C \quad (1-11)$$

και $q(j) = 0$ για $j < 0$, με συνθήκη $\sum_{j=0}^C q(j) = 1$, όπου οι παράμετροι $\delta_{k_0}(j)$ και $\delta_{k_l}(j)$

j) ορίζονται από τις ακόλουθες εκφράσεις, για $l = 1, \dots, S_k$:

$$\delta_{k_0}(j) = \begin{cases} 1, & \text{όταν } 1 \leq j \leq C \text{ και } b_{k_l} = 0 (l \neq 0) \\ 1, & \text{όταν } j \leq J_{k_1} + b_{k_0} \text{ και } b_{k_l} > 0 (l \neq 0) \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (1-12)$$

$$\delta_{k_l}(j) = \begin{cases} 1, & \text{όταν } (J_{k_{l+1}} + b_{k_l} \geq j > J_{k_l} + b_{k_l}) \text{ και } (b_{k_l} > 0) \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (1-13)$$

Η $\delta_{k_0}(j)$ σχετίζεται με τον χώρο της εμπρός μετανάστευσης, ενώ η $\delta_{k_l}(j)$ (με $l > 0$) με τον χώρο μετανάστευσης.

Μια νέα κλήση της κατηγορίας k γίνεται δεκτή στο σύστημα αν και μόνο αν η μικρότερη της απαίτηση, b_{kS_k} , μπορεί να ικανοποιηθεί, δηλαδή αν και μόνο αν $j \leq C - b_{kS_k}$. Έτσι για την κατηγορία k οι καταστάσεις $j = C - b_{kS_k} + 1, \dots, C$ είναι καταστάσεις απώλειας, ενώ οι καταστάσεις $j = 0, 1, \dots, C - b_{kS_k}$ είναι καταστάσεις μη απώλειας.

Η πιθανότητα απώλειας κλήσεων της κατηγορίας k υπολογίζεται προσθέτοντας τις πιθανότητες όλων των καταστάσεων απώλειας:

$$B_k = \sum_{j=C-b_{kS_k}+1}^C q(j) \quad (1-14)$$

1.2.6 Αριθμητικά Αποτελέσματα για τα EMLM και CDTM

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων για τα EMLM και CDTM. Θεωρούμε ότι το σύστημα υποστηρίζει δύο κατηγορίες κίνησης και έχει χωρητικότητα $C=50$ μονάδες εύρους ζώνης. Οι παράμετροι κίνησης που έχουν χρησιμοποιηθεί για τα δύο μοντέλα, φαίνονται στον Πίνακα 1-1. Τα αποτελέσματα των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων των δύο μοντέλων φαίνονται στον Πίνακα 1-2. Παρατηρούμε ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα η πιθανότητα απώλειας κλήσεων στο CDTM είναι σαφώς χαμηλότερη από αυτήν του EMLM. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στο CDTM, όταν δεν επαρκούν οι πόροι του συστήματος, υπάρχει η δυνατότητα μια κλήση να γίνει δεκτή στο σύστημα με μειωμένο εύρος ζώνης. Περισσότερα παραδείγματα μπορεί να δει κανείς στα [29] και [67].

Πίνακας 1-1: Παράμετροι κίνησης για τα EMLM και CDTM

	EMLM		CDTM	
	1 ^η κατηγ.	2 ^η κατηγ.	1 ^η κατηγ.	2 ^η κατηγ.
Απαιτήσεις εύρους ζώνης	$b_{1,1}=10$	$b_{2,1}=7$	$b_{1,1}=10, b_{1,2}=8, b_{1,3}=6$	$b_{2,1}=7, b_{2,2}=4$
Κατώφλια	-	-	$J_{1,1}=37, J_{1,2}=35$	$J_{2,1}=30$
Προσφερόμενο φορτίο κίνησης	$a_1=0.72$	$a_2=2.40$	$a_1=0.72$	$a_2=2.40$

Πίνακας 1-2: Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων στα EMLM και CDTM

Μοντέλο	1 ^η κατηγορία - CBP(%)	2 ^η κατηγορία - CBP(%)
EMLM	9.22	5.24
CDTM	4.74	2.24

Ας εξετάσουμε ακόμα ένα παράδειγμα όπου θα συγκρίνουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα του CDTM με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Θεωρούμε ότι το σύστημα υποστηρίζει 4 κατηγορίες κίνησης και έχει χωρητικότητα $C=580$ [67]. Οι παράμετροι κίνησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1-3, ενώ τα αποτελέσματα στον Πίνακα 1-4. Παρατηρούμε ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων δεν είναι καλή.

Πίνακας 1-3: Παράμετροι κίνησης για το CDTM

	CDTM			
	1 ^η κατηγ.	2 ^η κατηγ.	3 ^η κατηγ.	4 ^η κατηγ.
Απαιτήσεις εύρους ζώνης	$b_{1,1}=1$	$b_{2,1}=6, b_{2,2}=4$	$b_{3,1}=12, b_{3,2}=8, b_{3,3}=4$	$b_{4,1}=20, b_{4,2}=16, b_{4,3}=12, b_{4,4}=8$
Κατώφλια	-	$J_{2,1}=540$	$J_{3,1}=520, J_{3,2}=524$	$J_{4,1}=500, J_{4,2}=504, J_{4,3}=508$
Προσφερόμενο φορτίο κίνησης	$a_1=20$	$a_2=12$	$a_3=28$	$a_4=6$

Πίνακας 1-4: Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων στο CDTM

Μοντέλο	1 ^η - CBP(%)	2 ^η - CBP(%)	3 ^η - CBP(%)	4 ^η - CBP(%)
Αναλυτικά	0.95	4.01	4.01	8.21
Προσομοίωση	0.51	2.15	2.12	4.28

Ας εξετάσουμε το προηγούμενο παράδειγμα όπου έχουμε τροποποιήσει τα κατώφλια των υπηρεσιών. Οι νέες παράμετροι κίνησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1-5, ενώ τα αποτελέσματα στον Πίνακα 1-6. Παρατηρούμε ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων βελτιώθηκε αισθητά σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση.

Πίνακας 1-5: Παράμετροι κίνησης για το CDTM

	CDTM			
	1 ^η κατηγ.	2 ^η κατηγ.	3 ^η κατηγ.	4 ^η κατηγ.
Απαιτήσεις εύρους ζώνης	$b_{1,1}=1$	$b_{2,1}=6, b_{2,2}=4$	$b_{3,1}=12, b_{3,2}=8, b_{3,3}=4$	$b_{4,1}=20, b_{4,2}=16, b_{4,3}=12, b_{4,4}=8$
Κατώφλια	-	$J_{2,1}=574$	$J_{3,1}=568, J_{3,2}=572$	$J_{4,1}=560, J_{4,2}=564, J_{4,3}=568$
Προσφερόμενο φορτίο κίνησης	$a_1=20$	$a_2=12$	$a_3=28$	$a_4=6$

Πίνακας 1-6: Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων στο CDTM

Μοντέλο	1^η - CBP(%)	2^η - CBP(%)	3^η - CBP(%)	4^η - CBP(%)
Αναλυτικά	1.89	7.43	7.43	9.98
Προσομοίωση	1.89	6.73	6.79	9.03

Κεφάλαιο 2

2. Επισκόπηση Υφισταμένου Μοντέλου Απώλειας Κλήσεων για Ασύρματα Δίκτυα W-CDMA

2.1. Το μοντέλο απωλειών κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, W-EMLM (Wireless EMLM)

2.1.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Το Wireless Erlang Multirate Loss Model (W-EMLM) ([39]) είναι μια επέκταση του EMLM και έχει προταθεί για την ανάλυση της απόδοσης σε επίπεδο κλήσεων των δικτύων W-CDMA που υποστηρίζουν μόνο σταθερή Poisson κίνηση. Δηλαδή το W-EMLM, όπως θα δούμε στη συνέχεια, ενσωματώνει στο EMLM ορισμένα χαρακτηριστικά των δικτύων W-CDMA. Στο W-EMLM θεωρούμε ένα σύστημα W-CDMA που υποστηρίζει K ανεξάρτητες κατηγορίες κίνησης. Μελετάμε μια κυψέλη αναφοράς που γειτνιάζει με άλλες κυψέλες. Επικεντρωνόμαστε μόνο στην *άνω ζεύξη* (uplink), δηλαδή εξετάζουμε μόνο τις κλήσεις από τους *κινητούς χρήστες* προς τον *σταθμό βάσης*. Η μελέτη της *κάτω ζεύξης* (downlink), λόγω της μεγάλης διαφοράς από τη μελέτη της *άνω ζεύξης*, πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο άλλης διδακτορικής διατριβής.

Οι ακόλουθες παράμετροι χαρακτηρίζουν μια κλήση κατηγορίας k ($k=1, \dots, K$):

- R_k : Ρυθμός μετάδοσης bit (transmission bit rate).
- μ_k^{-1} : Μέσος χρόνος εξυπηρέτησης (εκθετικά κατανομημένος).
- $(E_b/N_0)_k$: Παράμετρος σφάλματος bit (bit error rate (BER) parameter).

Ο μέσος ρυθμός άφιξης των κλήσεων κατηγορίας k συμβολίζεται με λ_k . Εδώ θεωρούμε *τυχαία* άφιξη των κλήσεων στο σύστημα, δηλαδή διαδικασία άφιξης Poisson. Το *προσφερόμενο φορτίο κίνησης* της κατηγορίας k ορίζεται ως: $a_k = \lambda_k \mu_k^{-1}$.

2.1.1.1 Παρεμβολές και Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων

Θεωρούμε ιδανικό έλεγχο ισχύος (power control), δηλαδή η ισχύς που λαμβάνεται στον σταθμό βάσης από κάθε κλήση κατηγορίας k είναι ίδια. Η ισχύς αυτή συμβολίζεται με P_k . Επειδή στα συστήματα W-CDMA όλοι οι χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα και στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, κάθε χρήστης αντιλαμβάνεται τα σήματα που αποστέλλονται από άλλους χρήστες ως θόρυβο. Αυτού του είδους θόρυβο τον ονομάζουμε *παρεμβολή* (interference). Διακρίνουμε δύο ειδών παρεμβολές:

- Η *ομοκυψελική παρεμβολή* (intra-cell interference), I_{intra} , προκαλείται από τους χρήστες που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη με τον χρήστη αναφοράς
- Η *διακυψελική παρεμβολή* (inter-cell interference), I_{inter} , προκαλείται από τους χρήστες που βρίσκονται σε κυψέλες, διαφορετικές από την κυψέλη του χρήστη αναφοράς

Εκτός από τις παρεμβολές, λαμβάνουμε υπ' όψη και την ύπαρξη του *θερμικού θορύβου* (thermal noise), P_N , ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως η παρεμβολή από μια κυψέλη χωρίς χρήστες.

Στα συστήματα W-CDMA ο *έλεγχος αποδοχής κλήσεων* (call admission control, CAC) πραγματοποιείται μετρώντας την *αύξηση θορύβου* (noise rise), NR . Η ποσότητα αυτή ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ισχύος, I_{total} , που λαμβάνει ο σταθμός βάσης προς την ισχύ του θερμικού θορύβου, P_N [18]:

$$NR = \frac{I_{total}}{P_N} = \frac{I_{intra} + I_{inter} + P_N}{P_N} \quad (2-1)$$

Κάθε φορά που έχουμε άφιξη μιας νέας κλήσης, ο μηχανισμός *ελέγχου αποδοχής κλήσεων* εκτιμά την *αύξηση θορύβου* και εάν αυτή ξεπερνά μια μέγιστη προκαθορισμένη τιμή, NR_{max} , τότε η νέα αυτή κλήση απορρίπτεται. Αλλιώς, η κλήση γίνεται δεκτή στο σύστημα.

2.1.1.2 Δραστηριότητα χρήστη

Θεωρούμε ότι κατά τη διάρκεια της εξυπηρέτησης των κλήσεων, αυτές σε κάποια χρονικά διαστήματα είναι *ενεργές* (δηλ. μεταδίδουν), ενώ σε κάποια άλλα είναι *παθητικές* (δηλ. δεν μεταδίδουν). Μια τέτοια συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί μέσω της *παραμέτρου δραστηριότητας χρήστη* (user activity factor). Η παράμετρος αυτή για την κατηγορία k συμβολίζεται με ν_k . Προφανώς πρέπει $0 < \nu_k \leq 1$. Οι χρήστες

που σε μια δεδομένη χρονική στιγμή μεταδίδουν, δηλαδή χρησιμοποιούν τους πόρους του συστήματος, ονομάζονται *ενεργοί χρήστες* (active users). Να σημειωθεί ότι στα EMLM και CDTM, που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, η παράμετρος ν_k ουσιαστικά θεωρείται ίση με την μονάδα, δηλαδή όλοι οι χρήστες θεωρούνται ενεργοί.

2.1.1.3 Παράγοντας φορτίου και φορτίο κυψέλης

Το *φορτίο κυψέλης* (cell load), n , ορίζεται ως ο λόγος της λαμβανόμενης ισχύος στον σταθμό βάσης από όλους τους *ενεργούς χρήστες* (χρήστες της κυψέλης αναφοράς και των γειτονικών κυψελών) προς την συνολική λαμβανόμενη ισχύ [18]:

$$n = \frac{I_{intra} + I_{inter}}{I_{intra} + I_{inter} + P_N} \quad (2-2)$$

Έτσι από τις (2-1) και (2-2) μπορούμε να εξάγουμε τη σχέση που συνδέει την *αύξηση θορύβου* και το *φορτίο κυψέλης*:

$$n = \frac{NR - 1}{NR} \quad (2-3)$$

Ορίζουμε τη μέγιστη τιμή του *φορτίου κυψέλης*, n_{max} , ως το *φορτίο κυψέλης* που αντιστοιχεί στη μέγιστη *αύξηση φορτίου*, NR_{max} . Μια τυπική τιμή είναι $n_{max} = 0.8$. Η παράμετρος n_{max} μπορεί να θεωρηθεί ως ο διαμοιραζόμενος πόρος του συστήματος.

Ο *παράγοντας φορτίου* (load factor), L_k , που ορίζεται στην (2-4), μπορεί να θεωρηθεί ως η απαίτηση σε πόρους μιας κλήσης κατηγορίας k [18], [39]:

$$L_k = \frac{(E_b / N_0)_k * R_k}{W + (E_b / N_0)_k * R_k} \quad (2-4)$$

όπου με W συμβολίζουμε τον ρυθμό τσιπ (chip rate) του φορέα του W-CDMA. Στα συστήματα που μελετάμε ισχύει $W = 3.84$ Mcps.

Το *φορτίο κυψέλης* μπορεί να γραφτεί ως άθροισμα του *ομοκυψελικού φορτίου* (intra-cell load), n_{intra} και του *διακυψελικού φορτίου* (inter-cell load), n_{inter} . Το πρώτο οφείλεται στους *ενεργούς χρήστες* της κυψέλης αναφοράς, ενώ το δεύτερο τους *ενεργούς χρήστες* των γειτονικών κυψελών. Οι δύο αυτές ποσότητες ορίζονται στις (2-5) και (2-6), αντίστοιχα:

$$n_{intra} = \sum_{k=1}^K m_k L_k \quad (2-5)$$

όπου m_k είναι το πλήθος των ενεργών χρηστών της κατηγορίας k .

$$n_{inter} = (1 - n_{max}) \frac{I_{inter}}{P_N} \quad (2-6)$$

Σύμφωνα με την πολιτική *ελέγχου αποδοχής κλήσεων*, η ακόλουθη συνθήκη χρησιμοποιείται από τον σταθμό βάσης για την απόφαση αποδοχής ή μη μιας νέας κλήσης της κατηγορίας k :

$$n + L_k \leq n_{max} \quad (2-7)$$

2.1.2 Πιθανότητες Τοπικής Απώλειας

Λόγω της συνθήκης (2-7), η πιθανότητα ότι μια νέα κλήση της κατηγορίας k απορρίπτεται κατά την άφιξη σε μια χρονική στιγμή όταν στο σύστημα υπάρχει *διακυψελικό φορτίο*, n_{intra} , ονομάζεται *πιθανότητα τοπικής απώλειας* (local blocking probability, LBP) και μπορεί να υπολογιστεί από [20]:

$$\beta_k(n_{intra}) = P(n_{intra} + n_{inter} + L_k > n_{max}) \quad (2-8)$$

Για τον υπολογισμό της *πιθανότητας τοπικής απώλειας* της (2-9) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις (2-4), (2-5) και (2-6). Παρατηρούμε ότι η μόνη άγνωστη παράμετρος είναι η *διακυψελική παρεμβολή*, I_{inter} . Όπως στις [19] και [39], η I_{inter} μοντελοποιείται ως λογαριθμοκανονική (lognormal) τυχαία μεταβλητή (με παραμέτρους μ_I και σ_I), η οποία είναι ανεξάρτητη από την *ομοκυψελική παρεμβολή*. Έτσι, η μέση τιμή, $E[I_{inter}]$, και η διασπορά, $Var[I_{inter}]$, της I_{inter} υπολογίζονται από τις (2-9) και (2-10):

$$E[I_{inter}] = e^{\mu_I + \frac{\sigma_I^2}{2}} \quad (2-9)$$

$$Var[I_{inter}] = (e^{\sigma_I^2} - 1)e^{2\mu_I + \sigma_I^2} \quad (2-10)$$

Λόγω της (2-6), το *διακυψελικό φορτίο*, n_{inter} , θα είναι επίσης μια λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή. Η μέση της τιμή, $E[n_{inter}]$, και διασπορά, $Var[n_{inter}]$, υπολογίζονται από (2-11) και (2-12), αντίστοιχα:

$$E[n_{inter}] = e^{\mu_n + \frac{\sigma_n^2}{2}} = \frac{1 - n_{max}}{P_N} E[I_{inter}] \quad (2-11)$$

$$Var[n_{inter}] = (e^{\sigma_n^2} - 1) e^{2\mu_n + \sigma_n^2} = \left(\frac{1 - n_{max}}{P_N}\right)^2 Var[I_{inter}] \quad (2-12)$$

όπου μ_n και σ_n είναι οι παράμετροι του n_{inter} , οι οποίες υπολογίζονται επιλύοντας τις (2-11) και (2-12):

$$\mu_n = \ln(E[I_{inter}]) - \frac{\ln(1 + CV[I_{inter}]^2)}{2} + \ln(1 - n_{max}) - \ln(P_N) \quad (2-13)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\ln(1 + CV[I_{inter}]^2)} \quad (2-14)$$

Ο συντελεστής της διασποράς (coefficient of variation), $CV[I_{inter}]$, ορίζεται ως:

$$CV[I_{inter}] = \frac{\sqrt{Var[I_{inter}]}}{E[I_{inter}]} \quad (2-15)$$

Να σημειωθεί ότι η (2-9) μπορεί να γραφτεί και ως:

$$1 - \beta_{k_l}(n_{intra}) = P(n_{inter} \leq n_{max} - n_{intra} - L_{k_l}) \quad (2-16)$$

Το δεξιό μέλος της (2-16), είναι η *αθροιστική συνάρτηση κατανομής* (cumulative distribution function, CDF) του n_{inter} . Συμβολίζεται με $P(n_{inter} \leq x) = F_n(x)$ και μπορεί να υπολογιστεί από:

$$F_n(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln x - \mu_n}{\sigma_n \sqrt{2}} \right) \right] \quad (2-17)$$

όπου $\operatorname{erf}(\bullet)$ είναι η γνωστή *συνάρτηση σφάλματος* (error function).

Έτσι, εάν αντικαταστήσουμε $x = n_{max} - n_{intra} - L_k$ στην (2-17), από την (2-16) μπορούμε να υπολογίσουμε την *πιθανότητα τοπικής απώλειας* των κλήσεων της κατηγορίας k ως ακολούθως:

$$\beta_{k_l}(n_{intra}) = \begin{cases} 1 - F_n(x), & x \geq 0 \\ 1, & x < 0 \end{cases} \quad (2-18)$$

2.1.3 Πιθανότητες Καταστάσεων

Όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, στα δίκτυα W-CDMA το φορτίο κυψέλης μπορεί να θεωρηθεί ως ο διαμοιραζόμενος πόρος του συστήματος και ο παράγοντας φορτίου μπορεί να θεωρηθεί ως η απαίτηση μιας κλήσης σε πόρους [39]. Έτσι, μπορούμε να τροποποιήσουμε την (1-4) για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων καταστάσεων στο W-MLM. Παρακάτω παρουσιάζονται 5 βήματα που απαιτούνται για την τροποποίηση αυτή.

2.1.3.1 Διακριτοποίηση των πόρων.

Η διακριτοποίηση του φορτίου κυψέλης, n , και του παράγοντα φορτίου, L_k , γίνεται με χρήση της βασικής μονάδας φορτίου κυψέλης (basic cell load unit) g :

$$C = \frac{n_{max}}{g} \quad (2-19)$$

$$b_k = \frac{L_k}{g} \quad (2-20)$$

Η αναγκαιότητα της διακριτοποίησης οφείλεται στο γεγονός ότι οι ποσότητες n και L_k παίρνουν συνεχείς τιμές, ενώ στο MLM η χωρητικότητα του συστήματος και οι απαιτήσεις των κλήσεων σε εύρος ζώνης εκφράζονται με ακραίους αριθμούς.

Οι προκύπτουσες διακριτές τιμές των (2-19) και (2-20) μπορούν να θεωρηθούν ως η χωρητικότητα του συστήματος και η απαίτηση σε εύρος ζώνης της κατηγορίας k , αντίστοιχα.

2.1.3.2 Προσθήκη της δραστηριότητας χρήστη

Το MLM θεωρεί κλήσεις που είναι ενεργές σε όλη τη διάρκεια του χρόνου εξυπηρέτησης και δεν παρέχει τη δυνατότητα διάκρισης των ενεργών από τους παθητικούς χρήστες. Όμως στα δίκτυα W-CDMA μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι οι παθητικοί χρήστες δεν καταλαμβάνουν τους πόρους του συστήματος. Έτσι, στο W-MLM η κατάσταση j δεν αντιπροσωπεύει το συνολικό πλήθος κατειλημμένων μονάδων εύρους ζώνης, όπως συμβαίνει στο MLM. Αντιθέτως, αντιπροσωπεύει το συνολικό πλήθος κατειλημμένων μονάδων εύρους ζώνης, εάν όλοι οι χρήστες ήταν ενεργοί. Συμβολίζουμε με c το συνολικό πλήθος κατειλημμένων μονάδων εύρους ζώνης, σε κάποια χρονική στιγμή. Να σημειωθεί ότι

στο EMLM, το c είναι πάντα ίσο με το j , ενώ στο W-EMLM έχουμε $0 \leq c \leq j$. Η περίπτωση $c=0$ αντιστοιχεί σε μια κατάσταση όπου όλοι οι χρήστες είναι *παθητικοί*, ενώ όταν $c=j$, τότε όλοι οι χρήστες είναι *ενεργοί*.

Συμβολίζουμε με $q(j)$ την πιθανότητα της κατάστασης j . Η *κατάληψη εύρους ζώνης* (bandwidth occupancy), $A(c|j)$, ορίζεται ως η υπό συνθήκη πιθανότητα ότι c μονάδες εύρους ζώνης είναι κατειλημμένες στην κατάσταση j και μπορεί να υπολογιστεί αναδρομικά από την [20]:

$$A(c|j) = \sum_{k=1}^K P_k(j) [v_k A(c-r_k | j-r_k) + (1-v_k) A(c | j-r_k)] \quad (2-21)$$

για $j = 1, \dots, j_{\max}$ και $c \leq j$, όπου $A(0|0)=1$ και $A(c|j)=0$ για $c > j$

Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος για τον αναδρομικό υπολογισμό των $A(c|j)$ της σχέσης (2-21). Το παράδειγμα αναφέρεται σε ένα σύστημα με δύο κατηγορίες κίνησης που έχουμε απαιτήσεις εύρους ζώνης 1 και 2. Ξεκινάμε από την κατάσταση $A(0|0)$ που έχουμε 0 ενεργούς χρήστες και 0 συνολικούς χρήστες. Μετά υπάρχουν οι εξής τέσσερις δυνατότητες:

α) Στο σύστημα έρχεται ένας παθητικός χρήστης της πρώτης κατηγορίας. Τότε το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση $A(0|1)$. Η μετάβαση αυτή συμβολίζεται με διακεκομμένη ευθεία γραμμή. Η πιθανότητα της μετάβασης αυτής είναι $(1-v_1)P_1(0)$.

β) Στο σύστημα έρχεται ένας παθητικός χρήστης της δεύτερης κατηγορίας. Τότε το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση $A(0|2)$. Η μετάβαση αυτή συμβολίζεται με διακεκομμένη πλάγια γραμμή. Η πιθανότητα της μετάβασης αυτής είναι $(1-v_2)P_2(0)$.

γ) Στο σύστημα έρχεται ένας ενεργός χρήστης της πρώτης κατηγορίας. Τότε το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση $A(1|1)$. Η μετάβαση αυτή συμβολίζεται με συνεχόμενη ευθεία γραμμή. Η πιθανότητα της μετάβασης αυτής είναι $v_1P_1(0)$.

δ) Στο σύστημα έρχεται ένας ενεργός χρήστης της δεύτερης κατηγορίας. Τότε το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση $A(2|2)$. Η μετάβαση αυτή συμβολίζεται με συνεχόμενη πλάγια γραμμή. Η πιθανότητα της μετάβασης αυτής είναι $v_2P_2(0)$.

Έτσι για παράδειγμα η πιθανότητα $\Lambda(1|2)$ υπολογίζεται από τις $\Lambda(0|1)$ και $\Lambda(1|2)$ ως εξής: $\Lambda(1|2) = (1 - \nu_1)P_1(1)\Lambda(0|1) + \nu_1P_1(1)\Lambda(1|1)$.

Σχήμα 2-1: Αναδρομικός υπολογισμός των $\Lambda(c|j)$.

2.1.3.3 Προσθήκη των τοπικών απωλειών

Στα συστήματα W-CDMA, λόγω της διακυψελικής παρεμβολής, η απώλεια μιας κλήσης της κατηγορίας k μπορεί να συμβεί σε κάθε κατάσταση j με πιθανότητα $LB_k(j)$. Η πιθανότητα αυτή ονομάζεται *παράγοντας τοπικής απώλειας* (local blocking factor, LBF) και μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας τις *πιθανότητες τοπικής απώλειας* πολλαπλασιασμένες με τις αντίστοιχες *καταλήψεις εύρους ζώνης*, $\Lambda(c|j)$, για κάθε c :

$$LB_k(j) = \sum_{c=0}^j \beta_k(c) \Lambda(c|j) \quad (2-22)$$

2.1.3.4 Προσδιορισμός του μεριδίου εύρους ζώνης

Το *μερίδιο εύρους ζώνης*, $P_k(j)$, της κατηγορίας k στην κατάσταση j προκύπτει από την (1-3) με προσθήκη των *παραγόντων τοπικής απώλειας*:

$$P_k(j) = \frac{\alpha_k(1 - LB_k(j - b_k))b_k q(j - b_k)}{jq(j)} \quad (2-23)$$

2.1.3.5 Υπολογισμός των πιθανοτήτων καταστάσεων

Οι μη κανονικοποιημένες πιθανότητες καταστάσεων προκύπτουν επεκτείνοντας την (1-7) λόγω της ύπαρξης των τοπικών απωλειών [20]:

$$\hat{q}(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K \alpha_k (1 - L_k(j - b_k)) b_k \hat{q}(j - b_k), \quad \text{για } j = 1, \dots, j_{\max} \quad (2-24)$$

όπου $\hat{q}(0)=1$ και $\hat{q}(j)=0$ για $j < 0$.

Τελικά, οι κανονικοποιημένες πιθανότητες καταστάσεων, $q(j)$, υπολογίζονται από:

$$q(j) = \frac{\hat{q}(j)}{\sum_{j=0}^{j_{\max}} \hat{q}(j)} \quad (2-25)$$

2.1.4 Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων

Η πιθανότητα απώλειας κλήσεων της κατηγορίας k μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας όλες τις πιθανότητες καταστάσεων πολλαπλασιασμένες με τους αντίστοιχους παράγοντες τοπικής απώλειας:

$$B_k = \sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j) L B_k(j) \quad (2-26)$$

Κεφάλαιο 3

3. Νέα Μοντέλα Απωλειών Κλήσεων για Ασύρματα Δίκτυα W-CDMA

3.1. WH-EMLM (Wireless Handoff EMLM): Το μοντέλο απωλειών κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης σε ασύρματα δίκτυα W-CDMA, με κίνηση μεταπομπής.

3.1.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε το μοντέλο Wireless Handoff Erlang Multi-Rate Loss Model (WH-EMLM) ([63]). Το μοντέλο αυτό είναι επέκταση του W-EMLM, ώστε να λαμβάνεται υπ' όψη και η κίνηση *μεταπομπής* (handoff).

Στο μοντέλο αυτό διακρίνουμε δύο ειδών απώλειες: τις απώλειες *νέων κλήσεων* (new-call blocking) και τις απώλειες των *κλήσεων μεταπομπής* (handoff-call blocking). Το πρώτο είδος αντιστοιχεί στην αποτυχία της αρχικής εγκαθίδρυσης της σύνδεσης, ενώ το δεύτερο είδος αντιστοιχεί στην απώλεια κλήσης καθώς αυτή μετακινείται από μια κυψέλη σε μια άλλη. Η διαδικασία μετακίνησης από μια κυψέλη σε μια άλλη, ενώ η κλήση βρίσκεται ακόμα σε εξυπηρέτηση, ονομάζεται *μεταπομπή* (handoff). Είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει μια πολιτική *ελέγχου αποδοχής κλήσεων* η οποία να εγγυάται ότι οι απώλειες των κλήσεων μεταπομπής θα είναι πολύ πιο σπάνιες από ότι οι απώλειες των νέων.

Στο WH-EMLM θεωρούμε ένα κυψελωτό σύστημα W-CDMA που υποστηρίζει μόνο μια κατηγορία κίνησης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια κυψέλη αναφοράς που γειτνιάζει με άλλες κυψέλες. Για λόγους παρουσίασης αρχικά θεωρούμε μόνο μια κατηγορία κίνησης και μετά επεκτείνουμε για την περίπτωση πολλών κατηγοριών.

Οι βασικές παράμετροι μιας κλήσης είναι:

R : Ρυθμός μετάδοσης bit

E_b/N_0 : Παράμετρος σφάλματος bit

ν : παράγοντας δραστηριότητας

Ο ρυθμός άφιξης των νέων κλήσεων συμβολίζεται με λ_N , ενώ ο ρυθμός άφιξης των κλήσεων μεταπομπής συμβολίζεται με λ_H . Θεωρούμε ότι οι κλήσεις και των δύο ειδών φτάνουν στο σύστημα σύμφωνα με τη διαδικασία Poisson. Να σημειώσουμε ότι η υπόθεση αυτή είναι ισοδύναμη με την υπόθεση άπειρου πλήθους πηγών που δημιουργούν κλήσεις. Ο χρόνος εξυπηρέτησης των νέων κλήσεων είναι εκθετικά κατανομημένος με μέση τιμή μ_N^{-1} , ενώ ο χρόνος εξυπηρέτησης των κλήσεων μεταπομπής είναι εκθετικά κατανομημένος με μέση τιμή μ_H^{-1} . Μια λογική υπόθεση είναι ότι $\mu_N^{-1} > \mu_H^{-1}$, επειδή οι κλήσεις που μετακινούνται στην κυψέλη αναφοράς από γειτονικές κυψέλες, έχουν ήδη εξυπηρετηθεί για κάποιο χρόνο στην προηγούμενη κυψέλη. Τέλος, το προσφερόμενο φορτίο κίνησης των νέων κλήσεων και των κλήσεων μεταπομπής ορίζεται ως $a_N = \lambda_N \mu_N^{-1}$ και $a_H = \lambda_H \mu_H^{-1}$, αντίστοιχα.

3.1.2 Παρεμβολές και Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων

Η χωρητικότητα της κυψέλης W-CDMA στην άνω ζεύξη περιορίζεται από τις παρεμβολές. Επομένως, πρέπει να συμπεριλάβουμε στο μοντέλο όλα τα είδη των παρεμβολών, όπως και στο W-EMLM. Οι παρεμβολές αυτές είναι: α) ομοκυβελικές παρεμβολές, I_{intra} , β) διακυβελικές παρεμβολές, I_{inter} , γ) θερμικός θόρυβος, P_N .

Όπως έχουμε αναφέρει, ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων πραγματοποιείται μετρώντας την αύξηση του θορύβου, NR . Επειδή στο WH-EMLM έχουμε δύο ειδών κλήσεις, ορίζουμε δύο όρια για την αύξηση του θορύβου, NR_N και NR_H , για τις νέες κλήσεις και για τις κλήσεις μεταπομπής αντίστοιχα. Προκειμένου να ευνοήσουμε τις κλήσεις μεταπομπής, τα δύο αυτά όρια πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ισχύει:

$$NR_H > NR_N \quad (3-1)$$

3.1.3 Παράγοντας Φορτίου και Φορτίο Κυψέλης

Λόγω της (2-3), από τα δύο όρια, NR_N and NR_H , μπορούμε να ορίσουμε δύο όρια για το φορτίο κυψέλης, n_N και n_H , τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στον έλεγχο αποδοχής

κλήσεων. Τα όρια πρέπει να είναι ίσα ή μικρότερα από την μέγιστη τιμή, $n_{max}=0.8$, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ο διαμοιραζόμενος πόρος του συστήματος.

Ο παράγοντας φορτίου, L , της (3-2) μπορεί να θεωρηθεί ως η απαίτηση σε πόρους μιας κλήσης:

$$L = \frac{\frac{E_b}{N_0} R}{W + \frac{E_b}{N_0} R} \quad (3-2)$$

όπου W είναι ο ρυθμός chip του φορέα W-CDMA (3.84 Mcps).

Σύμφωνα με την πολιτική *ελέγχου αποδοχής κλήσεων* που έχουμε υιοθετήσει, η ακόλουθη συνθήκη πρέπει να χρησιμοποιείται στον σταθμό βάσης για την απόφαση αποδοχής ή μη μιας νέας κλήσης:

$$n + L \leq n_N \quad (3-3)$$

Ομοίως, για την αποδοχή ή μη μιας κλήσης *μεταπομπής* πρέπει να χρησιμοποιείται η ακόλουθη συνθήκη

$$n + L \leq n_H \quad (3-4)$$

3.1.4 Πιθανότητες Τοπικής Απώλειας

Λόγω των (3-3) και (3-4) έχουμε διαφορετικές *πιθανότητες τοπικής απώλειας* για τις νέες κλήσεις και για τις κλήσεις *μεταπομπής*. Οι πιθανότητες αυτές υπολογίζονται από:

$$\beta_N(n_{intra}) = P(n_{intra} + n_{inter} + L > n_N) \quad (3-5)$$

$$\beta_H(n_{intra}) = P(n_{intra} + n_{inter} + L > n_H) \quad (3-6)$$

Ο υπολογισμός των β_N και β_H , πραγματοποιείται με παρόμοιο τρόπο όπως και στο W-EMLM (παράγραφος 2.1.2).

Από τις (3-5) και (3-6) προκύπτει ότι οι πιθανότητες μη-απώλειας για τις νέες κλήσεις και για τις κλήσεις *μεταπομπής* δίνονται αντίστοιχα από:

$$1 - \beta_N(n_{intra}) = P(n_{inter} \leq n_N - n_{intra} - L) \quad (3-7)$$

$$1 - \beta_H(n_{intra}) = P(n_{inter} \leq n_H - n_{intra} - L_k) \quad (3-8)$$

Τελικά αν $x = n_N - n_{intra} - L$ τότε προκύπτουν οι:

$$\beta_N(n_{intra}) = \begin{cases} 1 - F_n(x_N), & x_N \geq 0 \\ 1, & x_N < 0 \end{cases} \quad (3-9)$$

$$\beta_H(n_{intra}) = \begin{cases} 1 - F_n(x_H), & x_H \geq 0 \\ 1, & x_H < 0 \end{cases} \quad (3-10)$$

όπου

$$F_n(x) = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(\frac{\ln x - \mu_n}{\sigma_n \sqrt{2}})] \quad (3-11)$$

3.1.5 Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων

Παρακάτω περιγράφουμε το σύστημα με τη βοήθεια μιας Μαρκοβιανής αλυσίδας, υπολογίζουμε τις πιθανότητες καταστάσεων και τελικά υπολογίζουμε τις πιθανότητες απώλειας των νέων κλήσεων και των κλήσεων μεταπομπής .

Ξεκινάμε με την διακριτοποίηση του φορτίου κυψέλης, n , του ομοκυψελικού φορτίου, n_{intra} , και του παράγοντα φορτίου, L , με τη χρήση της βασικής μονάδας g :

$$j = \frac{n}{g}, \quad c = \frac{n_{intra}}{g} \quad \text{και} \quad b = \frac{L}{g} \quad (3-12)$$

Η μονάδα g πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αρκετά μικρή για αποφυγή υψηλών σφαλμάτων διακριτοποίησης και να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αποφύγουμε μεγάλο χώρο καταστάσεων.

Οι προκύπτουσες διακριτές τιμές j , c και b της (3-12) μπορούν να θεωρηθούν ως το συνολικό πλήθος των κατειλημμένων πόρων του συστήματος, το πλήθος των κατειλημμένων πόρων από τους ενεργούς χρήστες και η απαίτηση σε πόρους μιας

κλήσης, αντίστοιχα. Βασιζόμενοι στα παραπάνω, μπορούμε να περιγράψουμε το σύστημα με μια δυσδιάστατη Μαρκοβιανή αλυσίδα, όπου κάθε κατάσταση του συστήματος μπορεί να οριστεί ως ένα δυσδιάστατο διάνυσμα $\vec{s} = (n_N, n_H)$, με n_N το πλήθος των νέων κλήσεων και n_H το πλήθος των κλήσεων μεταπομπής στο σύστημα.

Ένα παράδειγμα μιας Μαρκοβιανής αλυσίδας για ένα μικρό σύστημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-1. Παρατηρούμε ότι στις μεταβάσεις από τις χαμηλότερες καταστάσεις προς υψηλότερες οι ρυθμοί άφιξης των κλήσεων, λ_N και λ_H , πολλαπλασιάζονται με τους παράγοντες μετάβασης (passage factors), $PF_N(\vec{s})$ και $PF_H(\vec{s})$, οι οποίοι εξαρτώνται από την κατάσταση του συστήματος. Οι παράγοντες αυτοί εκφράζουν την πιθανότητα μετάβασης από μια κατάσταση $\vec{s}$ σε υψηλότερες καταστάσεις. Η πιθανότητα απώλειας μιας κλήσης μεγαλώνει όσο περνάμε σε υψηλότερες καταστάσεις, λόγω της ύπαρξης περισσότερων κλήσεων στο σύστημα. Επομένως, σε κάποιες καταστάσεις οι παράγοντες μετάβασης θα είναι πολύ μικροί (πρακτικά μηδέν) και δεν θα υπάρχει δυνατότητα για το σύστημα να περάσει σε ακόμα υψηλότερες καταστάσεις. Αυτό υπονοεί ότι υπάρχει κάποιο άνω όριο στο πλήθος των νέων κλήσεων στο σύστημα, $n_{N,max}$, και ένα άνω όριο για το πλήθος των κλήσεων μεταπομπής στο σύστημα $n_{H,max}$. Να σημειώσουμε ότι λόγω της (3-1) περιμένουμε ότι $n_{H,max} > n_{N,max}$. Στο παράδειγμα του Σχήματος 3-1 έχουμε $b=1$, $n_{N,max} = 2$ και $n_{H,max} = 3$.

Οι παράγοντες μετάβασης σχετίζονται με τους παράγοντες τοπικής απώλειας με τις παρακάτω σχέσεις

$$LB_N(\vec{s}) = 1 - PF_N(\vec{s}) \quad (3-13)$$

$$LB_H(\vec{s}) = 1 - PF_H(\vec{s}) \quad (3-14)$$

Σχήμα 3-1: Δισδιάστατη Μαρκοβιανή αλυσίδα για το μικρό παράδειγμα.

Από τους παραπάνω ορισμούς βλέπουμε ότι οι παράγοντες τοπικής απώλειας εκφράζουν την πιθανότητα ότι μια κλήση μπλοκάρει στην κατάσταση $\bar{s}$.

Να σημειώσουμε ότι το πλήθος των κατειλημμένων πόρων, j , μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας τους πόρους που έχουν εκχωρηθεί σε όλες τις κλήσεις που εξυπηρετούνται στο σύστημα:

$$j = n_N b + n_H b = (n_N + n_H) b \quad (3-15)$$

Η υψηλότερη δυνατή κατάσταση (μέγιστο πλήθος των κατειλημμένων πόρων), $j_{\max}$, μπορεί να υπολογιστεί από:

$$j_{\max} = (n_{N,\max} + n_{H,\max}) b \quad (3-16)$$

Με βάση τα παραπάνω, η δισδιάστατη Μαρκοβιανή αλυσίδα μπορεί να απλοποιηθεί σε μονοδιάστατη, όπου ως κατάσταση ορίζεται η παράμετρος j . Έτσι, το σύστημα του Σχήματος 3-1 μπορεί να αναπαρασταθεί και όπως στο Σχήμα 3-2. Οι ρυθμοί μετάβασης $\lambda_N(j)$ και $\lambda_H(j)$, που φαίνονται στο Σχήμα 3-2, δίνονται από (3-17) και (3-18), αντίστοιχα.

$$\lambda_N(j) = \lambda_N(1 - LB_N(j)) \quad (3-17)$$

$$\lambda_H(j) = \lambda_H(1 - LB_H(j)) \quad (3-18)$$

Σχήμα 3-2. Μονοδιάστατη Μαρκοβιανή αλυσίδα για το μικρό παράδειγμα.

Το μέσο πλήθος των νέων κλήσεων και των κλήσεων μεταπομπής στην κατάσταση j συμβολίζεται με $Y_N(j)$ και $Y_H(j)$, αντίστοιχα. Οι παράγοντες τοπικής απώλειας μπορούν να υπολογιστούν από τις (3-19) και (3-20):

$$LB_N(j) = \sum_{c=0}^j \beta_N(c) A(c | j) \quad (3-19)$$

$$LB_H(j) = \sum_{c=0}^j \beta_H(c) A(c | j) \quad (3-20)$$

Η κατάληψη πόρων, $A(c|j)$, ορίζεται ως η υπό συνθήκη πιθανότητα ότι c πόροι καταλαμβάνονται από του ενεργούς χρήστες στην κατάσταση j και μπορεί να υπολογιστεί από:

$$A(c|j) = \nu A(c-b | j-b) + (1-\nu) A(c | j-b) \quad (3-21)$$

για $j = 1, \dots, j_{\max}$ και $c \leq j$

όπου $A(0|0)=1$ και $A(c|j)=0$ για $c > j$.

Συμβολίζουμε με $q(j)$ την πιθανότητα ότι το σύστημα είναι στην κατάσταση j . Επιλύοντας την μονοδιάστατη Μαρκοβιανή αλυσίδα, μπορούμε να υπολογίσουμε τις πιθανότητες καταστάσεων, $q(j)$, από τον ακόλουθο αναδρομικό τύπο [63]:

$$q(j) = \frac{1}{j} \alpha_N (1 - LB_N(j-b)) b q(j-b) + \frac{1}{j} \alpha_H (1 - LB_H(j-b)) b q(j-b) \quad (3-22)$$

για $j = 1, \dots, j_{\max}$ και $q(j) = 0$ για $j < 0$, όπου $\sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j) = 1$

Με τη βοήθεια της (3-22) οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων μπορούν να υπολογιστούν προσθέτοντας τις πιθανότητες καταστάσεων, πολλαπλασιασμένες με του αντίστοιχους παράγοντες τοπικής απώλειας για όλες τις δυνατές καταστάσεις του συστήματος. Επομένως, οι πιθανότητες απώλειας νέων κλήσεων και οι πιθανότητες απώλειας των κλήσεων μεταπομπής δίνονται από τις (3-23) και (3-24), αντίστοιχα:

$$B_N = \sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j) LB_N(j) \quad (3-23)$$

$$B_H = \sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j) LB_H(j) \quad (3-24)$$

3.1.6 Γενίκευση σε Πολλές Κατηγορίες

Όλη η προηγούμενη ανάλυση, που αφορούσε σύστημα με μια μόνο κατηγορία κίνησης, μπορεί να γενικευτεί και σε συστήματα που υποστηρίζουν πολλές κατηγορίες κίνησης.

Στο Σχήμα 3-3 δείχνουμε μια Μαρκοβιανή αλυσίδα για ένα σύστημα που υποστηρίζει δύο κατηγορίες κίνησης. Συνολικά έχουμε 4 καταστάσεις (0 έως $j_{\max}=3$). Οι απαιτήσεις των κλήσεων των δύο κατηγοριών είναι $b_1=1$ και $b_2=2$. Στο Σχήμα 3-3, οι $\lambda_{N,k}(j)$ και $\lambda_{H,k}(j)$ είναι οι ρυθμοί μετάβασης προς υψηλότερες καταστάσεις και δίνονται από:

$$\lambda_{N,k}(j) = \lambda_{N,k}(1 - LB_{N,k}(j)) \quad (3-25)$$

$$\lambda_{H,k}(j) = \lambda_{H,k}(1 - LB_{H,k}(j)) \quad (3-26)$$

Σχήμα 3-3: Μαρκοβιανή αλυσίδα στο WH-EMLM.

Θεωρείστε ένα σύστημα W-CDMA που υποστηρίζει K κατηγορίες. Οι πιθανότητες καταστάσεων, $q(j)$, μπορούν να υπολογιστούν από τον ακόλουθο αναδρομικό τύπο [63], [64]:

$$q(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K a_{k,N} (1 - LB_{k,N}(j - b_k)) b_k q(j - b_k) + \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K a_{k,H} (1 - LB_{k,H}(j - b_k)) b_k q(j - b_k) \quad (3-27)$$

$$\text{για } j = 1, \dots, j_{\max} \text{ και } q(j) = 0 \text{ για } j < 0, \text{ όπου } \sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j) = 1$$

όπου $a_{k,N}$ είναι το προσφερόμενο φορτίο κίνησης των νέων κλήσεων της κατηγορίας k ($k=1, \dots, K$), $a_{k,H}$ είναι το προσφερόμενο φορτίο κίνησης των κλήσεων μεταπομπής της κατηγορίας k , $LB_{k,N}$ είναι ο παράγοντας τοπικής απώλειας των νέων κλήσεων της κατηγορίας k , $LB_{k,H}$ είναι ο παράγοντας τοπικής απώλειας των κλήσεων μεταπομπής της κατηγορίας k και b_k είναι η απαίτηση σε πόρους μιας κλήσης της κατηγορίας k (είτε μιας νέας κλήσης είτε μιας κλήσης μεταπομπής).

Για $K=1$, η (3-27) απλοποιείται στην (3-22). Οι πιθανότητες απώλειας νέων κλήσεων και οι πιθανότητες απώλειας των κλήσεων μεταπομπής της κατηγορίας k , δίνονται από (3-28) και (3-29), αντίστοιχα:

$$B_{k,N} = \sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j) LB_{k,N}(j) \quad (3-28)$$

$$B_{k,H} = \sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j) LB_{k,H}(j) \quad (3-29)$$

3.1.7 Αριθμητικά Αποτελέσματα (1^ο παράδειγμα)

Στην παράγραφο αυτή συγκρίνουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το WH-EMLM. Υπολογίζουμε τις *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* και των δύο ειδών, των *νέων κλήσεων* και των *κλήσεων μεταπομπής*.

Θεωρούμε ένα σύστημα W-CDMA με δύο κατηγορίες κίνησης, των οποίων οι παράμετροι είναι οι παρακάτω:

i) $R = 144$ Kbps, $E_b/N_0 = 3$ dB και $\nu = 0.7$.

ii) $R = 384$ Kbps, $E_b/N_0 = 4$ dB και $\nu = 0.6$.

Η διακυψελική παρεμβολή είναι κατανεμημένη λογαριθμοκανονικά με μέση τιμή $E[I_{inter}] = 2 \cdot 10^{-18}$ mW και συντελεστή διασποράς $CV[I_{inter}] = 1$. Η πυκνότητα φάσματος ισχύος του θερμικού θορύβου είναι -174dBm/Hz. Για διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκε $g = 0.001$.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Simscript II.5. Οι κινητές πηγές παράγουν κλήσεις διαφορετικών υπηρεσιών. Οι κλήσεις ανταγωνίζονται για το διαθέσιμο εύρος ζώνης (πόροι του συστήματος). Όταν το απαιτούμενο από την κλήση εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο, η κλήση γίνεται δεκτή στο σύστημα. Αλλιώς η κλήση μπλοκάρεται και αποχωρεί χωρίς να εξυπηρετηθεί. Στο τέλος της προσομοίωσης υπολογίζεται το ποσοστό των κλήσεων κάθε υπηρεσίας που έχουν εξυπηρετηθεί.

Αρχικά, υπολογίζουμε τις *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* για εννέα διαφορετικά σημεία φορτίου κίνησης (σημεία 1 έως 9 στον άξονα των x των Σχημάτων 3-4, 3-5 και 3-6) και για τα ακόλουθα κατώφλια φορτίου κυψέλης: $n_H = n_{\max} = 0.8$ και $n_N = 0.7$. Κάθε σημείο αντιστοιχεί σε κάποιες τιμές του προσφερόμενου φορτίου κίνησης των νέων κλήσεων και των κλήσεων μεταπομπής, όπως δείχνουμε στους Πίνακες 3-1 και 3-2. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της κατηγορίας των 144 Kbps, σύμφωνα με τον Πίνακα 3-1 το σημείο 1 αντιστοιχεί σε $a_N = 1.0$ και $a_H = 0.2$, το σημείο 2 σε $a_N = 1.5$ και $a_H = 0.3$ κλπ. Στο Σχήμα 3-4 παρουσιάζουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* για την κατηγορία των 144 Kbps, ενώ στο Σχήμα 3-5 παρουσιάζουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την κατηγορία των 384 Kbps. Και τα δύο σχήματα δείχνουν ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι πολύ ικανοποιητική. Παρατηρούμε επίσης ότι,

όπως και ήταν αναμενόμενο, με την αύξηση του προσφερόμενου φορτίου κίνησης, οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων επίσης αυξάνονται.

Έπειτα, θεωρούμε μόνο την κατηγορία των 144 Kbps. Μεταβάλλουμε την τιμή του n_N , ενώ διατηρούμε σταθερή την τιμή του n_H , για το ίδιο προσφερόμενο φορτίο κίνησης (Πίνακας 3-1) και υπολογίζουμε τις πιθανότητες απώλειας των κλήσεων μεταπομπής. Έχουν χρησιμοποιηθεί τέσσερις διαφορετικές τιμές του n_N : 0.75, 0.70, 0.65, 0.60. Τα αντίστοιχα αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-6. Παρατηρούμε ότι μειώνοντας την τιμή του n_N μπορούμε να μειώσουμε σημαντικά τις πιθανότητες απώλειας των κλήσεων μεταπομπής. Αυτό είναι περισσότερο εμφανές στην περίπτωση υψηλού προσφερόμενου φορτίου κίνησης (σημεία 8 και 9).

Σχήμα 3-4: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για την κατηγορία των 144 Kbps.

Σχήμα 3-5: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για την κατηγορία των 384 Kbps.

Σχήμα 3-6: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων μεταπομπής συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για την κατηγορία των 144 Kbps.

Πίνακας 3-1: Προσφερόμενο φορτίο κίνησης για την κατηγορία των 144 Kbps.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α_N (erl)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
α_H (erl)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

Πίνακας 3-2: Προσφερόμενο φορτίο κίνησης για την κατηγορία των 384 Kbps.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α_N (erl)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
α_H (erl)	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5

3.1.8 Αριθμητικά Αποτελέσματα (2^ο παράδειγμα)

Στο 2^ο παράδειγμα θεωρούμε τις παρακάτω δύο κατηγορίες κίνησης:

- $R_1=144$ Kbps, $(E_b/N_0)_1 = 3$ dB και $v_1 = 0.7$
- $R_2=384$ Kbps, $(E_b/N_0)_2 = 4$ dB και $v_2 = 1.0$

Υπολογίζουμε τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων για 7 σημεία (Σχήμα 3-7) και τα ακόλουθα κατώφλια: $n_{H,1} = n_{H,2} = n_{\max} = 0.8$ και $n_{N,1} = n_{N,2} = 0.7$. Το προσφερόμενο φορτίο παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-3. Στο Σχήμα 3-7 σε όλες τις περιπτώσεις τα αναλυτικά αποτελέσματα συμφωνούν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης..

Ύστερα, ελέγχουμε το μοντέλο για διαφορετικά κατώφλια $n_{N,1}$ και $n_{N,2}$ (ο άξονας των x του Σχήματος 3-8). Για απλότητα, τα κατώφλια αυτά έχουν επιλεγεί να είναι ίσα και για τις δύο κατηγορίες. Τα $n_{H,1}$ και $n_{H,2}$ διατηρούνται στην μέγιστη τιμή 0.8. Στο Σχήμα 3-8 παρατηρούμε ότι μειώνοντας τα κατώφλια $n_{N,1}$ και $n_{N,2}$ μπορούμε να μειώσουμε την πιθανότητα απώλειας των κλήσεων μεταπομπής. Αυτό είναι περισσότερο εμφανές στην περίπτωση των κατηγοριών με τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε πόρους (όπως είναι η 2^η κατηγορία του παραδείγματός μας).

Σχήμα 3-7: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το 2^ο παράδειγμα.

Σχήμα 3-8: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων μεταπομπής συναρτήσει των κατωφλίων ελέγχου αποδοχής κλήσεων.

Πίνακας 3-3: Προσφερόμενο φορτίο κίνησης (erl).

	1 ^η κατηγορία		2 ^η κατηγορία	
	$\alpha_{N,1}$	$\alpha_{H,1}$	$\alpha_{N,2}$	$\alpha_{H,2}$
1	0.25	0.05	0.05	0.01
2	0.375	0.075	0.075	0.015
3	0.50	0.10	0.10	0.02
4	0.625	0.125	0.125	0.025
5	0.75	0.15	0.15	0.03
6	0.875	0.175	0.175	0.035
7	1.0	0.2	0.2	0.04

3.2. W-CDTM (Wireless CDTM): Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης σε ασύρματα δίκτυα W-CDMA.

3.2.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Το Wireless Connection Dependent Threshold Model (W-CDTM) ([68]) συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των W-EMLM και CDTM. Το μοντέλο αυτό έχει προταθεί για την ανάλυση της απόδοσης σε επίπεδο κλήσεων των δικτύων W-CDMA που υποστηρίζουν ελαστικές κατηγορίες κίνησης Poisson. Θεωρούμε ένα σύστημα W-CDMA που υποστηρίζει K ανεξάρτητες κατηγορίες κίνησης. Μελετάμε μια κυψέλη αναφοράς που γειτνιάζει με άλλες κυψέλες. Επικεντρωνόμαστε μόνο στην άνω ζεύξη, δηλαδή εξετάζουμε μόνο τις κλήσεις από τους κινητούς χρήστες προς τον σταθμό βάσης.

Η ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS) που προσφέρεται από το σύστημα στην κατηγορία κίνησης k ($k=1, \dots, K$) ανήκει σε ένα από τα S_k πιθανά επίπεδα QoS. Τα επίπεδα αυτά εξαρτώνται από το πλήθος των κατειλημμένων πόρων του συστήματος. Στη συνέχεια μια κλήση που ανήκει στην κατηγορία k και έχει επίπεδο QoS l ($l=1, \dots, S_k$) αναφέρεται ως κλήση της κατηγορίας k_l .

Οι ακόλουθες παράμετροι QoS χαρακτηρίζουν μια κλήση κατηγορίας k_l :

- R_{k_l} : Ρυθμός μετάδοσης bit (transmission bit rate).
- $\mu_{k_l}^{-1}$: Μέσος χρόνος εξυπηρέτησης (εκθετικά κατανομημένος).
- $(E_b/N_0)_{k_l}$: Παράμετρος σφάλματος bit (bit error rate (BER) parameter).

Κάθε μια από τις K κατηγορίες κίνησης ανήκει σε έναν από τους παρακάτω τρεις τύπους κίνησης:

- *Σταθερές*: κατηγορίες κίνησης που έχουν μόνο ένα επίπεδο QoS ($S_k=1$).
- *Ελαστικές*: κατηγορίες κίνησης που έχουν περισσότερα από ένα επίπεδα QoS ($S_k>1$) και ο ρυθμός εξυπηρέτησης των κλήσεων είναι εξαρτώμενος από το επίπεδο QoS (και ισχύει: $\mu_{k_{S_k}}^{-1} > \dots > \mu_{k_l}^{-1} > \dots > \mu_{k_2}^{-1} > \mu_{k_1}^{-1}$).
- *Προσαρμοζόμενες*: κίνησης που έχουν περισσότερα από ένα επίπεδα QoS ($S_k>1$) και ο ρυθμός εξυπηρέτησης των κλήσεων είναι ο ίδιος για κάθε επίπεδο QoS (δηλαδή ισχύει: $\mu_{k_{S_k}}^{-1} = \dots = \mu_{k_l}^{-1} = \dots = \mu_{k_2}^{-1} = \mu_{k_1}^{-1}$).

Ο μέσος ρυθμός άφιξης των κλήσεων κατηγορίας k συμβολίζεται με λ_k . Εδώ θεωρούμε *τυχαία* άφιξη των κλήσεων στο σύστημα, δηλαδή διαδικασία άφιξης Poisson. Το *προσφερόμενο φορτίο κίνησης* της κατηγορίας k_l ορίζεται ως: $a_{k_l} = \lambda_k \mu_{k_l}^{-1}$.

3.2.1.1 Παρεμβολές και Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων

Θεωρούμε ιδανικό *έλεγχο ισχύος*, δηλαδή η ισχύς που λαμβάνεται στον σταθμό βάσης από κάθε κλήση κατηγορίας k_l είναι ίδια. Η ισχύς αυτή συμβολίζεται με P_{k_l} . Επειδή στα συστήματα W-CDMA όλοι οι χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα και στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, κάθε χρήστης αντιλαμβάνεται τα σήματα που αποστέλλονται από άλλους χρήστες ως θόρυβο. Αυτού του είδους θόρυβο τον ονομάζουμε *παρεμβολή* (interference). Διακρίνουμε δύο ειδών παρεμβολές:

- Η *ομοκυψελική παρεμβολή* (intra-cell interference), I_{intra} , προκαλείται από τους χρήστες που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη με τον χρήστη αναφοράς
- Η *διακυψελική παρεμβολή* (inter-cell interference), I_{inter} , προκαλείται από τους χρήστες που βρίσκονται σε κυψέλες, διαφορετικές από την κυψέλη του χρήστη αναφοράς

Εκτός από τις παρεμβολές, λαμβάνουμε υπ' όψη και την ύπαρξη του *θερμικού θορύβου* (thermal noise), P_N , ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως η παρεμβολή από μια κυψέλη χωρίς χρήστες.

Στα συστήματα W-CDMA ο *έλεγχος αποδοχής κλήσεων* πραγματοποιείται μετρώντας την *αύξηση θορύβου* (noise rise), NR . Η ποσότητα αυτή ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ισχύος, I_{total} , που λαμβάνει ο σταθμός βάσης προς την ισχύ του θερμικού θορύβου, P_N [18]:

$$NR = \frac{I_{total}}{P_N} = \frac{I_{intra} + I_{inter} + P_N}{P_N} \quad (3-30)$$

Κάθε φορά που έχουμε άφιξη μιας νέας κλήσης, ο μηχανισμός *ελέγχου αποδοχής κλήσεων* εκτιμά την *αύξηση θορύβου* και εάν αυτή ξεπερνά μια μέγιστη προκαθορισμένη τιμή, NR_{max} , τότε η νέα αυτή κλήση απορρίπτεται. Αλλιώς, η κλήση γίνεται δεκτή στο σύστημα.

3.2.1.2 Δραστηριότητα χρήστη

Θεωρούμε ότι κατά τη διάρκεια της εξυπηρέτησης των κλήσεων, αυτές σε κάποια χρονικά διαστήματα είναι *ενεργές*, ενώ σε κάποια άλλα είναι *παθητικές*. Μια τέτοια συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί μέσω της *παραμέτρου δραστηριότητας χρήστη*. Η παράμετρος αυτή για την κατηγορία k συμβολίζεται με v_k . Προφανώς πρέπει $0 < v_k \leq 1$. Οι χρήστες που σε μια δεδομένη χρονική στιγμή μεταδίδουν, δηλαδή χρησιμοποιούν τους πόρους του συστήματος, ονομάζονται *ενεργοί χρήστες*.

3.2.1.3 Παράγοντας φορτίου και φορτίο κυψέλης

Το *φορτίο κυψέλης* (cell load), n , ορίζεται ως ο λόγος της λαμβανόμενης ισχύος στον σταθμό βάσης από όλους τους *ενεργούς χρήστες* (χρήστες της κυψέλης αναφοράς και των γειτονικών κυψελών) προς την συνολική λαμβανόμενη ισχύ [18]:

$$n = \frac{I_{intra} + I_{inter}}{I_{intra} + I_{inter} + P_N} \quad (3-31)$$

Έτσι από τις (3-30) και (3-31) μπορούμε να εξάγουμε τη σχέση που συνδέει την *αύξηση θορύβου* και το *φορτίο κυψέλης*:

$$NR = \frac{1}{1-n} \quad \text{και} \quad n = \frac{NR-1}{NR} \quad (3-32)$$

Παρατηρείστε ότι όταν το NR τείνει στο άπειρο, τότε $n \rightarrow 1$, ενώ όταν το NR τείνει στο 1 τότε $n \rightarrow 0$.

Ορίζουμε τη μέγιστη τιμή του *φορτίου κυψέλης*, n_{max} , ως το *φορτίο κυψέλης* που αντιστοιχεί στη μέγιστη *αύξηση φορτίου*, NR_{max} . Μια τυπική τιμή είναι $n_{max} = 0.8$. Η παράμετρος n_{max} μπορεί να θεωρηθεί ως ο διαμοιραζόμενος πόρος του συστήματος.

Ο *παράγοντας φορτίου* (load factor), L_{k_l} , που ορίζεται στην (3-33), μπορεί να θεωρηθεί ως η απαίτηση σε πόρους μιας κλήσης κατηγορίας k_l [18], [39]:

$$L_{k_l} = \frac{(E_b / N_0)_{k_l} * R_{k_l}}{W + (E_b / N_0)_{k_l} * R_{k_l}} \quad (3-33)$$

όπου με W συμβολίζουμε τον ρυθμό τσιπ (chip rate) του φορέα του W-CDMA. Στα συστήματα που μελετάμε ισχύει $W=3.84$ Mcps.

Το *φορτίο κυψέλης* μπορεί να γραφτεί (δείτε την (3-36), παρακάτω) ως άθροισμα του *ομοκυψελικού φορτίου* (intra-cell load), n_{intra} και του *διακυψελικού φορτίου* (inter-cell load), n_{inter} . Το πρώτο οφείλεται στους *ενεργούς χρήστες* της κυψέλης αναφοράς, ενώ το δεύτερο τους *ενεργούς χρήστες* των γειτονικών κυψελών. Οι δύο αυτές ποσότητες ορίζονται στις (3-34) και (3-35), αντίστοιχα:

$$n_{intra} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{S_k} m_{k_l} L_{k_l} \quad (3-34)$$

όπου m_{k_l} είναι το πλήθος των *ενεργών χρηστών* της κατηγορίας k_l .

$$n_{inter} = (1 - n_{max}) \frac{I_{inter}}{P_N} \quad (3-35)$$

$$n = n_{intra} + n_{inter} \quad (3-36)$$

Σχήμα 3-9: Ομοκυψελικό και διακυψελικό φορτίο στο W-CDMA.

Το Σχήμα 3-9 βοηθάει στην κατανόηση του *φορτίου κυψέλης* των συστημάτων W-CDMA. Βλέπουμε δύο χρήστες της κυψέλης αναφοράς (η οποία ελέγχεται από τον σταθμό βάσης BS-1). Οι χρήστες αυτοί κατά το *ενεργό διάστημα* καταλαμβάνουν

L_1 και L_2 πόρους και έτσι συνεισφέρουν στο *ομοκυβελικό φορτίο*, n_{intra} , έτσι όπως το μετράει ο BS-1. Οι χρήστες (οι οποίοι δεν φαίνονται στο σχήμα) των δύο γειτονικών κυψελών (οι οποίες ελέγχονται από τους BS-2 και BS-3) συνεισφέρουν το *διακυβελικό φορτίο*, n_{inter} .

Σύμφωνα με την πολιτική *ελέγχου αποδοχής κλήσεων* που έχουμε υιοθετήσει, η ακόλουθη συνθήκη χρησιμοποιείται από τον σταθμό βάσης για την απόφαση αποδοχής ή μη μιας νέας κλήσης της κατηγορίας k_l :

$$n + L_{k_l} \leq n_{\max} \quad (3-37)$$

3.2.2 Ένα Μικρό Παράδειγμα

Παρουσιάζουμε τις βασικές αρχές του W-CDTM με τη βοήθεια ενός μικρού παραδείγματος. Το παράδειγμα αυτό είναι μια επέκταση του παραδείγματος της παραγράφου 1.2.2, όπου γίνεται η εισαγωγή της έννοιας της *τοπικής απώλειας* (local blocking). Λόγω των *τοπικών απωλειών*, στο W-CDTM δεν υπάρχουν «καθαρές» *καταστάσεις απώλειας* και *μη απώλειας*. Αντιθέτως, η απώλεια μιας κλήσης της κατηγορίας k_l σε μια κατάσταση j συμβαίνει με πιθανότητα $LB_{k_l}(j)$, η οποία ονομάζεται *παράγοντας τοπικής απώλειας* (local blocking factor). Στο Σχήμα 3-10, δείχνουμε το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων για το παράδειγμα αυτό για τη 2^η κατηγορία. Βλέπουμε ότι, λόγω των *τοπικών απωλειών*, στο Σχήμα 3-10, οι ρυθμοί μετάβασης από τις χαμηλότερες καταστάσεις προς υψηλότερες έχουν μειωθεί κατά $1 - LB_{k_l}(j)$ σε σύγκριση με την περίπτωση του CDTM (Σχήμα 1-3). Μια άλλη διαφορά είναι ότι η κατάσταση του συστήματος j μπορεί να ξεπεράσει το C . Η μέγιστη τιμή του j συμβολίζεται με $j_{\max}$ και εκφράζει την κατάσταση πέρα από την οποία ο παράγοντας $LB_{k_l}(j)$ είναι πρακτικά ίσος με 1, δηλαδή όταν οι υψηλότερες καταστάσεις πρακτικά δεν υπάρχουν λόγω των *τοπικών απωλειών*. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι στα συστήματα W-CDMA δεν υπάρχει αυστηρό όριο για την χωρητικότητα του συστήματος και γι' αυτό αναφερόμαστε σε *μεταβλητή χωρητικότητα* (soft capacity). Η Μαρκοβιανή αλυσίδα του Σχήματος 3-10 δεν έχει *λύση μορφής γινομένου* λόγω της ύπαρξης διαφορετικών εναλλακτικών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης (όπως και στο CDTM) και επίσης λόγω των *τοπικών απωλειών*, επειδή αυτές καταστρέφουν την τοπική ισορροπία ανάμεσα σε γειτονικές καταστάσεις.

Σχήμα 3-10: Διάγραμμα Μετάβασης Καταστάσεων στο W-CDTM.

3.2.3 Βασικές Προσεγγίσεις

Εισάγοντας τις ακόλουθες προσεγγίσεις, τροποποιούμε το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων του μοντέλου, έτσι ώστε αυτό να γίνει αντιστρέψιμο και να μπορεί να εξαχθεί ένας προσεγγιστικός αλλά αναδρομικός τύπος για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων καταστάσεων. Οι προσεγγίσεις αυτές είναι ίδιες με αυτές του CDTM (παράγραφος 1.2.3) με τη μόνη διαφορά ότι λαμβάνουν υπ' όψη τη μεταβλητή χωρητικότητα $j_{\max}$.

- 1) *Τοπική ισορροπία* ανάμεσα στις γειτονικές καταστάσεις.
- 2) *Προσέγγιση μετανάστευσης*: Το πλήθος των κλήσεων που έχουν γίνει δεκτές στο σύστημα με απαίτηση σε εύρος ζώνης διαφορετική από τη μέγιστη είναι αμελητέο μέσα σε έναν χώρο που ονομάζεται *χώρος μετανάστευσης*. Πιο συγκεκριμένα, το πλήθος $Y_{k_l}(j)$ ($l \neq 0$), των κλήσεων με απαίτηση εύρους ζώνης b_{k_l} στην κατάσταση j είναι αμελητέο όταν $0 < j < J_{k_l} + b_{k_l}$ και $J_{k_{l+1}} + b_{k_l} < j \leq j_{\max}$.
- 3) *Προσέγγιση της εμπρός μετανάστευσης*: Το πλήθος των κλήσεων που έχουν γίνει δεκτές στο σύστημα με τη μέγιστη απαίτηση σε εύρος ζώνης είναι αμελητέο μέσα σε έναν χώρο που ονομάζεται *χώρος της εμπρός μετανάστευσης*. Πιο συγκεκριμένα, το πλήθος $Y_{k_0}(j)$ των κλήσεων με απαίτηση b_{k_0} στην κατάσταση j είναι αμελητέο όταν $J_1 + b_{k_0} < j \leq j_{\max}$.

Στο παράδειγμα του Σχήματος 3-10, σύμφωνα με την *προσέγγιση μετανάστευσης*, το πλήθος των κλήσεων με απαίτηση $b_{2,1}$ στις καταστάσεις $j = 1, 2$ και 3 θεωρείται αμελητέο. Έτσι οι αντίστοιχες μεταβάσεις $3 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 1$ και $1 \rightarrow 0$ αγνοούνται, όπως

φαίνεται στο Σχήμα 3-11 με X πάνω στα βέλη. Ομοίως, λόγω της προσέγγισης εμπρός μετανάστευσης η μετάβαση $5 \rightarrow 3$ αγνοείται για τις κλήσεις με απαίτηση b_{20} . Με τρόπο αυτό και λόγω της υπόθεσης της τοπικής ισορροπίας η Μαρκοβιανή αλυσίδα που προκύπτει γίνεται αντιστρέψιμη. Στο Σχήμα 3-12 παρουσιάζεται ο χώρος μετανάστευσης και ο χώρος της εμπρός μετανάστευσης για το συγκεκριμένο παράδειγμα.

Σχήμα 3-11: Τροποποιημένο Διάγραμμα Μετάβασης Καταστάσεων στο W-CDTM.

Σχήμα 3-12: Χώρος μετανάστευσης και ο χώρος της εμπρός μετανάστευσης για την 2^η και 3^η κατηγορία.

3.2.4 Πιθανότητες Τοπικής Απώλειας

Λόγω της συνθήκης (3-37), η πιθανότητα ότι μια νέα κλήση της κατηγορίας k_l απορρίπτεται κατά την άφιξη σε μια χρονική στιγμή όταν στο σύστημα υπάρχει

διακυψελικό φορτίο, n_{intra} , ονομάζεται πιθανότητα τοπικής απώλειας (local blocking probability, LBP) και μπορεί να υπολογιστεί από [20]:

$$\beta_{k_l}(n_{intra}) = P(n_{intra} + n_{inter} + L_{k_l} > n_{max}) \quad (3-38)$$

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας τοπικής απώλειας της (3-38) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις (3-33), (3-34) και (3-35). Παρατηρούμε ότι η μόνη άγνωστη παράμετρος είναι η διακυψελική παρεμβολή, I_{inter} . Παρόμοια με το [8], μοντελοποιούμε την I_{inter} ως λογαριθμοκανονική (lognormal) τυχαία μεταβλητή (με παραμέτρους μ_I και σ_I), η οποία είναι ανεξάρτητη από την ομοκυψελική παρεμβολή. Έτσι, η μέση τιμή, $E[I_{inter}]$, και η διασπορά, $Var[I_{inter}]$, της I_{inter} υπολογίζονται από τις (3-39) και (3-40):

$$E[I_{inter}] = e^{\mu_I + \frac{\sigma_I^2}{2}} \quad (3-39)$$

$$Var[I_{inter}] = (e^{\sigma_I^2} - 1)e^{2\mu_I + \sigma_I^2} \quad (3-40)$$

Λόγω της (3-35), το διακυψελικό φορτίο, n_{inter} , θα είναι επίσης μια λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή. Η μέση της τιμή, $E[n_{inter}]$, και διασπορά, $Var[n_{inter}]$, υπολογίζονται από (3-41) και (3-42), αντίστοιχα:

$$E[n_{inter}] = e^{\mu_n + \frac{\sigma_n^2}{2}} = \frac{1 - n_{max}}{P_N} E[I_{inter}] \quad (3-41)$$

$$Var[n_{inter}] = (e^{\sigma_n^2} - 1)e^{2\mu_n + \sigma_n^2} = \left(\frac{1 - n_{max}}{P_N}\right)^2 Var[I_{inter}] \quad (3-42)$$

όπου μ_n και σ_n είναι οι παράμετροι του n_{inter} , οι οποίες υπολογίζονται επιλύοντας τις (3-41) και (3-42):

$$\mu_n = \ln(E[I_{inter}]) - \frac{\ln(1 + CV[I_{inter}]^2)}{2} + \ln(1 - n_{max}) - \ln(P_N) \quad (3-43)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\ln(1 + CV[I_{inter}]^2)} \quad (3-44)$$

Ο συντελεστής της διασποράς (coefficient of variation), $CV[I_{inter}]$, ορίζεται ως:

$$CV[I_{inter}] = \frac{\sqrt{Var[I_{inter}]}}{E[I_{inter}]} \quad (3-45)$$

Να σημειωθεί ότι η (3-38) μπορεί να γραφτεί και ως:

$$1 - \beta_{k_l}(n_{intra}) = P(n_{inter} \leq n_{max} - n_{intra} - L_{k_l}) \quad (3-46)$$

Το δεξιό μέλος της (3-46), είναι η *αθροιστική συνάρτηση κατανομής* (cumulative distribution function, CDF) του n_{inter} . Συμβολίζεται με $P(n_{inter} \leq x) = F_n(x)$ και μπορεί να υπολογιστεί από:

$$F_n(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln x - \mu_n}{\sigma_n \sqrt{2}} \right) \right] \quad (3-47)$$

όπου $\operatorname{erf}(\bullet)$ είναι η γνωστή *συνάρτηση σφάλματος* (error function).

Έτσι, εάν αντικαταστήσουμε $x = n_{max} - n_{intra} - L_{k_l}$ στην (3-47), από την (3-46) μπορούμε να υπολογίσουμε την *πιθανότητα τοπικής απώλειας* των κλήσεων της κατηγορίας k_l ως ακολούθως:

$$\beta_{k_l}(n_{intra}) = \begin{cases} 1 - F_n(x), & x \geq 0 \\ 1, & x < 0 \end{cases} \quad (3-48)$$

3.2.5 Πιθανότητες Καταστάσεων

Όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, στα δίκτυα W-CDMA το *φορτίο κυψέλης* μπορεί να θεωρηθεί ως ο διαμοιραζόμενος πόρος του συστήματος και ο *παράγοντας φορτίου* μπορεί να θεωρηθεί ως η απαίτηση μιας κλήσης σε πόρους [39]. Έτσι, μπορούμε να τροποποιήσουμε την (1-8) για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων καταστάσεων στο W-CDTM. Παρακάτω παρουσιάζονται 5 βήματα που απαιτούνται για την τροποποίηση αυτή.

3.2.5.1 Διακριτοποίηση των πόρων.

Η διακριτοποίηση του φορτίου κυψέλης, n , και του παράγοντα φορτίου, L_{k_l} , γίνεται με χρήση της *βασικής μονάδας φορτίου κυψέλης* (basic cell load unit) g :

$$C = \frac{n_{max}}{g} \quad (3-49)$$

$$b_{k_l} = \frac{L_{k_l}}{g} \quad (3-50)$$

Οι προκύπτουσες διακριτές τιμές των (3-49) και (3-50) μπορούν να θεωρηθούν ως η χωρητικότητα του συστήματος και η απαίτηση σε εύρος ζώνης της κατηγορίας k_l , αντίστοιχα.

3.2.5.2 Προσθήκη της δραστηριότητας χρήστη

Το CDTM θεωρεί κλήσεις που είναι *ενεργές* σε όλη τη διάρκεια του χρόνου εξυπηρέτησης και δεν παρέχει τη δυνατότητα διάκρισης των *ενεργών* από τους *παθητικούς* χρήστες. Όμως στα δίκτυα W-CDMA μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι οι *παθητικοί* χρήστες δεν καταλαμβάνουν τους πόρους του συστήματος. Έτσι, στο W-CDTM η κατάσταση j δεν αντιπροσωπεύει το συνολικό πλήθος κατειλημμένων μονάδων εύρους ζώνης, όπως συμβαίνει στο CDTM. Αντιθέτως, αντιπροσωπεύει το συνολικό πλήθος κατειλημμένων μονάδων εύρους ζώνης, εάν όλοι οι χρήστες ήταν *ενεργοί*. Συμβολίζουμε με c το συνολικό πλήθος κατειλημμένων μονάδων εύρους ζώνης σε κάποια χρονική στιγμή. Να σημειωθεί ότι στο CDTM, το c είναι πάντα ίσο με το j , ενώ στο W-CDTM έχουμε $0 \leq c \leq j$. Η περίπτωση $c=0$ αντιστοιχεί σε μια κατάσταση όπου όλοι οι χρήστες είναι *παθητικοί*, ενώ όταν $c=j$, τότε όλοι οι χρήστες είναι *ενεργοί*.

Συμβολίζουμε με $q(j)$ την πιθανότητα της κατάστασης j . Η *κατάληψη εύρους ζώνης*, $A(c|j)$, ορίζεται ως η υπό συνθήκη πιθανότητα ότι c μονάδες εύρους ζώνης είναι κατειλημμένες στην κατάσταση j και μπορεί να υπολογιστεί αναδρομικά από την [20]:

$$A(c|j) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{S_k} P_{k_l}(j) [v_k A(c - r_{k_l} | j - r_{k_l}) + (1 - v_k) A(c | j - r_{k_l})] \quad (3-51)$$

για $j = 1, \dots, j_{\max}$ και $c \leq j$, όπου $A(0|0)=1$ και $A(c|j)=0$ για $c > j$

3.2.5.3 Προσθήκη των τοπικών απωλειών

Στα συστήματα W-CDMA, λόγω της *διακυβελικής παρεμβολής*, η απώλεια μιας κλήσης της κατηγορίας k_l μπορεί να συμβεί σε κάθε κατάσταση j με πιθανότητα $LB_{k_l}(j)$. Η πιθανότητα αυτή ονομάζεται *παράγοντας τοπικής απώλειας* (local blocking factor, LBF) και μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας τις *πιθανότητες τοπικής*

απώλειας πολλαπλασιασμένες με τις αντίστοιχες καταλήψεις εύρους ζώνης, $A(c|j)$, για κάθε c :

$$LB_{k_l}(j) = \sum_{c=0}^j \beta_{k_l}(c) A(c|j) \quad (3-52)$$

Να σημειωθεί ότι όταν $j=0$ τότε $LB_{k_l}(0)=\beta_{k_l}(0)$, επειδή στην περίπτωση αυτή $j=c$ και $A(c|j)=1$.

3.2.5.4 Προσδιορισμός του μεριδίου εύρους ζώνης.

Το μερίδιο εύρους ζώνης, $P_{k_l}(j)$, της κατηγορίας k_l στην κατάσταση j προκύπτει από την (1-7) με προσθήκη των παραγόντων τοπικής απώλειας και των παραμέτρων Δέλτα από τις (1-9) και (1-10):

$$P_{k_l}(j) = \frac{\alpha_k (1 - LB_{k_l}(j - b_{k_l})) b_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l})}{jq(j)} \quad (3-53)$$

3.2.5.5 Υπολογισμός των πιθανοτήτων καταστάσεων

Οι μη κανονικοποιημένες πιθανότητες καταστάσεων προκύπτουν επεκτείνοντας την (1-8) λόγω της ύπαρξης των τοπικών απωλειών [20]:

$$\hat{q}(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{S_k} \alpha_{k_l} (1 - L_{k_l}(j - b_{k_l})) b_{k_l} \delta_{k_l}(j) \hat{q}(j - b_{k_l}), \quad \text{για } j = 1, \dots, j_{\max} \quad (3-54)$$

όπου $\hat{q}(0)=1$ και $\hat{q}(j)=0$ για $j<0$.

Τελικά, οι κανονικοποιημένες πιθανότητες καταστάσεων, $q(j)$, υπολογίζονται από:

$$q(j) = \frac{\hat{q}(j)}{\sum_{j=0}^{j_{\max}} \hat{q}(j)} \quad (3-55)$$

3.2.6 Πιθανότητες Απώλειας Κλήσεων

Η πιθανότητα απώλειας κλήσεων της κατηγορίας k μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας όλες τις πιθανότητες καταστάσεων πολλαπλασιασμένες με τους αντίστοιχους παράγοντες τοπικής απώλειας:

$$B_k = \sum_{j=0}^{j_{\max}} \sum_{l=1}^{S_k} q(j) \omega_{k_l}(j) L B_k(j) \quad (3-56)$$

Όμως, λόγω της ύπαρξης διαφορετικών εναλλακτικών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης, b_{k_l} , πρέπει επίσης να προσθέσουμε και για κάθε l στις συγκεκριμένες περιοχές που ορίζονται από τα κατώφλια. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των παραμέτρων Ωμέγα, οι οποίες ορίζονται ως:

$$\omega_{k_1}(j) = \begin{cases} 1, & \text{όταν } j \leq J_{k_1} \\ 0, & \text{αλλιού} \end{cases} \quad \text{και} \quad \omega_{k_l}(j) = \begin{cases} 1, & \text{όταν } J_{k_l} < j \leq J_{k_{l+1}} \\ 0, & \text{αλλιού} \end{cases}, \text{ για } l \neq 1 \quad (3-57)$$

3.3. Αριθμητικά Αποτελέσματα για το W-CDTM και W-EMLM

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τέσσερα παραδείγματα με τη βοήθεια των οποίων συγκρίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα για τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα W-CDTM και W-EMLM, για να δείξουμε την ακρίβεια των μοντέλων. Με χρήση της γλώσσας προσομοίωσης SIMSCRIPT II.5 έχουν δημιουργηθεί προσομοιωτές για τα W-CDTM και W-EMLM. Για τη παραγωγή των αναλυτικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα VISUAL FORTRAN 6.0. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έχουν ληφθεί ως μέσες τιμές από 6 δοκιμές με διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Παρακάτω παρουσιάζονται τέσσερα παραδείγματα εφαρμογής.

Όσον αφορά την διακριτοποίηση των παραμέτρων του συστήματος, τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η τιμή $g=0.005$ εισάγει σχεδόν μηδενικό σφάλμα διακριτοποίησης, ενώ παράγει έναν χώρο καταστάσεων αποδεκτού μεγέθους. Για το λόγο αυτό, η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα παραδείγματα. Θεωρήθηκε $n_{\max}=0.8$ και επιλέχθηκε η μέση τιμή και ο συντελεστής διασποράς της

διακυβελικής παρεμβολής ίσα με $E[I_{inter}] = 2 \cdot 10^{-18}$ mW και $CV[I_{inter}] = 1$, αντίστοιχα. Για την ισχύ του θερμικού θορύβου χρησιμοποιήθηκε η τυπική τιμή των $P_N = 3.98 \cdot 10^{-18}$ mW.

3.3.1 1^ο Παράδειγμα – Αποτελέσματα του W-EMLM

Θεωρείστε μια κυψέλη W-CDMA που φιλοξενεί δύο σταθερές κατηγορίες κίνησης. Κλήσεις και των δύο κατηγοριών φτάνουν στη κυψέλη σύμφωνα με τη διαδικασία Poisson. Οι παράμετροι κίνησης για κάθε κατηγορία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-3.

Στο Σχήμα 3-13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων των δύο κατηγοριών κίνησης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης. Κάθε σημείο φορτίου κίνησης (traffic-load point) στον οριζόντιο άξονα του Σχήματος 3-13 αντιστοιχεί στις τιμές του προσφερόμενου φορτίου κίνησης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-4. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ακρίβεια του μοντέλου είναι πολύ καλή, ακόμα και για πολύ υψηλό προσφερόμενο φορτίο κίνησης.

Πίνακας 3-3: Παράμετροι κίνησης στο W-EMLM

	1 ^η κατηγορία	2 ^η κατηγορία
Είδος	stream	stream
Ρυθμός μετάδοσης (Kbps)	$R_1=64$	$R_2=144$
Παράγοντας δραστηριότητας	$\nu_1=1.0$	$\nu_2=0.7$
Παράμετρος BER (dB)	$(E_b/N_0)_1=4$	$(E_b/N_0)_2=3$

Πίνακας 3-4: Προσφερόμενο φορτίο κίνησης στο 1^ο παράδειγμα.

Σημείο φορτίου κίνησης		1	2	3	4	5	6	7	8
Φορτίο (erl)	1 ^η κατήγ.	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
	2 ^η κατήγ.	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0

Σχήμα 3-13: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης στο W-EMLM.

3.3.2 2^ο Παράδειγμα – Αποτελέσματα του W-CDTM

Θεωρείστε το προηγούμενο παράδειγμα με τη μόνη διαφορά ότι οι δύο κατηγορίες κίνησης είναι *ελαστικές*. Επομένως, για την ανάλυση του συστήματος θα χρησιμοποιήσουμε το W-CDTM. Οι παράμετροι κίνησης κάθε κατηγορίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-5. Στο Σχήμα 3-14 φαίνονται τα αποτελέσματα για τις *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* των δύο κατηγοριών συναρτήσει του *προσφερόμενου φορτίου κίνησης*. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ακρίβεια του μοντέλου είναι πολύ καλή, ακόμα και για πολύ υψηλό *προσφερόμενο φορτίο κίνησης* (σημεία 7, 8).

Πίνακας 3-5: Παράμετροι κίνησης στο W-CDTM

	1 ^η κατηγορία	2 ^η κατηγορία
Είδος	ελαστική	ελαστική
Ρυθμός μετάδοσης (Kbps)	$R_{1,1}=64, R_{1,2}=32$	$R_{2,1}=144, R_{2,2}=112$
Κατώφλι	$T_{1,1}= 0.6$	$T_{2,1}= 0.5$
Παράγοντας δραστηριότητας	$\nu_1=1.0$	$\nu_2=0.7$
Παράμετρος BER (dB)	$(E_b/N_0)_1=4$	$(E_b/N_0)_2=3$

Σχήμα 3-14: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης στο W-CDTM.

Στον Πίνακα 3-6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αναλυτικά αποτελέσματα των δύο μοντέλων. Τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 3-13 και 3-14.

Πίνακας 3-6: Αναλυτικά αποτελέσματα για τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων στα W-EMLM και W-CDTM

	CBP (%), W-EMLM		CBP (%), W-CDTM	
	1 ^η κατήγ.	2 ^η κατήγ.	1 ^η κατήγ.	2 ^η κατήγ.
1	0.3016	0.3531	0.3016	0.3531
2	0.4211	0.4991	0.4211	0.4991
3	0.6062	0.7300	0.6058	0.7283
4	0.9052	1.1131	0.9000	1.0978
5	1.4008	1.7667	1.3686	1.6945
6	2.2080	2.8550	2.0891	2.6330
7	3.4416	4.5352	3.1323	4.0362
8	5.1663	6.8848	4.5441	5.9980

3.3.3 3^ο Παράδειγμα – Μεταβαλλόμενη διακυψελική παρεμβολή

Θεωρείστε ένα σύστημα W-CDMA με δύο κατηγορίες κίνησης : *ήχου* (voice) και *δεδομένων* (data) και μεταβαλλόμενη *διακυψελική παρεμβολή*. Οι παράμετροι κίνησης που έχουν χρησιμοποιηθεί για κάθε κατηγορία είναι οι παρακάτω (δείτε επίσης και τον Πίνακα 3-7):

- *Voice*: απαιτεί ρυθμό μετάδοσης $R_{11}=12.2$ Kbps που μπορεί να μειωθεί σε $R_{12}=6.2$ Kbps με το κατώφλι $J_{11}=0.7$. Ο παράγοντας δραστηριότητας είναι $\nu_1=0.67$ η απαιτούμενη παράμετρος BER είναι $(E_b/N_0)_1=5\text{dB}$. Η κατηγορία αυτή είναι *προσαρμοζόμενη* επειδή η μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεν επηρεάζει τον χρόνο εξυπηρέτησης.
- *Data*: απαιτεί ρυθμό μετάδοσης $R_{21}=64$ Kbps που μπορεί να μειωθεί σε $R_{22}=32$ Kbps με το κατώφλι $J_{21}=0.6$. Ο παράγοντας δραστηριότητας είναι $\nu_2=0.8$ η απαιτούμενη παράμετρος BER είναι $(E_b/N_0)_2=4\text{dB}$. Η κατηγορία αυτή είναι *ελαστική* επειδή η μείωση του ρυθμού μετάδοσης προκαλεί αύξηση του χρόνου εξυπηρέτησης.

Παίρνουμε μετρήσεις για 8 διαφορετικά *σημεία φορτίου κίνησης* (Σχήμα 3-15). Κάθε σημείο φορτίου κίνησης αντιστοιχεί σε κάποιες τιμές του προσφερόμενου φορτίου κίνησης των δύο κατηγοριών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-8 .

Στο παράδειγμα αυτό, διακρίνουμε δύο περιπτώσεις για τη *διακυψελική παρεμβολή*: χαμηλή παρεμβολή με μέση τιμή $E[I_{inter}] = 3 \cdot 10^{-18}$ mW και υψηλή παρεμβολή με μέση τιμή $E[I_{inter}] = 5 \cdot 10^{-18}$ mW.

Στο Σχήμα 3-15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και της προσομοίωσης του W-CDTM για τις δύο κατηγορίες κίνησης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ακρίβεια του μοντέλου είναι πολύ ικανοποιητική, ειδικά για χαμηλό προσφερόμενο φορτίο κίνησης (σημεία 1-6 του άξονα των x του Σχήματος 3-15). Επίσης, η αύξηση της *διακυψελικής παρεμβολής* δεν φαίνεται να επηρεάζει την ακρίβεια των υπολογισμών.

Στο Σχήμα 3-16 παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα του W-EMLM (δηλαδή δεν υπάρχουν κατώφλια) για τις δύο κατηγορίες κίνησης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης. Εάν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των Σχημάτων 3-15 και 3-16, θα δούμε ότι το W-CDTM οδηγεί σε χαμηλότερες *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* σε σύγκριση με το W-EMLM, και για τις δύο κατηγορίες. Η

διαφορά είναι περισσότερο εμφανής στην περίπτωση του υψηλού *προσφερόμενου φορτίου κίνησης* (σημεία 6 έως 8). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι με την αύξηση του *προσφερόμενου φορτίου κίνησης* περισσότερες κλήσεις κατά μέσον όρο υπάρχουν στο σύστημα και ο ρυθμός άφιξης των νέων κλήσεων αυξάνεται. Επειδή το W-MLM υποθέτει σταθερές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, είναι αναμενόμενο ότι υπό τις συνθήκες υψηλού φορτίου πολλές νέες κλήσεις αντί να γίνονται δεκτές με χαμηλότερο εύρος ζώνης (όπως συμβαίνει στο W-CDTM). Από την άλλη, υπό τις συνθήκες χαμηλού φορτίου, η κατάσταση του συστήματος j στο W-CDTM σπάνια ξεπερνάει τα κατώφλια και επομένως σχετικά λίγες κλήσεις γίνονται δεκτές στο σύστημα με μειωμένο εύρος ζώνης. Στην περίπτωση αυτή, το W-CDTM συμπεριφέρεται με τρόπο παρόμοιο με αυτόν του W-MLM. Επίσης, η ανωτερότητα του W-CDTM σε σύγκριση με το W-MLM φαίνεται ξεκάθαρα στην περίπτωση χαμηλής *διακυψελικής παρεμβολής*. Ο λόγος είναι ότι επειδή και τα δύο μοντέλα αντιμετωπίζουν τη *διακυψελική παρεμβολή* με τον ίδιο τρόπο, μια αυξημένη *διακυψελική παρεμβολή* έχει μεγαλύτερη επίδραση στις απώλειες των νέων κλήσεων σε σύγκριση με τη μείωση του απαιτούμενου εύρους ζώνης.

Πίνακας 3-7: Παράμετροι κίνησης για το 3^ο παράδειγμα

	Voice	Data
Είδος	Προσαρμοζόμενη	Ελαστική
Ρυθμός μετάδοσης (Kbps)	$R_{1_1}=12.2$ και $R_{1_2}=6.2$	$R_{2_1}=64$ και $R_{2_2}=32$
Κατώφλια	$J_{1_1}=0.7$	$J_{2_1}=0.6$
Παράγοντας δραστηριότητας	$\nu_1=0.67$	$\nu_2=0.8$
Παράμετρος BER	$(E_b/N_0)_1=5\text{dB}$	$(E_b/N_0)_2=4\text{dB}$

Σχήμα 3-15: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το W-CDTM στο 3^ο παράδειγμα.

Πίνακας 3-8: Προσφερόμενο φορτίο κίνησης για το 3^ο παράδειγμα

		1	2	3	4	5	6	7	8
Φορτίο (erl)	Voice (α_1)	5.0	10.0	15	20	25	30	35	40
	Data (α_2)	2.5	4.0	5.5	7.0	8.5	10	11.5	13

Σχήμα 3-16: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το W-MLM στο 3^ο παράδειγμα.

3.3.4 4^ο Παράδειγμα – Τρεις Κατηγορίες Κίνησης

Θεωρούμε ένα σύστημα W-CDMA με τρεις κατηγορίες κίνησης : *ήχου* (voice), *δεδομένων* (data) και *βίντεο* (video) και αμετάβλητη *διακυψελική παρεμβολή*. Οι παράμετροι κίνησης που έχουν χρησιμοποιηθεί για κάθε κατηγορία είναι οι παρακάτω (δείτε επίσης και τον Πίνακα 3-9):

- *Voice*: απαιτεί ρυθμό μετάδοσης $R_{1_1}=12.2$ Kbps που μπορεί να μειωθεί σε $R_{1_2}=8.4$ Kbps με το κατώφλι $J_{1_1}=0.7$. Ο παράγοντας δραστηριότητας είναι $v_1=0.5$ και η απαιτούμενη παράμετρος BER είναι $(E_b/N_0)_1=5\text{dB}$. Η κατηγορία αυτή είναι *προσαρμοζόμενη* επειδή η μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεν επηρεάζει τον χρόνο εξυπηρέτησης.
- *Data*: απαιτεί ρυθμό μετάδοσης $R_{2_1}=64$ Kbps που μπορεί να μειωθεί σε $R_{2_2}=32$ Kbps με το κατώφλι $J_{2_1}=0.6$. Ο παράγοντας δραστηριότητας είναι $v_2=1.0$ και η απαιτούμενη παράμετρος BER είναι $(E_b/N_0)_2=4\text{dB}$. Η κατηγορία αυτή είναι *ελαστική* επειδή η μείωση του ρυθμού μετάδοσης προκαλεί αύξηση του χρόνου εξυπηρέτησης.
- *Video*: απαιτεί ρυθμό μετάδοσης $R_{3_1}=144$ Kbps που μπορεί να μειωθεί σε $R_{3_2}=128$ Kbps και σε $R_{3_3}=112$ Kbps με τα κατώφλια $J_{3_1}=0.4$ και $J_{3_2}=0.6$. Ο παράγοντας δραστηριότητας είναι $v_2=0.3$ και η απαιτούμενη παράμετρος BER είναι $(E_b/N_0)_2=3\text{dB}$. Η κατηγορία αυτή είναι *προσαρμοζόμενη* επειδή η μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεν επηρεάζει τον χρόνο εξυπηρέτησης.

Παίρνουμε μετρήσεις για οκτώ διαφορετικά σημεία φορτίου κίνησης (ο άξονας των x του Σχήματος 3-17). Κάθε σημείο φορτίου κίνησης αντιστοιχεί σε κάποιες τιμές του *προσφερόμενου φορτίου κίνησης* των τριών κατηγοριών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-10. Στο παράδειγμα αυτό θεωρούμε χαμηλή *διακυψελική παρεμβολή* με $E[I_{inter}] = 3 \cdot 10^{-18}$ mW και $CV[I_{inter}]=1$.

Πίνακας 3-9: Παράμετροι κίνησης για το 4^ο παράδειγμα

	Voice	Data	Video
Είδος	Προσαρμοζόμενη	Ελαστική	Προσαρμοζόμενη
Ρυθμός μετάδοσης (Kbps)	$R_{11}=12.2$ και $R_{12}=8.4$	$R_{21}=64$ και $R_{22}=32$	$R_{31}=144$, $R_{32}=128$ και $R_{33}=112$
Κατώφλια	$J_{11}=0.7$	$J_{21}=0.6$	$J_{31}=0.4$ και $J_{32}=0.6$
Παράγοντας δραστηριότητας	$\nu_1=0.5$	$\nu_2=1.0$	$\nu_3=0.3$
Παράμετρος BER	$(E_b/N_0)_1=5\text{dB}$	$(E_b/N_0)_2=4\text{dB}$	$(E_b/N_0)_3=3\text{dB}$

Πίνακας 3-10: Προσφερόμενο φορτίο κίνησης για το 4^ο παράδειγμα

		1	2	3	4	5	6	7	8
Φορτίο (erl)	Voice (a_1)	2.0	6.0	10.0	14.0	18.0	22.0	26.0	30.0
	Data (a_2)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
	Video (a_3)	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.25	2.5

Σχήμα 3-17: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το W-CDTM στο 4^ο παράδειγμα.

Σχήμα 3-18: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το W-EMLM στο 4^ο παράδειγμα.

Στο Σχήμα 3-17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και της προσομοίωσης του W-CDTM για τις τρεις κατηγορίες συναρτήσεως του προσφερόμενου φορτίου κίνησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ακρίβεια του μοντέλου είναι πολύ ικανοποιητική, ειδικά για χαμηλό προσφερόμενο φορτίο κίνησης.

Στο Σχήμα 3-18 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα του W-EMLM για τις τρεις κατηγορίες συναρτήσεως του προσφερόμενου φορτίου κίνησης. Εάν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα αυτά με τα αποτελέσματα του W-CDTM του Σχήματος 3-18, θα δούμε ότι το W-CDTM δίνει χαμηλότερες πιθανότητες απώλειας κλήσεων για όλες τις κατηγορίες κίνησης. Η διαφορά είναι περισσότερο εμφανής στην περίπτωση υψηλού προσφερόμενου φορτίου κίνησης (σημεία 5 έως 8).

Κεφάλαιο 4

4. Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα επί της ενότητας

A

Στην ενότητα A που αποτελείται από κεφάλαια 1, 2 και 3 μελετήθηκαν τα μοντέλα απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης με σταθερό ρυθμό μετάδοσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο (state of the art) της Ενότητας A παρουσιάστηκαν και μελετήθηκαν δύο μοντέλα για ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα:

- Το μοντέλο απωλειών κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, των Kaufman-Roberts (Erlang Multirate Loss Model, EMLM). Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της απόδοσης σε επίπεδο κλήσεων των ενσύρματων συνδεσιμοστρεφών δικτύων όπου υπάρχουν μόνο σταθερές κατηγορίες κίνησης Poisson.
- Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (Connection Dependent Threshold Model, CDTM). Το μοντέλο αυτό είναι μια επέκταση του EMLM και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα που υποστηρίζουν *ελαστική* κίνηση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο (state of the art) της Ενότητας A παρουσιάστηκε και μελετήθηκε ένα μοντέλο για ασύρματα δίκτυα W-CDMA:

- Το μοντέλο απωλειών κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (Wireless Erlang Multirate Loss Model, W-EMLM). Το μοντέλο αυτό είναι μια επέκταση του EMLM και έχει προταθεί για την ανάλυση της απόδοσης σε επίπεδο κλήσεων των δικτύων W-CDMA που υποστηρίζουν μόνο σταθερή Poisson κίνηση.

Στο τρίτο κεφάλαιο της Ενότητας A προτάθηκαν δύο νέα μοντέλα απωλειών κλήσεων για ασύρματα δίκτυα W-CDMA:

- Το μοντέλο απωλειών κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης σε δίκτυα W-CDMA με κίνηση μεταπομπής (Wireless Handoff Erlang Multi-Rate Loss Model, WH-EMLM). Το μοντέλο αυτό είναι επέκταση του W-EMLM, ώστε να λαμβάνεται υπ' όψη και η κίνηση μεταπομπής.
- Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης σε δίκτυα W-CDMA (Wireless Connection Dependent Threshold Model, W-CDTM). Το μοντέλο αυτό συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των W-EMLM και CDTM. Το W-CDTM έχει προταθεί για την ανάλυση της απόδοσης σε επίπεδο κλήσεων των δικτύων W-CDMA που υποστηρίζουν ελαστικές κατηγορίες κίνησης Poisson.

Τα δύο νέα μοντέλα που προτάθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται μέσω μονοδιάστατων Μαρκοβιανών αλυσίδων. Ακολουθώς προτείνονται προσεγγιστικοί, αναδρομικοί τύποι για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων καταστάσεων του συστήματος για κάθε μοντέλο. Έχοντας υπολογίσει τις πιθανότητες των καταστάσεων, μπορούν εύκολα να υπολογιστούν οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων διαφόρων κατηγοριών κίνησης. Επίσης, μέσω των προσομοιώσεων σε υπολογιστή, έγινε η μελέτη της ακρίβειας των προτεινόμενων προσεγγιστικών τύπων. Στις προσομοιώσεις εξετάστηκαν οι περιπτώσεις δύο ή τριών κατηγοριών κίνησης, μεταβαλλόμενου προσφερόμενου φορτίου κίνησης, διαφορετικών συνθηκών στον έλεγχο αποδοχής κλήσεων και μεταβαλλόμενης διακυψελικής παρεμβολής. Σε όλες τις περιπτώσεις η ακρίβεια των προτεινόμενων προσεγγιστικών τύπων ήταν πολύ ικανοποιητική.

Ενότητα Β:
Μοντέλα απωλειών κλήσεων
πολυδιάστατης ψευδο-τυχαίας
κίνησης με σταθερό ρυθμό
μετάδοσης

Κεφάλαιο 5

5. Επισκόπηση Υφισταμένων Μοντέλων Απώλειας Κλήσεων για Ενσύρματα Συνδεσιμοστρεφή Δίκτυα

5.1. Το μοντέλο απωλειών ψευδο-τυχαίων κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, EnMLM (Engset Multirate Loss Model)

Το Engset Multi-rate Loss Model (EnMLM) ([30], [40]) έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το EMLM, με τη μόνη διαφορά ότι κάθε κατηγορία κίνησης k έχει ένα πεπερασμένο πλήθος πηγών N_k . Το προσφερόμενο φορτίο από μια ελεύθερη πηγή της κατηγορίας k είναι $\alpha_k = \gamma_k \mu_k^{-1}$, όπου γ_k είναι ο μέσος ρυθμός άφιξης κλήσεων κατηγορίας k από μια ελεύθερη πηγή. Εάν συμβολίσουμε με n_k το πλήθος των κλήσεων της κατηγορίας k που εξυπηρετούνται στο σύστημα, τότε ο μέσος ρυθμός άφιξης των κλήσεων από όλες τις ελεύθερες πηγές της κατηγορίας k δίνεται από $\lambda_k = (N_k - n_k)\gamma_k$. Αυτή η διαδικασία άφιξης κλήσεων ονομάζεται *ψευδό-τυχαία* (quasi-random) [2].

Πριν περάσουμε στο υπολογισμό των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων αξίζει να σημειώσουμε ότι στην ψευδό-τυχαία κίνηση υπάρχει διάκριση μεταξύ των πιθανοτήτων της *συμφόρησης στο χρόνο* (time congestion) και της *συμφόρησης κλήσεων* (call congestion) [30]. Οι πιθανότητες αυτές συμπίπτουν στην περίπτωση των αφίξεων Poisson (Poisson Arrivals See Time Averages, ιδιότητα PASTA [2]). Σε όλα τα μοντέλα με πεπερασμένο πλήθος πηγών που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή, ο όρος *πιθανότητα απώλειας κλήσεων* αναφέρεται στην *πιθανότητα συμφόρησης στο χρόνο* η οποία μπορεί να προσδιοριστεί από το ποσοστό του χρόνου που το σύστημα βρίσκεται σε συμφόρηση και μπορεί να μετρηθεί από έναν εξωτερικό παρατηρητή (όχι μια εισερχόμενη κλήση).

Για να υπολογίσουμε την πιθανότητα απώλειας κλήσεων, B_k , της κατηγορίας k χρησιμοποιούμε την εξίσωση (5-1):

$$B_k = \sum_{j=C-b_k+1}^C q(j) \quad (5-1)$$

Όπου οι τιμές των $q(j)$ μπορούν να υπολογιστούν με αναδρομικό και ακριβή τρόπο από τον παρακάτω τύπο [40]:

$$q(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K (N_k - n_k + 1) a_k b_k q(j - b_k) \quad j = 1, \dots, C \quad (5-2)$$

με $q(x)=0$ για $x < 0$ και τη συνθήκη κανονικοποίησης $\sum_{j=0}^C q(j) = 1$.

Όταν $N_k \rightarrow \infty$, για κάθε κατηγορία k τότε η (5-2) γίνεται (1-7) και το EnMLM γίνεται EMLM. Επιπλέον, αν $K=1$ τότε η (5-2) δίνει τα ίδια αποτελέσματα με τον γνωστό τύπο του Engset (πιθανότητα συμφόρησης στο χρόνο):

$$B_1 = \frac{\binom{N}{C} \alpha_1^C}{\sum_{i=0}^C \binom{N}{i} \alpha_1^i} \quad (5-3)$$

Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων $q(j)$ από την (5-2) δεν είναι άμεσος. Πρέπει να γνωρίζουμε το πλήθος των κλήσεων, $n_k(j)$, κάθε κατηγορίας σε διάφορες καταστάσεις j του συστήματος. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί δύο μέθοδοι: α) μια ακριβής, αλλά σύνθετη μέθοδος σύμφωνα με την οποία πρέπει να προσδιοριστεί ένα ισοδύναμο στοχαστικό σύστημα [30] και β) μια προσεγγιστική, αλλά απλούστερη μέθοδος, σύμφωνα με την οποία τα n_k στην κατάσταση j (δηλαδή τα $n_k(j)$) προσεγγίζονται από το μέσο πλήθος των κλήσεων κατηγορίας k με απαιτήσεις b_k , στην κατάσταση j , υποθέτοντας άπειρο πλήθος πηγών για κάθε κατηγορία [16]:

$$n_k(j) \approx y_k(j) = \frac{a_k q(j - b_k)}{q(j)} \quad (5-4)$$

όπου a_k και $q(j)$ είναι οι παράμετροι του αντίστοιχου μοντέλου με άπειρες πηγές κίνησης (EMLM).

Σε όλα τα μοντέλα με πεπερασμένες πηγές κίνησης που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή υιοθετούμε τη δεύτερη μέθοδο για τον υπολογισμό των $q(j)$.

Τελικά, ο υπολογισμός των $q(j)$ στο EnMLM γίνεται από [40]:

$$q(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K (N_k - y_k(j - b_k)) a_k b_k q(j - b_k) \quad j = 1, \dots, C \quad (5-5)$$

με $q(x)=0$ για $x < 0$, $\sum_{j=0}^C q(j) = 1$, και $n_k - 1 \approx y_k(j - b_k)$.

Στο Σχήμα 5-1 δείχνουμε το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων (Μαρκοβιανή αλυσίδα) του μικρού συστήματος της παραγράφου 1.1.4 με τη μοναδική διαφορά ότι το πλήθος των πηγών κίνησης είναι N_k (πεπερασμένο). Οι ποσότητες $y_k(j)$ είναι προσεγγιστικές σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο.

Σχήμα 5-1: Διάγραμμα Μετάβασης Καταστάσεων στο EnMLM.

5.2. Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης και πεπερασμένες πηγές κίνησης (Finite CDTM).

Το Finite Connection-Dependent Threshold Model (F-CDTM) ([31]) έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με το CDTM, με τη μόνη διαφορά ότι οι κλήσεις κάθε κατηγορίας k φτάνουν στο σύστημα σύμφωνα με μια ψευδό-τυχαία διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κατηγορία k έχει ένα πεπερασμένο πλήθος πηγών N_k και το

προσφερόμενο φορτίο ανά μια ελεύθερη πηγή της κατηγορίας k είναι $a_{k_l} = \gamma_{k_l} \mu_{k_l}^{-1}$ όπου γ_{k_l} είναι ο μέσος ρυθμός άφιξης ανά ελεύθερη πηγή. Εάν συμβολίσουμε με n_{k_l} το πλήθος των πηγών της κατηγορίας k με απαιτήσεις b_{k_l} που εξυπηρετούνται, τότε ο μέσος ρυθμός άφιξης ανά ελεύθερη πηγή δίνεται από $\lambda_{k_l} = (N_k - n_{k,l})\gamma_{k,l}$.

Στο Σχήμα 5-2 δείχνουμε τις βασικές αρχές του F-CDTM. Πιο συγκεκριμένα, δείχνουμε μια κατηγορία κίνησης με πεπερασμένο πλήθος πηγών N_1 , ένα κατώφλι, $J_{1_1}=2$ μονάδες εύρους ζώνης και δύο πιθανές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, $b_{1_1}=2$ και $b_{1_2}=1$ μέσα σε μια ζεύξη χωρητικότητας $C=5$ μονάδων εύρους ζώνης.

Σχήμα 5-2: Βασικές αρχές του F-CDTM.

Για το υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας κλήσεων, B_k , της κατηγορίας k , χρησιμοποιούμε την εξίσωση (1-8) όπου οι τιμές των $q(j)$ μπορούν να υπολογιστούν από έναν προσεγγιστικό, αλλά αναδρομικό τύπο [31]:

$$q(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{S_k} (N_k - \sum_{l=1}^{S_k} n_{k_l} + 1) a_{k_l} b_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l}) \quad j = 1, \dots, C \quad (5-6)$$

με $q(x)=0$ για $x < 0$, τη συνθήκη της κανονικοποίησης $\sum_{j=0}^C q(j) = 1$ και

$$\delta_{k_l}(j) = \begin{cases} 1, & \text{όταν } 1 \leq j \leq C \text{ και } b_{k_l} = 0 \ (\forall l > 1) \\ 1, & \text{όταν } j \leq J_{k_l} + b_{k_l} \text{ και } b_{k_l} > 0 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (5-7)$$

$$\delta_{k_l}(j) = \begin{cases} 1, & \text{όταν } J_{k_l} + b_{k_l} < j \leq J_{k_{l+1}} + b_{k_l} \text{ και } b_{k_l} > 0 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}, \text{ για } l > 1 \quad (5-8)$$

Όταν $N_k \rightarrow \infty$, για κάθε κατηγορία k τότε (5-6) απλοποιείται σε (1-7).

Επειδή ο υπολογισμός των $q(j)$ από την (5-6) απαιτεί να γνωρίζουμε τον ακριβή αριθμό των κλήσεων κάθε κατηγορίας σε διάφορες καταστάσεις j , χρησιμοποιούμε μια προσεγγιστική, αλλά αναδρομική μέθοδο, σύμφωνα με την οποία τα n_{k_l} στην κατάσταση j (δηλαδή τα $n_{k_l}(j)$) προσεγγίζονται από το μέσο πλήθος των κλήσεων κατηγορίας k με απαιτήσεις b_{k_l} στην κατάσταση j , υποθέτοντας άπειρο πλήθος πηγών για κάθε κατηγορία:

$$n_{k_l}(j) \approx \mathcal{Y}_{k_l}(j) = \frac{a_{k_l} q(j - b_{k_l})}{q(j)} \quad (5-9)$$

Επομένως, ο υπολογισμός των $q(j)$ στο F-CDTM γίνεται από [31]:

$$q(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{S_k} (N_k - \sum_{m=1}^{S_k} y_{k_m}(j - b_{k_l})) a_{k_l} b_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l}) \quad j=1, \dots, C \quad (5-10)$$

με $q(x)=0$ για $x < 0$, $\sum_{j=0}^C q(j) = 1$ και $\sum_{m=1}^{S_k} n_{k_m} - 1 \approx \sum_{m=1}^{S_k} y_{k_m}(j - b_{k_l})$.

Στο Σχήμα 5-3 δείχνουμε το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων υπό τη μορφή της Μαρκοβιανής αλυσίδας για το μικρό σύστημα της παραγράφου 1.1.4, με τη μοναδική διαφορά ότι το πλήθος των πηγών κίνησης, N_k , κάθε κατηγορίας είναι πεπερασμένο.

Σχήμα 5-3: Διάγραμμα Μετάβασης Καταστάσεων στο F-CDTM.

5.3. Αριθμητικά Αποτελέσματα για τα EnMLM και F-CDTM

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων για τα EnMLM και F-CDTM. Θεωρούμε ότι το σύστημα υποστηρίζει δύο κατηγορίες κίνησης και έχει χωρητικότητα $C=50$ μονάδες εύρους ζώνης. Οι παράμετροι κίνησης που έχουν χρησιμοποιηθεί για τα δύο μοντέλα, φαίνονται στον Πίνακα 5-1. Τα αποτελέσματα των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων των δύο μοντέλων φαίνονται στον Πίνακα 5-2.

Πίνακας 5-1: Παράμετροι κίνησης στα EnMLM και F-CDTM.

	EnMLM		F-CDTM	
	1 ^η κατήγ.	2 ^η κατήγ.	1 ^η κατήγ.	2 ^η κατήγ.
Απαιτήσεις εύρους ζώνης	$b_{1,1}=10$	$b_{2,1}=7$	$b_{1,1}=10, b_{1,2}=8, b_{1,3}=6$	$b_{2,1}=7, b_{2,2}=4$
Κατώφλια	-	-	$J_{1,1}=37, J_{1,2}=35$	$J_{2,1}=30$
Φορτίο	$a_1=0.012$	$a_2=0.040$	$a_1=0.012$	$a_2=0.040$
Πλήθος πηγών	$N_1=60$	$N_2=60$	$N_1=60$	$N_2=60$

Πίνακας 5-2: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων στα EnMLM και F-CDTM.

Μοντέλο	1 ^η κατηγορία - CBP(%)	2 ^η κατηγορία - CBP(%)
EnMLM	8.40	4.71
F-CDTM	3.70	2.06

Τα μοντέλα EnMLM και F-CDTM, όπως έχουμε αναφέρει, είναι προσεγγιστικά. Όμως, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στην [31], η ακρίβεια της προσέγγισης είναι ικανοποιητική.

Κεφάλαιο 6

6. Νέα Μοντέλα Απωλειών Κλήσεων για Ασύρματα Δίκτυα W-CDMA

6.1. W-EnMLM (Wireless EnMLM): Το μοντέλο απωλειών ψευδο-τυχαίων κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, για ασύρματα δίκτυα W-CDMA.

Το Wireless Engset Multi-rate Loss Model (W-EnMLM) ([58]) διαφέρει από το W-CDTM στο ότι οι κλήσεις κάθε κατηγορίας k φτάνουν στο σύστημα σύμφωνα με την ψευδο-τυχαία διαδικασία και στο ότι όλες οι κλήσεις έχουν σταθερές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κατηγορία k έχει πεπερασμένο πλήθος πηγών N_k και το προσφερόμενο φορτίο κίνησης ανά ελεύθερη πηγή της κατηγορίας k είναι $a_k = \gamma_k \mu_k^{-1}$, όπου γ_k είναι ο μέσος ρυθμός άφιξης των κλήσεων ανά ελεύθερη πηγή.

Εάν συμβολίσουμε με n_k το πλήθος των πηγών της κατηγορίας k που εξυπηρετούνται στο σύστημα, τότε οι τιμές $q(j)$ μπορούν να υπολογιστούν επεκτείνοντας το EnMLM (εξίσωση (5-2)) με προσθήκη των τοπικών απωλειών [58]:

$$q(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K (N_k - n_k + 1) a_k (1 - LB_k(j - b_k)) b_k q(j - b_k) \quad (6-1)$$

με $j=1, \dots, j_{\max}$, $q(x)=0$ για $x < 0$ και τη συνθήκη της κανονικοποίησης $\sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j) = 1$.

Για να προκύψει η (6-1) αντικαθιστούμε στην (5-2) $a_k \leftarrow a_k (1 - LB_k(j - b_k))$. Επειδή ο υπολογισμός των $q(j)$ μέσω της (6-1) δεν είναι άμεσος (όπως έχει ήδη συζητηθεί για την περίπτωση του EnMLM) προσεγγίζουμε τα n_k στην κατάσταση j με το μέσο πλήθος κλήσεων της κατηγορίας k με απαιτήσεις b_k , στην κατάσταση j , υποθέτοντας άπειρο πλήθος πηγών για κάθε κατηγορία:

$$n_k(j) \varphi y_k(j) = \frac{a_k q(j - b_k)(1 - LB_k(j - b_k))}{q(j)} \quad (6-2)$$

όπου a_k , $q(j)$ και $LB_k(j)$ είναι οι παράμετροι του αντίστοιχου μοντέλου με άπειρες πηγές (W-EMLM).

Επομένως, ο υπολογισμός των $q(j)$ στο W-EnMLM γίνεται από τη σχέση:

$$q(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K (N_k - y_k(j - b_k)) a_k (1 - LB_k(j - b_k)) b_k q(j - b_k) \quad j = 1, \dots, C \quad (6-3)$$

με $q(x)=0$ για $x < 0$, και τη συνθήκη $\sum_{j=0}^C q(j) = 1$, $n_k - 1 \approx y_k(j - b_k)$ και οι τιμές των

$y_k(j - b_k)$ υπολογίζονται από την (5-2).

Στο Σχήμα 6-1 δείχνουμε το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων υπό τη μορφή της Μαρκοβιανής αλυσίδας για ένα μικρό σύστημα. Στο Σχήμα 6-1 παρατηρείστε ότι $\lambda_k(j) = \lambda_k(1 - LB_k(j))$.

Σχήμα 6-1: Διάγραμμα Μετάβασης Καταστάσεων στο W-EnMLM.

6.1.1 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε κάποια αναλυτικά αποτελέσματα του W-EnMLM για τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων και για τις τοπικές απώλειες. Οι παράμετροι κίνησης που έχουν χρησιμοποιηθεί για κάθε κατηγορία δίνονται στον Πίνακα 6-1. Η μέση τιμή και ο συντελεστής διασποράς της διακυψελικής παρεμβολής είναι $E[I_{inter}] = 2 \cdot 10^{-18}$ mW και $CV[I_{inter}] = 1$, αντίστοιχα.

Πίνακας 6-1: Παράμετροι κίνησης στο αριθμητικό παράδειγμα.

	1^η κατηγορία	2^η κατηγορία
Ρυθμός μετάδοσης (Kbps)	$R_1 = 64$ Kbps	$R_2 = 144$ Kbps
Παράγοντας δραστηριότητας	$\nu_1 = 0.7$	$\nu_1 = 1.0$
Παράμετρος BER	$(E_b/N_0)_1 = 3$ dB	$(E_b/N_0)_2 = 4$ dB
Πηγές κλήσεων	$N_1 = 100$	$N_2 = 50$

Στον Πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές του παράγοντα τοπικής απώλειας $LB_1(j)$ της 1^{ης} κατηγορίας σε διαφορετικές καταστάσεις j .

Πίνακας 6-2: Τοπικές απώλειες της 1^{ης} κατηγορίας.

Κατάσταση j	$LB_1(j)$	Κατάσταση j	$LB_1(j)$
40	$2.56 * 10^{-3}$	580	$5.37 * 10^{-2}$
70	$3.17 * 10^{-3}$	590	$7.15 * 10^{-2}$
80	$2.97 * 10^{-3}$	600	$7.06 * 10^{-2}$
110	$3.70 * 10^{-3}$	610	$6.71 * 10^{-2}$
120	$3.47 * 10^{-3}$	620	$8.28 * 10^{-2}$
140	$4.64 * 10^{-3}$	630	0.10
150	$4.34 * 10^{-3}$	640	$9.64 * 10^{-2}$
160	$4.06 * 10^{-3}$	650	$9.74 * 10^{-2}$
180	$5.49 * 10^{-3}$	660	0.13
190	$5.12 * 10^{-3}$	670	0.14
200	$4.79 * 10^{-3}$	680	0.13
210	$6.99 * 10^{-3}$	690	0.15
220	$6.52 * 10^{-3}$	700	0.20
230	$6.07 * 10^{-3}$	710	0.21
240	$5.66 * 10^{-3}$	720	0.20
250	$8.38 * 10^{-3}$	730	0.25
260	$7.79 * 10^{-3}$	740	0.31
270	$7.25 * 10^{-3}$	750	0.30
280	$6.80 * 10^{-3}$	760	0.31
290	$1.01 * 10^{-2}$	770	0.41
300	$9.38 * 10^{-3}$	780	0.45
310	$8.70 * 10^{-3}$	790	0.43

320	$8.57 * 10^{-3}$	800	0.47
330	$1.23 * 10^{-2}$	810	0.58
340	$1.13 * 10^{-2}$	820	0.60
350	$1.05 * 10^{-2}$	830	0.58
360	$1.18 * 10^{-2}$	840	0.64
370	$1.50 * 10^{-2}$	850	0.74
380	$1.39 * 10^{-2}$	860	0.74
390	$1.30 * 10^{-2}$	870	0.73
400	$1.69 * 10^{-2}$	880	0.79
410	$1.85 * 10^{-2}$	890	0.86
420	$1.71 * 10^{-2}$	900	0.84
430	$1.67 * 10^{-2}$	910	0.84
440	$2.32 * 10^{-2}$	920	0.90
450	$2.31 * 10^{-2}$	930	0.92
460	$2.14 * 10^{-2}$	940	0.96
470	$2.32 * 10^{-2}$	950	0.96
480	$3.07 * 10^{-2}$	960	0.96
490	$2.92 * 10^{-2}$	970	0.96
500	$2.75 * 10^{-2}$	980	0.96
510	$3.40 * 10^{-2}$	990	0.97
520	$4.02 * 10^{-2}$	1000	0.98
530	$3.75 * 10^{-2}$	1010	0.98
540	$3.70 * 10^{-2}$	1020	0.99
550	$4.99 * 10^{-2}$	1030	0.99
560	$5.29 * 10^{-2}$	1040	0.99
570	$4.92 * 10^{-2}$		

Ο προηγούμενος πίνακας δείχνει τις τοπικές απώλειες της 1^{ης} κατηγορίας. Οι τοπικές απώλειες στις καταστάσεις j που δεν εμφανίζονται στον παραπάνω Πίνακα είναι 0. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του j έχουμε και την αύξηση των τοπικών απωλειών. Αυτό είναι αναμενόμενο, επειδή μεγάλο j σημαίνει περισσότερες κλήσεις στο σύστημα.

Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων των δύο κατηγοριών.

Πίνακας 6-3: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων της 1^{ης} και 2^{ης} κατηγορίας.

	1^η κατηγορία	2^η κατηγορία
Πιθανότητα απώλειας κλήσεων	0.72 %	0.88 %

Περισσότερα αριθμητικά αποτελέσματα και αποτελέσματα της προσομοίωσης για το συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζονται στην παράγραφο 6.2.1, παρακάτω.

6.2. WH-EnMLM (Wireless Handoff EnMLM): Το μοντέλο απωλειών ψευδό-τυχαίων κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης, για ασύρματα δίκτυα W-CDMA με κίνηση μεταπομπής.

Το Wireless Handoff Engset Multi-rate Loss Model (WH-EnMLM) ([60]) είναι μια επέκταση του WH-MLM όπου αντί για άπειρο πλήθος πηγών, θεωρούμε πεπερασμένο πλήθος πηγών για κάθε κατηγορία.

Ο υπολογισμός πολλών παραμέτρων στο WH-EnMLM είναι ο ίδιος με αυτόν του WH-MLM. Παρακάτω παρουσιάζουμε τον υπολογισμό των παραμέτρων του WH-EnMLM που είναι διαφορετικές από το WH-MLM.

Με $N_{N,k}$ συμβολίζουμε το πλήθος των πηγών των νέων κλήσεων της κατηγορίας k και με $N_{H,k}$ το πλήθος των πηγών των κλήσεων μεταπομπής της κατηγορίας k .

Οι παράμετροι $P_{N,k}(j)$ και $P_{H,k}(j)$ ορίζονται ως το μερίδιο εύρους ζώνης των νέων κλήσεων και των κλήσεων μεταπομπής της κατηγορίας k , αντίστοιχα:

$$P_{N,k}(j) = \frac{(N_{N,k} - n_{N,k} + 1) \alpha_{N,k} (1 - F_{N,k}(j - b_k)) b_k q(j - b_k)}{jq(j)} \quad (6-4)$$

$$P_{H,k}(j) = \frac{(N_{H,k} - n_{H,k} + 1) \alpha_{H,k} (1 - F_{H,k}(j - b_k)) b_k q(j - b_k)}{jq(j)} \quad (6-5)$$

Στο Σχήμα 6-2 παρουσιάζουμε την Μαρκοβιανή αλυσίδα για ένα μικρό παράδειγμα. Έχουμε τέσσερις καταστάσεις, δύο κατηγορίες κίνησης και οι απαιτήσεις των κλήσεων σε εύρος ζώνης είναι $b_1=1$ και $b_2=2$ για την 1^η και 2^η κατηγορία, αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μετάβασης, που εμφανίζονται πάνω στα βέλη (Σχήμα 6-2) ορίζονται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \lambda(m, m+k) = & (N_{N,k} - Y_{N,k}(j) + 1) \lambda_{N,k}(1 - LB_{N,k}(m)) \\ & + (N_{H,k} - Y_{H,k}(j) + 1) \lambda_{H,k}(1 - LB_{H,k}(m)) \end{aligned} \quad (6-6)$$

$$\mu(m+k, m) = \mu_{N,k} Y_{N,k}(m+k) + \mu_{H,k} Y_{H,k}(m+k) \quad (6-7)$$

για $k=1, \dots, K$ και $m=1, \dots, j_{\max} - k$.

Π.χ. για $m=1$ το $\lambda(1, 1+k)$ δείχνει το ρυθμό μετάβασης του συστήματος από την κατάσταση 1 στην κατάσταση $1+k$, ενώ $\mu(1+k, 1)$ δείχνει το ρυθμό μετάβασης του συστήματος από την κατάσταση $1+k$ στην κατάσταση 1.

Το μέσο πλήθος των νέων κλήσεων και των κλήσεων μεταπομπής στην κατάσταση j συμβολίζεται με $Y_{N,k}(j)$ και $Y_{H,k}(j)$, αντίστοιχα. Επιλύοντας την μονοδιάστατη Μαρκοβιανή αλυσίδα μπορούμε να υπολογίσουμε τις πιθανότητες των καταστάσεων $q(j)$ με τον ακόλουθο αναδρομικό τύπο [60]:

$$\begin{aligned} q(j) = & \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K [(N_{N,k} - Y_{N,k}(j) + 1) \alpha_{N,k}(1 - LB_{N,k}(j - b_k)) b_k q(j - b_k) \\ & + (N_{H,k} - Y_{H,k}(j) + 1) \alpha_{H,k}(1 - LB_{H,k}(j - b_k)) b_k q(j - b_k)] \end{aligned} \quad (6-8)$$

για $j=1, \dots, j_{\max}$ και $q(j)=0$ για $j < 0$, όπου $\sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j)=1$.

Σχήμα 6-2: Μαρκοβιανή αλυσίδα για το μικρό παράδειγμα.

Οι παράμετροι $Y_{N,k}(j)$ και $Y_{H,k}(j)$ που χρησιμοποιούνται στην (6-8) μπορούν να προσεγγιστούν με τη ίδια μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε και στην περίπτωση του W-EnMLM. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το μέσο πλήθος των κλήσεων κατηγορίας k

με απαίτηση b_k στην κατάσταση j , μπορεί να προσδιοριστεί θεωρώντας άπειρο πλήθος πηγών κίνησης για κάθε κατηγορία. Επομένως:

$$Y_{N,k}(j) \approx \frac{a_k q(j - b_k)(1 - LB_{N,k}(j - b_k))}{q(j)} \quad (6-9)$$

$$Y_{H,k}(j) \approx \frac{a_k q(j - b_k)(1 - LB_{H,k}(j - b_k))}{q(j)} \quad (6-10)$$

όπου a_k , $q(j)$, $LB_{N,k}(j)$ και $LB_{H,k}(j)$ είναι οι παράμετροι του αντίστοιχου μοντέλου με άπειρο πλήθος πηγών (δηλαδή του WH-EMLM).

Με τη βοήθεια της (6-8) οι *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* μπορούν να υπολογιστούν προσθέτοντας τις *πιθανότητες καταστάσεων*, πολλαπλασιασμένες με τους αντίστοιχους *παράγοντες τοπικής απώλειας* για όλες τις δυνατές καταστάσεις του συστήματος. Επομένως, οι *πιθανότητες απώλειας νέων κλήσεων* και οι *πιθανότητες απώλειας των κλήσεων μεταπομπής* δίνονται από τις (6-11) και (6-12), αντίστοιχα:

$$B_N = \sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j) LB_N(j) \quad (6-11)$$

$$B_H = \sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j) LB_H(j) \quad (6-12)$$

6.2.1 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στην παράγραφο αυτή ελέγχουμε την ακρίβεια του WH-EnMLM. Για το σκοπό αυτό συγκρίνουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα για τις *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Στα τρία παραδείγματα που παρουσιάζονται παρακάτω, θεωρούμε ένα σύστημα W-CDMA με δύο κατηγορίες κίνησης. Οι παράμετροι κίνησης που έχουν χρησιμοποιηθεί για κάθε κατηγορία δίνονται στον Πίνακα 6-4. Σε όλα τα παραδείγματα η μέση τιμή και ο συντελεστής διασποράς της διακυβελικής παρεμβολής είναι $E[I_{inter}] = 2 \cdot 10^{-18}$ mW και $CV[I_{inter}] = 1$, αντίστοιχα.

6.2.1.1 1^ο παράδειγμα

Στο 1^ο παράδειγμα χρησιμοποιούμε τα ακόλουθα κατώφλια για τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων: $n_{H,1} = n_{H,2} = n_{\max} = 0.8$ και $n_{N,1} = n_{N,2} = 0.7$. Έχουμε εξετάσει έξι διαφορετικές περιπτώσεις προσφερόμενου φορτίου κίνησης. Οι τιμές του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για κάθε περίπτωση δίνονται στον Πίνακα 6-5. Στο Σχήμα 6-3 παρουσιάζουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις πιθανότητες απώλειας των νέων κλήσεων και των κλήσεων μεταπομπής των δύο κατηγοριών. Στον οριζόντιο άξονα του Σχήματος 6-3 τα έξι σημεία φορτίου κίνησης (1 έως 6) εκφράζουν τις τιμές του προσφερόμενου φορτίου κίνησης των αντίστοιχων γραμμών του Πίνακα 6-5. Το Σχήμα 6-3 δείχνει ότι η ακρίβεια του αναλυτικού μοντέλου είναι πολύ ικανοποιητική, επειδή τα αναλυτικά αποτελέσματα είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αυτό είναι περισσότερο εμφανές στην περίπτωση χαμηλού προσφερόμενου φορτίου κίνησης όπως υποδεικνύεται από τα σημεία 1 έως 4 του οριζόντιου άξονα. Να σημειωθεί ότι λόγω του υψηλότερου κατωφλίου για τον έλεγχο αποδοχής των κλήσεων μεταπομπής, οι πιθανότητες απώλειας των κλήσεων μεταπομπής είναι πολύ χαμηλότερες από τις πιθανότητες απώλειας των νέων κλήσεων.

6.2.1.2 2^ο παράδειγμα

Στο 2^ο παράδειγμα, μεταβάλλουμε τα κατώφλια των νέων κλήσεων και των δύο κατηγοριών, ενώ διατηρούμε τα κατώφλια των κλήσεων μεταπομπής στις υψηλότερες τιμές (δηλαδή $n_{H,1} = n_{H,2} = 0.8$). Τα κατώφλια των νέων κλήσεων δίνονται στον οριζόντιο άξονα του Σχήματος 6-4. Εξετάζουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις προσφερόμενου φορτίου κίνησης: χαμηλό φορτίο και υψηλό φορτίο. Οι τιμές του προσφερόμενου φορτίου κίνησης που έχουν χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση δίνονται στον Πίνακα 6-6. Στο Σχήμα 6-4 παρουσιάζουμε τις πιθανότητες απώλειας των κλήσεων μεταπομπής συναρτήσει των κατωφλίων ελέγχου αποδοχής των νέων κλήσεων για τις δύο κατηγορίες και για χαμηλό και για υψηλό φορτίο. Στην περίπτωση του χαμηλού φορτίου τα αναλυτικά αποτελέσματα σχεδόν συμπίπτουν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στην περίπτωση υψηλού φορτίου, η ακρίβεια του μοντέλου είναι ικανοποιητική. Στην περίπτωση υψηλού φορτίου οι διαφορές

ανάμεσα στα αναλυτικά αποτελέσματα και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης οφείλονται στο γεγονός ότι το μοντέλο είναι προσεγγιστικό.

6.2.1.3 3^ο παράδειγμα

Στο 3^ο παράδειγμα θα συγκρίνουμε το WH-EnMLM με το W-EnMLM. Υπενθυμίζουμε ότι στο τελευταίο μοντέλο δεν γίνεται διάκριση ανάμεσα στις νέες κλήσεις και στις κλήσεις μεταπομπής. Για το WH-EnMLM χρησιμοποιούμε $n_{H,1} = n_{H,2} = 0.8$ και $n_{N,1} = n_{N,2} = 0.5$ και τις υπόλοιπες παραμέτρους παίρνουμε από το 1^ο παράδειγμα. Για το W-EnMLM χρησιμοποιούμε $n_{H,1} = n_{H,2} = n_{N,1} = n_{N,2} = 0.8$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο W-EnMLM τα κατώφλια ελέγχου αποδοχής κλήσεων πρέπει να είναι τα ίδια και για τα δύο είδη κλήσεων. Οι πιθανότητες απώλειας των κλήσεων μεταπομπής συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-5. Το γεγονός ότι οι πιθανότητες αυτές στο WH-EnMLM είναι πολύ χαμηλότερες σε σχέση με το W-EnMLM αναδεικνύει την αναγκαιότητα του WH-EnMLM.

Πίνακας 6-4: Παράμετροι κίνησης στο 1^ο, 2^ο και 3^ο παράδειγμα.

	1 ^η κατηγορία	2 ^η κατηγορία
Ρυθμός μετάδοσης (Kbps)	$R_1 = 144$ Kbps	$R_2 = 384$ Kbps
Παράγοντας δραστηριότητας	$\nu_1 = 0.7$	$\nu_1 = 1.0$
Παράμετρος BER	$(E_b/N_0)_1 = 3$ dB	$(E_b/N_0)_2 = 4$ dB
Πηγές νέων κλήσεων	$N_{N,1} = 100$	$N_{N,2} = 50$
Πηγές κλήσεων μεταπομπής	$N_{H,1} = 20$	$N_{H,2} = 10$

Πίνακας 6-5: Προσφερόμενο φορτίο κίνησης στο 1^ο παράδειγμα (erl).

	1 ^η κατηγορία		2 ^η κατηγορία	
	$a_{N,1}$	$a_{H,1}$	$a_{N,2}$	$a_{H,2}$
1	0.10	0.02	0.05	0.01
2	0.20	0.04	0.10	0.02
3	0.30	0.06	0.15	0.03
4	0.40	0.08	0.20	0.04
5	0.50	0.10	0.25	0.05
6	0.60	0.12	0.30	0.06

Πίνακας 6-6: Προσφερόμενο φορτίο κίνησης στο 2^ο παράδειγμα (erl).

	Χαμηλό φορτίο		Υψηλό φορτίο	
	144 Kbps	384 Kbps	144 Kbps	384 Kbps
Νέες κλήσεις	0.40	0.20	0.60	0.30
Κλήσεις μεταπομπής	0.08	0.04	0.12	0.06

Σχήμα 6-3: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης στο 1^ο παράδειγμα.

Σχήμα 6-4: Πιθανότητες απώλειας των κλήσεων μεταπομπής συναρτήσει των κατωφλίων ελέγχου αποδοχής κλήσεων των νέων κλήσεων για το 2^ο παράδειγμα.

Σχήμα 6-5: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης στο 3^ο παράδειγμα.

6.3. WF-CDTM (Wireless Finite CDTM): Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης και πεπερασμένες πηγές κίνησης, για ασύρματα δίκτυα W-CDMA.

Το Wireless Finite Connection Dependent Loss Model (WF-CDTM) ([61]) έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά του W-CDTM, με τη μόνη διαφορά ότι οι κλήσεις κάθε κατηγορίας k φτάνουν στο σύστημα σύμφωνα με την ψευδό-τυχαία διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κατηγορία k έχει ένα πεπερασμένο πλήθος πηγών N_k και το προσφερόμενο φορτίο κίνησης ανά ελεύθερη πηγή της κατηγορίας k είναι $a_{k,l} = \gamma_{k,l} \mu_{k,l}^{-1}$ όπου $\gamma_{k,l}$ είναι ο μέσος ρυθμός άφιξης ανά ελεύθερη πηγή. Εάν συμβολίσουμε με $n_{k,l}$ το πλήθος των κλήσεων της κατηγορίας k με απαιτήσεις $b_{k,l}$ που εξυπηρετούνται στο σύστημα, τότε ο μέσος ρυθμός άφιξης των ελεύθερων πηγών δίνεται από $\lambda_{k,l} = (N_k - n_{k,l}) \gamma_{k,l}$.

Όπως και στην περίπτωση του W-CDTM η *κατάληψη του εύρους ζώνης* $A(c|j)$ μπορεί να προσδιοριστεί από την (3-51) και ο *παράγοντας τοπικής απώλειας* από την (3-52). Οι τιμές των $P_{k_l}(j)$ δίνονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{k_l}(j) = \frac{(N_k - \sum_{l=1}^{S_k} n_{k_l} + 1) A_{k_l}(j) q(j - b_{k_l})}{jq(j)} \quad (6-13)$$

$$\text{όπου: } A_{k_l}(j) = \alpha_{k_l} (1 - LB_{k_l}(j - b_{k_l})) b_{k_l} \delta_{k_l}(j)$$

Όσον αφορά τις πιθανότητες καταστάσεων $q(j)$, αυτές μπορούν να προσδιοριστούν από [61]:

$$q(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{S_k} (N_k - \sum_{l=1}^{S_k} n_{k_l} + 1) A_{k_l}(j) q(j - b_{k_l}) \quad (6-14)$$

για $j=1, \dots, j_{max}$ και $q(x)=0$ για $x < 0$, τη συνθήκη $\sum_{j=0}^{j_{max}} q(j) = 1$ και

$$\delta_{k_l}(j) = \begin{cases} 1, & \text{όταν } 1 \leq j \leq C \text{ και } b_{k_l} = 0 \ (\forall l > 1) \\ 1, & \text{όταν } j \leq J_{k_1} + b_{k_1} \text{ και } b_{k_2} > 0 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (6-15)$$

$$\delta_{k_l}(j) = \begin{cases} 1, & \text{αλλού } J_{k_l} + b_{k_l} < j \leq J_{k_{l+1}} + b_{k_l} \text{ και } b_{k_l} > 0 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}, \text{ για } l > 1 \quad (6-16)$$

Όταν $N_k \rightarrow \infty$, για κάθε κατηγορία κίνησης, τότε η (6-40) απλοποιείται σε (3-54).

Επειδή όμως ο υπολογισμός των $q(j)$ από την (6-40) απαιτεί να γνωρίζουμε τον ακριβή αριθμό των κλήσεων κάθε κατηγορίας σε διάφορες καταστάσεις j , χρησιμοποιούμε μια προσεγγιστική αλλά πολύ απλούστερη μέθοδο σύμφωνα με την οποία τα n_{k_l} στην κατάσταση j προσεγγίζονται από το μέσο πλήθος των κλήσεων της κατηγορίας k με απαιτήσεις b_{k_p} στην κατάσταση j , υποθέτοντας άπειρο πλήθος πηγών κίνησης (δηλαδή κίνηση Poisson) για κάθε κατηγορία:

$$n_{k_l}(j) \approx y_{k_l}(j) = \frac{a_{k_l} q(j - b_{k_l}) (1 - LB_{k_l}(j - b_{k_l}))}{q(j)} \quad (6-17)$$

Επομένως, ο υπολογισμός των $q(j)$ στο WF-CDTM δίνεται από:

$$q(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{S_k} (N_k - \sum_{m=1}^{S_k} y_{k_m}(j - b_{k_l})) A_{k_l}(j) q(j - b_{k_l}) \quad (6-18)$$

με $q(x)=0$ για $x < 0$, τη συνθήκη $\sum_{j=0}^{j_{\max}} q(j) = 1$ και $\sum_{m=1}^{S_k} n_{k_m} - 1 \approx \sum_{m=1}^{S_k} y_{k_m} (j - b_{k_l})$.

Τελικά, ο υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσεων της κατηγορίας k γίνεται από τις (3-56) και (3-57).

Στο Σχήμα 6-6 δείχνουμε το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων υπό τη μορφή της Μαρκοβιανής αλυσίδας για το μικρό σύστημα της παραγράφου 3.2.2, με τη μοναδική διαφορά ότι το πλήθος των πηγών N_k , είναι πεπερασμένο. Στο Σχήμα 6-6 έχουμε $\lambda_{k_l}(j) = \lambda_k (1 - LB_{k_l}(j))$.

Σχήμα 6-6: Διάγραμμα Μετάβασης Καταστάσεων στο WF-CDTM.

6.4. Αριθμητικά Αποτελέσματα για τα W-EnMLM και WF-CDTM

Στην παράγραφο αυτή συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των WF-CDTM και W-EnMLM. Με χρήση της γλώσσας προσομοίωσης SIMSCRIPT II.5 έχουμε δημιουργήσει προσομοιωτές για τα W-EnMLM και WF-CDTM. Για τη παραγωγή των αναλυτικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα VISUAL FORTRAN 6.0. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο παραδείγματα εφαρμογής.

6.4.1 1^ο παράδειγμα – Αποτελέσματα του W-EnMLM

Θεωρούμε μια κυψέλη W-CDMA που φιλοξενεί δύο σταθερές κατηγορίες κίνησης. Κλήσεις και των δύο κατηγοριών φτάνουν στη κυψέλη σύμφωνα με τη διαδικασία Poisson. Οι παράμετροι κίνησης για κάθε κατηγορία παρουσιάζονται στον

Πίνακα 6-7. Θεωρήσαμε $n_{max}=0.8$ και επιλέξαμε τη μέση τιμή και τον συντελεστή διασποράς της *διακυψελικής παρεμβολής* ίσα με $E[I_{inter}] = 2 \cdot 10^{-18}$ mW και $CV[I_{inter}] = 1$, αντίστοιχα. Για την ισχύ του θερμικού θορύβου χρησιμοποιήθηκε η τυπική τιμή των $P_N = 3.98 \cdot 10^{-18}$ mW.

Στο Σχήμα 6-7 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της *πιθανότητας απώλειας κλήσεων* των δύο κατηγοριών κίνησης συναρτήσει του *προσφερόμενου φορτίου κίνησης*. Κάθε σημείο φορτίου κίνησης στον οριζόντιο άξονα του Σχήματος 6-7 αντιστοιχεί στις τιμές του προσφερόμενου φορτίου κίνησης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-7. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ακρίβεια του μοντέλου είναι πολύ καλή, ακόμα και για πολύ υψηλό προσφερόμενο φορτίο κίνησης.

Πίνακας 6-7: Παράμετροι κίνησης στο W-EnMLM

	1 ^η κατηγορία	2 ^η κατηγορία
Είδος	σταθερή	σταθερή
Ρυθμός μετάδοσης (Kbps)	$R_1=64$	$R_2=144$
Παράγοντας δραστηριότητας	$\nu_1=1.0$	$\nu_2=0.7$
Παράμετρος BER (dB)	$(E_b/N_0)_1=4$	$(E_b/N_0)_2=3$

Πίνακας 6-8: Προσφερόμενο φορτίο κίνησης στο 1^ο παράδειγμα

Σημείο φορτίου κίνησης		1	2	3	4	5	6	7	8
Φορτίο (erl)	1 ^η κατήγ.	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
	2 ^η κατήγ.	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0

Θεωρούμε επίσης ότι το πλήθος των πηγών κίνησης είναι πεπερασμένο και για τις δύο κατηγορίες. Για απλότητα θεωρούμε ότι οι δύο κατηγορίες έχουν το ίδιο πλήθος πηγών και ίσο με 5, 10, 20, 50, 100, 200 ή 500 (όπως φαίνεται στον οριζόντιο άξονα του Σχήματος 6-7). Συμπεριλαμβάνουμε επίσης στον οριζόντιο άξονα του Σχήματος 6-7 την περίπτωση του απείρου πλήθους πηγών κίνησης (τυχαία κίνηση). Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στο W-EMLM και έχει συμπεριληφθεί για να γίνει σύγκριση των δύο μοντέλων. Υπολογίζουμε τις *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* για κάθε κατηγορία συναρτήσει το πλήθος των πηγών. Το προσφερόμενο φορτίο κίνησης ανά ελεύθερη πηγή έχει επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε το γινόμενο *Πλήθος Πηγών* N_k επί *Προσφερόμενο Φορτίο Κίνησης* ανά *Ελεύθερη Πηγή* a_k να είναι σταθερό για κάθε σημείο του οριζόντιου άξονα του Σχήματος 6-7 και ίσο με $N_1 a_1 = 4$ erl και $N_2 a_2 = 1$ erl.

Στο Σχήμα 6-7, τα αποτελέσματα των *πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων* δείχνουν ότι η ακρίβεια του μοντέλου είναι πολύ καλή ακόμα και για πολύ μικρό πλήθος

πηγών. Στην περίπτωση της 1^{ης} κατηγορίας και μικρού πλήθους πηγών (5 και 10) η διαφορά ανάμεσα στα αναλυτικά αποτελέσματα και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης οφείλεται στις προσεγγίσεις της (6-2). Το σφάλμα προσέγγισης κατά των υπολογισμό των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων που οφείλεται στην (6-2) γίνεται υψηλότερο όσο το πλήθος των πηγών μειώνεται.

Σχήμα 6-7: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του πλήθους των πηγών στο W-EnMLM.

6.4.2 2^ο παράδειγμα – Αποτελέσματα του WF-CDTM

Θεωρούμε και πάλι μια κυψέλη W-CDMA που φιλοξενεί δύο ελαστικές κατηγορίες κίνησης, όμως το πλήθος των πηγών κίνησης είναι πεπερασμένο. Για την ανάλυση του συστήματος θα χρησιμοποιήσουμε το WF-CDTM. Οι παράμετροι κίνησης που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παράδειγμα αυτό παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-9. Το πλήθος των πηγών κίνησης είναι το ίδιο και για τις δύο κατηγορίες και ίσο με 5, 10, 20, 50, 100, 200 ή 500 (όπως βλέπουμε στον οριζόντιο άξονα του Σχήματος 6-8). Συμπεριλαμβάνουμε επίσης και την περίπτωση με άπειρο πλήθος πηγών. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στο W-CDTM και έχει συμπεριληφθεί για σύγκριση με το WF-CDTM.

Υπολογίζουμε τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων για κάθε κατηγορία κίνησης συναρτήσει του πλήθους των πηγών. Τα αποτελέσματα αυτά (ανάλυση και

προσομοίωση) παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-8. Το προσφερόμενο φορτίο κίνησης ανά ελεύθερη πηγή έχει επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε το γινόμενο *Πλήθος Πηγών* N_k επί *Προσφερόμενο Φορτίο Κίνησης* ανά *Ελεύθερη Πηγή* a_k να είναι σταθερό για κάθε σημείο του οριζόντιου άξονα του και ίσο με $N_1 a_1 = 4$ erl και $N_2 a_2 = 1$ erl.

Τα αποτελέσματα του Σχήματος 6-8 δείχνουν ότι η ακρίβεια του μοντέλου είναι αρκετά ικανοποιητική. Οι διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα της ανάλυσης και της προσομοίωσης οφείλονται στην (6-17) και στις προσεγγίσεις που είχαν παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.2.3. Επιπροσθέτως, το Σχήμα 6-8 δείχνει την αναγκαιότητα του WF-CDTM. Εάν το W-CDTM είχε χρησιμοποιηθεί αντί του WF-CDTM, τότε τα αποτελέσματα των *πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων* που αντιστοιχούν στην περίπτωσης “inf” του οριζόντιου άξονα θα ίσχυαν επίσης και για όλες τις άλλες περιπτώσεις. Κάτι τέτοιο θα ήταν όμως λανθασμένο.

Πίνακας 6-9: Παράμετροι κίνησης στο WF-CDTM

	1 ^η κατηγορία	2 ^η κατηγορία
Είδος	ελαστική	ελαστική
Ρυθμός μετάδοσης (Kbps)	$R_{1,1}=64, R_{1,2}=32$	$R_{2,1}=144, R_{2,2}=112$
Κατώφλια	$T_{1,1}=0.6$	$T_{2,1}=0.5$
Παράγοντας δραστηριότητας	$\nu_1=1.0$	$\nu_2=0.7$
Παράμετρος BER	$(E_b/N_0)_1=4$	$(E_b/N_0)_2=3$

Σχήμα 6-8: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του πλήθους των πηγών στο WF-CDTM.

Στον Πίνακα 6-10 παρουσιάζουμε τα συγκεντρωτικά αναλυτικά αποτελέσματα των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων των δύο μοντέλων. Είναι τα ίδια αποτελέσματα που δείχνουμε και στα Σχήματα 6-7 και 6-8.

Πίνακας 6-10: Αναλυτικά αποτελέσματα των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων στα W-EnMLM και WF-CDTM.

Πλήθος Πηγών	CBP (%), W-EnMLM		CBP (%), WF-CDTM	
	1 ^η κατηγορία	2 ^η κατηγορία	1 ^η κατηγορία	2 ^η κατηγορία
5	0.4827	0.5743	0.4476	0.5307
10	0.5970	0.7170	0.5233	0.6243
20	0.7070	0.8566	0.6175	0.7419
50	0.8105	0.9898	0.7355	0.8901
100	0.8547	1.0472	0.8026	0.9747
200	0.8791	1.0790	0.8463	1.0299
500	0.8946	1.0992	0.8771	1.0689
inf	0.9052	1.1131	0.9000	1.0978

Κεφάλαιο 7

7. Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα επί της ενότητας

B

Στην ενότητα B που αποτελείται από κεφάλαια 5 και 6 μελετήθηκαν τα μοντέλα απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης ψευδο-τυχαίας κίνησης με σταθερό ρυθμό μετάδοσης.

Στο κεφάλαιο 5 (state of the art) της Ενότητας B παρουσιάστηκαν και μελετήθηκαν δύο μοντέλα για ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα:

- Το μοντέλο απωλειών ψευδο-τυχαίων κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (Engset Multirate Loss Model, EnMLM). Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της απόδοσης σε επίπεδο κλήσεων των ενσύρματων συνδεσιμοστρεφών δικτύων με πεπερασμένο πλήθος πηγών και με κατηγορίες κίνησης που έχουν σταθερές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.
- Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης και πεπερασμένες πηγές κίνησης (Finite Connection Dependent Threshold Model, F-CDTM). Το μοντέλο αυτό είναι μια επέκταση του EnMLM και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα που υποστηρίζουν ελαστική κίνηση και πεπερασμένο πλήθος πηγών.

Στο κεφάλαιο 6 της Ενότητας B προτάθηκαν τρία νέα μοντέλα απωλειών κλήσεων για ασύρματα δίκτυα W-CDMA που υποστηρίζουν ψευδο-τυχαία κίνηση:

- Το μοντέλο απωλειών ψευδο-τυχαίων κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης σε δίκτυα W-CDMA (Wireless Engset Multi-Rate Loss Model, W-EnMLM). Το μοντέλο αυτό είναι επέκταση του EnMLM, ώστε να λαμβάνονται υπ' όψη οι ιδιαιτερότητες των δικτύων W-CDMA.

- Το μοντέλο απωλειών ψευδο-τυχαίων κλήσεων με σταθερές απαιτήσεις εξυπηρέτησης σε δίκτυα W-CDMA με κίνηση μεταπομπής (Wireless Handoff Engset Multi-Rate Loss Model, WH-EnMLM). Το μοντέλο αυτό είναι επέκταση του W-EnMLM, ώστε να λαμβάνεται υπ' όψη και η κίνηση μεταπομπής.
- Το μοντέλο κατωφλίων για κλήσεις με εναλλακτικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης και πεπερασμένες πηγές σε δίκτυα W-CDMA (Wireless Finite Connection Dependent Threshold Model, WF-CDTM). Το μοντέλο αυτό είναι μια επέκταση του F-CDTM, ώστε να λαμβάνονται υπ' όψη οι ιδιαιτερότητες των δικτύων W-CDMA.

Τα τρία νέα μοντέλα που προτάθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται μέσω μονοδιάστατων Μαρκοβιανών αλυσίδων με σκοπό τη δημιουργία αναδρομικών τύπων για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων καταστάσεων του συστήματος και των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων διαφόρων κατηγοριών κίνησης. Επίσης, μέσω των προσομοιώσεων σε υπολογιστή, έγινε η μελέτη της ακρίβειας των προτεινόμενων προσεγγιστικών τύπων. Στις προσομοιώσεις εξετάστηκαν οι περιπτώσεις δύο ή τριών κατηγοριών κίνησης, διαφορετικού πλήθους πηγών κίνησης, διαφορετικών συνθηκών στον έλεγχο αποδοχής νέων κλήσεων και κλήσεων μεταπομπής, μεταβαλλόμενου προσφερόμενου φορτίου κίνησης και μεταβαλλόμενης διακυψελικής παρεμβολής. Σε όλες τις περιπτώσεις, όπως έδειχναν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η ακρίβεια των προτεινόμενων προσεγγιστικών τύπων ήταν πολύ ικανοποιητική.

Στο Σχήμα 7-1 παρουσιάζεται η διασύνδεση των ασύρματων μοντέλων της διατριβής. Σε έντονους κύκλους είναι τα νέα μοντέλα που έχουν προταθεί. Πάνω στα βέλη υπάρχει η συνθήκη που οδηγεί από το ένα μοντέλο στο άλλο. Π.χ αν στο W-EnMLM θεωρήσουμε ότι το πλήθος των πηγών κίνησης N_k τείνει στο άπειρο, τότε προκύπτει το W-EMLM.

Σχήμα 7-1: Διασύνδεση των ασύρματων μοντέλων.

Ενότητα Γ:
Μοντέλα απωλειών κλήσεων
πολυδιάστατης κίνησης με
ελαστικό ρυθμό μετάδοσης σε
ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή
δίκτυα

Κεφάλαιο 8

8. Επισκόπηση Υφισταμένου Μοντέλου Απώλειας Κλήσεων για Τυχαία Κίνηση

8.1. E-EMLM (Extended EMLM): Το μοντέλο απωλειών για τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες.

8.1.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Το EMLM θεωρεί ότι κάθε κλήση χρησιμοποιεί σταθερό εύρος ζώνης σε όλη τη διάρκεια της παραμονής της στο σύστημα (ζεύξη). Όμως, στο Extended Erlang Multi-rate Loss Model (E-EMLM) ([11], [41]) το εύρος ζώνης που ανατίθεται σε μια κλήση μπορεί να συμπιεστεί και να απλωθεί πολλές φορές κατά τη διάρκεια της εξυπηρέτησης της κλήσης. Αυτή η συμπίεση και το άπλωμα το εύρους ζώνης εξαρτώνται από τις συνθήκες συμφόρησης του επικρατούν στο σύστημα. Θεωρούμε ότι κλήσεις από K ανεξάρτητες κατηγορίες κίνησης φτάνουν σε μια ζεύξη χωρητικότητας C μονάδων εύρους ζώνης σύμφωνα με τη διαδικασία Poisson. Ο ρυθμός άφιξης των κλήσεων της κατηγορίας k ($k = 1, 2, \dots, K$) συμβολίζεται με λ_k . Οι κλήσεις ανταγωνίζονται για το διαθέσιμο εύρος ζώνης της ζεύξης σύμφωνα με την πολιτική πλήρους διάθεσης. Μια κατηγορία κίνησης μπορεί να είναι είτε *ελαστική* είτε *προσαρμοζόμενη*. Συμβολίζουμε με K_e το σύνολο (πλήθος) των *ελαστικών* κατηγοριών και με K_a το σύνολο (πλήθος) των *προσαρμοζόμενων* κατηγοριών ($K_e + K_a = K$). Οι κλήσεις της κατηγορίας k έχουν ως μέγιστη απαίτηση σε εύρος ζώνης την b_k^{peak} και την αντίστοιχη απαίτηση σε χρόνο εξυπηρέτησης η οποία είναι εκθετικά κατανομημένη με μέση τιμή μ_k^{-1} . Εάν κατά την άφιξη μιας νέας κλήσης της κατηγορίας k , οι b_k^{peak} μονάδες εύρους ζώνης δεν είναι διαθέσιμες στη ζεύξη, τότε η εισερχόμενη κλήση μπορεί να γίνει δεκτή στο σύστημα με μικρότερο (συμπιεσμένο) εύρος ζώνης και μεγαλύτερο (απλωμένο) χρόνο εξυπηρέτησης. Για να επιτευχθεί αυτό, συμπιέζεται επίσης το εύρος ζώνης όλων των κλήσεων που ήδη εξυπηρετούνται

στο σύστημα. Μετά από τη συμπίεση του εύρους ζώνης, οι κλήσεις που ανήκουν σε μια *ελαστική* κατηγορία προσαρμόζουν τον χρόνο εξυπηρέτησης με τέτοιο τρόπο ώστε το γινόμενο (*χρόνος εξυπηρέτησης*) επί (*εύρος ζώνης ανά κλήση*) παραμένει σταθερό, ενώ οι κλήσεις που ανήκουν σε μια *προσαρμοζόμενη* κατηγορία δεν μεταβάλλουν τον χρόνο εξυπηρέτησης.

Η συμπίεση του εύρους ζώνης (είτε μιας νέας κλήσης είτε μιας κλήσης που ήδη βρίσκεται στο σύστημα) επιτρέπεται μέχρι ένα ελάχιστο εύρος ζώνης $b_k^{\min} = r_k^{\min} b_k^{\text{peak}}$, όπου $r_k^{\min}$ είναι το ελάχιστο ποσοστό του μέγιστου εύρους ζώνης b_k^{peak} που μπορεί να ανατεθεί σε μια κλήση κατηγορίας k . Θεωρούμε ένα κοινό $r_k^{\min} = r^{\min}$ για όλες τις κατηγορίες. Έτσι, το στιγμιαίο εύρος ζώνης, b_k , που ανατίθεται σε μια κλήση κατηγορίας k , παίρνει τιμές ανάμεσα στα $b_k^{\min}$ και b_k^{peak} ανάλογα με τις συνθήκες συμφόρησης στη ζεύξη εκείνη τη χρονική στιγμή.

Συμβολίζουμε με s το συνολικό κατειλημμένο εύρος ζώνης της ζεύξης, και με j το (εικονικό) εύρος ζώνης που θα ήταν κατειλημμένο αν όλες οι κλήσεις που βρίσκονται στη ζεύξη καταλάμβαναν το μέγιστο εύρος ζώνης. Το j αντιπροσωπεύει η *συνολική απαίτηση σε εύρος ζώνης* (total bandwidth demand) και χρησιμοποιείται ως (μάκρο-) κατάσταση του συστήματος. Το άνω όριο του j , δηλαδή η *μέγιστη συνολική απαίτηση σε εύρος ζώνης*, ορίζεται ως $T = C/r^{\min}$. Όταν $j \leq C$, οι τιμές των j και s συμπίπτουν. Ο *έλεγχος αποδοχής κλήσεων* βασίζεται στο T . Μια κλήση κατηγορίας k γίνεται δεκτή στο σύστημα αν και μόνο αν $j + b_k^{\text{peak}} \leq T$. Μετά την αποδοχή, στην κλήση ανατίθεται το μέγιστο εύρος ζώνης αν $j + b_k^{\text{peak}} \leq C$. Αλλιώς στη κλήση ανατίθεται το μειωμένο εύρος ζώνης $b_k = (C/j) b_k^{\text{peak}}$. Η συνάρτηση $r(j) = \min(1, C/j)$ εκφράζει το ποσοστό του μέγιστου εύρους ζώνης που ανατίθεται σε κάθε κλήση στην κατάσταση j . Να σημειωθεί ότι $r^{\min} = r(T)$.

Ως ένα παράδειγμα θεωρήστε μια ζεύξη χωρητικότητας $C=5$ και μέγιστης συνολικής απαίτησης σε εύρος ζώνης $T=7$. Η ζεύξη εξυπηρετεί κλήσεις δύο κατηγοριών (*ελαστικών* ή *προσαρμοζόμενων*). Θεωρήστε ότι σε μια δεδομένη χρονική στιγμή μόνο 1 μονάδα εύρους ζώνης, από την συνολική χωρητικότητα της ζεύξης είναι διαθέσιμο, ενώ οι υπόλοιπες 4 μονάδες εύρους ζώνης καταλαμβάνονται από δύο κλήσεις της 1^{ης} κατηγορίας με απαιτήσεις $b_1^{\text{peak}} = 2$. Τη στιγμή αυτή $s=j=4 \leq C$, επομένως, στις κλήσεις ανατίθεται το μέγιστο εύρος ζώνης. Έστω τη χρονική στιγμή αυτή έρχεται μια νέα κλήση 2^{ης} κατηγορίας και ζητά $b_2^{\text{peak}} = 3$. Μολονότι η νέα αυτή κλήση ζητά παραπάνω μονάδες εύρους ζώνης από ότι είναι διαθέσιμες στη ζεύξη, αυτή γίνεται δεκτή επειδή $b_2^{\text{peak}} + j = 7 \leq T$. Τότε το σύστημα μεταφέρεται στην

κατάσταση $j = 7 = T$. Επειδή j ξεπερνάει το C , η νέα κλήση γίνεται δεκτή με συμπιεσμένο εύρος ζώνης, $b_2 = (C/j)b_2^{\text{peak}} = (5/7)*3$. Μετά την αποδοχή της κλήσης, το εύρος ζώνης που έχει ανατεθεί στις άλλες δύο κλήσεις που ήδη βρίσκονται στο σύστημα, επίσης συμπιέζεται κατά C/j και γίνεται $b_1 = (C/j) b_1^{\text{peak}} = (5/7)*2$. Να σημειωθεί ότι τώρα το s παίρνει τη μέγιστη τιμή. Δηλαδή $s=2b_1+b_2=5=C$.

Σχήμα 8-1: Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων στο E-EMLM – Μονοδιάστατη Μαρκοβιανή αλυσίδα.

Στο Σχήμα 8-1 παρουσιάζεται το *διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων* για το παραπάνω παράδειγμα. Με $Y_k(j)$ συμβολίζουμε το μέσο πλήθος των κλήσεων κατηγορίας k στην κατάσταση j . Όταν το σύστημα είναι στις καταστάσεις $j=1$ έως 5, όλες οι κλήσεις καταλαμβάνουν το μέγιστο εύρος ζώνης. Στις καταστάσεις $j=6$ και 7 όλες οι κλήσεις καταλαμβάνουν συμπιεσμένο εύρος ζώνης και οι ρυθμοί μετάβασης των *ελαστικών* κλήσεων από τις καταστάσεις $j=6$ και 7 προς χαμηλότερες καταστάσεις μειώνονται κατά τον παράγοντα $r(j)$, ενώ παραμένουν αμετάβλητοι στην περίπτωση των *προσαρμοζόμενων* κλήσεων. Το σύστημα δεν έχει *λύση μορφής γινομένου* επειδή η Μαρκοβιανή αλυσίδα είναι μη αντιστρέψιμη (οι εξισώσεις τοπικής ισορροπίας παύουν να ισχύουν λόγω της $r(j)$). Η Μαρκοβιανή αυτή αλυσίδα προσεγγίζεται από μια αντιστρέψιμη Μαρκοβιανή αλυσίδα με τον ίδιο χώρο κατάστασης. Στην αντιστρέψιμη Μαρκοβιανή αλυσίδα η $r(j)$ αντικαθίσταται από μια άλλη συνάρτηση της j της οποίας οι τιμές προσδιορίζονται με αναδρομικό τρόπο, έτσι ώστε η τοπική ισορροπία να ισχύει σε όλες τις καταστάσεις. Όσον αφορά τις *καταστάσεις απώλειας*, οι $j=6$ και 7 είναι *καταστάσεις απώλειας* και των δύο κατηγορών, ενώ η $j=5$ είναι *κατάσταση απώλειας* μόνο για την 2^η κατηγορία.

8.1.2 Υπολογισμός των πιθανοτήτων καταστάσεων

Με βάση την προσεγγιστική αντιστρέψιμη Μαρκοβιανή αλυσίδα, οι πιθανότητες των καταστάσεων υπολογίζονται ως ακολούθως [11]:

$$\min(C, j)q(j) = \sum_{k \in K_e} a_k b_k q(j - b_k) + \min(1, \frac{C}{j}) \sum_{k \in K_a} a_k b_k q(j - b_k) \quad (8-1)$$

$$\text{για } j=0, \dots, T \text{ και } q(j)=0 \text{ για } j < 0 \text{ με } \sum_{j=0}^T q(j) = 1$$

Απόδειξη:

Από την Μαρκοβιανή αλυσίδα του Σχήματος 8-1 έχουμε δύο εξισώσεις τοπικής ισορροπίας για την *ελαστική* και την *προσαρμοζόμενη* κίνηση.

Για την *ελαστική* κίνηση έχουμε την ακόλουθη εξίσωση τοπικής ισορροπίας :

$$q(j-b_k) \lambda_k = q(j) Y_k(j) \mu_k r(j) \quad (8-2)$$

Για την *προσαρμοζόμενη* κίνηση έχουμε την ακόλουθη εξίσωση τοπικής ισορροπίας :

$$q(j-b_k) \lambda_k = q(j) Y_k(j) \mu_k \quad (8-3)$$

Προκειμένου να φτιάξουμε μια εξίσωση τοπικής ισορροπίας για όλες της κατηγορίες (και *ελαστικές* και *προσαρμοζόμενες*), συνδυάζουμε τις (8-2) και (8-3), εισάγοντας τον παράγοντα $\Phi_k(j)$, στην ακόλουθη εξίσωση, η οποία ισχύει και για τις *ελαστικές* και για τις *προσαρμοζόμενες* κατηγορίες:

$$q(j-b_k) \lambda_k = q(j) Y_k(j) \mu_k \Phi_k(j), \quad 0 \leq j \leq T \quad (8-4)$$

όπου $\Phi_k(j) = r(j)$ για τις *ελαστικές* κατηγορίες και $\Phi_k(j) = 1$ για τις *προσαρμοζόμενες* κατηγορίες.

Στην (8-4) ο όρος $\mu_k \Phi_k(j)$ αντιπροσωπεύει την τροποποίηση του ρυθμού εξυπηρέτησης μ_k μιας κλήσης της κατηγορίας k . Επειδή έχουμε κάνει την υπόθεση ότι το συνολικό προσφερόμενο φορτίο κίνησης για κάθε κατηγορία παραμένει σταθερό, έχουμε:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_k b_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k r(j)} b_k r(j) = \frac{\lambda_k}{\mu_k \Phi_k(j)} b'_k \quad (\text{ελαστικές}) \\ \alpha_k b_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k} b_k r(j) = \frac{\lambda_k}{\mu_k \Phi_k(j)} b'_k \quad (\text{προσαρμοζόμενες}) \end{array} \right\} \quad (8-5)$$

όπου b'_k είναι το τροποποιημένο εύρος ζώνης που ανατίθεται σε κάθε κλήση της κατηγορίας k .

Παρακάτω, θα υπολογίσουμε τις πιθανότητες καταστάσεων, $q(j)$, για $0 \leq j \leq T$ (αλλού $q(j)=0$).

Όταν $j \leq C$, τότε το συνολικό κατειλημμένο εύρος ζώνης s είναι ίσο με την κατάσταση του συστήματος, j :

$$j = s = \sum_{k \in K_e} Y_k(j) b'_k + \sum_{k \in K_a} Y_k(j) b'_k \quad (8-6)$$

Η (8-6) εκφράζει το γεγονός ότι το συνολικό κατειλημμένο εύρος ζώνης είναι το άθροισμα των b'_k . Όμως, λόγω της (8-5), το b'_k πρέπει να είναι ίσο με: $b'_k = b_k \Phi_k(j)$ (επειδή $r(j) = 1$, για $j \leq C$). Επομένως:

$$j = s = \sum_{k \in K_e} Y_k(j) b_k \Phi_k(j) + \sum_{k \in K_a} Y_k(j) b_k \Phi_k(j) \quad (8-7)$$

Όταν $C < j \leq T$, τότε το συνολικό κατειλημμένο εύρος ζώνης s είναι ίσο με την χωρητικότητα του συστήματος C :

$$C = s = \sum_{k \in K_e} Y_k(j) b'_k + \sum_{k \in K_a} Y_k(j) b'_k \quad (8-8)$$

όπου, λόγω της (8-5), έχουμε $b'_k = b_k \Phi_k(j)$ για ελαστικές κατηγορίες, και $b'_k = r(j) b_k \Phi_k(j)$ για προσαρμοζόμενες κατηγορίες, δηλαδή:

$$C = s = \sum_{k \in K_e} Y_k(j) b_k \Phi_k(j) + r(j) \sum_{k \in K_a} Y_k(j) b_k \Phi_k(j) \quad (8-9)$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της (8-4) με b_k και αντικαθιστώντας $a_k = \lambda_k / \mu_k$, έχουμε:

$$q(j-b_k) a_k b_k = q(j) Y_k(j) b_k \Phi_k(j), \quad 0 \leq j \leq T \quad (8-10)$$

Αθροίζοντας την (8-10) για κάθε κατηγορία $k \in K_e$, προκύπτει:

$$\sum_{k \in K_e} q(j-b_k) a_k b_k = q(j) \sum_{k \in K_e} Y_k(j) b_k \Phi_k(j) \quad (8-11)$$

Ομοίως, αθροίζοντας την (8-10) για κάθε κατηγορία $k \in K_a$, προκύπτει:

$$\sum_{k \in K_a} q(j-b_k) a_k b_k = q(j) \sum_{k \in K_a} Y_k(j) b_k \Phi_k(j) \quad (8-12)$$

Για τις καταστάσεις $0 \leq j \leq C$ προσθέτουμε (8-11) και (8-12) για να προκύψει μια κοινή εξίσωση για τις ελαστικές και τις προσαρμοζόμενες κατηγορίες:

$$\sum_{k \in K_e \cup K_a} q(j-b_k) a_k b_k = q(j) \sum_{k \in K_e \cup K_a} Y_k(j) b_k \Phi_k(j) \quad (8-13)$$

Λόγω της (8-7), η (8-13) γίνεται:

$$q(j) j = \sum_{k \in K_e \cup K_a} q(j-b_k) a_k b_k \quad (8-14)$$

Για $C < j \leq T$, αρχικά πολλαπλασιάζουμε την (8-12) με C/j και την προσθέτουμε στην (8-11) για να προκύψει μια κοινή εξίσωση για τις ελαστικές και τις προσαρμοζόμενες κατηγορίες:

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K_e} q(j-b_k) a_k b_k + \frac{C}{j} \sum_{k \in K_a} q(j-b_k) a_k b_k &= \\ = q(j) \sum_{k \in K_e} Y_k(j) b_k \Phi_k(j) + \frac{C}{j} q(j) \sum_{k \in K_a} Y_k(j) b_k \Phi_k(j) \end{aligned} \quad (8-15)$$

Έπειτα, αντικαθιστώντας την (8-9) στην (8-15) (και επειδή $r(j)=C/j$ όταν $j>C$), αφαιρούμε τα $Y_k(j)$ και $\Phi_k(j)$ και παίρνουμε:

$$q(j) C = \sum_{k \in K_e} q(j-b_k) a_k b_k + \frac{C}{j} \sum_{k \in K_a} q(j-b_k) a_k b_k \quad (8-16)$$

Τέλος, για $0 \leq j \leq T$ από τις (8-14) και (8-16) προκύπτει η (8-1) – τέλος της απόδειξης.

Έχοντας προσδιορίσει τις $q(j)$, η πιθανότητα απώλειας κλήσεων της κατηγορίας k υπολογίζεται προσθέτοντας τις πιθανότητες των καταστάσεων απώλειας της κατηγορίας k :

$$B_k = \sum_{j=T-b_k+1}^T q(j) \quad (8-17)$$

Η *χρησιμοποίηση της ζεύξης* (link utilization) υπολογίζεται από:

$$U = \sum_{j=1}^C j q(j) + \sum_{j=C+1}^T C q(j) \quad (8-18)$$

Η μέση *διεκπεραιωτική ικανότητα* (throughput) της κατηγορίας k (ελαστικής ή προσαρμοζόμενης) ορίζεται ως το μέσο εύρος ζώνης που καταλαμβάνεται από τις κλήσεις της κατηγορίας k και υπολογίζεται από [11]:

$$\Theta_k = \frac{\sum_{j=0}^T r(j) b_k Y_k(j) q(j)}{\sum_{j=0}^T Y_k(j) q(j)} \quad (8-19)$$

Στην (8-19), το μέσο πλήθος των κλήσεων κατηγορίας k στην κατάσταση j , $Y_k(j)q(j)$, υπολογίζεται από (8-20) και (8-21) για *ελαστικές* και *προσαρμοζόμενες* κατηγορίες, αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} Y_k(j)q(j) = & \frac{a_k b_k q(j-b_k)}{\min(C, j)} (Y_k(j-b_k)+1) + \frac{1}{j} \sum_{i \in K_a} a_i b_i q(j-b_i) Y_k(j-b_i) \\ & + \frac{1}{\min(C, j)} \sum_{i \in K_e, i \neq k} a_i b_i q(j-b_i) Y_k(j-b_i) \end{aligned} \quad (8-20)$$

$$\begin{aligned} Y_k(j)q(j) = & \frac{a_k b_k q(j-b_k)}{j} (Y_k(j-b_k)+1) + \frac{1}{j} \sum_{i \in K_a, i \neq k} a_i b_i q(j-b_i) Y_k(j-b_i) \\ & + \frac{1}{\min(C, j)} \sum_{i \in K_e} a_i b_i q(j-b_i) Y_k(j-b_i) \end{aligned} \quad (8-21)$$

Κεφάλαιο 9

9. Νέα Μοντέλα Απωλειών Κλήσεων με Εναλλακτικές Απαιτήσεις Εξυπηρέτησης

9.1. E-CDTM (Extended CDTM): Το μοντέλο κατωφλίων για τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες.

9.1.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Θεωρούμε K ανεξάρτητες κατηγορίες κίνησης, είτε ελαστικές είτε προσαρμοζόμενες, που εξυπηρετούνται από μια ζεύξη χωρητικότητας C . Συμβολίζουμε με K_e το σύνολο (πλήθος) των ελαστικών κατηγοριών και με K_a το σύνολο (πλήθος) των προσαρμοζόμενων κατηγοριών ($K_e + K_a = K$). Οι κλήσεις της κατηγορίας k φτάνουν στη ζεύξη σύμφωνα με τη διαδικασία Poisson με ρυθμό λ_k ($k = 1, 2, \dots, K$). Κάθε κατηγορία k έχει ένα σύνολο από S_k κατώφλια: $J_{k1}, J_{k2}, \dots, J_{kS_k}$. Τα κατώφλια αναφέρονται στο συνολικό κατειλημμένο εύρος ζώνης και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του εύρους ζώνης που θα απαιτεί μια νέα κλήση. Όπως και στο E-EMLM, συμβολίζουμε με s το συνολικό κατειλημμένο εύρος ζώνης της ζεύξης και με j το (εικονικό) εύρος ζώνης που θα ήταν κατειλημμένο στη ζεύξη αν όλες οι κλήσεις εξυπηρετούντο με το μέγιστο εύρος ζώνης. Το j αντιπροσωπεύει τη συνολική απαίτηση σε εύρος ζώνης και χρησιμοποιείται ως (μάκρο-)κατάσταση του συστήματος. Οι νέες κλήσεις που φτάνουν στη ζεύξη ζητούν εύρος ζώνης ανάλογα με την κατάσταση του συστήματος j εκείνη τη χρονική στιγμή και τα κατώφλια της αντίστοιχης κατηγορίας. Οι κλήσεις της κατηγορίας k έχουν S_k+1 προκαθορισμένες εναλλακτικές απαιτήσεις εύρους ζώνης $b_{k0} > b_{k1} > \dots > b_{kS_k}$. Κάθε απαίτηση b_{kl} ($l=0,1,\dots, S_k$) αντιστοιχεί σε μια απαίτηση χρόνου εξυπηρέτησης, ο οποίος είναι εκθετικά κατανομημένος με μέση τιμή μ_{kl}^{-1} . Το γινόμενο χρόνος εξυπηρέτησης επί απαιτούμενο εύρος ζώνης παραμένει σταθερό για κάθε ζεύγος ($b_{kl}\mu_{kl}^{-1}$). Αυτό ισχύει και για τις ελαστικές και για τις προσαρμοζόμενες κλήσεις. Το

προσφερόμενο φορτίο κίνησης που αναφέρεται στο b_{k_l} είναι $a_{k_l} = \lambda_k \mu_{k_l}^{-1}$. Ορίζουμε επίσης $a_k = a_{k_0}$. Όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης της ζεύξης είναι αρκετό, κάθε κλήση γίνεται δεκτή με μια από τις εναλλακτικές απαιτήσεις b_{k_l} . Εάν, κατά την άφιξη της κλήσης, το απαιτούμενο εύρος ζώνης b_{k_l} δεν είναι διαθέσιμο, τότε υπάρχει και πάλι η δυνατότητα για τη κλήση να γίνει δεκτή, αλλά με συμπιεσμένο εύρος ζώνης και ταυτόχρονα θα συμπιεστεί και το εύρος ζώνης των κλήσεων που ήδη εξυπηρετούνται στο σύστημα. Η συμπίεση του εύρους ζώνης επιτρέπεται μέχρι ένα ελάχιστο εύρος ζώνης $b_{k_l}^{\min} = r_k^{\min} b_{k_p}$, όπου $r_k^{\min}$ είναι το ελάχιστο ποσοστό του απαιτούμενου εύρους ζώνης b_{k_l} που μπορεί να ανατεθεί στις κλήσεις της κατηγορίας k . Στη συνέχεια θεωρούμε ένα κοινό $r_k^{\min} = r^{\min}$, για όλες τις κατηγορίες, το οποίο και αποτελεί μια παράμετρο του συστήματος. Η μέγιστη συνολική απαίτηση εύρους ζώνης ορίζεται ως $T = C/r^{\min}$.

Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων βασίζεται στο T . Μια κλήση της κατηγορίας k απορρίπτεται αν και μόνο αν $j + b_{k_l} > T$. Μετά την αποδοχή, το απαιτούμενο εύρος ζώνης, b_{k_p} , ανατίθεται στη κλήση χωρίς συμπίεση αν η νέα κατάσταση του συστήματος είναι $(j + b_{k_l}) \leq C$. Αλλιώς έχουμε τη συμπίεση του εύρους ζώνης. Το ποσοστό της συμπίεσης του εύρους ζώνης κάθε κλήσης στην κατάσταση j προσδιορίζεται από: $r(j) = \min(1, C/j)$. Δηλαδή το πραγματικό εύρος ζώνης που καταλαμβάνει η κλήση είναι $r(j) b_{k_l}$. Να σημειωθεί ότι για τις καταστάσεις $j \leq C$ έχουμε $r(j)=1$ και επομένως δεν υπάρχει συμπίεση. Ενώ για $j=T$ έχουμε την μέγιστη δυνατή συμπίεση η οποία ορίζεται ως $r(T)=C/T=r^{\min}$. Για τις καταστάσεις $C < j \leq T$, το ποσοστό της συμπίεσης είναι $r(j)=C/j$ για όλες τις κλήσεις. Όταν γίνεται η συμπίεση του εύρους ζώνης κατά κάποιο ποσοστό, τότε χρόνος εξυπηρέτησης των ελαστικών κλήσεων απλώνεται κατά το ίδιο ποσοστό και γίνεται $1/(r(j)\mu_{k_l})$, ενώ ο χρόνος εξυπηρέτησης των προσαρμοζόμενων κλήσεων παραμένει αμετάβλητος και ίσος με μ_{k_l} .

9.1.2 Υποθέσεις του Μοντέλου

Εάν εξετάσουμε κάποιο παράδειγμα του E-CDTM (π.χ. σαν και αυτό που παρουσιάζεται παρακάτω, στην παράγραφο 9.1.3) και κατασκευάσουμε το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων (π.χ. Σχήμα 9-2), μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι δεν

υπάρχει τοπική ισορροπία ανάμεσα στις καταστάσεις του συστήματος. Με άλλα λόγια, βλέπουμε ότι το σύστημα περιγράφεται από μη αντιστρέψιμη Μαρκοβιανή αλυσίδα. Συνεπώς, το μοντέλο δεν έχει *λύση μορφής γινομένου*. Επομένως, θα πρέπει να καταφύγουμε σε μια προσεγγιστική λύση. Με την εισαγωγή των παρακάτω υποθέσεων, προσεγγίζουμε το σύστημα με μια αντιστρέψιμη Μαρκοβιανή αλυσίδα η οποία θα οδηγήσει σε αναδρομικό υπολογισμό των πιθανοτήτων των καταστάσεων και τον αποδοτικό προσδιορισμό των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων

1) *Υπόθεση τοπικής ισορροπίας* ανάμεσα σε γειτονικές καταστάσεις:

Για την *ελαστική* κίνηση υποθέτουμε την ακόλουθη εξίσωση τοπικής ισορροπίας :

$$q(j-b_{k_l}) \lambda_k = q(j) Y_{k_l}(j) \mu_{k_l} r(j) \quad (9-1)$$

Για την *προσαρμοζόμενη* κίνηση υποθέτουμε την ακόλουθη εξίσωση τοπικής ισορροπίας :

$$q(j-b_{k_l}) \lambda_k = q(j) Y_{k_l}(j) \mu_{k_l} \quad (9-2)$$

Με $Y_{k_l}(j)$ συμβολίζουμε το μέσο πλήθος των κλήσεων με απαίτηση b_{k_l} στην κατάσταση j .

Για μια ευκολότερη κατανόηση της υπόθεσης της τοπικής ισορροπίας, ας θεωρήσουμε ότι μόνο μια *ελαστική* κατηγορία και μόνο μια *προσαρμοζόμενη* κατηγορία φιλοξενούνται στο σύστημα, χωρίς την ύπαρξη των κατωφλίων . Τότε από την (7-1) έχουμε:

$$\min(C, j)q(j) = a_e b_e q(j-b_e) + \min(1, \frac{C}{j}) a_a b_a q(j-b_a) \quad \text{για } j=0, \dots, T \quad (9-3)$$

Ο δείκτης “ e ” αναφέρεται στην *ελαστική* κατηγορία, ενώ ο δείκτης “ a ” αναφέρεται στην *προσαρμοζόμενη* κατηγορία.

Από την (9-3), όταν $C < j \leq T$, έχουμε:

$$jq(j) = \frac{j}{C} a_e b_e q(j-b_e) + a_a b_a q(j-b_a) \quad (9-4)$$

Από την (9-4), επειδή $j = Y_e(j) b_e + Y_a(j) b_a$ και $r(j) = C/j$ για $j > C$, έχουμε:

$$Y_e(j) b_e q(j) + Y_a(j) b_a q(j) = \frac{1}{r(j)} a_e b_e q(j-b_e) + a_a b_a q(j-b_a) \quad (9-5)$$

Ομοίως, από την (9-3) για $j \leq C$ (δηλαδή για $r(j) = 1$), έχουμε και πάλι την (9-5).

Σύμφωνα με την υπόθεση της τοπικής ισορροπίας, υποθέτουμε ότι ισχύει όχι μόνο η (9-5) αλλά επίσης και η $Y_e(j)b_e q(j) = \frac{l}{r(j)} a_e b_e q(j - b_e)$ και $Y_a(j)b_a q(j) = a_a b_a q(j - b_a)$ (που αντιστοιχούν στις (9-1) και (9-2), αντίστοιχα).

2) *Προσέγγιση μετανάστευσης*: Το πλήθος των κλήσεων που έχουν γίνει δεκτές στο σύστημα με απαίτηση σε εύρος ζώνης διαφορετική από τη μέγιστη είναι αμελητέο μέσα σε έναν χώρο που ονομάζεται *χώρος μετανάστευσης*. Πιο συγκεκριμένα, το πλήθος των κλήσεων με απαίτηση εύρους ζώνης b_{k_l} ($l \neq 0$) στην κατάσταση j είναι αμελητέο όταν $0 < j < J_{k_l} + b_{k_l}$ και $J_{k_{l+1}} + b_{k_l} < j \leq C$.

3) *Προσέγγιση της εμπρός μετανάστευσης*: Το πλήθος των κλήσεων που έχουν γίνει δεκτές στο σύστημα με τη μέγιστη απαίτηση σε εύρος ζώνης είναι αμελητέο μέσα σε έναν χώρο που ονομάζεται *χώρος της εμπρός μετανάστευσης*. Πιο συγκεκριμένα, το πλήθος των κλήσεων με απαίτηση b_{k_0} στην κατάσταση j είναι αμελητέο όταν $J_1 + b_{k_0} < j \leq C$.

Σύμφωνα με την *προσέγγιση μετανάστευσης* και την *προσέγγιση της εμπρός μετανάστευσης* οι παράμετροι Δέλτα ($\delta_{k_0}(j)$ και $\delta_{k_l}(j)$) ορίζονται ως ακολούθως:

$$\delta_{k_0}(j) = \begin{cases} 1, & \text{όταν } 1 \leq j \leq T \text{ και } b_{k_l} = 0 \ (l \neq 0) \\ 1, & \text{όταν } j \leq J_{k_1} + b_{k_0} \text{ και } b_{k_l} > 0 \ (l \neq 0) \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (9-6)$$

$$\delta_{k_l}(j) = \begin{cases} 1, & \text{όταν } (J_{k_{l+1}} + b_{k_l} \geq j > J_{k_l} + b_{k_l}) \text{ και } (b_{k_l} > 0) \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (9-7)$$

Να σημειωθεί ότι όταν $l = S_k$, τότε $J_{k_{l+1}} = T$.

Λόγω της *προσέγγισης μετανάστευσης* και της *προσέγγισης της εμπρός μετανάστευσης*, μέσα στον *χώρο μετανάστευσης* και στον *χώρο της εμπρός μετανάστευσης* οι εξισώσεις τοπικής ισορροπίας δεν έχουν νόημα (επειδή $Y_{k_l}(j) = 0$). Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις (9-1) και (9-2) έξω από τον *χώρο μετανάστευσης* και τον *χώρο της εμπρός μετανάστευσης*, παίρνουμε το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

Για *ελαστικές* κλήσεις που έχουν γίνει δεκτές στο σύστημα με τη μέγιστη απαίτηση σε εύρος ζώνης b_{k_0} :

$$q(j - b_{k_0}) \lambda_k = q(j) Y_{k_0}(j) \mu_{k_0} r(j), \quad j \leq J_{k_1} + b_{k_0} \quad (9-8)$$

Για ελαστικές κλήσεις που έχουν γίνει δεκτές στο σύστημα με εύρος ζώνης b_{k_p} , διαφορετικό από το μέγιστο:

$$q(j-b_{k_l}) \lambda_k = q(j) Y_{k_l}(j) \mu_{k_l} r(j), \quad J_{k_l} + b_{k_l} < j \leq J_{k_{l+1}} + b_{k_l} \quad (9-9)$$

Για προσαρμοζόμενες κλήσεις που έχουν γίνει δεκτές στο σύστημα με τη μέγιστη απαίτηση σε εύρος ζώνης b_{k_0} :

$$q(j-b_{k_0}) \lambda_k = q(j) Y_{k_0}(j) \mu_{k_0}, \quad j \leq J_{k_1} + b_{k_0} \quad (9-10)$$

Για προσαρμοζόμενες κλήσεις που έχουν γίνει δεκτές στο σύστημα με εύρος ζώνης b_{k_p} , διαφορετικό από το μέγιστο:

$$q(j-b_{k_l}) \lambda_k = q(j) Y_{k_l}(j) \mu_{k_p}, \quad J_{k_l} + b_{k_l} < j \leq J_{k_{l+1}} + b_{k_l} \quad (9-11)$$

9.1.3 Ένα Μικρό Παράδειγμα

Στο Σχήμα 9-1 παρουσιάζουμε τις βασικές αρχές του E-CDTM, με τη βοήθεια ενός παραδείγματος που είναι η συνέχεια του παραδείγματος της παραγράφου 1.2.2. Η παράμετρος που εκφράζει τη μέγιστη συνολική απαίτηση σε εύρος ζώνης είναι $T=7$. Στο συγκεκριμένο αυτό παράδειγμα, ακόμα και όταν το εύρος ζώνης της ζεύξης είναι πλήρως κατειλημμένο (δηλαδή όταν το συνολικό κατειλημμένο εύρος ζώνης είναι $s=C=5$), μια νέα κλήση και πάλι μπορεί να εξυπηρετηθεί κάνοντας συμπίεση εύρους ζώνης. Μια νέα κλήση μπλοκάρεται και χάνεται όταν το σύστημα είναι στην κατάσταση $j=T=7$. Η πιθανότητα απώλειας κλήσεων είναι ίδια και για τις δύο κατηγορίες και είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με το CDTM, επειδή $T>C$.

Στο Σχήμα 9-2 δείχνουμε το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων για το παράδειγμα αυτό και μόνο για τη 2^η κατηγορία. Το σύστημα δεν έχει λύση μορφής γινομένου επειδή η αντίστοιχη Μαρκοβιανή αλυσίδα είναι μη αντιστρέψιμη. Όταν το σύστημα είναι στις καταστάσεις $j=1, \dots, 5$ ($j \leq C$), τότε δεν έχουμε συμπίεση εύρους ζώνης. Στις καταστάσεις $j=6$ και 7 ($C < j \leq T$) το εύρος ζώνης των κλήσεων συμπίεζεται κατά τους παράγοντες $r(6)=5/6$ και $r(7)=5/7$, αντίστοιχα. Υπάρχει μόνο μια κατάσταση απώλειας: $j=7$.

Ας θεωρήσουμε το ακόλουθο σενάριο. Σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, όταν το σύστημα είναι στην κατάσταση $j_a=4$, φτάνει μια νέα κλήση της 1^{ης} κατηγορίας. Βλέπουμε ότι ισχύει $j_a > J_{1_1}$, επομένως η νέα κλήση θα απαιτήσει $b_{1_1}=1$. Επειδή $j_a +$

$b_{1_1}=5 \leq C$, η κλήση θα γίνει δεκτή στο σύστημα με παραμέτρους $(b_{1_1}, \mu_{1_1}^{-1})$. Έτσι, το σύστημα θα περάσει σε μια άλλη κατάσταση, στην $j_b=j_a + b_{1_1}=5$ (Σχήμα 9-3). Ύστερα φτάνει μια νέα κλήση της $2^{η}$ κατηγορίας και επειδή $j_b > J_{2_2}$, η κλήση θα ζητήσει $b_{2_2}=1$. Η κλήση αυτή θα γίνει δεκτή (ενώ θα έπρεπε να απορριφθεί στο CDTM) επειδή $j_b + b_{2_2} = 6 \leq T$ και το σύστημα θα περάσει στην κατάσταση $j_c=j_b + b_{2_2}=6$ (Σχήμα 9-4). Όμως το εύρος ζώνης που θα ανατεθεί στην κλήση θα είναι συμπιεσμένο και ίσο με $r(j_c) b_{2_2} = (5/6) * 1$, επειδή $j_c = 6 > C$. Εάν η κλήση αυτή είναι *ελαστική*, τότε ο χρόνος εξυπηρέτησης θα αυξηθεί και θα γίνει $\mu_{2_2}^{-1}/r(j_c)$, ενώ εάν η κλήση είναι *προσαρμοζόμενη* τότε ο χρόνος εξυπηρέτησης θα παραμείνει $\mu_{2_2}^{-1}$. Ταυτόχρονα, το εύρος ζώνης όλων των κλήσεων που βρίσκονται ήδη υπό εξυπηρέτηση, επίσης θα συμπιεστεί κατά τον ίδιο παράγοντα $r(j_c)$ και οι αντίστοιχοι χρόνοι εξυπηρέτησης των *ελαστικών* κλήσεων θα τροποποιηθούν κατάλληλα (ενώ θα παραμείνουν αμετάβλητοι οι χρόνοι των *προσαρμοζόμενων* κλήσεων).

Σχήμα 9-1: Βασικές αρχές του E-CDTM.

Σχήμα 9-2: Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων για τη $2^{η}$ κατηγορία στο E-CDTM.

Σχήμα 9-3: Κατάσταση του συστήματος χωρίς συμπίεση εύρους ζώνης.

Σχήμα 9-4: Κατάσταση του συστήματος με συμπίεση εύρους ζώνης.

Σχήμα 9-5: Τροποποιημένο διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων για τη 2^η κατηγορία στο E-CDTM.

Σύμφωνα με την προσέγγιση μετανάστευσης, όταν το σύστημα είναι σε μια κατάσταση, έστω $j=3$, το πλήθος των κλήσεων της 2^{ης} κατηγορίας με $b_{22}=1$ είναι αμελητέο (δηλαδή μηδέν), επειδή η κατάσταση $j=3$ ανήκει στην χώρο μετανάστευσης των κλήσεων με απαίτηση $b_{22}=1$. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 9-2 από το γεγονός ότι το σύστημα δεν μπορεί να περάσει στην κατάσταση $j=3$ (από την κατάσταση 2) μετά

από άφιξη μιας κλήσης της $2^{\text{ης}}$ κατηγορίας με απαίτηση $b_{2_2}=1$. Εναλλακτικά, αυτό προκύπτει από τον ορισμό του *χώρου μετανάστευσης*: $0 < j < J_{2_2} + b_{2_2} = 4$.

Σύμφωνα με την *προσέγγιση της εμπρός μετανάστευσης*, όταν το σύστημα είναι σε μια κατάσταση, έστω $j=6$, το πλήθος των κλήσεων της $2^{\text{ης}}$ κατηγορίας με $b_{2_0}=3$ είναι αμελητέο, επειδή η κατάσταση $j=6$ ανήκει στον *χώρο της εμπρός μετανάστευσης* της $2^{\text{ης}}$ κατηγορίας. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 9-2 από το γεγονός ότι το σύστημα δεν μπορεί να περάσει στην κατάσταση $j=6$ μετά από άφιξη μιας κλήσης της $2^{\text{ης}}$ κατηγορίας με απαίτηση $b_{2_0}=3$. Εναλλακτικά, αυτό προκύπτει από τον ορισμό του *χώρου της εμπρός μετανάστευσης*: $J_{2_1} + b_{2_0} = 2 + 3 = 5 < j \leq 7$.

Λόγω της *προσέγγισης μετανάστευσης* και της *προσέγγισης της εμπρός μετανάστευσης*, οι αντίστοιχες προς τα πίσω μεταβάσεις πρέπει να εξαιρεθούν όπως φαίνεται στο Σχήμα 9-5 με X πάνω στα βέλη. Για παράδειγμα από την κατάσταση $j=3$, δεν πρέπει να υπάρχει μετάβαση στην κατάσταση $j=2$ λόγω της υπόθεσης ότι στην κατάσταση αυτή δεν υπάρχουν κλήσεις της $2^{\text{ης}}$ κατηγορίας με $b_{2_1}=1$. Με τρόπο αυτό και λόγω της υπόθεσης της τοπικής ισορροπίας προκύπτει μια αντιστρέψιμη Μαρκοβιανή αλυσίδα. Στο Σχήμα 9-6 παρουσιάζουμε ολόκληρους τους *χώρους μετανάστευσης* και τους *χώρους της εμπρός μετανάστευσης* για το συγκεκριμένο αυτό παράδειγμα.

Σχήμα 9-6: Χώροι μετανάστευσης και χώροι της εμπρός μετανάστευσης.

9.1.4 Πιθανότητες Καταστάσεων

Με χρήση των παραμέτρων $\delta_{k_l}(j)$ ($l=0, \dots, S_k$), οι (9-8) και (9-9) συνδυάζονται στην (9-12), για τις ελαστικές κατηγορίες, ενώ οι (9-10) και (9-11) συνδυάζονται στην (9-13), για τις προσαρμοζόμενες κατηγορίες:

$$q(j-b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) \lambda_k = q(j) Y_{k_l}(j) \mu_{k_l} r(j), \quad 0 \leq j \leq T \quad (9-12)$$

$$q(j-b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) \lambda_k = q(j) Y_{k_l}(j) \mu_{k_l}, \quad 0 \leq j \leq T \quad (9-13)$$

Προκειμένου να φτιάξουμε μια εξίσωση τοπικής ισορροπίας για όλες της κατηγορίες (και ελαστικές και προσαρμοζόμενες), συνδυάζουμε τις (9-12) και (9-13), εισάγοντας τον παράγοντα $\Phi_{k_l}(j)$, στην ακόλουθη εξίσωση, η οποία ισχύει και για τις ελαστικές και για τις προσαρμοζόμενες κατηγορίες:

$$q(j-b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) \lambda_k = q(j) Y_{k_l}(j) \mu_{k_l} \Phi_{k_l}(j), \quad 0 \leq j \leq T \quad (9-14)$$

όπου $\Phi_{k_l}(j) = r(j)$ για τις ελαστικές κατηγορίες και $\Phi_{k_l}(j) = 1$ για τις προσαρμοζόμενες κατηγορίες.

Στην (9-14) ο όρος $\mu_{k_l} \Phi_{k_l}(j)$ αντιπροσωπεύει την τροποποίηση του ρυθμού εξυπηρέτησης μ_{k_l} μιας κλήσης της κατηγορίας k με κατώφλι l . Επειδή έχουμε κάνει την υπόθεση ότι το συνολικό προσφερόμενο φορτίο κίνησης για κάθε κατηγορία παραμένει σταθερό, έχουμε:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_k b_k = a_{k_l} b_{k_l} = \frac{\lambda_k}{\mu_{k_l} r(j)} b_{k_l} r(j) = \frac{\lambda_k}{\mu_{k_l} \Phi_{k_l}(j)} b'_{k_l} \quad (\text{ελαστικές}) \\ \alpha_k b_k = a_{k_l} b_{k_l} = \frac{\lambda_k}{\mu_{k_l}} b_{k_l} r(j) = \frac{\lambda_k}{\mu_{k_l} \Phi_{k_l}(j)} b'_{k_l} \quad (\text{προσαρμοζόμενες}) \end{array} \right\} \quad (9-15)$$

όπου b'_{k_l} είναι το τροποποιημένο εύρος ζώνης που ανατίθεται σε κάθε κλήση της κατηγορίας k ανάλογα με το κατώφλι l .

Παρακάτω, θα υπολογίσουμε τις πιθανότητες καταστάσεων, $q(j)$, για $0 \leq j \leq T$ (αλλού $q(j)=0$).

Όταν $j \leq C$, τότε το συνολικό κατειλημμένο εύρος ζώνης s είναι ίσο με την κατάσταση του συστήματος, j :

$$j = s = \sum_{k \in K_e} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b'_{k_l} + \sum_{k \in K_a} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b'_{k_l} \quad (9-16)$$

Η (9-16) εκφράζει το γεγονός ότι το συνολικό κατειλημμένο εύρος ζώνης είναι το άθροισμα των b'_{k_l} . Όμως, λόγω της (9-15), το b'_{k_l} πρέπει να είναι ίσο με: $b'_{k_l} = b_{k_l} \Phi_{k_l}(j)$ (επειδή $r(j) = 1$, για $j \leq C$). Επομένως:

$$j = s = \sum_{k \in K_e} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b_{k_l} \Phi_{k_l}(j) + \sum_{k \in K_a} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b_{k_l} \Phi_{k_l}(j) \quad (9-17)$$

Όταν $C < j \leq T$, τότε το συνολικό κατειλημμένο εύρος ζώνης s είναι ίσο με την χωρητικότητα του συστήματος C :

$$C = s = \sum_{k \in K_e} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b'_{k_l} + \sum_{k \in K_a} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b'_{k_l} \quad (9-18)$$

όπου, λόγω της (9-15), έχουμε $b'_{k_l} = b_{k_l} \Phi_{k_l}(j)$ για ελαστικές κατηγορίες, και $b'_{k_l} = r(j) b_{k_l} \Phi_{k_l}(j)$ για προσαρμοζόμενες κατηγορίες, δηλαδή:

$$C = s = \sum_{k \in K_e} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b_{k_l} \Phi_{k_l}(j) + r(j) \sum_{k \in K_a} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b_{k_l} \Phi_{k_l}(j) \quad (9-19)$$

Παρακάτω, θα δείξουμε ότι ο αναδρομικός τύπος της (9-20) υπολογίζει τις πιθανότητες καταστάσεων $q(j)$, $0 \leq j \leq T$:

$$\begin{aligned} \min(C, j) q(j) = & \sum_{k \in K_e} \sum_{l=0}^{S_k} \alpha_{k_l} b_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l}) \\ & + r(j) \sum_{k \in K_a} \sum_{l=0}^{S_k} \alpha_{k_l} b_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l}) \end{aligned} \quad (9-20)$$

όπου $q(j)=0$ για $j < 0$ και $\sum_{j=0}^T q(j) = 1$.

Απόδειξη: Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της (9-14) με b_{k_l} και αντικαθιστώντας $a_{k_l} = \lambda_k / \mu_{k_l}$, έχουμε:

$$q(j - b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) a_{k_l} b_{k_l} = q(j) Y_{k_l}(j) b_{k_l} \Phi_{k_l}(j), \quad 0 \leq j \leq T \quad (9-21)$$

Αθροίζοντας την (9-21) για κάθε κατηγορία $k \in K_e$, προκύπτει:

$$\sum_{k \in K_e} \sum_{l=0}^{S_k} q(j-b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) a_{k_l} b_{k_l} = q(j) \sum_{k \in K_e} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b_{k_l} \Phi_{k_l}(j) \quad (9-22)$$

Ομοίως, αθροίζοντας την (9-21) για κάθε κατηγορία $k \in K_a$, προκύπτει:

$$\sum_{k \in K_a} \sum_{l=0}^{S_k} q(j-b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) a_{k_l} b_{k_l} = q(j) \sum_{k \in K_a} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b_{k_l} \Phi_{k_l}(j) \quad (9-23)$$

Για τις καταστάσεις $0 \leq j \leq C$ προσθέτουμε (9-22) και (9-23) για να προκύψει μια κοινή εξίσωση για τις ελαστικές και τις προσαρμοζόμενες κατηγορίες:

$$\sum_{k \in K_e \cup K_a} \sum_{l=0}^{S_k} q(j-b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) a_{k_l} b_{k_l} = q(j) \sum_{k \in K_e \cup K_a} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b_{k_l} \Phi_{k_l}(j) \quad (9-24)$$

Λόγω της (9-17), η (9-24) γίνεται:

$$q(j)j = \sum_{k \in K_e \cup K_a} \sum_{l=0}^{S_k} q(j-b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) a_{k_l} b_{k_l} \quad (9-25)$$

Για $C < j \leq T$, αρχικά πολλαπλασιάζουμε την (9-23) με C/j και την προσθέτουμε στην (9-22) για να προκύψει μια κοινή εξίσωση για τις ελαστικές και τις προσαρμοζόμενες κατηγορίες:

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K_e} \sum_{l=0}^{S_k} q(j-b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) a_{k_l} b_{k_l} + \frac{C}{j} \sum_{k \in K_a} \sum_{l=0}^{S_k} q(j-b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) a_{k_l} b_{k_l} = \\ = q(j) \sum_{k \in K_e} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b_{k_l} \Phi_{k_l}(j) + \frac{C}{j} q(j) \sum_{k \in K_a} \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) b_{k_l} \Phi_{k_l}(j) \end{aligned} \quad (9-26)$$

Έπειτα, αντικαθιστώντας την (9-19) στην (9-26) (και επειδή $r(j)=C/j$ όταν $j>C$), αφαιρούμε τα $Y_{k_l}(j)$ και $\Phi_{k_l}(j)$ και παίρνουμε:

$$q(j)C = \sum_{k \in K_e} \sum_{l=0}^{S_k} q(j-b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) a_{k_l} b_{k_l} + \frac{C}{j} \sum_{k \in K_a} \sum_{l=0}^{S_k} q(j-b_{k_l}) \delta_{k_l}(j) a_{k_l} b_{k_l} \quad (9-27)$$

Τέλος, για $0 \leq j \leq T$ από τις (9-25) και (9-27) προκύπτει η (9-20) – τέλος της απόδειξης.

9.1.5 Μετρικές Απόδοσης

Η πιθανότητα απώλειας κλήσεων της κατηγορίας k υπολογίζεται από:

$$B_k = \sum_{j=T-b_k S_k + 1}^T q(j) \quad (9-28)$$

Η χρησιμοποίηση της ζεύξης υπολογίζεται από:

$$U = \sum_{j=1}^C j q(j) + \sum_{j=C+1}^T C q(j) \quad (9-29)$$

Η μέση διεκπεραιωτική ικανότητα της κατηγορίας k (ελαστικής ή προσαρμοζόμενης) ορίζεται ως το μέσο εύρος ζώνης που καταλαμβάνεται από τις κλήσεις της κατηγορίας k και υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\Theta_k = \frac{\sum_{j=0}^T \sum_{l=0}^{S_k} r(j) b_{k_l} Y_{k_l}(j) \delta_{k_l}(j) q(j)}{\sum_{j=0}^T \sum_{l=0}^{S_k} Y_{k_l}(j) \delta_{k_l}(j) q(j)} \quad (9-30)$$

Από την (9-30) και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις τοπικής ισορροπίας (9-12) και (9-13) μπορούμε να υπολογίσουμε μέση διεκπεραιωτική ικανότητα για μια ελαστική και μια προσαρμοζόμενη κατηγορία k από τις (9-31) και (9-32), αντίστοιχα:

$$\Theta_k = \frac{\sum_{j=0}^T \sum_{l=0}^{S_k} a_{k_l} b_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l})}{\sum_{j=0}^T \sum_{l=0}^{S_k} a_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l})} \quad (9-31)$$

$$\Theta_k = \frac{\sum_{j=0}^T \sum_{l=0}^{S_k} r(j) a_{k_l} b_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l})}{\sum_{j=0}^T \sum_{l=0}^{S_k} a_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l})} \quad (9-32)$$

9.2. E-CDTM/BR (E-CDTM/Bandwidth Reservation): Το μοντέλο κατωφλίων, για τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες, με σύστημα δέσμευσης εύρους ζώνης.

Σύμφωνα με την πολιτική δέσμευσης εύρους ζώνης (bandwidth reservation ή trunk reservation) [35], ένα ποσοστό του διαθέσιμου εύρους ζώνης του συστήματος (που ονομάζεται παράμετρος δέσμευσης εύρους ζώνης), δεσμεύεται για να ευνοήσει τις κατηγορίες κίνησης με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Είναι γνωστό ότι κατά την εφαρμογή της πολιτικής πλήρους διάθεσης εύρους ζώνης, οι κατηγορίες κίνησης με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης λαμβάνουν χειρότερη ποιότητα εξυπηρέτησης σε επίπεδο κλήσεων σε σύγκριση με τις κατηγορίες κίνησης με μικρότερες απαιτήσεις. Από την άλλη, σε συστήματα με συμπίεση/διαστολή εύρους ζώνης, όπως είναι η περίπτωση του E-CDTM (με πολιτική πλήρους διάθεσης εύρους ζώνης), η συμπίεση/διαστολή τους εύρους ζώνης των κλήσεων πρέπει να είναι ίδια για όλες τις κατηγορίες κίνησης, προκειμένου να μπορεί να εξαχθεί ένας αποδοτικός, αναδρομικός τύπος για τον υπολογισμό των *πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων*. Όμως, κατά την εφαρμογή της πολιτικής δέσμευσης εύρους ζώνης, ο περιορισμός αυτός μπορεί να αρθεί και σε διαφορετικές κατηγορίες μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικοί ρυθμοί συμπίεσης/διαστολής εύρους ζώνης. Ως αποτέλεσμα θα έχουμε προσεγγιστικό, αλλά αποδοτικό και αναδρομικό τύπο τον υπολογισμό των *πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων*.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε κατηγορία κίνησης k έχει μια παράμετρος, t_k , η οποία υποδηλώνει το πλήθος των μονάδων εύρους ζώνης, που θα πρέπει να παραμένουν διαθέσιμες στο σύστημα, μετά την αποδοχή μιας νέας κλήσης κατηγορίας k . Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι διαφορετικές κατηγορίες βλέπουν διαφορετικές χωρητικότητες $C_k = C - t_k$, του συστήματος. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι εάν η ελάχιστη απαίτηση της κλήσης είναι b_k^{min} , τότε η κλήση γίνεται δεκτή στο σύστημα αν και μόνο αν $j + b_k^{min} \leq C - t_k$. Στην περίπτωση του E-CDTM με εφαρμογή της πολιτικής δέσμευσης εύρους ζώνης (E-CDTM/BR), η παραπάνω συνθήκη πρέπει να σχετίζεται με την εικονική χωρητικότητα, T , και όχι με την πραγματική χωρητικότητα, C . Αυτό συμβαίνει επειδή η αποδοχή των κλήσεων εξαρτάται μόνο από την T , ενώ η μέγιστη συμπίεση/διαστολή του εύρους ζώνης εξαρτάται από C και T . Επομένως, για να αναθέσουμε διαφορετικούς μέγιστους ρυθμούς συμπίεσης/διαστολής σε διαφορετικές κατηγορίες, μπορούμε να διατηρήσουμε την

πραγματική χωρητικότητα C ίδια για όλες της κατηγορίες και να ορίσουμε την εικονική χωρητικότητα, T_k , ανά κατηγορία ως εξής: $T_k = T - t_k$. Για παράδειγμα, αν το σύστημα φιλοξενεί μια σταθερή κατηγορία η οποία δεν επιτρέπει συμπίεση/διαστολή εύρους ζώνης, τότε για την κατηγορία αυτή πρέπει να επιλέξουμε $t_k = T - C$.

Ο παρακάτω αναδρομικός τύπος υπολογίζει τις πιθανότητες καταστάσεων, $q(j)$, $0 \leq j \leq T$, στο E-CDTM/BR:

$$\min(C, j)q(j) = \sum_{k \in K_e} \sum_{l=0}^{S_k} a_{k_l} D_{k_l}(j) \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l}) + r(j) \sum_{k \in K_a} \sum_{l=0}^{S_k} a_{k_l} D_{k_l}(j) \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l}) \quad (9-33)$$

$$\text{Όπου } q(j)=0 \text{ for } j < 0, \sum_{j=0}^T q(j) = 1 \text{ και } D_{k_l}(j) = \begin{cases} b_{k_l}, & j \leq T - t_k \\ 0, & j > T - t_k \end{cases}$$

Ο ρόλος των παραμέτρων $D_{k_l}(j)$ είναι να μην επιτρέπει το πέρασμα του συστήματος σε καταστάσεις υψηλότερες $j = T - t_k$ μετά από αφίξεις κλήσεων κατηγορίας k . Με τον τρόπο αυτό ορίζεται ο χώρος δέσμευσης (reservation space) της κατηγορίας k .

Ο τύπος (9-33) προκύπτει με βάση τη μέθοδο του Roberts [35] η οποία υποθέτει ότι το πλήθος των κλήσεων της κατηγορίας k μέσα στον χώρο δέσμευσης είναι αμελητέο. Όταν $t_k > 0$, ο χώρος δέσμευσης της κατηγορίας k , αποτελείται από τις καταστάσεις $j = T - t_k + 1, \dots, T$. Με βάση την υπόθεση αυτή, το σύστημα περιγράφεται από μια αντιστρέψιμη Μαρκοβιανή αλυσίδα. Επιπροσθέτως, υποθέτοντας τοπική ισορροπία, η Μαρκοβιανή αυτή αλυσίδα επιλύεται και προκύπτει ο αναδρομικός τύπος (9-33).

Οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων της κατηγορίας k υπολογίζονται από:

$$B_k = \sum_{j=T-b_{S_k}^{S_k}-t_k+1}^T q(j) \quad (9-34)$$

Για παράδειγμα, όταν δύο ελαστικές κατηγορίες κίνησης ($k=1, 2$) φιλοξενούνται σε ένα σύστημα E-CDTM/BR με $b_1^{min} = 1$ και $b_2^{min} = 2$ και επιθυμούμε την εξισορρόπηση των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων, αυτό μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας $t_1 = 1$ και $t_2 = 0$ (επειδή: $T - b_1^{min} = T - b_2^{min}$, δηλαδή, $T - t_1 - b_1^{min} = T - t_2 - b_2^{min} \Rightarrow t_1 + b_1^{min} = t_2 + b_2^{min}$), και την παράμετρο συμπίεσης $r_k^{min} = C/T_k$ για $k=1, 2$.

9.3. Προσδιορισμός των Παραμέτρων Δέλτα στο E-CDTM

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η μέθοδος για τον προσδιορισμό των παραμέτρων Δέλτα του E-CDTM, που έχουν οριστεί στην 9.1.2.

Θεωρούμε ότι η διαφορά ανάμεσα στα γειτονικά κατώφλια είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη απαίτηση σε εύρος ζώνης, δηλαδή $J_{k_1} > b_{k_0}$ και $J_{k_l} - J_{k_{l-1}} > b_{k_l}$ ($l=1, \dots, S_k$). Η υπόθεση αυτή έχει γίνει προκειμένου να απλοποιηθεί η παρουσίαση της μεθόδου και δεν επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Αρχικά, για να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κοινές εξισώσεις για τις ελαστικές και τις προσαρμοζόμενες κατηγορίες κίνησης, εισάγουμε τις παραμέτρους $e(k,j)$:

$$e(k,j) = \begin{cases} 1, & \text{if } k \in K_e \\ r(j), & \text{if } k \in K_a \end{cases}, \text{ με } k=1, \dots, K \text{ και } j=0, \dots, T \quad (9-35)$$

Με προσθήκη των $e(k,j)b_{k_l}$ στις εξισώσεις τοπικής ισορροπίας (9-1) και (9-2), προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις, που ισχύουν και για τις ελαστικές και τις προσαρμοζόμενες κατηγορίες κίνησης.

$$e(k,j)q(j-b_{k_0}) a_{k_0} b_{k_0} = q(j) Y_{k_0}(j)r(j) b_{k_0}, \quad b_{k_0} \leq j \leq J_{k_1} + b_{k_0} \quad (9-36-0)$$

$$e(k,j)q(j-b_{k_1}) a_{k_1} b_{k_1} = q(j) Y_{k_1}(j) r(j) b_{k_1}, \quad J_{k_1} + b_{k_1} \leq j \leq J_{k_2} + b_{k_1} \quad (9-36-1)$$

$$e(k,j)q(j-b_{k_2}) a_{k_2} b_{k_2} = q(j) Y_{k_2}(j) r(j) b_{k_2}, \quad J_{k_2} + b_{k_2} \leq j \leq J_{k_3} + b_{k_2} \quad (9-36-2)$$

•

•

•

$$e(k,j)q(j-b_{k_l}) a_{k_l} b_{k_l} = q(j) Y_{k_l}(j) r(j) b_{k_l}, \quad J_{k_l} + b_{k_l} \leq j \leq J_{k_{l+1}} + b_{k_l} \quad (9-36-l)$$

•

•

•

$$e(k,j)q(j-b_{k_{S_k}}) \quad a_{k_{S_k}} \quad b_{k_{S_k}} = \quad q(j) \quad Y_{k_{S_k}}(j) \quad r(j) \quad b_{k_{S_k}}, \quad J_{k_{S_k}} + b_{k_{S_k}} < j \leq T$$

(9-36- S_k)

Να σημειωθεί ότι τα δεξιά μέλη των παραπάνω εξισώσεων δεν περιέχουν την παράμετρο $e(k,j)$. Τα αριστερά μέλη των εξισώσεων που αντιστοιχούν στις *προσαρμοζόμενες* κατηγορίες κίνησης, λόγω της παρουσίας της παραμέτρου $e(k,j)$, πολλαπλασιάζονται με $r(j)$, σε αντίθεση με τα αριστερά μέλη των εξισώσεων που αντιστοιχούν στις *ελαστικές* κατηγορίες, που πολλαπλασιάζονται με 1. Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους Δέλτα. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι Δέλτα της (9-6) για τις κλήσεις με απαίτηση εύρους ζώνης b_{k_0} προκύπτουν από την (9-36-0) και από το γεγονός ότι για τις κλήσεις που δεν έχουν εναλλακτικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης (δηλαδή $b_{k_l}=0$ ($l \neq 0$)) ο χώρος της εμπρός μετανάστευσης είναι κενός. Ομοίως, οι παράμετροι Δέλτα της (9-7) για κλήσεις με απαιτήσεις b_{k_l} ($l \neq 0$) προκύπτουν από τις (9-36- l).

Σχήμα 9-7: Περιοχές κλήσεων με διαφορετικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.

Στο Σχήμα 9-7 παρουσιάζονται διαφορετικές περιοχές του χώρου κατάστασης $[0, \dots, T]$ σύμφωνα με τις (9-36-0), (9-36-1) και (6-36-2). Παρατηρούμε ότι οι περιοχές αυτές επικαλύπτονται για κάποια j (σκούρες περιοχές στο Σχήμα 14). Όπως, επειδή ο στόχος μας είναι να συνδυάσουμε τις (9-36-0) - (9-36- S_k) σε μια εξίσωση, λαμβάνουμε το παρακάτω σύστημα εξισώσεων για τις μη-επικαλυπτόμενες περιοχές του χώρου κατάστασης $[0, \dots, T]$:

$$e(k,j)q(j-b_{k_0}) \quad a_{k_0} \quad b_{k_0} = \quad q(j) \quad Y_{k_0}(j) \quad r(j) \quad b_{k_0}, \quad b_{k_0} \leq j \leq J_{k_1} + b_{k_1}$$

(9-37-1a)

$$e(k,j)q(j-b_{k_0}) a_{k_0} + e(k,j)q(j-b_{k_1}) a_{k_1} = q(j) (Y_{k_0}(j) r(j) b_{k_0} + Y_{k_1}(j) r(j) b_{k_1}),$$

$$J_{k_1}+b_{k_1} < j \leq J_{k_1}+b_{k_0} \quad (9-37-1b)$$

$$e(k,j)q(j-b_{k_1}) a_{k_1} = q(j) Y_{k_1}(j) r(j) b_{k_1}, \quad J_{k_1}+b_{k_0} < j \leq J_{k_2}+b_{k_2}$$

$$(9-37-2a)$$

$$e(k,j)q(j-b_{k_1}) a_{k_1} + e(k,j)q(j-b_{k_2}) a_{k_2} = q(j) (Y_{k_1}(j) r(j) b_{k_1} + Y_{k_2}(j) r(j) b_{k_2}),$$

$$J_{k_2}+b_{k_2} < j \leq J_{k_2}+b_{k_1} \quad (9-37-2b)$$

•
•
•

$$e(k,j)q(j-b_{k_l}) a_{k_l} = q(j) Y_{k_l}(j) r(j) b_{k_l}, \quad J_{k_l}+b_{k_l} < j \leq J_{k_{l+1}}+b_{k_{l+1}}$$

$$(9-37-1a)$$

$$e(k,j)q(j-b_{k_l}) a_{k_l} + e(k,j)q(j-b_{k_{l+1}}) a_{k_{l+1}} = q(j) (Y_{k_l}(j) r(j) b_{k_l} + Y_{k_{l+1}}(j) r(j) b_{k_{l+1}}),$$

$$J_{k_{l+1}}+b_{k_{l+1}} < j \leq J_{k_{l+1}}+b_{k_l} \quad (9-37-1b)$$

•
•
•

$$e(k,j)q(j-b_{k_{S_k}}) a_{k_{S_k}} = q(j) Y_{k_{S_k}}(j) r(j) b_{k_{S_k}}, \quad J_{k_{S_k}}+b_{k_{S_k-1}} < j \leq T$$

$$(9-37-S_k a)$$

Παρατηρείστε ότι για $J_{k_{l+1}}+b_{k_{l+1}} < j \leq J_{k_{l+1}}+b_{k_l}$ ισχύει:

$$\sum_{k \in K_e \cup K_a} Y_{k_l}(j) r(j) b_{k_l} + Y_{k_{l+1}}(j) r(j) b_{k_{l+1}} \approx \min(C, j) \quad (9-38)$$

Αυτό είναι μια άμεση συνέπεια των προσεγγίσεων της μετανάστευσης και της εμπρός μετανάστευσης, επειδή στην περιοχή $J_{k_{l+1}}+b_{k_{l+1}} < j \leq J_{k_{l+1}}+b_{k_l}$ υπάρχουν μόνο οι πληθυσμοί των κλήσεων με απαιτήσεις b_{k_l} και $b_{k_{l+1}}$.

Έτσι, με χρήση των παραμέτρων Δέλτα από τις (9-6) και (9-7), και με τη βοήθεια της (9-38) μπορούμε να συνδυάσουμε τις (9-37-1a) - (9-37-S_ka) σε μια εξίσωση:

$$\sum_{k \in K_e \cup K_a} \sum_{l=0}^{S_k} e(k, j) \alpha_{k_l} b_{k_l} \delta_{k_l}(j) q(j - b_{k_l}) = q(j) \min(C, j) \quad (9-39)$$

Τελικά, αντικαθιστώντας την (9-35) στην (9-39) προκύπτει η (9-20).

9.4. Αριθμητικά Αποτελέσματα για το E-CDTM και το E-CDTM/BR

Παρακάτω παρουσιάζουμε αριθμητικά αποτελέσματα με τη βοήθεια των οποίων ελέγχουμε την ακρίβεια του E-CDTM μέσω της σύγκρισης των αναλυτικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι μέσες τιμές από 8 δοκιμές με διάστημα εμπιστοσύνης 95%.

Επίσης συγκρίνουμε το E-CDTM με τα E-EMLM και CDTM όσον αφορά τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων, τη χρησιμοποίηση της ζεύξης και τη μέση διεκπεραιωτική ικανότητα ανά κατηγορία κίνησης. Για να γίνει σύγκριση του E-CDTM με το E-EMLM θεωρούμε τρεις περιπτώσεις. Στην 1^η περίπτωση (παράδειγμα 1) επιλέγουμε μια κοινή μέγιστη συνολική απαίτηση εύρους ζώνης, T , για τα E-CDTM και E-EMLM. Στην 2^η περίπτωση (παράδειγμα 2), επιλέγουμε διαφορετικά σύνολα κατωφλίων για τις ίδιες κατηγορίες του E-CDTM (για να ελέγξουμε την επίδραση των κατωφλίων στην απόδοση του E-CDTM), και επιτρέπουμε μόνο στο E-EMLM να αυξάνει την παράμετρο T . Στην 3^η περίπτωση (παράδειγμα 3) διατηρούμε σταθερή την παράμετρο T του E-CDTM, ενώ η αντίστοιχη παράμετρος T του E-EMLM επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε τα δύο μοντέλα να έχουν την ίδια μέση διεκπεραιωτική ικανότητα. Τα αποτελέσματα για τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων του E-CDTM/BR παρουσιάζονται στο παράδειγμα 1, για διαφορετικές τιμές του T .

9.4.1 1^ο Παράδειγμα

Θεωρούμε μια ζεύξη με χωρητικότητα $C=80$ μονάδων εύρους ζώνης και μέγιστη συνολική απαίτηση εύρους ζώνης $T=80, 85$ και 90 μονάδων εύρους ζώνης. (δηλαδή $T=C, C+5$ και $C+10$). Έχουμε δύο κατηγορίες κίνησης. Η 1^η κατηγορία είναι ελαστική, ενώ η 2^η είναι προσαρμοζόμενη. Η μέγιστη απαίτησή τους σε εύρος ζώνης

είναι 24 και 8 μονάδες εύρους ζώνης., ενώ το προσφερόμενο φορτίο κίνησης είναι $\alpha_1=0.125 \text{ erl}$ και $\alpha_2=0.25 \text{ erl}$, για την 1^η και την 2^η κατηγορία, αντίστοιχα.

Στο E-CDTM, οι κλήσεις της *ελαστικής* κατηγορίας έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης από 24 σε 16 σε βήματα των 4 μονάδων εύρους ζώνης., ενώ οι κλήσεις της *προσαρμοζόμενης* κατηγορίας έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης από 8 σε 6 μονάδα προς μονάδα. Τα κατώφλια της 1^{ης} κατηγορίας είναι: $J_{10}=40$ και $J_{11}=55$, ενώ της 2^{ης} κατηγορίας είναι: $J_{20}=35$ και $J_{21}=45$. Πιο συγκεκριμένα, όταν η κατάσταση του συστήματος j , είναι μικρότερη ή ίση από 40 μια κλήση της 1^{ης} κατηγορίας γίνεται δεκτή στο σύστημα με τη μέγιστη απαίτηση 24 μονάδων εύρους ζώνης. Αν $40 < j \leq 55$ τότε η κλήση γίνεται δεκτή στο σύστημα με 20 μονάδες εύρους ζώνης, ενώ αν $55 < j \leq 80-16=64$, τότε αυτή γίνεται δεκτή με 16 μονάδες εύρους ζώνης. Μια κλήση της 2^{ης} κατηγορίας γίνεται δεκτή στο σύστημα με 8 μονάδες εύρους ζώνης όταν $j \leq 35$. Αν $35 < j \leq 45$, τότε αυτή γίνεται δεκτή με 7 μονάδες εύρους ζώνης, ενώ αν $45 < j \leq 80-6=74$, τότε η κλήση γίνεται δεκτή στο σύστημα με 6 μονάδες εύρους ζώνης. Όταν $C < j \leq T$, η νέα κλήση της 1^{ης} κατηγορίας καταλαμβάνει $16j/C$ μονάδες εύρους ζώνης, ενώ μια νέα κλήση της 2^{ης} κατηγορίας καταλαμβάνει $8j/C$ μονάδες εύρους ζώνης. Στις καταστάσεις αυτές υπάρχει περίπτωση να υπάρχουν ήδη στο σύστημα κάποιες άλλες κλήσεις τις 1^{ης} κατηγορίας, με εύρος ζώνης 24 ή 20 μονάδων εύρους ζώνης το οποίο τους είχε ανατεθεί όταν το σύστημα ήταν σε κάποια κατάσταση $j < C$. Αυτές οι κλήσεις τώρα (μετά την αποδοχή της νέας κλήσης) θα καταλαμβάνουν $24j/C$ ή $20j/C$, αντίστοιχα.

Στο E-EMLM, αν $j \leq C$, οι κλήσεις και των δύο κατηγοριών λαμβάνουν το μέγιστο εύρος ζώνης, ενώ αν $C < j \leq T$, αυτές λαμβάνουν $24j/C$ και $8j/C$ μονάδες εύρους ζώνης, για την 1^η και την 2^η κατηγορία, αντίστοιχα.

Στα Σχήματα 9-8, 9-9 και 9-10 παρουσιάζουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα των *πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων* των δύο μοντέλων συναρτήσει του *προσφερόμενου φορτίου κίνησης*, για $T=C$, $T=C+5$ και $T=C+10$, αντίστοιχα. Πρέπει να αναφέρουμε ότι όταν $T=C$ (Σχήμα 9-8), το E-CDTM δίνει τα ίδια αποτελέσματα με το CDTM, ενώ το E-EMLM δίνει τα ίδια αποτελέσματα με το EMLM. Παρουσιάζουμε επίσης τα αποτελέσματα της *προσομοίωσης* για τις *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* και την *χρησιμοποίηση της ζεύξης* για το E-CDTM, για να ελεγχθεί η ακρίβεια του μοντέλου. Θεωρούμε επτά σημεία φορτίου κίνησης (1,2,...,7) στον οριζόντιο άξονα των

σχημάτων, αυξάνοντας ταυτόχρονα a_1 και a_2 κατά 0.25 erl και 0.5 erl, αντίστοιχα, έτσι ώστε το υψηλότερο φορτίο κίνησης (σημείο 7) είναι $a_1=0.875$ erl για την 1^η κατηγορία και $a_2=1.75$ erl για την 2^η κατηγορία (δύο πρώτες στήλες του Πίνακα 9-1). Στους Πίνακες 9-1, 9-2 και 9-3 δείχνουμε την *χρησιμοποίηση της ζεύξης* των δύο μοντέλων για $T=C$, $T=C+5$ και $T=C+10$, αντίστοιχα. Όλα τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ακρίβεια των μοντέλων είναι πολύ ικανοποιητική. Στα Σχήματα 9-7, 9-8 και 9-9 παρατηρούμε ότι το E-CDTM παρουσιάζει χαμηλότερες *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* σε σύγκριση με το E-EMLM και για τις δύο κατηγορίες. Όσον αφορά το Σχήμα 9-8, ο βασικός της σκοπός είναι να είναι το σημείο αναφοράς για σύγκριση των σχημάτων 9-9 και 9-10. Παρατηρούμε επίσης στους Πίνακες 9-1, 9-2 και 9-3 ότι το E-CDTM παρουσιάζει υψηλότερη *χρησιμοποίηση της ζεύξης* σε σύγκριση με το E-EMLM.

Στο Σχήμα 9-11 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων για το παράδειγμα αυτό, μετά από την εφαρμογή της πολιτικής δέσμευσης εύρους ζώνης. Οι παράμετροι δέσμευσης εύρους ζώνης είναι $t_1=0$ και $t_2=10$, προκειμένου να εξισορροπήσουμε τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων των δύο κατηγοριών. Παρατηρούμε ότι τα αναλυτικά αποτελέσματα είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε όλες τις περιπτώσεις ($T=C$, $C+5$, $C+10$).

Στον Πίνακα 9-4 παρουσιάζουμε τη μέση *διεκπεραιωτική ικανότητα* ανά κατηγορία για τα δύο μοντέλα (E-CDTM και E-EMLM), για τις περιπτώσεις $T=C+5$ και $T=C+10$. Όπως και ήταν αναμενόμενο, η μέση *διεκπεραιωτική ικανότητα* ανά κατηγορία μειώνεται με την αύξηση του *προσφερόμενου φορτίου κίνησης*. Αυτό ισχύει και στα δύο μοντέλα. Η μέση *διεκπεραιωτική ικανότητα* ανά κατηγορία μειώνεται και άλλο με την αύξηση του T . Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη συμπίεση του εύρους ζώνης των κλήσεων που εξυπηρετούνται. Αυτό επίσης ισχύει και στα δύο μοντέλα. Όμως το E-EMLM επιτυγχάνει πολύ υψηλότερη η μέση *διεκπεραιωτική ικανότητα* ανά κατηγορία σε σύγκριση με το E-CDTM. Αυτό σημαίνει ότι στο E-CDTM εξυπηρετούνται περισσότερες κλήσεις (*χαμηλότερες πιθανότητες απώλειας κλήσεων* και καλύτερη *χρησιμοποίηση της ζεύξης*), αλλά με πιο μικρό εύρος ζώνης (κατά μέσον όρο), σε σύγκριση με το E-EMLM.

Σχήμα 9-8: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το 1^ο παράδειγμα ($T=C$).

Σχήμα 9-9: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το 1^ο παράδειγμα ($T=C+5$).

Σχήμα 9-10: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το 1^ο παράδειγμα ($T=C+10$).

Σχήμα 9-11: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου με πολιτική δέσμευσης εύρους ζώνης ($T=C, C+5, C+10$).

Πίνακας 9-1: Χρησιμοποίηση της ζεύξης, U , συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το 1^ο παράδειγμα ($T=C$)

	Φορτίο (a_1, a_2) erl	E-CDTM		E-EMLM
		U (%) ανάλυση	U (%) προσομοίωση	U % ανάλυση
1	(0.125, 0.25)	5.00	5.00	4.99
2	(0.25, 0.5)	9.98	9.99	9.97
3	(0.375, 0.75)	14.92	14.93	14.86
4	(0.5, 1.0)	19.74	19.76	19.59
5	(0.625, 1.25)	24.38	24.42	24.08
6	(0.75, 1.5)	28.78	28.84	28.28
7	(0.875, 1.75)	32.89	32.99	32.16

Πίνακας 9-2: Χρησιμοποίηση της ζεύξης, U , συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το 1^ο παράδειγμα ($T=C+5$)

	Φορτίο (a_1, a_2) erl	E-CDTM		E-EMLM
		U (%) ανάλυση	U (%) προσομοίωση	U (%) ανάλυση
1	(0.125, 0.25)	5.00	5.00	4.99
2	(0.25, 0.5)	9.99	9.99	9.97
3	(0.375, 0.75)	14.95	14.96	14.86
4	(0.5, 1.0)	19.83	19.86	19.59
5	(0.625, 1.25)	24.56	24.63	24.08
6	(0.75, 1.5)	29.08	29.21	28.28
7	(0.875, 1.75)	33.35	33.53	32.16

Πίνακας 9-3: Χρησιμοποίηση της ζεύξης, U , συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το 1^ο παράδειγμα ($T=C+10$)

	Φορτίο (a_1, a_2) erl	E-CDTM		E-EMLM
		U (%) ανάλυση	U (%) προσομοίωση	U (%) ανάλυση
1	(0.125, 0.25)	5.00	5.00	5.00
2	(0.25, 0.5)	10.00	9.99	9.98
3	(0.375, 0.75)	14.98	14.98	14.92
4	(0.5, 1.0)	19.91	19.94	19.76
5	(0.625, 1.25)	24.76	24.78	24.42
6	(0.75, 1.5)	29.43	29.50	28.86
7	(0.875, 1.75)	33.92	34.04	33.02

Πίνακας 9-4: Διεκπεραιωτική ικανότητα, θ_k , συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το 1^ο παράδειγμα (αναλυτικά αποτελέσματα).

	Φορτίο (a_1, a_2) erl	$T=C+5$		$T=C+10$	
		E-EMLM (θ_1, θ_2)	E-CDTM (θ_1, θ_2)	E-EMLM (θ_1, θ_2)	E-CDTM (θ_1, θ_2)
1	(0.125, 0.25)	(24.00, 8.00)	(23.95, 7.98)	(24.00, 8.00)	(23.95, 7.98)
2	(0.25, 0.5)	(24.00, 8.00)	(23.79, 7.91)	(23.99, 8.00)	(23.78, 7.90)
3	(0.375, 0.75)	(24.00, 8.00)	(23.52, 7.79)	(23.98, 8.00)	(23.48, 7.78)
4	(0.5, 1.0)	(23.99, 8.00)	(23.16, 7.64)	(23.97, 7.99)	(23.08, 7.61)
5	(0.625, 1.25)	(23.99, 8.00)	(22.75, 7.47)	(23.94, 7.99)	(22.61, 7.40)
6	(0.75, 1.5)	(23.98, 8.00)	(22.32, 7.29)	(23.91, 7.98)	(22.11, 7.18)
7	(0.875, 1.75)	(23.98, 8.00)	(21.89, 7.11)	(23.88, 7.97)	(21.60, 6.93)

9.4.2 2^ο Παράδειγμα

Για να ελέγξουμε την επίδραση των κατωφλίων στην απόδοση του E-CDTM και για να την συγκρίνουμε με την απόδοση του E-EMLM, θεωρούμε και πάλι το 1^ο παράδειγμα, όπου $T=90$ και στο E-CDTM και στο E-EMLM, ενώ το T αυξάνεται σε

100 και 110 μόνο για στο E-EMLM. Επίσης, το E-CDTM, ελέγχεται για τα ακόλουθα σύνολα κατωφλίων της 1^{ης} κατηγορίας:

- 1^ο σύνολο: $J_{10}=20$ και $J_{11}=35$
- 2^ο σύνολο: $J_{10}=30$ και $J_{11}=45$
- 3^ο σύνολο: $J_{10}=40$ και $J_{11}=55$ (όπως στο παράδειγμα 1)
- 4^ο σύνολο: $J_{10}=50$ και $J_{11}=65$

Όλες οι άλλες παράμετροι παραμένουν ίδιες με αυτές του παραδείγματος 1. Στο Σχήμα 9-12 παρουσιάζουμε τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων της 1^{ης} κατηγορίας συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης. Βλέπουμε ότι για να μπορεί το E-EMLM να επιτύχει παρόμοια απόδοση με το E-CDTM, η παράμετρος T στο E-EMLM πρέπει να αυξηθεί σημαντικά, από $T=90$ σε $T=110$. Όμως, κάποιες κατηγορίες κίνησης μπορεί να μην επιτρέπουν μια τόσο μεγάλη συμπίεση.

Σχήμα 9-12: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων της 1^{ης} κατηγορίας συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το 2^ο παράδειγμα.

9.4.3 3^ο Παράδειγμα

Θεωρούμε δύο κατηγορίες κίνησης που φιλοξενούνται σε μια ζεύξη χωρητικότητας $C=100$ μονάδων εύρους ζώνης. Η 1^η κατηγορία είναι *ελαστική*, ενώ η 2^η είναι *προσαρμοζόμενη*. Αυτές έχουν τη μέγιστη απαίτηση σε εύρος ζώνης 14 και 8 μονάδες εύρους ζώνης, και προσφερόμενο φορτίο κίνησης $\alpha_1=1.0$ erl και $\alpha_2=2.0$ erl, αντίστοιχα. Διατηρούμε σταθερή την παράμετρο T του E-CDTM και ίση με $T=C+5$, ενώ η παράμετρος T του E-EMLM επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε η *χρησιμοποίηση της ζεύξης* του E-EMLM να είναι ίση (για την ακρίβεια όσο το δυνατόν πιο κοντά) στην *χρησιμοποίηση της ζεύξης* του E-CDTM.

Στο E-CDTM, οι κλήσεις της 1^{ης} κατηγορίας έχουν τη δυνατότητα να μειώνουν την απαίτησή τους σε εύρος ζώνης από 14 σε 5 σε βήματα των 3 μονάδων εύρους ζώνης και οι κλήσεις της 2^{ης} κατηγορίας από 8 σε 4 σε βήματα των 2 μονάδων εύρους ζώνης. Τα κατώφλια της 1^{ης} κατηγορίας είναι: $J_{10}=65$, $J_{11}=80$ και $J_{12}=95$, ενώ της 2^{ης} κατηγορίας είναι: $J_{20}=55$ και $J_{21}=75$. Όταν $C < j \leq T$, τότε οι κλήσεις της 1^{ης} κατηγορίας καταλαμβάνουν $5j/C$ και οι κλήσεις της 2^{ης} καταλαμβάνουν $4j/C$ μονάδες εύρους ζώνης.

Στο E-EMLM, όταν $j \leq C$, οι κλήσεις και των δύο κατηγοριών λαμβάνουν το μέγιστο απαιτούμενο εύρος ζώνης, ενώ όταν $C < j \leq T$, αυτές καταλαμβάνουν $14j/C$ και $8j/C$ μονάδες εύρους ζώνης, για την 1^η και την 2^η κατηγορία, αντίστοιχα.

Σχήμα 9-13: Πιθανότητες απώλειας κλήσεων συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το 3^ο παράδειγμα.

Πίνακας 9-5: Χρησιμοποίηση της ζεύξης, U , και η μέγιστη απαίτηση σε εύρος ζώνης, T , συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης για το 2^ο παράδειγμα.

	Φορτίο (a_1, a_2) erl	E-CDTM			E-EMLM	
		U (%) ανάλυση	U (%) προσομοίωση	T	U (%) ανάλυση	T
1	(1.0, 2.0)	29.99	30.00	$C+5$	29.99	$C+20$
2	(1.25, 2.5)	37.47	37.50	$C+5$	37.44	$C+20$
3	(1.5, 3.0)	44.87	44.95	$C+5$	44.77	$C+20$
4	(1.75, 3.5)	52.09	52.29	$C+5$	51.84	$C+20$
5	(2.0, 4.0)	58.95	59.41	$C+5$	58.49	$C+20$
6	(2.25, 4.5)	65.25	66.07	$C+5$	64.56	$C+20$
7	(2.5, 5.0)	70.86	72.20	$C+5$	69.96	$C+20$

Στο Σχήμα 9-13 παρουσιάζουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα για τις *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* των μοντέλων (E-CDTM και E-EMLM) συναρτήσει του *προσφερόμενου φορτίου κίνησης*. Στην περίπτωση του E-CDTM, δείχνουμε επίσης και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* με σκοπό να ελεγχθεί η ακρίβεια του μοντέλου. Θεωρούμε επτά σημεία φορτίου κίνησης (1,2,...,7) στον x -άξονα του Σχήματος 9-13, αυξάνοντας ταυτόχρονα τα a_1 και a_2 κατά 0.25 erl και 0.5 erl, αντίστοιχα. Έτσι το υψηλότερο φορτίο (σημείο 7) είναι $a_1=2.5$ και $a_2=5.0$ erl.

Στον Πίνακα 9-5 παρουσιάζουμε την *χρησιμοποίηση της ζεύξης* (που έχει επιλεγεί να είναι περίπου ίση και στα δύο μοντέλα) συναρτήσει του *προσφερόμενου φορτίου κίνησης*. Παρουσιάζουμε επίσης και τις αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου T .

Στο Σχήμα 9-13 βλέπουμε ότι το E-CDTM έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* σε σύγκριση με το E-EMLM για την 1^η κατηγορία, ενώ τα οι *πιθανότητες απώλειας κλήσεων* που προκύπτουν για την 2^η κατηγορία είναι καλύτερες στο E-EMLM (αν και οι διαφορές δεν είναι μεγάλες). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι παράμετροι κίνησης έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει η ίδια (σχεδόν) *χρησιμοποίηση της ζεύξης*.

Τέλος, στο Σχήμα 9-13, παρατηρούμε πιο μεγάλες διαφορές ανάμεσα στα αναλυτικά αποτελέσματα και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις *πιθανότητες απώλειας κλήσεων*, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των Σχημάτων 9-

10, 9-11 και 9-12. Αυτό υποδηλώνει ότι τα μοντέλα είναι προσεγγιστικά. Ένα μεγαλύτερο πλήθος κατωφλίων και ένα μεγαλύτερο προσφερόμενο φορτίο κίνησης στο 3^ο παράδειγμα σε σχέση με το 1^ο παράδειγμα οδήγησε σε μεγαλύτερες διαφορές όσον αφορά τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων. Όπως και να έχει όμως, κατά μέσον όρο οι διαφορές ανάμεσα στα αναλυτικά αποτελέσματα και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι μικρότερες από 2%, που είναι ένα αποδεκτό εύρος για την ανάλυση των δικτύων σε επίπεδο κλήσεων.

9.5. EF-CDTM (Extended Finite CDTM): Το μοντέλο κατωφλίων για ψευδο-τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες.

9.5.1 Περιγραφή του μοντέλου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε το Extended Finite Connection-Dependent Threshold Model (EF-CDTM). Το μοντέλο αυτό έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με το E-CDTM, με τη μόνη διαφορά ότι θεωρεί ψευδο-τυχαία και όχι τυχαία (όπως στα E-EMLM και E-CDTM) διαδικασία άφιξης κλήσεων στο σύστημα.

Θεωρούμε K ανεξάρτητες κατηγορίες κίνησης που φιλοξενούνται σε μια ζεύξη χωρητικότητας C . Η κατηγορία k ($k=1, \dots, K$) έχει ένα πεπερασμένο πλήθος πηγών, N_k , και μπορεί να είναι είτε *ελαστική* είτε *προσαρμοζόμενη*. Συμβολίζουμε με K_e το πλήθος των *ελαστικών* κατηγοριών κίνησης και με K_a το πλήθος των *προσαρμοζόμενων* κατηγοριών κίνησης. Ισχύει $K = K_e + K_a$. Η κατηγορία k έχει ένα σύνολο από S_k κατώφλια: $J_{k,1}, J_{k,2}, \dots, J_{k,S_k}$. Τα κατώφλια αυτά αναφέρονται στο κατειλημμένο εύρος ζώνης της ζεύξης και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του εύρους ζώνης που θα ζητήσει μια νέα κλήση κατηγορίας k . Πιο συγκεκριμένα, το απαιτούμενο εύρος ζώνης της κλήσης εξαρτάται από την κατάσταση του συστήματος, j , κατά τη στιγμή της άφιξης της κλήσης και από τα κατώφλια της κατηγορίας στην οποία ανήκει η κλήση. Οι κλήσεις της κατηγορίας k μπορούν να έχουν μια από $S_k + 1$ εναλλακτικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης:

$b_{k,0} > b_{k,1} > \dots > b_{k,S_k}$. Κάθε απαίτηση σε εύρος ζώνης $b_{k,l}$ ($l = 0, 1, \dots, S_k$) αντιστοιχεί σε μια απαίτηση χρόνου εξυπηρέτησης, που είναι εκθετικά καταναμεμημένος με μέση τιμή $\mu_{k,l}^{-1}$.

Εάν κατά την άφιξη της νέας κλήσης το απαιτούμενο εύρος ζώνης, $b_{k,l}$, δεν είναι διαθέσιμο στη ζεύξη, η κλήση και πάλι μπορεί να γίνει δεκτή (με συμπιεσμένο εύρος ζώνης). Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει να συμπίεστεί και το εύρος ζώνης των κλήσεων που ήδη εξυπηρετούνται στο σύστημα. Η συμπίεση του εύρους ζώνης επιτρέπεται μέχρι μια ελάχιστη τιμή $b_{k,l}^{\min} = r^{\min} b_{k,l}$, όπου $r^{\min}$ είναι το ελάχιστο ποσοστό του απαιτούμενου εύρους ζώνης $b_{k,l}$ που μπορεί να ανατεθεί σε μια κλήση. Το $r^{\min}$, ουσιαστικά, εκφράζει το μέγιστο όριο συμπίεσης των κλήσεων.

Όπως και στο E-CDTM, με s συμβολίζουμε το συνολικό (πραγματικό) κατειλημμένο εύρος ζώνης στη ζεύξη. Προφανώς ισχύει $0 \leq s \leq C$, όπου C είναι η (πραγματική) χωρητικότητα της ζεύξης. Με j συμβολίζουμε το εικονικό κατειλημμένο εύρος ζώνης στη ζεύξη. Με άλλα λόγια το j εκφράζει το εύρος ζώνης που θα ήταν κατειλημμένο στη ζεύξη εάν όλες οι κλήσεις, που βρίσκονται υπό εξυπηρέτηση, καταλάμβαναν ασυμπίεστο εύρος ζώνης. Προφανώς ισχύει $0 \leq j \leq T$, όπου T είναι η εικονική χωρητικότητα της ζεύξης. Η πραγματική και η εικονική χωρητικότητες συνδέονται με τη σχέση: $T = \frac{C}{r^{\min}}$. Επειδή $r^{\min}$ εκφράζει ποσοστό,

πρέπει $r^{\min} \leq 1$ και επομένως $C \leq T$. Στις δύο αυτές σχέσεις, στην περίπτωση της ισότητας, δεν επιτρέπεται συμπίεση/διαστολή του εύρους ζώνης των κλήσεων και, επομένως, το EF-CDTM εκφυλίζεται στο F-CDTM.

Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων βασίζεται στην εικονική χωρητικότητα, T . Μια νέα κλήση της κατηγορίας k απορρίπτεται από το σύστημα αν και μόνο αν $j + b_{k,l} > T$. Δηλαδή, όταν μετά την αποδοχή της κλήσης θα ξεπερνούσαμε την εικονική χωρητικότητα. Όταν $j + b_{k,l} \leq T$, η νέα κλήση γίνεται δεκτή στο σύστημα και καταλαμβάνει $b_{k,l}$ μονάδες εύρους ζώνης από την εικονική χωρητικότητα. Μετά από την αποδοχή της κλήσης αυτής, το σύστημα από την κατάσταση j περνάει στην κατάσταση $j + b_{k,l}$.

Έπειτα το σύστημα πρέπει να αποφασίσει αν θα συμπίεσει το εύρος ζώνης της νέας αυτής κλήσης. Εάν $j + b_{k,l} \leq C$, τότε το εύρος ζώνης της κλήσης δεν συμπιέζεται, αφού το (πραγματικό) διαθέσιμο εύρος ζώνης της ζεύξης είναι αρκετό για να καλύψει την απαίτηση της κλήσης. Εάν $j + b_{k,l} > C$, τότε πρέπει να γίνει συμπίεση του εύρους ζώνης και της νέας κλήσης, αλλά και όλων των κλήσεων που βρίσκονται υπό εξυπηρέτηση στο σύστημα. Το ποσοστό συμπίεσης εξαρτάται από την κατάσταση j και υπολογίζεται από $r(j) = \frac{C}{j}$. Τότε το πραγματικό εύρος ζώνης που καταλαμβάνει η κλήση είναι $r(j)b_{k,l}$.

Κάθε φορά που έχουμε συμπίεση εύρους ζώνης, ο χρόνος εξυπηρέτησης των ελαστικών κλήσεων αυξάνεται κατά το ίδιο ποσοστό με τη συμπίεση και γίνεται $\frac{1}{r(j)\mu_{k,l}}$, ενώ ο χρόνος εξυπηρέτησης των προσαρμοζόμενων κλήσεων παραμένει αμετάβλητος και ίσος με $\mu_{k,l}^{-1}$.

Η υιοθέτηση της ψευδο-τυχαίας διαδικασίας άφιξης των κλήσεων στο σύστημα υποθέτει ότι υπάρχει ένα πεπερασμένο πλήθος πηγών κίνησης που παράγουν τις κλήσεις κάθε κατηγορίας. Με N_k συμβολίζουμε το πλήθος των πηγών κίνησης της κατηγορίας k . Οι νέες κλήσεις μπορούν να προέρχονται μόνο από ελεύθερες πηγές, δηλαδή από πηγές που δεν έχουν κλήση που εξυπηρετείται στο σύστημα. Με $n_{k,l}(j)$ συμβολίζουμε το πλήθος των κλήσεων με απαίτηση $b_{k,l}$ που εξυπηρετούνται στο σύστημα στην κατάσταση j . Επομένως το πλήθος των ελεύθερων πηγών είναι $N_k - n_{k,l}(j)$. Με v_k συμβολίζουμε το ρυθμό άφιξης των κλήσεων από μια ελεύθερη πηγή της κατηγορίας k , ενώ ο συνολικός ρυθμός άφιξης των κλήσεων της κατηγορίας k (δηλαδή ο ρυθμός άφιξης από όλες τις ελεύθερες πηγές), υπολογίζεται από $\lambda_k(j) = (N_k - \sum_{l=1}^{S_k} n_{k,l}(j))v_k$. Το προσφερόμενο φορτίο κίνησης ανά ελεύθερη

πηγή της κατηγορίας k ορίζεται ως $a_{k,l} = v_k \mu_{k,l}^{-1}$.

Το EF-CDTM δεν έχει λύση μορφής γινομένου για τους ίδιους λόγους που δεν την έχει και το E-CDTM. Αυτό σημαίνει ότι η Μαρκοβιανή αλυσίδα που περιγράφει το σύστημα δεν είναι αντιστρέψιμη και, επομένως, προκειμένου να μπορούμε να καταλήξουμε σε έναν αναδρομικό τύπο για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων

καταστάσεων, θα πρέπει να υιοθετήσουμε ορισμένες προσεγγίσεις. Οι απαιτούμενες προσεγγίσεις είναι ίδιες με αυτές που είχαμε κάνει και στο E-CDTM, στην παράγραφο 9.1.2 και δεν επαναλαμβάνονται εδώ.

9.5.2 Ένα μικρό παράδειγμα

Παρουσιάζουμε τις βασικές αρχές του EF-CDTM μέσω ενός μικρού παραδείγματος του Σχήματος 9-14. Θεωρούμε μια ζεύξη με (πραγματική) χωρητικότητα $C = 5$ και με εικονική χωρητικότητα $T = 7$. Έχουμε τρεις κατηγορίες κίνησης. Η 1^η κατηγορία δεν έχει κατώφλια και έχει μια απαίτηση εύρους ζώνης $b_1 = 1$. Η 2^η κατηγορία έχει ένα κατώφλι $J_{2,1} = 2$ και δύο εναλλακτικές απαιτήσεις $b_{2,0} = 2$ και $b_{2,1} = 1$. Η 3^η κατηγορία έχει δύο κατώφλια $J_{3,2} = 3$ και $J_{3,1} = 2$, και τρεις εναλλακτικές απαιτήσεις $b_{3,0} = 3$, $b_{3,1} = 2$ και $b_{3,2} = 1$. Το πλήθος των πηγών κίνησης των τριών κατηγοριών είναι $N_1 = 20$, $N_2 = 10$ και $N_3 = 5$.

Σχήμα 9-14: Βασικές αρχές του EF-CDTM.

Στο Σχήμα 9-15 δείχνουμε το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων για το συγκεκριμένο παράδειγμα, μόνο για την 3^η κατηγορία κίνησης. Είναι προφανές από το σχήμα ότι το σύστημα δεν έχει λύση μορφής γινομένου. Όταν το σύστημα είναι στις καταστάσεις $j = 1, \dots, 5$ (δηλαδή για $b_{3,1} = 2$) δεν έχουμε συμπίεση του εύρους ζώνης των κλήσεων. Στις καταστάσεις $j = 6$ και $j = 7$ (δηλαδή για $C < j \leq T$) το εύρος ζώνης των κλήσεων συμπιέζεται κατά $r(6) = \frac{5}{6}$ και $r(7) = \frac{5}{7}$, αντίστοιχα. Υπάρχει μόνο μια κατάσταση απώλειας, η $j = 7$.

Σύμφωνα με την προσέγγιση μετανάστευσης, όταν το σύστημα είναι π.χ. στην κατάσταση $j=3$, τότε το πλήθος των κλήσεων της 3^{ης} κατηγορίας με απαίτηση $b_{3,2}=1$ είναι αμελητέο, επειδή η $j=3$ ανήκει στο χώρο μετανάστευσης των κλήσεων με $b_{3,2}=1$. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι το σύστημα δεν μπορεί να φτάσει στην κατάσταση $j=3$ από την κατάσταση $j=2$ μέσω μιας άφιξης μιας κλήσης της 3^{ης} κατηγορίας με απαίτηση $b_{3,2}=1$. Αυτό προκύπτει επίσης απευθείας από τον ορισμό του χώρου μετανάστευσης $0 < j < J_{3,2} + b_{3,2} = 4$.

Σύμφωνα με την προσέγγιση της εμπρός μετανάστευσης, όταν το σύστημα είναι π.χ. στην κατάσταση $j=6$, τότε το πλήθος των κλήσεων της 3^{ης} κατηγορίας με απαίτηση $b_{3,0}=3$ είναι αμελητέο, επειδή η $j=6$ ανήκει στο χώρο της εμπρός μετανάστευσης της 3^{ης} κατηγορίας. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι το σύστημα δεν μπορεί να φτάσει στην κατάσταση $j=6$ από την κατάσταση $j=3$ μέσω μιας άφιξης μιας κλήσης της 3^{ης} κατηγορίας με απαίτηση $b_{3,0}=3$. Αυτό προκύπτει επίσης απευθείας από τον ορισμό του χώρου της εμπρός μετανάστευσης $J_{3,1} + b_{3,0} = 2 + 3 = 5 < j$.

Λόγω των προσεγγίσεων μετανάστευσης και των προσεγγίσεων της εμπρός μετανάστευσης οι αντίστοιχες προς τα πίσω μεταβάσεις στο διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων πρέπει να εξαλειφθούν. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 9-16 με X πάνω στα βέλη. Με τον τρόπο αυτό και λόγω της υπόθεσης της τοπικής ισορροπίας προκύπτει αντιστρέψιμη Μαρκοβιανή αλυσίδα.

Σχήμα 9-15: Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων για την 3^η κατηγορία στο EF-CDTM.

Σχήμα 9-16: Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων για την 3^η κατηγορία στο EF-CDTM.

Κεφάλαιο 10

10. Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα επί της ενότητας Γ

Στην ενότητα Γ που αποτελείται από κεφάλαια 8 και 9 μελετήθηκαν τα μοντέλα απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης κίνησης με σταθερό ελαστικό ρυθμό μετάδοσης σε ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα.

Στο κεφάλαιο 8 (state of the art) της Ενότητας Γ παρουσιάστηκε και μελετήθηκε το μοντέλο απωλειών τυχαίων κλήσεων με ελαστικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης (Extended Erlang Multirate Loss Model, E-EMLM). Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της απόδοσης σε επίπεδο κλήσεων των ενσύρματων συνδεσιμοστρεφών δικτύων με άπειρο πλήθος πηγών και με κατηγορίες κίνησης που έχουν ελαστικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.

Στο κεφάλαιο 9 της Ενότητας Β προτάθηκαν τρία νέα μοντέλα απωλειών κλήσεων για τα ενσύρματα συνδεσιμοστρεφή δίκτυα που υποστηρίζουν τυχαία και ψευδο-τυχαία κίνηση:

- Το μοντέλο κατωφλίων για τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες (Extended Connection Dependent Threshold Model, E-CDTM). Το μοντέλο αυτό είναι επέκταση του CDTM, με σκοπό την ενσωμάτωση του ελαστικού ρυθμού μετάδοσης.
- Το μοντέλο κατωφλίων για τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες, με σύστημα δέσμευσης εύρους ζώνης (E-CDTM/Bandwidth Reservation, E-CDTM/BR). Το μοντέλο αυτό είναι επέκταση του E-CDTM, με σκοπό την ενσωμάτωση του συστήματος δέσμευσης εύρους ζώνης.
- Το μοντέλο κατωφλίων για ψευδο-τυχαία κίνηση και ελαστικές υπηρεσίες (Extended Finite Connection Dependent Threshold Model, EF-CDTM). Το μοντέλο αυτό είναι επέκταση του F-CDTM, με σκοπό την ενσωμάτωση του ελαστικού ρυθμού μετάδοσης.

Τα τρία νέα μοντέλα που προτάθηκαν στο ένατο κεφάλαιο περιγράφονται μέσω μονοδιάστατων Μαρκοβιανών αλυσίδων με σκοπό τη δημιουργία αναδρομικών τύπων για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων καταστάσεων του συστήματος, της διεκπεραιωτικής ικανότητας (throughput), της χρησιμοποίησης ζεύξης (link utilization) και των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων διαφόρων κατηγοριών κίνησης. Επίσης, μέσω των προσομοιώσεων σε υπολογιστή, έγινε η μελέτη της ακρίβειας των προτεινόμενων προσεγγιστικών τύπων. Στις προσομοιώσεις εξετάστηκαν οι περιπτώσεις δύο ή τριών κατηγοριών κίνησης, μεταβαλλόμενου προσφερόμενου φορτίου κίνησης και διαφορετικών παραμέτρων δέσμευσης εύρους ζώνης. Σε όλες τις περιπτώσεις, όπως έδειχναν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η ακρίβεια των προτεινόμενων προσεγγιστικών τύπων ήταν πολύ ικανοποιητική.

Στο Σχήμα 10-1 παρουσιάζεται η διασύνδεση των ενσύρματων μοντέλων της διατριβής. Σε έντονους κύκλους είναι τα νέα μοντέλα που έχουν προταθεί. Πάνω στα βέλη υπάρχει η συνθήκη που οδηγεί από το ένα μοντέλο στο άλλο. Π.χ αν στο E-CDTM θεωρήσουμε ότι η εικονική χωρητικότητα T είναι ίση με την πραγματική χωρητικότητα C , τότε προκύπτει το CDTM.

Σχήμα 10-1: Διασύνδεση των ενσύρματων μοντέλων.

Κεφάλαιο 11

11. Εφαρμογές Μοντέλων Απωλειών Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης σε Οπτικά Δίκτυα

11.1.Οπτικά δίκτυα πρόσβασης

Το δίκτυο πρόσβασης είναι γνωστό και ως δίκτυο πρώτου μιλίου (“first mile” network) και συνδέει τους παροχείς υπηρεσιών (service providers) με εταιρίες και οικιακούς χρήστες. Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην ανάπτυξη δικτύων κορμού υψηλής χωρητικότητας. Τα υπάρχοντα δίκτυα κορμού παρέχουν ζεύξεις υψηλής χωρητικότητας (OC-192, δηλ. 10 Gbps). Αντίθετα, τα υπάρχοντα δίκτυα πρόσβασης, όπως η ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (Digital Subscriber Line-DSL), παρέχουν σχετικά χαμηλές ταχύτητες στο κατερχόμενο κανάλι (downstream channel) (της τάξεως των μερικών Mbps) και στο ανερχόμενο κανάλι (upstream channel) (της τάξεως των μερικών εκατοντάδων Kbps). Επομένως, τα δίκτυα πρόσβασης αποτελούν τον περιοριστικό παράγοντα για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών στους χρήστες, όπως η εντολή αποκατάστασης βίντεο (video on-demand), διαδραστικά παιχνίδια (interactive games), εικονοδιάσκεψη (video conference) κ.τ.λ. Οι υπάρχοντες λύσεις για ευρυζωνική πρόσβαση αποτελούν η DSL και η τηλεόραση συλλογικής κεραίας ή καλωδιακή τηλεόραση (Community Antenna Television-CATV ή cable television). Αυτές οι τεχνολογίες παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα, καθώς βασίζονται σε υποδομές, οι οποίες είχαν αρχικά κατασκευαστεί ώστε να μεταφέρουν φωνή και αναλογική τηλεόραση, αντίστοιχα. Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται κάποιες παραλλαγές του DSL, όπως η υπερυψηλής ταχύτητας DSL (Very high bit-rate DSL-VDSL), η οποία μπορεί να υποστηρίξει ταχύτητες έως 50 Mbps, αλλά με τον περιορισμό της μικρής απόστασης.

Η αντιμετώπιση των προβλημάτων των υπάρχοντων δικτύων πρόσβασης μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εισαγωγή της οπτικής ίνας, ένα μέσο μετάδοσης που παρουσιάζει πολύ χαμηλές απώλειες και τεράστιο προσφερόμενο εύρος ζώνης. Τα

δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς έχουν ως στόχο να χρησιμοποιήσουν οπτικές ίνες έως το χώρο εργασίας ή έως τους οικιακούς χρήστες. Τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης υποστηρίζουν ταχύτητες της τάξεως των Gbps, με κόστος εφάμιλλο με το κόστος των DSL δικτύων [69].

Γενικά ένα παθητικό οπτικό δίκτυο πρόσβασης είναι ένα δίκτυο, όπου το τοπικό κέντρο εξυπηρετεί πολλούς χρήστες. Υπάρχουν διάφορες πολυσημειακές τοπολογίες που είναι κατάλληλες για δίκτυα πρόσβασης, όπως η αρχιτεκτονική αρτηρίας (bus), δακτυλίου (ring), δένδρου (tree) και η δενδροκλαδική (tree-and-branch) αρχιτεκτονική. Με τη χρήση 1:2 ή 1:N συζευκτών, τα PONs μπορούν να υλοποιηθούν σε οποιαδήποτε από αυτές τις αρχιτεκτονικές. Επιπλέον, μπορούν να υλοποιηθούν σε εφεδρικές διατάξεις, όπως στις αρχιτεκτονικές διπλού δακτυλίου ή διπλού δένδρου.

Η μετάδοση σε ένα PON πραγματοποιείται μεταξύ ενός τερματικού οπτικής γραμμής (Optical Line Terminal-OLT) και των μονάδων οπτικού δικτύου (Optical Network Units-ONUs). Το τερματικό οπτικής γραμμής ανήκει σε ένα τηλεπικοινωνιακό κέντρο, το οποίο συνδέει το δίκτυο πρόσβασης με το δίκτυο κορμού. Η μονάδα οπτικού δικτύου εντοπίζεται είτε στην περιοχή του χρήστη είτε σε ένα σύνολο χρηστών. Θα πρέπει να τονιστεί ότι σε όλες τις PON αρχιτεκτονικές δεν είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ των χρηστών, αφού κάθε χρήστης στέλνει δεδομένα μόνο στο OLT.

11.2.Εφαρμογή της TDMA τεχνολογίας στα PONs

Οι σημερινές PON διαμορφώσεις βασίζονται στην τεχνολογία της πολύπλεξης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing (TDM)). Η χρήση της TDM τεχνολογίας προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως το χαμηλό κόστος εξοπλισμού των χρηστών (οι πομποί και οι δέκτες είναι συντονισμένοι σε μία συχνότητα λειτουργίας, οπότε το κόστος τους είναι χαμηλό), και η εύκολη προσθήκη νέων χρηστών στο δίκτυο. Τα TDM-PONs έχουν επιδείξει σημαντική πρόοδο σε ότι αφορά την τυποποίηση (standardization) και την εφαρμογή τους τα τελευταία χρόνια. Τα PONs που βασίζονται στον ασύγχρονο τρόπο μετάδοσης (Asynchronous Transfer Mode PONs (APONs)), καθώς και τα ευρυζωνικά PONs (Broadband PONs

(BPONs)) έχουν ήδη τυποποιηθεί από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών - Τομέας Τηλεπικοινωνιακής Τυποποίησης (International Telecommunications Union – Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)) με την προδιαγραφή G.983. Επίσης, το γιγαδυφιακό PON (Gigabit PON (GPON)) με την προδιαγραφή G.984 και το Ethernet PON (EPON) με την προδιαγραφή IEEE 802.3ah [70].

11.2.1 ATM PONs

Στα παθητικά οπτικά δίκτυα που βασίζονται στον ασύγχρονο τρόπο μετάδοσης (Asynchronous Transfer Mode-ATM), ο ρυθμός μετάδοσης στην κατερχόμενη κατεύθυνση είναι 155 ή 622 Mbps και στην ανερχόμενη κατεύθυνση 155 Mbps [71]. Ο μέγιστος λόγος διαχωρισμού (splitting ratio) στην παθητική διάταξη είναι 32 (με προοπτική να γίνει 64) και η μέγιστη απόσταση μεταξύ των ONUs και του OLT είναι τα 20 Km. Ο οπτική ίνα που χρησιμοποιείται είναι μία τυποποιημένη ίνα απλού ρυθμού (single-mode). Το κανάλι κατερχόμενης κατεύθυνσης λειτουργεί στην περιοχή των 1.5 μm ενώ το κανάλι ανερχόμενης κατεύθυνσης λειτουργεί στη περιοχή των 1.3 μm . Στην περίπτωση των 155 Mbps της κατερχόμενης ζεύξης υπάρχουν 54 ATM πλαίσια των 53 bytes για και άλλα δύο πλαίσια για διαχείριση και συντήρηση, ενώ στην περίπτωση των 622 Mbps υπάρχουν 216 ATM πλαίσια και 8 πλαίσια διαχείρισης. Καθώς κάθε χρήστης βρίσκεται σε διαφορετική απόσταση από το OLT, θα πρέπει ο συγχρονισμός των ONUs να είναι προσεκτικός για την αποφυγή συγκρούσεων.

Για την επέκταση των ATM-PONs έχει πραγματοποιηθεί έρευνα σε ταχύτητες 622, 1244 και 2488 Mbps και για τις δύο κατευθύνσεις. Επίσης νέες εξελίξεις στον τομέα της φωτονικής τεχνολογίας επιτρέπουν τη χρήση διατάξεων όπου ο λόγος διαχωρισμού να φθάνει το 128 ή και το 256, ενώ χρησιμοποιούνται οπτικοί ενισχυτές προσμείξεων ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifiers-EDFAs) για την ενίσχυση των σημάτων.

11.2.2 Ethernet PON (EPON)

Η πρώτη γενιά των PONs έχει τυποποιηθεί με το ITU-T G.983 και χρησιμοποιεί τον ασύγχρονο τρόπο μετάδοσης (Asynchronous Transfer Mode-ATM), ως το

πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control-MAC). Η ATM έχει τα πλεονεκτήματα της μετάδοσης υπηρεσιών φωνής και δεδομένων, ενώ παρέχει εγγυήσεις λειτουργικότητας και απόδοσης. Ωστόσο, από εκείνη την περίοδο το Ethernet έχει παρουσιάσει σημαντική ανάπτυξη. Οι κάρτες γραμμής του Ethernet έχουν μικρό κόστος, και χρησιμοποιούνται ευρέως στα LANs. Η υλοποίηση του υπερυψηλού Ethernet (High-speed Gigabit Ethernet) επιταχύνεται σημαντικά, ενώ το 10-Gigabit Ethernet είναι διαθέσιμο. Το Ethernet είναι περισσότερο αξιόπιστο MAC πρωτόκολλο σε σύγκριση με το ATM, το οποίο απαιτεί μία σημαντική ποσότητα επίβαρου. Κάποιες τεχνικές ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service-QoS) που έχουν υιοθετηθεί πρόσφατα έχουν εισάγει νέες τεχνολογίες στα Ethernet δίκτυα, ώστε να παρέχουν αξιόπιστη υποστήριξη φωνής, δεδομένων και βίντεο. Οι τεχνικές αυτές περιέχουν αμφίδρομους τρόπους μετάδοσης (full-duplex transfer modes), προτεραιοποιητοθέτηση (prioritization) (802.1p), και αναρτηματοθέτηση (tagging) ιδεατού LAN (virtual LAN-VLAN) (802.1Q). Το 802.1p είναι μία προδιαγραφή, η οποία επιτρέπει την προτεραιοποιητοθέτηση της κίνησης σε διάφορες κατηγορίες κίνησης στο MAC επίπεδο. Το 802.1Q ορίζει την αρχιτεκτονική των VLANs. Μολονότι το 802.1Q δεν ορίζει καμία υποστήριξη QoS, ορίζει μία επέκταση της μορφοποίησης πλαισίου (frame format), η οποία επιτρέπει στα πλαίσια του Ethernet να μεταφέρουν πληροφορία προτεραιότητας.

Τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης που βασίζονται στο Ethernet (EPONs) έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς πακέτων μεταβλητού μήκους, έως 1518 bytes, σε αντίθεση με τα πακέτα σταθερού μήκους των ATM-PONs, ενώ οι νεότερες εκδόσεις των EPONs έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς ATM πλαισίων μαζί με Ethernet πακέτα με μεγάλη αξιοπιστία. Με αυτό τον τρόπο συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα, όσον αφορά την ποιότητα υπηρεσίας, της ATM τεχνολογίας, με την αξιοπιστία του Ethernet. Επομένως, τα EPONs εμφανίζονται ως τα επικρατούντα μελλοντικά δίκτυα πρόσβασης σε σχέση με τα ATM-PONs (APONs).

Καθώς το όνομα APON έδινε την εντύπωση ότι οι υπηρεσίες που μπορούν να υποστηριχθούν είναι μόνο ATM υπηρεσίες, ο όρος μετατράπηκε σε Broadband PON (BPON). Τα BPONs έχουν τυποποιηθεί από την ITU-T προδιαγραφή G.983.1.

11.2.3 Gigabit PON

Η επέκταση της χωρητικότητας των PONs στην περιοχή των Gbps, πραγματοποιήθηκε με την τυποποίηση του GPON από την ITU στη σειρά πρωτοκόλλων G.984.x. Η αρχιτεκτονική του δικτύου που περιγράφεται σε αυτά τα πρωτόκολλα έχει πολλές ομοιότητες με την αρχιτεκτονική του ATM-PON. Ο μέγιστος λόγος διαχωρισμού είναι 128, και η μέγιστη απόσταση ενός ONU από το OLT είναι 20 Km. Στην κατερχόμενη κατεύθυνση οι ρυθμοί μετάδοσης που υποστηρίζονται είναι 1244.16 ή 2488.32 Mbps, ενώ η φασματική περιοχή του καναλιού που χρησιμοποιείται σε αυτή την κατεύθυνση περιορίζεται στα 1480-1500 nm. Στην ανερχόμενη κατεύθυνση, οι ρυθμοί μετάδοσης που χρησιμοποιούνται είναι 155.52, 622.08, 1244.16 και 2488.32 Mbps, ενώ το κανάλι λειτουργεί στην περιοχή των 1260-1360 nm [72]. Το πρωτόκολλο G.983.2, το οποίο ορίζει το επίπεδο εξαρτώμενο από το φυσικό επίπεδο (Physical-Medium-Dependent-PMD), καθορίζει αυτούς τους ρυθμούς μετάδοσης της ανερχόμενης και κατερχόμενης κατεύθυνσης. Παράλληλα, καθορίζει ότι στο δίκτυο μεταδίδονται πλαίσια σταθερής διάρκειας (125 μs), τα οποία μπορούν να υποστηρίξουν διάφορες μορφές πακέτων (Ethernet, ATM, IP κ.τ.λ.). Ταυτόχρονα, το πρωτόκολλο G.984.3 ορίζει το επίπεδο σύγκλισης μετάδοσης (transmission convergence), το οποίο πραγματοποιεί την προσαρμογή των δεδομένων του χρήστη πάνω στο PMD επίπεδο, ενώ παράλληλα παρέχει τις βασικές παραμέτρους διαχείρισης του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο τα GPONs έχουν τη δυνατότητα αξιόπιστης μετάδοσης διαφορετικών μορφών πακέτων, επιτυγχάνοντας παράγοντα αξιοποίησης του δικτύου πάνω από το 95%.

Τα τελευταία χρόνια μελετάται η επέκταση των GPONs, ώστε να υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης έως 10 Gbps και στις δύο κατευθύνσεις [73]. Το βασικό πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί είναι η κατασκευή οικονομικών διατάξεων οπτοηλεκτρονικής μετατροπής, που μπορούν να υποστηρίξουν αυτές τις ταχύτητες και να τοποθετηθούν στο χώρο των χρηστών.

11.3.Εφαρμογή της OCDMA τεχνολογίας στα PONs

Η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση οπτικού κώδικα (Optical Code Division Multiple access) είναι ένας μηχανισμός πρόσβασης ο οποίος παρέμεινε εκτός

ερευνητικής δραστηριότητας για μεγάλο χρονικό διάστημα εξαιτίας της αδυναμίας κατασκευής οπτικών διατάξεων, ικανών να πραγματοποιήσουν την κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση στο οπτικό επίπεδο. Πρόσφατες εξελίξεις σε αυτή την περιοχή έχουν οδηγήσει στον επαναπροσδιορισμό του ερευνητικού ενδιαφέροντος για την OCDMA τεχνολογία, προσδιορίζοντας τις συνθήκες για την υλοποίηση της OCDMA στα δίκτυα πρόσβασης.

Τα συστήματα OCDMA μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ένα μεγάλο αριθμό χρηστών που μεταδίδουν περιοδικά, καθώς η απόδοση αυτών των συστημάτων περιορίζεται από τον αριθμό των χρηστών που μεταδίδουν ταυτόχρονα, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο παρεμβολές. Επομένως στα συστήματα OCDMA υπάρχει το πλεονέκτημα της επίτευξης στατιστικής πολυπλεξίας απευθείας στο φυσικό επίπεδο του δικτύου. Η κατάλληλη εκμετάλλευση αυτής της στατιστικής πολυπλεξίας μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος.

Η εφαρμογή της OCDMA τεχνολογίας βασίζεται σε πολλά πλεονεκτήματα όπως η δίκαιη κατανομή του εύρους ζώνης, η δυνατότητα παροχής διαφορετικών υπηρεσιών και ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) στο φυσικό επίπεδο, υποστήριξη ασύγχρονης πρόσβασης, ευελιξία στην κατανομή των χρηστών, υποστήριξη μεταβαλλόμενου ρυθμού δυφίου (Variable Bit Rate VBR) και ριπαίας κίνησης (bursty traffic), προστασία από ανεξουσιοδότητα άτομα κ.τ.λ. [74].

Η πολύπλεξη με διαίρεση οπτικού κώδικα (Optical Code Division Multiplexing-OCDM) είναι μία διαδικασία πολύπλεξης, όπου ο διαχωρισμός των τηλεπικοινωνιακών καναλιών καθορίζεται από διαφορετικούς οπτικούς κώδικες και όχι από διαφορετικά μήκη κύματος ή χρονοθυρίδες. Στη διαδικασία μετάδοσης, κάθε bit δεδομένων υποβάλλεται σε μία διαδικασία κωδικοποίησης (encoding) στον πομπό, ενώ στο δέκτη απαιτείται η αντίστροφη διαδικασία αποκωδικοποίησης (decoding) για την ανάκτηση των δεδομένων. Η διαδικασίες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης συνθέτουν την οπτική κωδικοποίηση (optical coding). Η OCDMA είναι η εφαρμογή της OCDM τεχνολογίας στον έλεγχο πρόσβασης πολλών χρηστών [75].

Ο συνδυασμός πολλών πλεονεκτημάτων έχουν προκαλέσει το έντονο ενδιαφέρον για την εφαρμογή της OCDMA στα οπτικά δίκτυα πρόσβασης, σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης. Ένα βασικό πλεονέκτημα των OCDMA συστημάτων είναι η λειτουργία ασύγχρονης μετάδοσης, που απλοποιεί τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσο σε σχέση με την TDMA, η οποία απαιτεί αυστηρό

συγχρονισμό. Παράλληλα, μπορεί να υλοποιηθεί η ταυτόχρονη μετάδοση κίνησης που προέρχεται από διαφορετικές υπηρεσίες. Η OCDMA τεχνολογία παρουσιάζει διαφάνεια και οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης και διαμορφώσεις. Τέλος, η OCDMA προσφέρει υψηλά επίπεδα ασφάλειας, ενώ η TDMA απαιτεί την ύπαρξη κρυπτοθέτησης (encryption) στο ηλεκτρονικό επίπεδο, για την παροχή ασφάλειας.

11.4. Μοντέλο για υβριδικά παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης (Passive Optical Networks, PON), τεχνολογίας TDM-WDM (Time Division Multiplexing – Wavelength Division Multiplexing).

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (passive optical network, PONs) αποτελούν μια ελκυστική λύση με πολλές εφαρμογές. Στην [45] προτείνεται ένα μοντέλο απωλειών τηλεπικοινωνιακής κίνησης για τον υπολογισμό των *πιθανοτήτων αποτυχίας σύνδεσης* (connection failure probabilities) και των *πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων* στα υβριδικά δίκτυα TDM-WDM (Time Division Multiplexing – Wavelength Division Multiplexing) PONs με δυναμική ανάθεση μήκους κύματος. Η αποτυχία της σύνδεσης συμβαίνει όταν δεν είναι διαθέσιμο το μήκος κύματος (wavelength), ενώ η απώλεια κλήσεων συμβαίνει όταν δεν είναι διαθέσιμο το εύρος ζώνης μέσα σε ένα μήκος κύματος. Το μοντέλο λαμβάνει υπ' όψη και τη *σταθερή* και την *ελαστική* κίνηση. Η μαθηματική περιγραφή του μοντέλου βασίζεται στην μονοδιάστατη Μαρκοβιανή αλυσίδα.

11.4.1 Μοντέλο εξυπηρέτησης υβριδικού TDM-WDM PON

Θεωρούμε ένα υβριδικό TDM-WDM PON που χρησιμοποιεί δυναμική ανάθεση μήκους κύματος. Κάθε ONU έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με OLT χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε διαθέσιμο μήκος κύματος. Η διαδικασία σύνδεσης ενός ONU στον OLT έχει ως εξής. Όταν έχουμε άφιξη μιας κλήσης σε ένα ONU, ενώ δεν υπάρχουν άλλες κλήσεις ούτε στον ίδιο ONU ούτε σε κάποιο άλλο ONU, η κλήση ψάχνει για ένα διαθέσιμο μήκος κύματος στο PON. Αυτό πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων σημάτων σύνδεσης μεταξύ του OLT και ONU. Εάν υπάρχει ελεύθερο μήκος

κύματος, τότε γίνεται η εγκατάσταση της σύνδεσης και η κλήση εξυπηρετείται. Στην αντίθετη περίπτωση η κλήση μπλοκάρεται και χάνεται. Μετά την εγκατάσταση της σύνδεσης όλες οι κλήσεις που ανήκουν στην ίδια ομάδα ONUs καταλαμβάνουν το ίδιο μήκος κύματος. Έτσι λόγω της περιορισμένης χωρητικότητας σε εύρος ζώνης του μήκους κύματος, μπορεί να συμβεί απώλεια κλήσεων (αποτυχία σύνδεσης). Όταν εξυπηρετηθούν όλες οι κλήσεις που χρησιμοποιούν το ίδιο μήκος κύματος, τότε τερματίζει η σύνδεση και το μήκος κύματος απελευθερώνει τους πόρους του, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κάποια νέα κλήση που ανήκει σε οποιαδήποτε ομάδα ONUs.

Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιάσουμε αναλυτικά μοντέλα για CFP και CBP στην άνω ζεύξη, δηλαδή μετάδοση από τα ONUs στον OLT. Θα θεωρήσουμε ότι κάθε ONU εξυπηρετεί πολλαπλές κατηγορίες κίνησης με άπειρο ή πεπερασμένο πλήθος πηγών κίνησης.

11.4.2 Μοντέλα για κατηγορίες κίνησης με άπειρο πλήθος πηγών κίνησης

Έστω C είναι το πλήθος των μηκών κύματος και N είναι το πλήθος των ONUs στο PON. Κάθε συσκευή διαίρεσης υποστηρίζει μια ομάδα από S ONUs ($S < N$). Έτσι το πλήθος των διαιρετών στο δίκτυο πρόσβασης είναι N/S , όπου N είναι πολλαπλάσιο του S . Κάθε μήκος κύματος έχει χωρητικότητα T μονάδων εύρους ζώνης. Κλήσεις φτάνουν στον ONU σύμφωνα με μια Poisson διαδικασία και προωθούνται στο ίδιο μήκος κύματος. Κάθε ONU εξυπηρετεί K κατηγορίες κίνησης. Κάθε κλήση της κατηγορίας k ($k=1, \dots, K$) για την εξυπηρέτησή της απαιτεί b_k μονάδες εύρους ζώνης. Εάν το απαιτούμενο εύρος ζώνης μιας κλήσης δεν είναι διαθέσιμο, τότε η κλήση μπλοκάρεται και χάνεται (Πολιτική Πλήρους Διάθεσης Πόρων). Ο ρυθμός άφιξης των κλήσεων της κατηγορίας k συμβολίζεται με λ_k , ενώ ο ρυθμός εξυπηρέτησης είναι εκθετικά κατανομημένος με μέση τιμή μ_k^{-1} .

Για την εξαγωγή των CFP, κατασκευάζουμε μια Μαρκοβιανή αλυσίδα με διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων που φαίνεται στο Σχήμα 11-1, όπου η κατάσταση j αντιπροσωπεύει το πλήθος των κατειλημμένων μηκών κύματος στο PON. Ο συνολικός ρυθμός άφιξης των κλήσεων από έναν ONU συμβολίζεται με

$$\lambda = \sum_{k=1}^K \lambda_k .$$

Η εγκατάσταση της σύνδεσης με ένα ONU ουσιαστικά συνδέει όλα τα

ONUs της ίδιας ομάδας. Επομένως, μετά από την εγκατάσταση μιας σύνδεσης, το πλήθος των ONUs που δεν έχουν ακόμα σύνδεση έχει μειωθεί κατά S . Γι' αυτό το λόγο, όταν το σύστημα είναι στην κατάσταση $(j-1)$ αυτό θα περνάει στην κατάσταση (j) $(N-(j-1)S)\lambda$ φορές στη μονάδα του χρόνου (Σχήμα 11-1).

Σχήμα 11-1: Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων ενός TDM-WDM PON με δυναμική ανάθεση μήκους κύματος.

Προκειμένου να ορίσουμε το ρυθμό με τον οποίο απελευθερώνεται ένα μήκος κύματος πρέπει να λάβουμε υπ' όψη όχι μόνο το πλήθος των κατειλημμένων μηκών κύματος j , αλλά επίσης το γεγονός ότι η απελευθέρωση ενός μήκους κύματος συμπίπτει με την αποχώρηση της τελευταίας κλήσης που χρησιμοποιεί το μήκος κύματος αυτό και μπορεί να ανήκει σε οποιαδήποτε κατηγορία κίνησης. Η μετάβαση από την κατάσταση (j) στην κατάσταση $(j-1)$ συμβαίνει με ρυθμό jQ , όπου Q αντιστοιχεί στο μέσο ρυθμό κατάληψης/εξυπηρέτησης ενός μήκους κύματος. Ο ρυθμός Q μπορεί να προσδιοριστεί από:

$$Q = \sum_{k=1}^K \mu_k y_k(b_k) \frac{q(b_k)}{\sum_{i=1}^T q(i)} \quad (11-1)$$

όπου $y_k(b_k)$ είναι το μέσο πλήθος των κλήσεων κατηγορίας k , όταν b_k μονάδες εύρους ζώνης είναι κατειλημμένες στο μήκος κύματος, και $q(i)$ είναι η πιθανότητα της κατάστασης i στο μήκος κύματος. Η πιθανότητα αυτή μπορεί να υπολογιστεί από τον γνωστό αναδρομικό τύπο των Kaufman-Roberts (EMLM) (εξ. (1-7)).

Το μέσο πλήθος των κλήσεων της κατηγορίας k δίνεται από

$$y_k(i) = \frac{a_k q(i - b_k)}{q(i)} \quad (11-2)$$

όπου $a_k = S\lambda_k \mu_k^{-1}$.

Η πιθανότητα $P(j)$ ότι j μήκη κύματος είναι κατειλημμένα στη ζεύξη μπορεί να εξαχθεί από το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων του Σχήματος 11-1.

$$(N - (j-1)S)\lambda P(j-1) + (j+1)QP(j+1) = ((N - jS)\lambda + jQ)P(j) \quad (11-3)$$

όπου $P(j) = 0$ για $j < 0$ και $j > C$. Προσθέτοντας κατά μέλη την (11-3) για $j = 0, 1, \dots, j-1$, προκύπτει ο αναδρομικός τύπος:

$$P(j) = \frac{\lambda(N - (j-1)S)}{Qj} P(j-1) \quad (11-4)$$

Από την (11-4) προκύπτει:

$$P(j) = \left(\frac{\lambda}{Q}\right)^j \frac{\prod_{i=1}^j [N - (i-1)S]}{j!} P(0) \quad (11-5)$$

όπου $P(0)$ να μην υπάρχουν κατειλημμένα μήκη κύματος. Χρησιμοποιώντας τη συνθήκη της κανονικοποίησης $\sum_{j=0}^C P(j) = 1$ προκύπτει:

$$P(0) = \left[\sum_{l=0}^C \left(\frac{\lambda}{Q}\right)^l \frac{\prod_{j=1}^l [N - (j-1)S]}{l!} \right]^{-1} \quad (11-6)$$

Επομένως, χρησιμοποιώντας τις (11-5) και (11-6) έχουμε:

$$P(j) = \left(\frac{\lambda}{Q}\right)^j \frac{\prod_{i=1}^j [N - (i-1)S]}{j!} \left[\sum_{l=0}^C \left(\frac{\lambda}{Q}\right)^l \frac{\prod_{j=1}^l [N - (j-1)S]}{l!} \right]^{-1} \quad (11-7)$$

Το CFP προσδιορίζεται από $P(C)$, επειδή μια εγκατάσταση σύνδεσης μπλοκάρει και χάνεται αν και μόνο αν όλα τα μήκη κύματος είναι κατειλημμένα.

Για τον υπολογισμό του CBP B_k της κατηγορίας k ενός συγκεκριμένου ONU, βασιζόμαστε στην (1-7):

$$B_k = \sum_{j=T-b_k+1}^T q(j) \quad (11-8)$$

11.4.3 Μοντέλα για κατηγορίες κίνησης με πεπερασμένο πλήθος πηγών κίνησης

Θεωρούμε το υβριδικό TDM-WDM PON της προηγούμενης ενότητας με την υπόθεση ότι κάθε κατηγορία κίνησης έχει πεπερασμένο πλήθος πηγών. Έστω M_k είναι το πλήθος των πηγών κίνησης της κατηγορίας k . Για την ανάλυση του νέου μοντέλου χρησιμοποιούμε την Μαρκοβιανή αλυσίδα του αντίστοιχου μοντέλου με άπειρο πλήθος πηγών κίνησης (Σχήμα 11-1) με κατάλληλη τροποποίηση των παραμέτρων λ και Q .

Λόγω του πεπερασμένου πλήθους πηγών, η διαδικασία άφιξης κλήσεων σε κάθε ONU δεν είναι τυχαία (Poisson) αλλά ψευδο-τυχαία. Ο ρυθμός άφιξης από μια ελεύθερη πηγή κατηγορίας k συμβολίζεται με ν_k . Εάν δεν υπάρχει καμία κλήση στην εξυπηρέτηση σε κάθε ONU, τότε ο ρυθμός άφιξης σε κάθε ONU από την κατηγορία k είναι $M_k \nu_k$ και ο συνολικός ρυθμός άφιξης σε κάθε ONU γίνεται

$$\lambda = \sum_{k=1}^K M_k \nu_k.$$

Η εγκατάσταση μιας σύνδεσης μπορεί να πραγματοποιηθεί από οποιαδήποτε κλήση (και οποιαδήποτε κατηγορία κίνησης) που φτάνει από ένα ONU. Έτσι, η μετάβαση από την κατάσταση $(j-1)$ στην κατάσταση (j) συμβαίνει με ρυθμό $(N - (j-1)S)\lambda$, όπου $N - (j-1)S$ είναι το πλήθος των ONU που δεν έχουν ακόμα συνδεθεί. Η αντίστροφη μετάβαση, από την κατάσταση (j) στην κατάσταση $(j-1)$, συμβαίνει με ρυθμό jQ , όπου ο ρυθμός εξυπηρέτησης ενός μήκους κύματος Q δίνεται από

$$Q = \sum_{k=1}^K \mu_k y_{k_F}(b_k) \frac{q_F(b_k)}{\sum_{i=1}^T q_F(i)} \quad (11-9)$$

όπου $y_{k_F}(b_k)$ είναι το μέσο πλήθος των κλήσεων κατηγορίας k , όταν b_k μονάδες εύρους ζώνης είναι κατειλημμένες στο μήκος κύματος, και $q_F(i)$ είναι η πιθανότητα της κατάστασης i στο μήκος κύματος για τις πεπερασμένες πηγές.

Το μέσο πλήθος των κλήσεων της κατηγορίας k δίνεται από

$$y_{k_F}(i) = \frac{a_k q_F(i - b_k)}{q_F(i)} \quad (11-10)$$

όπου $a_{k_F} = v_k \mu_k^{-1}$ είναι το προσφερόμενο φορτίο κίνησης από μια ελεύθερη πηγή κατηγορίας k .

Επειδή S ONUs χρησιμοποιούν το ίδιο μήκος κύματος, το συνολικό πλήθος των πηγών της κατηγορίας k που ζητούν εξυπηρέτηση σε ένα μήκος κύματος είναι $M_k S$. Έτσι, οι πιθανότητες καταστάσεων $q_F(i)$ υπολογίζονται από τον ακόλουθο αναδρομικό τύπο (EnMLM):

$$i q_F(i) = \sum_{k=1}^K a_{k_F} q_F(i - b_k) (SM_k - n_k(i) + 1), \quad i = 1, \dots, T \quad (11-11)$$

με $q_F(i) = 0, i < 0$ και $\sum_{i=0}^T q_F(i) = 1$. Όπου $n_k(i)$ είναι το πλήθος των κλήσεων της

κατηγορίας k που βρίσκονται υπό εξυπηρέτηση στο σύστημα όταν i από T μονάδες εύρους ζώνης είναι κατειλημμένες στο μήκος κύματος.

Για τον υπολογισμό του CBP B_k της κατηγορίας k ενός συγκεκριμένου ONU, βασιζόμαστε στην (11-11):

$$B_k = \sum_{j=T-b_k+1}^T q_F(j) \quad (11-12)$$

11.5.Μοντέλο για υβριδικά παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης, PON, τεχνολογίας WDM-OCDMA (Wavelength Division Multiplexing – Code Division Multiple Access).

Στην [46] γίνεται μελέτη των παθητικών υβριδικών δικτύων τεχνολογίας WDM-OCDMA (Wavelength Division Multiplexing – Optical Code Division Multiple Access) PON με δυναμική ανάθεση μήκους κύματος. Προτείνεται ένα μοντέλο απωλειών τηλεπικοινωνιακής κίνησης των *πιθανοτήτων αποτυχίας σύνδεσης* και των *πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων* (λόγω το παρεμβολών από άλλες κλήσεις). Η διαδικασία άφιξης των κλήσεων στο σύστημα θεωρείται Poisson. Η μαθηματική περιγραφή του μοντέλου βασίζεται στην μονοδιάστατη Μαρκοβιανή αλυσίδα.

11.5.1 Περιγραφή μοντέλου για το WDM-OCDMA PON

Θεωρούμε ένα υβριδικό WDM-OCDMA PON με N ONUs και C μήκη κύματος. Εξετάζουμε την άνω ζεύξη (κατεύθυνση από τα ONUs στον OLT). Στον OLT το πλήθος των οπτικών αποκωδικοποιητών που ανατίθεται σε κάθε μήκος κύματος είναι αρκετά μεγάλο, έτσι ώστε δεν συμβαίνει απώλεια κλήσης λόγω έλλειψης αποκωδικοποιητή. Κάθε ONU φιλοξενεί K κατηγορίες κίνησης. Ο ρυθμός άφιξης των κλήσεων της κατηγορίας k ($k = 1, \dots, K$) συμβολίζεται με λ_k , ενώ ο χρόνος εξυπηρέτησης είναι εκθετικά κατανομημένος με μέση τιμή μ_k^{-1} . Κατά τη διαδικασία εγκατάστασης της σύνδεσης ενός ONU με έναν OLT, όταν σε ένα ONU φτάνει μια κλήση, ενώ δεν υπάρχουν στην εξυπηρέτηση άλλες κλήσεις του ίδιου ONU, τότε αυτή ζητά ένα διαθέσιμο μήκος κύματος από τον OLT. Εάν υπάρχει ελεύθερο μήκος κύματος, αυτό ανατίθεται στον ONU για να εγκατασταθεί η σύνδεση. Μετά την εγκατάσταση της σύνδεσης όλες οι κλήσεις από αυτό το ONU εξυπηρετούνται μέσω του συγκεκριμένου μήκους κύματος, εφόσον οι παρεμβολές από γειτονικές κυψέλες (μέσα στο μήκος κύματος) παραμένουν κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο. Μια κλήση δεν πρέπει να γίνεται δεκτή στο σύστημα όταν αυξάνει τις παρεμβολές προς όλες τις κλήσεις που βρίσκονται ήδη υπό εξυπηρέτηση, πάνω από ένα ανεκτό όριο. Όταν όλες οι κλήσεις σε ένα μήκος κύματος τερματίζουν, η σύνδεση τερματίζει επίσης και το μήκος κύματος γίνεται ελεύθερο.

11.5.2 Πιθανότητα αποτυχίας σύνδεσης

Ο υπολογισμός της πιθανότητας αποτυχίας σύνδεσης (connection failure probability - CFP) βασίζεται στην Μαρκοβιανή αλυσίδα του Σχήματος 11-2, όπου η κατάσταση j αντιπροσωπεύει το πλήθος των κατειλημμένων μηκών κύματος στο

PON. Ο συνολικός ρυθμός άφιξης των κλήσεων από έναν ONU είναι $\lambda = \sum_{k=1}^K \lambda_k$.

Σχήμα 11-2: Μαρκοβιανή αλυσίδα ενός WDM-OCDMA PON.

Οι αιτήσεις για εγκατάσταση σύνδεσης δημιουργούν μια ψευδο-τυχαία διαδικασία. Έτσι, ο ρυθμός μετάβασης από την κατάσταση $(j-1)$ στην κατάσταση (j) είναι $(N-(j-1))\lambda$, επειδή στην κατάσταση $(j-1)$ το πλήθος των ONU που δεν έχουν ακόμα εγκαταστήσει σύνδεση είναι $N-(j-1)$. Η αντίστροφη μετάβαση, από την κατάσταση (j) στην κατάσταση $(j-1)$ συμβαίνει με ρυθμό jQ , όπου Q είναι ο ρυθμός εξυπηρέτησης ενός μήκους κύματος (θα υπολογιστεί στην ενότητα 11.5.3). Υπολογίζουμε την πιθανότητα $P(j)$ ότι j ($j=0,1,\dots,C$) μήκη κύματος είναι κατειλημμένα στο PON από τις εξισώσεις τοπικής ισορροπίας της Μαρκοβιανής αλυσίδας του Σχήματος 11-2.

$$P(j) = \left(\frac{\lambda}{Q}\right)^j \frac{\prod_{i=1}^j [N-(i-1)]}{j!} \left[\sum_{l=0}^C \left(\frac{\lambda}{Q}\right)^l \frac{\prod_{j=1}^l [N-(j-1)]}{l!} \right]^{-1} \quad (11-13)$$

Το CFP προσδιορίζεται από $P(C)$, επειδή μια εγκατάσταση σύνδεσης μπλοκάρει και χάνεται αν και μόνο αν όλα τα μήκη κύματος είναι κατειλημμένα.

11.5.3 Ρυθμός εξυπηρέτησης μήκους κύματος – Πιθανότητα Απώλειας Κλήσεων

Ο υπολογισμός του ρυθμού εξυπηρέτησης Q ενός μήκους κύματος βασίζεται στην κατανομή του κατελειμμένου εύρους ζώνης στο μήκος κύματος. Θεωρούμε ότι κάθε κατηγορία κίνησης k χαρακτηρίζεται από το ρυθμό μετάδοσης R_k , το ρυθμό σφάλματος bit (BER) μέσω της παραμέτρου $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_k$ και τον παράγοντα δραστηριότητας v_k . Διακρίνουμε την Παρεμβολή Πολλαπλής Πρόσβασης (Multiple Access Interference - MAI), I_{MAI} , και τον θερμικό θόρυβο P_N . Η αύξηση θορύβου NR ορίζεται ως λόγος της συνολικής λαμβανόμενης ισχύος I_{total} στον OLT, προς την ισχύ του θερμικού θορύβου P_N .

$$NR = \frac{I_{total}}{P_N} = \frac{I_{MAI} + P_N}{P_N} \quad (11-13)$$

Όταν στο σύστημα φτάνει μια νέα κλήση, ο Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων (Call Admission Control - CAC) εκτιμά το NR και εάν αυτό ξεπερνάει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, NR_{max} , τότε η νέα κλήση μπλοκάρεται και χάνεται.

Το *φορτίο μήκους κύματος* (wavelength load) ορίζεται ως ο λόγος της λαμβανόμενης ισχύος από όλους τους ενεργούς χρήστες προς τη συνολική λαμβανόμενη ισχύ:

$$n = \frac{I_{MAI}}{I_{MAI} + P_N} = \frac{NR - 1}{NR} \quad (11-14)$$

Η μέγιστη τιμή του φορτίου μήκους κύματος n_{max} αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της αύξησης θορύβου NR_{max} . Κάνοντας παρόμοια ανάλυση, όπως αυτή του W-EMLM, ο *παράγοντας φορτίου* (load factor) L_k μπορεί να θεωρηθεί ως η απαίτηση σε εύρος ζώνης μιας κλήσης κατηγορίας k :

$$L_k = \frac{(E_b / N_0)_k R_k}{W + (E_b / N_0)_k R_k} \quad (11-15)$$

όπου W είναι ο ρυθμός τσιπ (chip rate) του συστήματος. Μπορούμε να εκφράσουμε το φορτίο μήκους κύματος συναρτήσει του πλήθους των ενεργών χρηστών m_k και του παράγοντα φορτίου L_k :

$$n = \sum_{k=1}^K m_k L_k \quad (11-16)$$

Σύμφωνα με την πολιτική CAC, ο OLT αποφασίζει αν θα δεχτεί ή όχι τη νέα κλήση, ελέγχοντας την παρακάτω συνθήκη:

$$n + L_k \leq n_{\max} \quad (11-17)$$

Έστω $q(j)$ είναι η πιθανότητα το σύστημα να είναι στην κατάσταση j . Η *κατάληψη εύρους ζώνης* (bandwidth occupancy) $\Lambda(c|j)$ ορίζεται ως δεσμευμένη πιθανότητα c μονάδες εύρους ζώνης να είναι κατηλειμμένες όταν η κατάσταση είναι i :

$$\Lambda(c|i) = \sum_{k=1}^K P_k(i) [v_k \Lambda(c - b_k | i - b_k) + (1 - v_k) \Lambda(c | i - b_k)] \quad (11-18)$$

για $j = 1, \dots, i_{\max}$ και $c \leq j$, όπου $\Lambda(0|0)=1$ και $\Lambda(c|i)=0$ για $c > i$ και $i_{\max}$ αντιπροσωπεύει τη μέγιστη δυνατή κατάσταση του συστήματος.

Σε ένα σύστημα OCDMA, λόγω της MAI μια κλήση της κατηγορίας k μπορεί να μπλοκαριστεί σε οποιαδήποτε κατάσταση i με πιθανότητα $LB_k(i)$:

$$LB_k(i) = \sum_{c=0}^i \beta_k(c) \Lambda(c|i) \quad (11-19)$$

Η πιθανότητα $P_k(i)$ ότι το σύστημα φτάνει στην κατάσταση i με άφιξη μιας νέας κλήσης κατηγορίας k είναι:

$$P_k(i) = \frac{q(i - b_k) a_k (1 - LB_k(b_k)) b_k}{iq(i)} \quad (11-20)$$

όπου $a_k = \lambda_k / \mu_k$ είναι το προσφερόμενο φορτίο κίνησης.

Η πιθανότητα $q(i)$ υπολογίζεται από την παρακάτω αναδρομή:

$$iq(i) = \sum_{k=1}^K a_k b_k (1 - LB_k(i)) q(i - b_k) \quad (11-21)$$

με $q(i) = 0, i < 0$ και $\sum_{i=0}^T q(i) = 1$.

Ο υπολογισμός του ρυθμού εξυπηρέτησης Q ενός μήκους κύματος βασίζεται στο γεγονός ότι η απελευθέρωση ενός μήκους κύματος συμβαίνει με τον τερματισμό

της τελευταίας κλήσης που εξυπηρετεί (η οποία μπορεί να ανήκει σε οποιαδήποτε κατηγορία κίνησης). Η απελευθέρωση του μήκους κύματος λόγω της αποχώρησης μιας κλήσης κατηγορίας k συμβαίνει ότι το κατηλειμμένο εύρος ζώνης είναι b_k . Επομένως, η απελευθέρωση συμβαίνει με ρυθμό $\mu_k y_k(b_k) \hat{q}(b_k)$, όπου $y_k(b_k)$ είναι το μέσο πλήθος των κλήσεων της κατηγορίας k όταν στο μήκος κύματος είναι κατηλειμμένες b_k μονάδες εύρους ζώνης και $\hat{q}(i)$ είναι η υπό συνθήκη πιθανότητα να είναι κατηλειμμένες i μονάδες εύρους ζώνης, δεδομένου ότι το μήκος κύματος είναι κατηλειμμένο.

$$Q = \sum_{k=1}^K \mu_k y_k(b_k) \hat{q}(b_k) = \sum_{k=1}^K \mu_k y_k(b_k) \frac{q(b_k)}{\sum_{i=1}^{i_{\max}} q(i)} \quad (11-22)$$

Στον παραπάνω τύπο προσθέτουμε για όλες τις κατηγορίες κίνησης επειδή η τελευταία κλήση μπορεί να ανήκει σε οποιαδήποτε κατηγορία.

Το μέσο πλήθος $y_k(i)$ των κλήσεων κατηγορίας k όταν στο μήκος κύματος i μονάδες εύρους ζώνης είναι κατηλειμμένες δίνεται από την εξίσωση τοπικής ισορροπίας της Μαρκοβιανής αλυσίδας.

$$y_k(i) = a_k (1 - LB_k(i - b_k)) \frac{q(i - b_k)}{q(i)} \quad (11-23)$$

Το CBP των κλήσεων κατηγορίας k για ένα συγκεκριμένο ONU που χρησιμοποιεί το δίκτυο μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας τις πιθανότητες καταστάσεων πολλαπλασιασμένες με τους αντίστοιχους LBFs για όλες τις δυνατές καταστάσεις:

$$B_k = \sum_{i=0}^{i_{\max}} q(i) LB_k(i) \quad (11-24)$$

Βιβλιογραφία

- [1] J.M. Aein, A multi-user-class, blocked-calls-cleared demand access model, IEEE Trans. Commun. COM-26 (3) (1978) 378–385.
- [2] H. Akimaru, K. Kawashima, Teletraffic – Theory and Applications, Springer-Verlag, 1993.
- [3] E. Altman, “Capacity of multi-service cellular networks with transmission-rate control: a queueing analysis”, in proc. ACM Mobicom ’02, Atlanta, GA, 23–28 September 2002.
- [4] D. Awduche and Y. Rekhter, Multiprotocol Lambda Switching: Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Crossconnects, IEEE Communications Magazine vol. 39, no. 3, March 2001, pp. 111-116.
- [5] F. Baskett, K. M. Chandy, R. R. Muntz, F. G. Palacios, Open, closed and mixed networks of queues with different classes of customers, Journal of the ACM, Vol. 22., Issue 2, pp. 248-260, 1975.
- [6] T. Bonald, J. Virtamo, A Recursive Formula for Multirate Systems with Elastic Traffic, IEEE Communications Letters, Vol. 9, No. 8, pp. 753-755, August 2005.
- [7] T. Bonald, A. Proutiere, J. Roberts, J. Virtamo, Computational aspects of balanced fairness, in Proc. ITC 18, 2003, pp. 801–810.
- [8] I. B. Daskalopoulos, V. G. Vassilakis, and M. D. Logothetis, “Thorough analysis of downlink capacity in a WCDMA cell”, Proc. The 1st International Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems, MOBILIGHT 2009, Athens, Greece, May 18-20, 2009).
- [9] L. E. N. Delbrouck, “On the steady state distribution in a service facility with different peakedness factors and capacity requirements”, IEEE Trans. Commun., vol. 31, no. 11, November 1983, pp. 1209-1211.
- [10] J. Evans and D. Everitt, “On the teletraffic capacity of CDMA cellular networks”, Trans. Vehicular Tech., vol. 48, pp. 153-165, Jan. 1999.
- [11] G. Fodor, S. Racz, M. Telek, On providing blocking probability and throughput guarantees in a multi-service environment, International Journal of Communication Systems, Vol. 15, Issue 4, May 2002, pp. 257-285.

- [12] G. Fodor, M. Telek, "A recursive formula to calculate the steady state of CDMA networks", in *proc. International Teletraffic Congress 2005*, Beijing, China, September 2005, pp. 1285-1294.
- [13] G. Fodor and M. Telek: "Bounding the blocking probabilities in multirate CDMA networks supporting elastic services", *IEEE/ACM Trans. Netw.* 15(4), 2007, pp. 944-956.
- [14] K. Gilhousen et al., "On the capacity of a cellular CDMA system", *Trans. Vehicular Tech.*, vol. 40, pp. 303-311, May 1991.
- [15] M. Glabowski, M. Stasiak, A. Wisniewski, and P. Zwierzykowski, "Uplink blocking probability calculation for cellular systems with WCDMA radio interference and finite source population", in *Proc. HET-NETs'04*, Ilkley, U.K., 26-28 July 2004, pp. 80/1-80/10.
- [16] M. Glabowski and M. Stasiak, "An approximate model of the full-availability group with multi-rate traffic and a finite source population", in *Proc. MMB&PGTS'04*, Dresden, Germany, Sept. 2004, pp. 195-204.
- [17] M. Glabowski, S. Hanczewski, M. Stasiak "Calculation of Available Bandwidth for UMTS-HSDPA/HSUPA Users", *Proc. IEEE EUROCON 2007*, Warsaw, Poland, Sep. 9-12, 2007.
- [18] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS*, 3rd ed., John Wiley & Sons Ltd., 2004.
- [19] V. B. Iversen, V. Benetis, N. T. Ha, S. Stepanov, "Evaluation of Multi-service CDMA Networks with Soft Blocking", *Proc. of ITC Specialist Seminar*, Antwerp, Belgium, August/September 2004; pp. 223-227.
- [20] G. A. Kallos, V. G. Vassilakis, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Performance Modelling of W-CDMA Networks Supporting Elastic and Adaptive Traffic", in *Proc. 4th International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs 2006)*, Ilkley, West Yorkshire, U.K., 11-13 September, 2006, pp. 09/1-09/10.
- [21] G. A. Kallos, V. G. Vassilakis, and M. D. Logothetis "Call Blocking Probabilities in a W-CDMA Cell with Fixed Number of Channels and Finite Number of Traffic Sources", *Proc. of the 6th International Conference on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing - CSNDSP 2008*, Graz, Austria, 23-25 July 2008.

- [22] J. S. Kaufman, Blocking in a shared resource environment, IEEE Transactions on Communications, vol.29 (10) (1981), pp.1474-1481.
- [23] J. S. Kaufman, Blocking in a completely shared resource environment with state dependent resource and residency requirements, in Proceedings of the IEEE Conference, INFOCOM'92, 1992, pp. 2224-2232.
- [24] J. S. Kaufman, Blocking with retrials in a completely shared resource environment, Performance Evaluation, 15 (1992), pp. 99-113.
- [25] A. Mäder and D. Staehle, "Analytic Modeling of the WCDMA Downlink Capacity in Multi-Service Environments", ITC Specialist Seminar on Performance Evaluation of Wireless and Mobile Systems, Antwerp, Belgium, 2004, pp. 217-226.
- [26] M. Mehmet Ali, "Call-burst blocking and call admission control in a broadband network with bursty sources", Performance Evaluation, Vol. 38, Issue 1, pp. 1-19, September 1999.
- [27] A. Mishra, "Advanced Cellular Network Planning and Optimization". John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [28] M. J. Morrow, M. Tatipamula and A. Farrel, GMPLS The promise of the Next-Generation Optical Control Plane, IEEE Communications Magazine vol. 43, no. 7, July 2005, pp. 26-27.
- [29] I. Moscholios, M. Logothetis, G. Kokkinakis, Connection Dependent Threshold Model: A Generalization of the Erlang Multiple Rate Loss Model, Performance Evaluation, vol. 48, (1-4), pp. 177-200, May 2002.
- [30] I. Moscholios, M. Logothetis, P. Nikolaropoulos, Engset multi-rate state-dependent loss models, Performance Evaluation, vol. 59, Issues 2-3, February 2005, pp. 247-277.
- [31] I. D. Moscholios, M. D. Logothetis and G. K. Kokkinakis, "On the calculation of Blocking Probabilities in the Multirate State-Dependent Loss Models for Finite Sources", Mediterranean Journal of Computers and Networks, Vol. 3, No. 3, July 2007, pp. 100-109.
- [32] L. Popova, W. Koch, "Analytical Performance Evaluation of Mixed Services with Variable Data Rates for the Uplink of UMTS", Proc. of ISWCS'06, Valencia, Spain, September 2006.

- [33] S. Racz, B. P. Gero, G. Fodor, Flow level performance analysis of a multi-service system supporting elastic and adaptive services, *Performance Evaluation*, vol. 49, no. 1/4, pp. 451-469, 2002.
- [34] J. W. Roberts, A service system with heterogeneous user requirements, in: G. Pujolle (Ed.), *Performance of Data Communications systems and their applications*, North Holland, Amsterdam, 1981, pp. 423-431.
- [35] J. W. Roberts, *Teletraffic models for the Telecom 1 Integrated Services Network*. Proceedings of ITC-10, Montreal, Canada, 1982.
- [36] K. W. Ross, *Multiservice Loss Models for Broadband Telecommunication Networks*, Springer, Berlin, 1995.
- [37] M. Schwartz, *Mobile Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [38] D. Staehle, K. Leibnitz, K. Heck, B. Schröder, A. Weller, and P. Tran-Gia, "Approximating the othercell interference distribution inhomogeneous UMTS networks", in *Proc. IEEE VTC Spring*, (Birmingham, AL), May 2002.
- [39] D. Staehle and A. Mäder, "An analytic approximation of the uplink capacity in a UMTS network with heterogeneous traffic," in *proc. 18th International Teletraffic Congress (ITC18)*, Berlin, Sept. 2003.
- [40] G. Stamatelos, J. Hayes, "Admission control techniques with application to broadband networks", *Computer Communication*, vol. 17 , no. 9, September 1994, pp. 663-673.
- [41] G. Stamatelos, V. Koukoulidis, "Reservation-based bandwidth allocation in a radio ATM network", *IEEE/ACM Trans. Networking* vol. 5, no.3, June 1997, pp. 420-428.
- [42] M. Stasiak, M. Glabowski, A simple approximation of the link model with reservation by a one-dimensional Markov chain. *Performance Evaluation*, vol. 41, issues 2-3, pp.195–208, July 2000.
- [43] J. S. Vardakas, V. G. Vassilakis, and M. D. Logothetis, "Calculating Blocking Probabilities in Single-Hop WDM Traffic Groomed Optical Networks", in *Proc. 9th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2007)*, Rome, Italy, 1-5 July, 2007.
- [44] J. S. Vardakas, V. G. Vassilakis and M. D. Logothetis, "Performance Modelling and Analysis of Passive Optical Networks for Poisson Traffic", *Journal of Communications*, 4/2008, University of Zilina, Slovakia, 2008, pp. 38-44.

- [45] J. S. Vardakas, V. G. Vassilakis and M. D. Logothetis, "Blocking Analysis in Hybrid TDM-WDM Passive Optical Networks", in Proc. 5th International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs 2008), Karlskrona, Sweden, 18-20 February 2008.
- [46] J. S. Vardakas, V. G. Vassilakis and M. D. Logothetis, "Call-level analysis of hybrid WDM-OCDMA PONs", in Proc. 10th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2008), Athens, Greece, 22-26 June 2008.
- [47] J. S. Vardakas, V. G. Vassilakis and M. D. Logothetis, "Blocking Analysis in Hybrid TDM-WDM Passive Optical Networks supporting elastic traffic", Proc. IARIA 4th Advanced International Conference on Telecommunications, AICT 2008, Athens, Greece, 8-13 June 2008.
- [48] J. S. Vardakas, V. G. Vassilakis and M. D. Logothetis, "Loss Models in Traffic-Groomed WDM All-Optical Networks", Proc. of the 6th International Conference on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing - CSNDSP' 2008, Graz, Austria, 23-25 July 2008.
- [49] J. S. Vardakas, V. G. Vassilakis and M. D. Logothetis, "End-to-End Delay Analysis of the IEEE 802.11e with MMPP Input-Traffic", Proc. Third International Workshop on Ad Hoc, Sensor and P2P Networks (AHSP2009), in the framework of ISADS'09, Athens, March 23-25, 2009.
- [50] J. S. Vardakas, V. G. Vassilakis and M. D. Logothetis, "Blocking Analysis for Priority Classes in hybrid WDM-OCDMA Passive Optical Networks", Proc. Fifth IARIA Advanced International Conference on Telecommunications - AICT 2009, Venice, Italy, May 24-28, 2009).
- [51] V. G. Vassilakis, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Evaluation of Multi-rate Loss Models for Elastic Traffic", in Proc. 3rd International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs 2005), Ilkley, West Yorkshire, U.K., 18-20 July, 2005, pp. 24/1-24/10.
- [52] V. G. Vassilakis, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Evaluation of Multi-rate Loss Models for Elastic and Adaptive Services", in Proc. 12th Polish Teletraffic Symposium (PSRT 2005), Poznan, Poland, 19-20 September, 2005, pp. 7-16

- [53] V. G. Vassilakis, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, Evaluation of multi-rate loss models for elastic traffic, 3rd International Working Conference on Performance Modeling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs'05), Ilkley, West Yorkshire, U.K., July 18-20, 2005.
- [54] V. G. Vassilakis, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, Evaluation of multi-rate loss models for elastic and adaptive services, 12th Polish Teletraffic Symposium (PSRT '05), Poznan, Poland, September 19-20, 2005.
- [55] V. G. Vassilakis, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "The Extended Connection-Dependent Threshold Model for Elastic and Adaptive Traffic", in Proc. of 5th international symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2006), Patras, Greece, 19-22 July, 2006, pp. 42-45.
- [56] V. G. Vassilakis, I. D. Moscholios, M. D. Logothetis, and J. S. Vardakas, "Call-level Multi-rate Loss Models for Elastic Traffic", in Proc. 45th European Telecommunications Congress of FITCE, Athens, Greece, 30 August- 2 September, 2006, pp. 287-291.
- [57] V. G. Vassilakis, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Call-level Performance Modelling of Elastic and Adaptive Service-classes", in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC 2007), Glasgow, Scotland, 24-28 June, 2007.
- [58] V. G. Vassilakis, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "The Wireless Engset Multi-Rate Loss Model for the Call-level Analysis of W-CDMA Networks", in Proc. 18th IEEE Annual International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007), Athens, Greece, 3-6 September, 2007.
- [59] V. G. Vassilakis, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Call-Level Analysis of W-CDMA Networks Supporting Elastic Services of Finite Population", IEEE ICC 2008, Beijing, China, 19-23 May 2008.
- [60] V. G. Vassilakis and M. D. Logothetis, "The Wireless Engset Multi-rate Loss Model for the Handoff Traffic Analysis in W-CDMA Networks", Proc. 18th IEEE Annual International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2008), Cannes, France, 15-18 September, 2008.
- [61] V. G. Vassilakis, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Call-Level Analysis of W-CDMA Networks Supporting Elastic Services of Finite

- Population", in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC 2008), Beijing, China, 19-23 May, 2008.
- [62] V. G. Vassilakis, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Call-level Performance Modelling of Elastic and Adaptive Service-classes with Finite Population", IEICE Transactions on Communications, Vol. E91-B, Issue 1, 2008, pp. 151-163.
 - [63] V. G. Vassilakis, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "On the Handoff-Call Blocking Probability Calculation in W-CDMA Cellular Networks", Proc. IARIA 4th Advanced International Conference on Telecommunications, AICT 2008, Athens, Greece, 8-13 June 2008.
 - [64] V. G. Vassilakis, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Evaluation of a Call Admission Control Scheme in W-CDMA Cellular Networks", Proc. of the 6th International Conference on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing - CSNDSP 2008, Graz, Austria, 23-25 July 2008.
 - [65] A. Viterbi and A. Viterbi, "Erlang capacity of a power controlled CDMA system", IEEE Journal on Selected Areas in Commun., vol. 11, Aug. 1993.
 - [66] Μ. Δ. Λογοθέτης, "Θεωρία τηλεπικοινωνιακής κίνησης και εφαρμογές", εκδ. Παπασωτηρίου, 2001.
 - [67] Ι. Δ. Μοσχολιός, "Μοντέλα απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης τηλεπικοινωνιακής κίνησης – μοντέλα κατωφλίων, κλήσεων ON-OFF, ομαδικών κλήσεων", διδακτορική διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2004.
 - [68] V. G. Vassilakis, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "An Analytical Model for Elastic Service-classes in W-CDMA Networks", Journal of 'Wireless and Personal Communications' – WIRE – Special issue on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (accepted).
 - [69] B. Mukherjee, "Optical Communication Networks", McGraw-Hill, 1997.
 - [70] K. M. Sivalingam, S. Subramaniam, "Emerging Optical Network Technologies", Springer Science, 2005.
 - [71] N. Bouabdallah, "Sub-Wavelength Solutions for Next-Generation Optical Networks", IEEE Communications Magazine, pp. 36-43, August 2007.
 - [72] G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition", John Wiley, 2002.

- [73] B. Wu and K. L. Yeung, "Virtual Topology Design for OBS Optical Networks", Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), 2007.
- [74] Z. ChongFu, Q. Kun, and X. Bo, "Passive optical networks based on optical CDMA: Design and system analysis", Chinese Science Bulletin, Vol. 52, No. 1, pp. 118-126, January 2007.
- [75] K. Fouli and M. Maier, "OCDMA and Optical Coding: Principles, Application, and Challenges", IEEE Communications Magazine, August 2007.

Δημοσιεύσεις

A. Περιοδικά

1. **V. G. Vassilakis**, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, “Call-level Performance Modelling of Elastic and Adaptive Service-classes with Finite Population”, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E91-B, Issue 1, 2008, pp. 151-163.
http://www.jstage.jst.go.jp/article/transcom/E91.B/1/E91.B_151/article
2. J. S. Vardakas, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, “Performance Modelling and Analysis of Passive Optical Networks for Poisson Traffic”, *Journal of Communications*, 4/2008, *University of Zilina, Slovakia*, 2008, pp. 38-44.
3. **V. G. Vassilakis**, G. A. Kallos, I. D. Moscholios and M. D. Logothetis, “On Call Admission Control in W-CDMA Networks Supporting Handoff Traffic”, *Ubiquitous Computing and Communication Journal - Special issue on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, 9/1/2009.
http://www.ubicc.org/files/pdf/UBICC_submission_325_325.pdf
4. J. S. Vardakas, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, “Call-level analysis of hybrid WDM-OCDMA Passive Optical Networks with finite traffic sources“, *Journal on Information and Communications Technologies*, Special issue on Tools, Modeling Techniques and Analysis Aspects of Heterogeneous Networks, Volume E-1, Number 1(5), 06/08/2009.
<http://www.tapchibcvn.gov.vn/News/PrintView.aspx?ID=20407>
5. G. A. Kallos, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, “Call-Level Analysis of a W-CDMA Cell with Finite Population and Interference Cancellation” (letter), *European Transactions on Telecommunications*, 10 Oct. 2010, DOI: 10.1002/ett.1446
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ett.1446/pdf>

6. **V. G. Vassilakis**, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "An Analytical Model for Elastic Service-classes in W-CDMA Networks", *Journal of 'Wireless and Personal Communications' – WIRE* – Special issue on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (accepted).

B. Συνέδρια

7. **V. G. Vassilakis**, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Evaluation of Multi-rate Loss Models for Elastic Traffic", *Proc. 3rd International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs 2005)*, Ilkley, West Yorkshire, U.K., 18-20 July, 2005, pp. 24/1-24/10.
8. **V. G. Vassilakis**, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Evaluation of Multi-rate Loss Models for Elastic and Adaptive Services", *Proc. 12th Polish Teletraffic Symposium (PSRT 2005)*, Poznan, Poland, 19-20 September, 2005, pp. 7-16
9. **V. G. Vassilakis**, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "The Extended Connection-Dependent Threshold Model for Elastic and Adaptive Traffic", *Proc. of 5th international symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2006)*, Patras, Greece, 19-22 July, 2006, pp. 42-45.
10. **V. G. Vassilakis**, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis and John S. Vardakas, "Call-level Multi-rate Loss Models for Elastic Traffic", *Proc. 45th European Telecommunications Congress of FITCE*, Athens, Greece, 30 August- 2 September, 2006, pp. 287-291.

Αριθμός Επεροαναφορών: 3

11. G. A. Kallos, **V. G. Vassilakis**, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, “Performance Modelling of W-CDMA Networks Supporting Elastic and Adaptive Traffic”, in *Proc. 4th International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs 2006)*, Ilkley, West Yorkshire, U.K., 11-13 September, 2006, pp. 09/1-09/10.

Αριθμός Ετεροαναφορών: 8

12. **V. G. Vassilakis**, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, “Call-level Performance Modelling of Elastic and Adaptive Service-classes”, *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC 2007)*, Glasgow, Scotland, 24-28 June, 2007.

13. J. S. Vardakas, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, “Calculating Blocking Probabilities in Single-Hop WDM Traffic Groomed Optical Networks”, *Proc. 9th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2007)*, Rome, Italy, 1-5 July, 2007.

Αριθμός Ετεροαναφορών: 1

14. **V. G. Vassilakis**, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, “The Wireless Engset Multi-Rate Loss Model for the Call-level Analysis of W-CDMA Networks”, *Proc. 18th IEEE Annual International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007)*, Athens, Greece, 3-6 September, 2007.

Αριθμός Ετεροαναφορών: 2

15. J. S. Vardakas, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, “Blocking Analysis in Hybrid TDM-WDM Passive Optical Networks”, *Proc. 5th International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs 2008)*, Karlskrona, Sweden, 18-20 February 2008.

16. **V. G. Vassilakis**, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Call-Level Analysis of W-CDMA Networks Supporting Elastic Services of Finite Population", *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC 2008)*, Beijing, China, 19-23 May, 2008.
17. J. S. Vardakas, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, "Blocking Analysis in Hybrid TDM-WDM Passive Optical Networks supporting elastic traffic", *Proc. IARIA 4th Advanced International Conference on Telecommunications, AICT 2008*, Athens, Greece, 8-13 June 2008.
18. **V. G. Vassilakis**, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "On the Handoff-Call Blocking Probability Calculation in W-CDMA Cellular Networks", *Proc. IARIA 4th Advanced International Conference on Telecommunications, AICT 2008*, Athens, Greece, 8-13 June 2008.
19. J. S. Vardakas, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, "Call-level analysis of hybrid WDM-OCDMA PONs", *Proc. 10th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2008)*, Athens, Greece, 22-26 June 2008.
20. **V. G. Vassilakis**, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Evaluation of a Call Admission Control Scheme in W-CDMA Cellular Networks", *Proc. of the 6th International Conference on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing - CSNDSP 2008*, Graz, Austria, 23-25 July 2008.
21. G. A. Kallos, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis "Call Blocking Probabilities in a W-CDMA Cell with Fixed Number of Channels and Finite Number of Traffic Sources", *Proc. of the 6th International Conference on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing - CSNDSP 2008*, Graz, Austria, 23-25 July 2008.

Αριθμός Επεροαναφορών: 8

22. J. S. Vardakas, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, “Loss Models in Traffic-Groomed WDM All-Optical Networks”, *Proc. of the 6th International Conference on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing – CSNDSP 2008*, Graz, Austria, 23-25 July 2008.

Αριθμός Ετεροαναφορών: 1

23. **V. G. Vassilakis** and M. D. Logothetis, "The Wireless Engset Multi-rate Loss Model for the Handoff Traffic Analysis in W-CDMA Networks", *Proc. 18th IEEE Annual International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2008)*, Cannes, France, 15-18 September, 2008.

Αριθμός Ετεροαναφορών: 8

24. J. S. Vardakas, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, “End-to-End Delay Analysis of the IEEE 802.11e with MMPP Input-Traffic”, *Proc. Third International Workshop on Ad Hoc, Sensor and P2P Networks (AHSP2009)*, in the framework of ISADS'09, Athens, March 23-25, 2009.

25. I. B. Daskalopoulos, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, “Thorough analysis of downlink capacity in a WCDMA cell”, *Proc. The 1st International Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems, MOBILIGHT 2009*, Athens, Greece, May 18-20, 2009.

26. J. S. Vardakas, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, “Blocking Analysis for Priority Classes in hybrid WDM-OCDMA Passive Optical Networks”, *Proc. Fifth IARIA Advanced International Conference on Telecommunications - AICT 2009*, Venice, Italy, May 24-28, 2009).

Αριθμός Ετεροαναφορών: 2

27. I. D. Moscholios, **V. G. Vassilakis**, M. D. Logothetis, and A. C. Boucouvalas, “Blocking Equalization in the Erlang Multirate Loss Model for Elastic Traffic”, *Proc. of 2nd Int. Conference on Emerging Network Intelligence, EMERGING 2010*, Florence, Italy, 25-30 October 2010.

Γ. Κεφάλαια σε βιβλία

28. **V. G. Vassilakis**, G. A. Kallos, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, “An Analytical Model for Elastic Service-classes in W-CDMA Networks”, in the book, Heterogeneous Networks, Vol. II - Performance Analysis & Applications (D.SEA.6.1.6: Part of Final Deliverables of NoE Euro-NGI to EC), River Publishers, 2008 (accepted).
29. J. S. Vardakas, **V. G. Vassilakis**, and M. D. Logothetis, “Blocking Analysis in Hybrid TDM-WDM Passive Optical Networks”, in the book, Heterogeneous Networks, Vol. II - Performance Analysis & Applications (D.SEA.6.1.6: Part of Final Deliverables of NoE Euro-NGI to EC), River Publishers, 2008 (accepted).
30. M. D. Logothetis, **V. G. Vassilakis**, and I. D. Moscholios, “Call-level Performance Modeling and QoS Assessment of W-CDMA Networks”, accepted to be included in the book "Wireless Networks: Research, Technology and Applications", Nova Science Publishers, New York, USA, 2008 (accepted).

Συνολικός Αριθμός Ετεροαναφορών: 33