ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
Τομέας Εφαρμογών Πληροφορικής

Θέματα σε Χρέωση και Ανάλυση Επίδοσης Κίνησης ATM

Εργασία Μ.Δ.Ε.

Φώτιος Χ. Χαρμαντζής

ΗΡΑΚΛΕΙΟ, ΚΡΗΤΗ
Ιούνιος 1997

Θέματα σε Χρέωση και Ανάλυση Επίδοσης Κίνησης ATM

Φώτιος Χ. Χαρμαντζής

Εργασία Μ.Δ.Ε.

Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Περίληψη

Αυτή η εργασία ΜΔΕ επικεντρώνεται στην ανάπτυξη και την τελειοποίηση υψηλού επιπέδου εργαλείων, βασισμένων σε μοντέλα εφαρμοσμένων πιθανοτήτων, με σκοπό την χρησιμοποίησή τους για αξιολόγηση επιδόσεων δικτύων ATM, για χρέωση και κοστολόγηση υπηρεσιών, και για αποδοτική υποκατάσταση κίνησης.

Η στατιστική πολυπλεξία και η κοινή χρήση πόρων θα είναι ουσιώδη ζητήματα στα δίκτυα ATM του μέλλοντος, και μπορούν να επιτευχθούν με ανάλυση επίδοσης των δικτύων βάσει της έννοιας του ισοδυνάμου εύρους ζώνης. Η σημαντική αυτή έννοια έχει σημαντικό ρόλο, όντας παράμετρος που συνοψίζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά της πηγής στις διάφορες χρονικές κλίμακες. Όταν το ισοδύναμο εύρος ζώνης μπορεί να ορισθεί και υπολογισθεί κατάλληλα, τότε προβλήματα όπως ο Έλεγχος Αποδοχής Κλήσης (ΕΑΚ) και η κοστολόγηση, απλοποιούνται πάρα πολύ. Ωστόσο, αναλυτικές μέθοδοι είναι συχνά δύσκολο να εφαρμοσθούν (αν όχι αδύνατο), ειδικά όταν εμπλέκονται πηγές πραγματικής κίνησης. Κατά συνέπεια, η προσομοίωση και οι on-line μέθοδοι είναι εξαιρετικά πολύτιμα εργαλεία για την σχετική διερεύνηση των ζητημάτων αυτών.

Χρησιμοποιούμε εκτεταμένα το *"ασυμπτωτικό μεγάλου πλήθους πηγών"*, που προκύπτει από την Θεωρία των Μεγάλων Αποκλίσεων. Βασίζεται σε ένα μοντέλο πολυπλεξίας, όπου η επαλληλία N τύπων από πηγές κίνησης τροφοδοτούν σύνδεσμο εξόδου μεταγωγέα ATM στον οποίο η χωρητικότητα Nc και ο χώρος ενταμίευσης Nb αυξάνουν αναλογικά με το N. Για τον υπολογισμό της Ποιότητας Εξυπηρέτησης, χρησιμοποιούμε την Πιθανότητα Απώλειας Κελιού (ΠΑΚ), σαν το πρωταρχικό κριτήριο.

Η εργασία εστιάζει σε δύο προβλήματα τα οποία σχετίζονται με τις παραπάνω έννοιες: στην χρέωση και κοστολόγηση υπηρεσιών και στην υποκατάσταση ροής πραγματικής κίνησης με ισοδύναμη ροή μοντέλου κίνησης.

Το πρώτο μέρος, ασχολείται με την αποτίμηση σχημάτων χρέωσης για υπηρεσίες ευρυζώνιων δικτύων. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας ζήτημα για τις μοντέρνες τηλεπικοινωνίες, και τελευταία έχει τύχει αξιοσημείωτης προσοχής. Συγκεκριμένα, μελετούμε, υλοποιούμε και επαληθεύουμε δύο συναρτήσεις χρέωσης βασιζόμενες σε μοντέλα τα οποία εκφράζουν απαιτήσεις για δίκαιη χρέωση, σύμφωνη με την αποδοτική χρήση των δικτυακών πόρων. Αυτές οι συναρτήσεις χρέωσης βασίζονται σε άνω

φράγματα του ισοδυνάμου εύρους ζώνης. Υπολογίζουμε αριθμητικά αυτές τις τελικές χρεώσεις, και τις συγκρίνουμε με αυτή που βασίζεται στον ακριβή υπολογισμό του ισοδυνάμου εύρους ζώνης στο τέλος της κλήσης. Μέσω αυτής της συγκριτικής μελέτης, προσεγγίζουμε την καταλληλότητα αυτών των σχημάτων για χρέωση διαφορετικών πηγών κίνησης. Πειράματα προσομοίωσης για τυπικές κλήσεις πραγματικών (MPEG video) και μοντελοποιημένων Markov-Modulated Fluid (MMF) πηγών, παρουσιάζονται. Τα σχήματα που εξετάζονται, έχουν χαμηλό κόστος υλοποίησης και μπορεί να οδηγήσουν στην αποδοτική χρήση των δικτυακών πόρων, όταν η χρέωση συνδυαστεί με τον ΕΑΚ.

Το δεύτερο μέρος αυτής της εργασίας, θίγει ζητήματα υποκατάστασης κίνησης, παραγωγής ισοδύναμης κίνησης, και αξιολόγησης μοντέλων για πραγματικές MPEG πηγές video. Συγκεκριμένα, για την παραγωγή ισοδύναμης κίνησης, αναζητούμε μοντελοποιημένη πηγή (γνωστών στατιστικών), ικανή να αντικαταστήσει σε ένα πολυπλέκτη, ένα υποσύνολο πραγματικών πηγών, χωρίς να μεταβληθεί η Ποιότητα Εξυπηρέτησης. Θεωρούμε δύο διαφορετικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για να χαρακτηρίσουν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Δημιουργήθηκε κίνηση από ΑυτοΠαλινδρομούμενες(1) και ON/OFF Markov-Modulated Fluid πηγές, για να καταφέρουμε την ισοδύναμη κίνηση. Για την εύρεση κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους των μοντέλων, εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι, μια παραδοσιακή και μια νέα πιο προχωρημένη. Η εκτίμηση των δύο αυτών μεθόδων, βασίζεται σε πειράματα προσομοίωσης για πραγματική και μοντελοποιημένη κίνηση εισόδου σε ένα σύνδεσμο ATM, πολιτικής εξυπηρέτησης FCFS. Μέσω μελέτης προσομοίωσης διερευνήθηκαν τόσο η προτεινόμενη νέα μέθοδος όσο και η παραδοσιακή, και συγκρίθηκαν οι αντίστοιχες αποδόσεις τους.

Επόπτης Καθηγητής:
Κώστας Κουρκουμπέτης,
Καθηγητής Επιστήμης Υπολογιστών,
Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Topics on Charging and Performance Analysis of ATM Traffic

Fotios C. Harmantzis

M.Sc. Thesis Dissertation

Department of Computer Science
University of Crete

Abstract

This Master's thesis concentrates on the development and refinement of sophisticated tools, based on applied probability models, to be used for the evaluation of the performance of ATM networks, for charging and pricing services, and for the effective traffic substitution.

Statistical multiplexing and resource sharing, will be essential aspects in future ATM networks. These can be attained by analysing the performance of such networks on the basis of the concept of effective bandwidth. In fact, this concept has a unifying role as a parameter summarising the statistical characteristics of sources over different time scales. When an effective bandwidth can be appropriately defined and measured, then problems such as Call Admission Control (CAC) and pricing greatly simplify. However, analytical methods are usually hard to apply (if at all possible), particularly when real traffic sources are involved. Thus, simulation and on-line methods are invaluable tools for related investigations.

An existing asymptotic result, justified by the theory of large deviations, is employed in our work. This is based on a multiplexing model, where the superposition of N groups of traffic sources feeds an ATM link in which the capacity Nc and buffer size Nb also increase proportionally to N; this result is known as the *"large N asymptotic"*. A measure of the Quality-of-Service (QoS) offered, is the cell loss probability (CLP), which is used as the primary QoS criterion.

This thesis focuses on two main problems related to the concepts mentioned above: charging and pricing network services, and substitution of real traffic streams with an equivalent stream of modelled traffic.

The first part, deals with evaluating charging schemes for broadband network services. This is an extremely vital subject in modern telecommunications an has recently attracted considerable attention. More specifically, we study, implement and validate two charging formulae based on models that address needs such as fair charging according to effective usage of network resources. The charging formulae are based on bounds for the effective bandwidth. We compute these charges, and compare them to those based on the accurate calculation of the effective bandwidth of the source at the end of the call. Through this comparative study, we assess appropriateness of these schemes for charging

different traffic sources. Simulation experiments for typical calls from real (MPEG video) and Markov-Modulated Fluid (MMF) sources, are performed. The schemes investigated have low implementation cost, and can lead to efficient usage of network resources when pricing is combined with CAC.

The second part of this thesis concerns aspects on traffic substitution, derivation of equivalent traffic, and assessment of models for real MPEG video sources. In particular, in deriving the equivalent traffic, we are seeking for a modelled source (with known statistics) that may replace a given subset of real sources feeding a multiplexer, without affecting the QoS. Two different models, which are widely used to characterize real-time services are considered. We generate traffic from AutoRegressive(1) and 'ON/OFF MMF' sources, in order to achieve equivalent traffic. Two methods, a traditional one and a more elaborate new method, are employed to derive values of the appropriate model parameters. Evaluation of these methods is based on simulation experiments for real and modelled input traffic in an ATM link which serves a single buffer in a FCFS manner. A simulation study was conducted which investigated both the proposed new methodology and the traditional, and compared their respective performance.

Su*per*v*isor*:
Costas Courcoubetis,
Professor of Computer Science,
University of Crete.

Περιεχόμενα

Περίληψη ii

A*bstract* iv

Εισαγωγή 1

1.1 Χρέωση και κοστολόγηση δικτυακών υπηρεσιών 4

1.2 Η σημασία κατανόησης και μοντελοποίησης της κίνησης ATM 10

1.3 Η οργάνωση του κειμένου και η συνεισφορά της παρούσας εργασίας .. 12

Ισοδύναμο εύρος ζώνης πηγής 15

2.1 Εισαγωγή στην έννοια του ισοδυνάμου εύρους ζώνης 17

2.2 Χρέωση βασισμένη στο ισοδύναμο εύρος ζώνης 20

2.3 Ασυμπτωτικό μοντέλο πολυπλεξίας 23

Μηχανισμοί Χρέωσης για Δίκτυα ATM 27

3.1 Η "Απλή" φόρμουλα χρέωσης 29

3.2 Σχήμα χρέωσης βασισμένο στην "Φορολόγηση με Διαβαθμίσεις" ("Tax-Band") 35

3.3 Στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης 40

3.4 Ρεαλιστική κίνηση video με κωδικοποίηση MPEG 46

3.5 Σύγκριση των σχημάτων χρέωσης με αριθμητικά αποτελέσματα 49

3.6 Συμπεράσματα - Μελλοντικές κατευθύνσεις 54

Υποκατάσταση Κίνησης ATM 55
4.1 Ορισμός του προβλήματος 57
4.2 Χαρακτηρισμός ρεαλιστικής κίνησης 58
4.3 Το αθροιστικό MMF μοντέλο 63
4.4 Το αυτοπαλινδρομούμενο Gaussian μοντέλο AR(1) 66
4.5 Υποκατάσταση βάσει στατιστικών χαρακτηριστικών 68
4.6 Υποκατάσταση με βάση με βάση τις ασυμπτωτικές ιδιότητες του ισοδυνάμου εύρους ζώνης 70
4.7 Πειραματική αξιολόγηση των μεθόδων υποκατάστασης 73
4.8 Συμπεράσματα - Μελλοντικές κατευθύνσεις 77

Παράρτημα 79
Σχέση σχημάτων χρέωσης με φράγματα του ισοδυνάμου εύρους ζώνης

Βιβλιογραφία 83
Αντιστοιχία Αγγλικών - Ελληνικών όρων 91

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα δίκτυα επικοινωνίας στηρίζονται είτε σε *μεταγωγή κυκλωμάτων* είτε σε *μεταγωγή πακέτων*. Τα πρώτα δεσμεύουν τους απαιτούμενους για τον χρήστη πόρους, ώστε να του εξασφαλίσουν την αναμενόμενη Ποιότητα Εξυπηρέτησης.

Και ενώ Σταθερού Ψηφιακού Ρυθμού δεδεμένα, όπως αυτά που εκπέμπονται από μια πηγή φωνής, ταιριάζουν σε αυτό τον τύπο μεταγωγής, κίνηση εκρηκτικών πηγών, π.χ. δεδομένα από υπηρεσίες υπολογιστών, υποχρησιμοποιούν τους πόρους λόγω της απρόβλεπτης φύσης τους. Για αυτό το λόγο δίκτυα δεδομένων, στηριζόμενα σε μεταγωγή πακέτων, αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του '60. Έτσι οι κοινόχρηστοι πόροι του δικτύου αξιοποιούνταν με πιο αποδοτικό τρόπο. Άμεση συνέπεια αυτού του τρόπου μεταγωγής, ήταν η αδυναμία εξασφάλισης (με μόνο ενδεχόμενο κάποια προσεγγιστική πρόβλεψη) κάποιας Ποιότητας Εξυπηρέτησης (π.χ. καθυστέρηση) για τους χρήστες, δεδομένου ότι κάτι τέτοιο ήταν άμεσα εξαρτώμενο από την ταυτόχρονη χρήση πόρων από άλλους χρήστες.

Αυτός ο διαχωρισμός των δικτύων τείνει να εκλείψει, με την ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακών δικτύων υψηλών ταχυτήτων (βασισμένων σε οπτικές ίνες) που ήδη έχουν τεθεί σε λειτουργία ή σχεδιάζονται για το άμεσο μέλλον. Ενα πρώτο χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων είναι η ικανότητά τους να εξυπηρετούν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, π.χ. φωνή, video, δεδομένα, με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Αυτή η τάση για *ενοποίηση* διαφορετικών τεχνολογιών δικτύων και υπηρεσιών, είναι μια νέα πρόκληση για την κοινότητα (ερευνητική και βιομηχανική) των ανθρώπων που ασχολούνται με τηλεπικοινωνίες. Μέσα από αυτή την κοινή προσπάθεια που βρίσκεται σε εξέλιξη, έχουν σχηματοποιηθεί τα χαρακτηριστικά αυτών των μελλοντικών δικτύων, που θα είναι ικανά να υποστηρίζουν:

- Υπηρεσίες κατανεμημένου λογισμικού και αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες πολυμέσων
- Ευρυζώνιους ρυθμούς και ρυθμούς στενού εύρους
- Εκρηκτική κίνηση και κίνηση σταθερού ψηφιακού ρυθμού
- Υπηρεσίες με σύνδεση και χωρίς σύνδεση

- Συνδέσεις από σημείο-σε-σημείο, από σημείο-σε-πολλαπλά σημεία και πολλαπλής αποστολής

Το δεύτερο χαρακτηριστικό των δικτύων υψηλών επιδόσεων, εκτός της υποστήριξης ποικίλων εφαρμογών, θα είναι η υποστήριξη *Ποιότητας Εξυπηρέτησης* για κάθε τελικό χρήστη. Για κάθε κατηγορία εφαρμογής, ορίζεται κάποιο διάνυσμα παραμέτρων απόδοσης που αναφέρονται σε επιθυμητή καθυστέρηση (μέγιστη, ελάχιστη, διακύμανη, ή/και συγκεκριμένη τιμή), πιθανότητα φραγής κλήσεως, πιθανότητα απόρριψης πακέτου (ή κελιού), διέλευση κτλ.

Αυτή τη στιγμή, η προσπάθεια εξάλειψης του διαχωρισμού των δικτύων μεταγωγής προσεγγίζεται με δυο τρόπους:

1. Ο πρώτος, ο **Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης** (ATM), βασίζεται σε ένα μικρό, σταθερού μήκους πακέτο (48-bytes πεδίο πληροφορίας + 5-bytes επικεφαλίδα), που ονομάζεται κελί. Ο ATM είχε επιλεγεί από την ITU-T (πρώην CCITT), σαν ο κατάλληλος τρόπος μετάδοσης για τα *Ευρυζώνια Ψηφιακά Δίκτυα Ενοποιημένων Υπηρεσιών* (B-ISDNs), ([32]). Η παγκοσμιοποίηση των προιόντων ATM έχει επισπευσθεί τα τελευταία χρόνια κυρίως λόγω των προσπαθιών του ATM-Forum, μιας ομάδας μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα που αποτελείται από μερικές εκατοντάδες κατασκευαστών, πωλητών, τηλεπικοινωνιακών φορέων, και άλλων στελεχών οργανισμών. Αυτός ο τρόπος, ο οποίος προβάλλεται σαν μια αρχιτεκτονική μακράς διαρκείας, βασίζεται σε υψηλές ταχύτητες μεταγωγής και εγγυάται υψηλά επίπεδα Ποιότητας Εξυπηρέτησης. Σαν σοβαρό μειονέκτημα τονίζεται από τους επικριτές του η πολυπλοκότητα της σηματοδότησης, ειδικά για πολλαπλή αποστολή.

2. Συγχρόνως, σημαντική προσπάθεια καταβάλλεται για την αναβάθμιση της σημερινής αρχιτεκτονικής του Internet. Κεντρικό ρόλο παίζει το πρωτόκολλο **IP** (Internet Protocol) ([19]). Παρότι είναι δίκτυο μεταγωγής πακέτων, το Internet ήδη παρέχει υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όπως φωνής και video, ιδιαίτερα μέσω του Mbone. Αυτή η βασισμένη στο IP προσπάθεια, τυγχάνει σοβαρής υποστήριξης από διάφορα ερευνητικά κέντρα και εταιρείες, λόγω της ευρείας αποδοχής και δημοσιότητας των υπηρεσιών και προιόντων Internet (τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια αλματώδη εξάπλωση). Παρόλα αυτά, πολλά ζητήματα είναι ακόμα ανοιχτά, κυρίως γύρω από προβλήματα δρομολόγησης, μεταγωγής ετικετών και υποστήριξης εγγυημένης Ποιότητας Εξυπηρέτησης ([63]).

Μια περιεκτική ανασκόπηση της εξέλιξης των δικτύων μέσα από συγκεκριμένες τεχνολογίες, και της πορείας σύγκλισης προς τα ενοποιημένα δίκτυα του μέλλοντος, περιέχεται στο βιβλίο των Warland and Varaiya (1996).

Στην παρούσα εργασία μελετάμε θέματα χρέωσης υπηρεσιών δικτύων ATM και αξιολόγησης επιδόσεων των δικτύων αυτών. Μερικά βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας αυτών των δικτύων αναφέρονται στα επόμενα κεφάλαια και τα θεωρούμε δεδομένα. Για περισσότερο τεχνικές και λεπτομερείς αναφορές συστήνουμε στον αναγνώστη να καταφύγει στα [2], [54].

Όσο αφορά την χρέωση και κοστολόγηση των υπηρεσιών, μελετάμε, υλοποιούμε με βοήθεια προσομοίωσης και αποτιμάμε δύο σχήματα χρέωσης που μπορούν να

χρησιμοποιηθούν ως μηχανισμοί χρέωσης βάσει χρήσεως των δικτυακών πόρων. Η ποσοτικοποίηση της χρήσης βασίζεται στην θεμελιώδη έννοια του ισοδυνάμου εύρους ζώνης πηγής. Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας είναι να επαληθεύσει την καταλληλότητα και ορθότητα αυτών των μηχανισμών, μέσω πειραμάτων χρέωσης κλήσεων πηγών σε περιβάλλοντα ATM.

Η δεύτερη ενότητα αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο πρωτότυπο πρόβλημα υποκατάστασης πραγματικής κίνησης ATM, με μια ισοδύναμη ώστε να διατηρείται η παρεχόμενη Ποιότητα Εξυπηρέτησης. Για την επίλυση αυτού του ζητήματος, θίγονται θέματα χαρακτηρισμού κίνησης video, μοντελοποίησης των ανάλογων πηγών και παραγωγής κίνησης σε εξομοιούμενα δικτυακά περιβάλλοντα. Αρχικά επιχειρείται μια μέθοδος υποκατάστασης που στηρίζεται σε παραδοσιακές τεχνικές, και κατόπιν παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος που στηρίζεται σε ασυμπτωτικές ιδιότητες του μοντέλου πολυπλεξίας πηγών. Οι μέθοδοι και τα μοντέλα κίνησης αξιολογούνται ως προς την επίδοσή τους, με πειράματα προσομοίωσης.

1. Χρέωση και κοστολόγηση δικτυακών υπηρεσιών

Η χρέωση και κοστολόγηση υπηρεσιών δικτύων υψηλών επιδόσεων είναι ζωτικής σημασίας για την βιώσιμη, επιτυχή λειτουργία και ανάπτυξή τους. Αυτή η διαπίστωση είναι κοινή, και γι'αυτό το ζήτημα της χρέωσης έχει απασχολήσει αρκετούς επιστήμονες ερευνητικών κέντρων και βιομηχανιών, από τα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας. Το πρόβλημα είναι πολύπλοκο λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών των υπηρεσιών που παρέχουν τα ενοποιημένα δίκτυα (σε σύγκριση με π.χ. τηλεφωνικά, καλωδιακής τηλεόρασης), είτε βασίζονται στον ATM είτε στο IP. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει ένας ευρέως αποδεκτός τρόπος χρέωσης των δικτυακών υπηρεσιών. Είναι ένα ανοιχτό ζήτημα και οι αρμόδιοι οργανισμοί δεν έχουν καταλήξει σε πρότυπα, δεδομένου ότι η προσπάθεια είναι σε εξέλιξη ([9]).

Παρά ταύτα, η συνεισφορά της έρευνας αυτά τα χρόνια ήταν τέτοια ώστε βοήθησε να καταλήξουμε σε κάποιες επιθυμητές ιδιότητες που πρέπει να ικανοποιεί ένα σχήμα χρέωσης, τι θα πρέπει να αποφεύγεται, ποιοί παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν, την αρχιτεκτονική ενός τέτοιου μηχανισμού, τί σκοπούς πρέπει να ικανοποιεί, κτλ. Τα σχήματα χρέωσης που μελετούμε στην παρούσα εργασία, ακολουθούν (σε διαφορετικό βαθμό το καθένα), αυτά τα συμπεράσματα-αρχές.

Όπως είναι φυσικό, οι λόγοι που ωθούν τηλεπικοινωνικούς και δικτυακούς φορείς σε αναζήτηση απλών σχημάτων χρέωσης, είναι η μεγιστοποίηση των κερδών τους από τις υπηρεσίες που παρέχουν, αφού καλύψουν τα έξοδα λειτουργίας τους (τα έξοδα αυτά προέρχονται από αγορά και συντήρηση εξοπλισμού, αμοιβές προσωπικού κτλ). Όμως, για τους μηχανικούς και γενικότερα όσους ασχολούνται με την διαχείριση των δικτύων, η χρέωση υπηρεσιών είναι και ένας έμμεσος μηχανισμός ελέγχου του δικτύου. Για παράδειγμα, η μη ύπαρξη χρέωσης στο παρόν Internet, έχει δημιουργήσει υπερβολικές απαιτήσεις στους χρήστες του (οι οποίες δεν αντιστοιχούν σε πραγματικές ανάγκες), με αποτέλεσμα προβλήματα απόδοσης, κυρίως λόγω συμφόρησης. Έτσι η χρέωση μπορεί να συμβάλει στον έλεγχο της συμφόρησης και στην ομοιόμορφη κατανομή του φόρτου του δικτύου, με αποτέλεσμα οι πόροι να διατίθενται στους χρήστες με πιο αποδοτικό και οικονομικό τρόπο.

Το πρόβλημα της χρέωσης αγαθών και υπηρεσιών έχει απασχολήσει ευρέως τους οικονομολόγους, και κατά το παρελθόν έχουν προταθεί διάφορα οικονομικά μοντέλα. Για παράδειγμα, απλά σχήματα χρέωσης εφαρμόζονται από την αρχή λειτουργίας των τηλεφωνικών δικτύων ([43]). Επίσης, έχουν προταθεί σχήματα κατάλληλα για δίκτυα συγκεκριμένου τύπου π.χ. για το Internet ([44], [42], [22], [4]). Τα ευρυζώνια δίκτυα υπολογιστών όμως, εισάγουν δικούς τους τεχνολογικούς περιορισμούς και ιδιαιτερότητες, με αποτέλεσμα την ανάγκη αναζήτησης κατάλληλων μοντέλων και σχημάτων χρέωσης ([14]). Γι΄αυτά τα δίκτυα, η χρέωση δεν είναι μια απλή υπόθεση τιμολόγησης αγαθών της αγοράς. Μερικές από τις σχετικές δυσκολίες αναφέρονται στην συνέχεια.

Η πρώτη δυσκολία οφείλεται στην αρχιτεκτονική παροχής υπηρεσιών από το δίκτυο. Ένα ευρυζώνιο δίκτυο όπως είδαμε, εκτός από τις ιδιαιτερότητες των διαφορετικών πηγών έχει να αντιμετωπίσει και να εγγυηθεί τις παραμέτρους Ποιότητας Εξυπηρέτησης του χρήστη. Τις παραμέτρους αυτές ο μηχανισμός χρέωσης τις λαμβάνει από το συμβόλαιο χρήστη-δικτύου που καθορίζεται στην αρχή της κλήσης. Το δίκτυο

προκειμένου να εγγυηθεί την υποσχόμενη εξυπηρέτηση πρέπει να δεσμεύσει τους ανάλογους πόρους, και το κόστος αυτό πρέπει να αντικατοπτρίζεται στην χρέωση.

Στα ευρυζώνια δίκτυα υπάρχει η αναγκαιότητα για αστυνόμευση της πηγής και εξομάλυνση της κίνησης που εισάγει αυτή στο δίκτυο. Σκοπός αυτών των μηχανισμών, είναι να παρακολουθούν κατά πόσο ο χρήστης τηρεί τα συμφωνηθέντα του συμβολαίου, ώστε να προστατεύουν το δίκτυο από απρόβλεπτες συμπεριφορές. Για παράδειγμα, χρήστης ο οποίος δίνει ικανοποιητικές περιγραφές των στατιστικών χαρακτηριστικών της κίνησης της πηγής του, πρέπει να ευνοείται στην χρέωση από κάποιον που είναι ασαφής και άρα πιο απρόβλεπτος. Για τους μηχανισμούς χρέωσης που εξετάζουμε, θα μπορούσαμε να πούμε ότι και αυτοί οι ίδιοι αστυνομεύουν τους χρήστες, ενθαρρύνοντάς τους να αξιοποιούν τη γνώση που έχουν για την συμπεριφορά της κίνησης. Με αυτό το τρόπο οι χρήστες βοηθούν το δίκτυο να διαθέτει πιο αποδοτικά τους πόρους του, και άρα πρέπει να ευνοούνται από το μηχανισμό χρέωσης. Τελικά η χρέωση θα λάβει υπόψη της τόσο την ακρίβεια της αρχικής πρόβλεψης όσο και την πραγματική χρήση. Γενικότερα, οι μηχανισμοί χρέωσης δεν πρέπει να θεωρούνται ως κάτι αυτόνομο και ανεξάρτητο από τους άλλους μηχανισμούς του δικτύου.

Δεν πρέπει να παραβλέπουμε το γεγονός, ότι το κόστος διατήρησης λογιστικών στοιχείων και έκδοσης λογαριασμών είναι αρκετά σημαντικό. Έτσι, οποιοσδήποτε μηχανισμός χρέωσης προταθεί πρέπει να έχει δυνατότητα να υλοποιηθεί σε υλικό και λογισμικό. Η απαραίτητη πληροφορία πρέπει να συλλέγεται, να επεξεργάζεται και να μεταδίδεται στο δίκτυο με αποδοτικό τρόπο.

Η αγορά των τηλεπικοινωνιακών δικτύων είναι ανταγωνιστική, άρα οι μηχανισμοί χρέωσης θα πρέπει να λάβουν υπόψη τους τις ιδιαιτερότητες αυτού του τύπου αγοράς. Υπάρχουν βασικά δύο τύποι χρέωσης των δικτυακών υπηρεσιών: *χρέωση βάσει χρήσης* των πόρων του δικτύου από το χρήστη και *χρέωση βάσει συμφόρησης* που προκαλεί η κίνηση του χρήστη στο δίκτυο. Η Οικονομική Θεωρία προτείνει τον πρώτο τύπο χρέωσης ως καταλληλότερο σε συνθήκες αγοράς τέλειου ανταγωνισμού, γιατί προτιμάται από τους χρήστες, τους βοηθά να ώστε να προσαρμόζουν την ζήτησή τους στις πραγματικές ανάγκες τους, και οδηγεί σε αποδοτική δέσμευση πόρων. Οι δύο μηχανισμοί που εξετάζουμε, πραγματοποιούν χρέωση βάσει χρήσεως.

Ένα ακατάλληλα σχεδιασμένο σχήμα χρέωσης, δεν ικανοποιεί τους χρήστες, ούτε τους δίνει τα σωστά κίνητρα χρήσης του δικτύου, με αποτέλεσμα να τους ωθεί σε αναζήτηση δικτύων ανταγωνιστικών φορέων. Παρακάτω αναφέρουμε επιγραμματικά τι επιθυμεί ο **χρήστης/πελάτης** από ένα μηχανισμό χρέωσης:

- Το τέλος που θα κληθεί να πληρώσει να είναι προβλέψιμο, ώστε να αποφεύγονται οι δυσάρεστες εκπλήξεις
- Οι λογαριασμοι να είναι απλοί και ελέξιμοι (π.χ. όπως οι τηλεφωνικοί)
- Η χρέωση να αντανακλά την αντίληψη των χρηστών για την Ποιότητα Εξυπηρέτησης που λαμβάνουν
- Η χρέωση να βασίζεται αποκλειστικά στην ατομική χρήση, όπως την αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Για παράδειγμα, ίδια κλήση (την ίδια ώρα της μέρας) θα πρέπει να χρεώνεται το ίδιο. Επίσης οι χρήστες δεν επιθυμούν χρέωση βασει συμφόρησης, ειδικά χωρίς προειδοποίηση
- Η χρέωση πρέπει να θεωρείται δίκαιη

Ας δούμε και τις απαιτήσεις που εγείρει η άλλη πλευρά, αυτή των τηλεπικοινωνιακών και δικτυακών **φορέων/επιχειρήσεων**.

- Χρέωση ανάλογη του κόστους
- Κάλυψη κόστους λειτουργίας και συντήρησης του δικτύου
- Μεγιστοποίηση εσόδων
- Δημιουργία καθαρών κερδών για επενδύσεις και επεκτάσεις του δικτύου
- Χρέωση άμεσα σχετιζόμενη με την Ποιότητα Εξυπηρέτησης που παρέχεται
- Παράμετροι χρέωσης συνεπείς προς όλες τις υπηρεσίες
- Τέλη εύκολα υπολογίσιμα (όχι πολύπλοκες μετρήσεις και λογιστικά σχήματα)
- Εύκολη υλοποίηση μηχανισμών
- Αποθάρυνση μεταπώλησης των πόρων του δικτύου ή των υπηρεσιών
- Περιορισμός της διασταυρωμένης επιδότησης μεταξύ των υπηρεσιών
- Χρέωση που οδηγεί σε κατάτμηση της αγοράς, αποφυγή καννιβαλισμού

1.1. Υπηρεσίες δικτύων ATM

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες μπορούμε να κατατάξουμε τις δικτυακές υπηρεσίες, ανάλογα με τις απαιτήσεις τους σε απόδοση.

Η πρώτη είναι η κατηγορία των *best-effort υπηρεσιών*, για τις οποίες δεν υπάρχει από την πλευρά του δικτύου καμία εγγύηση ως προς την Ποιότητα Εξυπηρέτησης. Τέτοιες είναι οι υπηρεσίες του σημερινού Internet: e-mail, ftp, Web browsing, κτλ. Το δίκτυο, για να εξυπηρετήσει αυτούς τους χρήστες κάνει ότι είναι δυνατό για να μεταφέρει την κίνησή τους, χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους πόρους του.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι *εγγυημένες υπηρεσίες*. Είναι κυρίως οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και πολυμέσων, με τις οποίες είναι στενά συνδεδεμένη η έννοια της Ποιότητας Εξυπηρέτησης. Για να μπορέσει το δίκτυο να ανταποκριθεί σε αυτές τια απαιτήσεις πρέπει να δεσμεύσει συγκεκριμένους πόρους του.

Σύμφωνα με πρότυπα/συστάσεις του ATM-Forum, τα δίκτυα B-ISDN/ATM εξυπηρετούν κίνηση υπηρεσιών και των δύο τύπων. Συγκεκριμένα, οι δικτυακές υπηρεσίες κατηγοριοποιούνται, ως εξής ([1]):

1. *Σταθερού Ψηφιακού Ρυθμού* (CBR): Αυτή η κατηγορία υπηρεσιών απευθύνεται σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, (οι οποίες απαιτούν συγκεριμένη καθυστέρηση και μικρή διασπορά αυτής) με σταθερό ρυθμό μεταφοράς κελιών. Θα χρησιμοποιηθεί για τηλεφωνικές συνδιαλέξεις, τηλεδιασκέψεις υψηλής ποιότητας, υπηρεσίες μισθωμένων γραμμών κτλ.

2. *Μεταβλητού Ψηφιακού Ρυθμού* (VBR): Αυτή η κατηγορία απευθύνεται σε υπηρεσίες μεταβλητού ρυθμού δεδομένων με χρονικούς περιορισμούς και άλλες απαιτήσεις σε Ποιότητα Εξυπηρέτησης. Θα υποστηρίζει στατιστική πολυπλεξία, και η δημιουργία της οφείλεται στην εκρηκτική φύση πολλών πηγών. Τελευταίες προδιαγραφές, αναφέρονται σε δύο υποκατηγορίες, την πραγματικού χρόνου VBR (rt-VBR) με αυστηρά καθορισμένη τιμή καθυστέρησης και διασπορά αυτής, και την μη πραγματικού χρόνου (nrt-VBR), η οποία υποστηρίζει φράγματα για την μέση

καθυστέρηση. Θα χρησημοποιηθεί για video μεταβλητού ρυθμού δεδομένων, ήχο, και άλλες εφαρμογές πολυμέσων.

3. *Διαθέσιμου Ψηφιακού Ρυθμού* (ABR): Αυτή η κατηγορία υπηρεσιών υποστηρίζει κίνηση μη πραγματικού χρόνου με μη καθορισμένες απαιτήσεις σε καθυστέρηση αλλά με μηδενικές απώλειες. Το δίκτυο υποστηρίζει έλεγχο συμφόρησης με ανάδραση, ώστε η πηγή να μεταβάλλει τον ρυθμό της κίνησης που εισάγει, όταν κάτι τέτοιο απαιτείται. Ένας Ελάχιστος Ρυθμός Μεταφοράς Κελιών (MCR) μπορεί να υποστηριχθεί. Το ABR θα χρησιμοποιηθεί για μεταφορές αρχείων, web browsing χωρίς εγγυήσεις απόδοσης, και άλλες εφαρμογές δεδομένων.

4. *Ακαθόριστου Ψηφιακού Ρυθμού* (UBR): Αυτή η κατηγορία υπηρεσιών υποστηρίζει κίνηση best-effort, όπου δεν υπάρχουν εγγυήσεις τόσο για την καθυστέρηση όσο και τις απώλειες κελιών. Θα χρησιμοποιηθεί για κάποιες best-effort εφαρμογές των δικτύων υπολογιστών, όπως το e-mail κτλ.

Από τους ορισμούς τους, οι υπηρεσίες CBR και VBR θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για εγγυημένες υπηρεσίες, ενώ οι UBR για best-effort. Η ABR αποτελεί ενδιάμεση κατηγορία, δεδομένου ότι παρέχει κάποιες εγγυήσεις (κυρίως όσο αφορά τις απώλειες κελιών).

Ο χρήστης με βάση τις ανάγκες του, επιλέγει έναν από τους τέσσερις παραπάνω τύπους υπηρεσιών. Είναι ενδιαφέρον ότι για την ίδια κλήση, μπορεί να επιλεγθούν διαφορετικοί τύποι (π.χ. για κάποιο ψυχαγωγικό video μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε rt-VBR είτε ABR). Στη συνέχεια, ένα συμβόλαιο παραμέτρων Ποιότητας Εξυπηρέτησης συμφωνείται ανάμεσα στο χρήστη και στο δίκτυο (το εύρος των τιμών των παραμέτρων είναι άμεσα συνδεδεμένο με τον τύπο υπηρεσίας). Η επιλογή του χρήστη θα εξαρτηθεί άμεσα και από τον μηχανισμό χρέωσης που χρησιμοποιεί ο φορέας για τις τέσσερεις αυτές κατηγορίες υπηρεσιών που παρέχει, καθώς και από την σχέση των τελών.

1.2. Ανασκόπηση βασικών μοντέλων Μικροοικονομίας για κοστολόγηση υπηρεσιών ευρυζώνιων δικτύων

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε σε τρία σημαντικά άρθρα, [41], [21], [46], τα οποία παρουσιάζουν αλγορίθμους και μοντέλα Μικροοικονομίας για χρέωση υπηρεσιών σε ευρυζώνια δίκτυα. Κυρίως θα ασχοληθούμε με την ρεαλιστικότητα των περιορισμών τους, την γενικότητά τους και τις δυνατότητες εφαρμογής τους στα δίκτυα πολλαπλών υπηρεσιών. Οι γενικές ιδέες και αρχές που διέπουν αυτές τις εργασίες στρέφονται γύρω από της έννοια της *κοινωνικής ευημερίας* (εκφράζεται σαν η συνολική ικανοποίηση/κέρδος του συστήματος δικτύου και χρηστών σε μονοπωλιακό περιβάλλον), στην διαμόρφωση των *τιμών* από τη *ζήτηση*, και την επαναλαμβανόμενη αναπροσαρμογή των τιμών που οδηγεί (κάτω από προϋποθέσεις) σε *σημείο ισορροπίας* που είναι κοινωνικά βέλτιστο. Και τα τρία μοντέλα υποστηρίζουν χρέωση βάσει χρήσεως. Δυο βασικά εγχειρίδια Μικροοικονομίας που βοηθούν σημαντικά στην κατανόηση των άρθρων, είναι τα βιβλία του οικονομολόγου Hal R. Varian ([57], [56]).

Στο άρθρο [41], οι Low and Varayia, ασχολούνται με ανάθεση πόρων και χρέωση σε δίκτυα ATM πολλαπλών υπηρεσιών. Το δίκτυο παρέχει ένα σύνολο υπηρεσιών S με

εγγυημένη Ποιότητα Εξυπηρέτησης. Κάθε σύνδεση απαιτεί ένα συγκεκριμένο ποσό εύρους ζώνης και χώρου ενταμίευσης για κάθε σύνδεσμο επικοινωνίας από τον οποίο διέρχεται. Εύρος ζώνης και χώρος ενταμίευσης θεωρούνται υποκατάστατα μεγέθη. Οι πόροι δεσμεύονται ανά σύνδεση, επομένως δεν υποστηρίζεται στατιστική πολυπλεξία. Έστω w_s η τιμή της υπηρεσίας τύπου s ανά χρονική μονάδα. Τότε $D_s(w_s) = \upsilon_s e^{-w_s}$ η συνάρτηση συνολικής ζήτησης για την υπηρεσία s (σταθερής ελαστικότητας), η οποία είναι γνωστή στο δίκτυο. Έστω επίσης $x_s \le D_s(w_s)$ το ποσό της υπηρεσίας s που προσφέρει το δίκτυο. Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός είναι να βρεθεί κάποια ισορροπία τιμών-προσφοράς στην αγορά, κατά την οποία μεγιστοποιούνται τα έσοδα του δικτύου και η ευημερία (δεν είναι εξ΄αρχής γνωστό ότι και τα δύο μεγιστοποιούνται ταυτόχρονα). Οι συγγραφείς ορίζουν ως κοινωνική ευημερία την

Κοινωνική Ευημερία = Έσοδα Δικτύου + Πλεόνασμα Χρήστη

Στην συνέχεια διερευνεται η ύπαρξη σημείου ισορροπίας ανάγοντας το ζήτημα σε ένα ισοδύναμο ανταγωνιστικό παίγνιο μεταξύ του δικτύου και των χρηστών. Το σημείο αυτό θα καθορίζεται από ένα διάνυσμα τιμών **w** και ποσοτήτων υπηρεσιών **x** που προσφέρονται. Ως σημείο ισορροπίας ορίζεται αυτό για το οποίο

- Η προσφορά ικανοποιεί την ζήτηση, δηλ. $x_s = D_s(w_s) = \upsilon_s e^{-w_s}$.
- Τα έσοδα του δικτύου $\sum_s x_s w_s$ μεγιστοποιούνται
- Οι πόροι διατίθενται έτσι ώστε οι απαιτήσεις σε Ποιότητα Εξυπηρέτησης να ικανοποιούνται χωρίς να υπερβαίνουν τις υπάρχουσες ποσότητες εύρους ζώνης και χώρου ενταμίευσης.

Οι συγγραφείς υπολογίζουν αυτό το σημείο λειτουργίας, το οποίο είναι και μοναδικό, και το οποίο μεγιστοποιεί και την κοινωνική ευημερία. Προτείνουν ένα επαναληπτικό και κατανεμημένο αλγόριθμο, στον οποίο εμπλέκονται και τα δύο μέρη, λύνοντας αντίστοιχα προβλήματα βελτιστοποίησης. Σε αυτό το παίγνιο, ο κάθε χρήστης αποφασίζει ανεξάρτητα από τους άλλους, την ζήτησή του, με βάση τα χαρακτηριστικά της κίνησής του και τις παραμέτρους Ποιότητας Εξυπηρέτησης. Το δίκτυο, ως αντίπαλος, αναπροσαρμόζει τις τιμές παρακολουθώντας περιοδικά την συνολική ζήτηση. Στο άρθρο καλύπτονται και θέματα σύγκλισης αυτού του επαναληπτικού παιγνίου στο σημείο ισορροπίας. Το σχήμα που προτείνεται πραγματοποιεί χρέωση βάσει χρέωσης και σκιωδών τιμών ανά πόρο. Παρά ταύτα, χρεώνονται μόνο οι σπάνιοι πόροι, κάτι που μας ανάγει σε χρέωση βάσει συμφόρησης.

Το άρθρο [21], των G. de Veciana and R. Baldick, αποτελεί μια επέκταση του προηγούμενου, δεδομένου ότι το μοντέλο υποστηρίζει στατιστική πολυπλεξία και best-effort υπηρεσίες. Επίσης εξαλείφει την αντιστάθμιση εύρους ζώνης και ενταμίευσης, χρεώνοντας μόνο το πρώτο (έτσι διευκολύνονται και οι αποφάσεις του χρήστη). Το δίκτυο παρέχει ένα σύνολο από υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και best-effort. Η χρέωση της κίνησης πραγματικού χρόνου βασίζεται στο ισοδύναμο εύρος ζώνης πηγής, ενώ η χρέωση μιας best-effort κίνησης γίνεται βάσει του μέσου ρυθμού της πηγής. Ο στόχος είναι ο ίδιος: να βρεθούν εκείνα τα διανύσματα τιμών και προσφοράς υπηρεσιών, ώστε η κοινωνική ευημερία να μεγιστοποιείται (μάλιστα πολλές μαθηματικές εκφράσεις

που χρησιμοποιούνται είναι κοινές με το [41]). Οι συγγραφείς αποδεικνύουν ότι υπάρχει ένα σημείο λειτουργίας του συστήματος, το οποία μεγιστοποιεί την ευημερία και τα έσοδα του χρήστη και ταυτόχρονα είναι σημείο ισορροπίας. Περιγράφεται αντίστοιχος αλγόριθμος παιγνίου, όπου οι χρήστες υπηρεσιών πραγματικού χρόνου θεωρείται ότι δηλώνουν το πραγματικό μέσο ρυθμό της πηγής τους. Ζητήματα σύγκλισης εξακολουθούν να μην διευκρινίζονται επαρκώς. Τα αποτελέσματα επεκτείνονται για περιπτώσεις όπου η ζήτηση δεν είναι γνωστή πλήρως, και σε περιπτώσεις χρέωσης σε δίκτυο με πολλούς κόμβους.

Στο [46], οι J. Murphy *et al.* (1994), προτείνουν ένα σχήμα χρέωσης Εικονικών Μονοπατιών (VPs) σε δίκτυο ATM. Οι συγγραφείς είναι περισσότερο επηρεασμένοι από την φιλοσοφία της χρέωσης βάσει συμφόρησης, με την έννοια ότι οι τιμές διαμορφώνονται έτσι ώστε η ζήτηση να μην οδηγεί ποτέ σε συμφόρηση. Επίσης η προσέγγιση που ακολουθείται είναι διαφορετική, δεδομένου ότι η βελτιστοποίηση χρηστών και δικτύου επιχειρείται ταυτόχρονα (όχι παίγνιο). Προτείνεται κάποιος επαναληπτικός αλγόριθμος, που στην περίπτωση σύγκλισης οδηγεί σε κοστολόγηση ισορροπίας. Υποθέτει συγκεκριμένο ποσό εύρους ζώνης ανά χρήστη (όχι στατιστική πολυπλεξία), και δυνατότητα δημιουργίας Εικονικού Μονοπατιού για κάθε δυνατό συνδυασμό αποστολέα-παραλήπτη. Το σχήμα θεωρείται κατάλληλο για "χρήστες" οι οποίοι είναι παροχείς υπηρεσιών και χρειάζεται να δεσμεύσουν μεγάλα ποσά εύρους ζώνης, ώστε να τα μεταπουλήσουν σε μικτότερους χρήστες.

Τέλος, αναφέρουμε την πολύ πρόσφατη ερευνητική δουλεία στο [17], των Courcoubetis *et al.* (1997), σχετική με ζητήματα χρέωσης ABR κίνησης, που ακολουθεί προσέγγιση ακόλουθη με του [41], προσαρμοσμένη όμως στις ιδιαιτερότητες των υπηρεσιών ABR και των μηχανισμών (π.χ. έλεγχος ροής) που τις υποστηρίζουν.

Το ένα από τα δύο σχήματα χρέωσης που μελετούμε και υλοποιούμε, παρουσιάζεται στο [37], από τον F. P. Kelly (1994). Πρόκειται για μια θεμελιώδη ερευνητική προσπάθεια, που με απλό τρόπο κατωρθώνει να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των χρηστών και του δικτύου για χρέωση βάσει χρήσης.

2. Η σημασία κατανόησης και μοντελοποίησης της κίνησης ATM

Όπως προαναφέρθηκε, τα δίκτυα B-ISDN/ATM έχουν σχεδιαστεί ώστε να παρέχουν υψηλή Ποιότητα Εξυπηρέτησης, πετυχαίνοντας σημαντική στατιστική πολυπλεξία. Επίσης, αναφερθήκαμε στο γεγονός ότι οι μηχανισμοί χρέωσης θα πρέπει να κοστολογούν τις διάφορες κατηγορίες υπηρεσιών, ανάλογα με αυτά που εγγυώνται. Για παράδειγμα, το δίκτυο μπορεί να παρέχει μια υψηλή Ποιότητα Εξυπηρέτησης σε μια υπηρεσία CBR, δεσμεύοντας πόρους με βάση το μέγιστο ρυθμό της πηγής. Δεν θα μπορούν όμως όλοι οι πελάτες να αντέξουν οικονομικά αυτή την εξυπηρέτηση, που αναγκαστικά οδηγεί σε υψηλή χρέωση (λόγω υψηλής δέσμευσης πόρων). Επίσης αναφέραμε ότι ένας μηχανισμός χρέωσης θα πρέπει να ευνοεί τους χρήστες που προβλέπουν με σχετική ακρίβεια την συμπεριφορά της κίνησης που εισάγουν.

Έτσι, συνειδητοποιούμε πόσο σημαντικός είναι ο χαρακτηρισμός της πηγής ATM στην φάση εγκατάστασης κλήσης και "υπογραφής" του συμβολαίου χρήστη-δικτύου: (1) σχετίζεται άμεσα με τις παραμέτρους της Ποιότητας Εξυπηρέτησης και το μηχανισμό χρέωσης, και (2) βοηθά ουσιαστικά το δίκτυο στον έλεγχο τον πόρων του. Η εύρεση στατιστικών χαρακτηριστικών, προϋποθέτει την κατανόηση της συμπεριφοράς της κίνησης ATM, η οποία προέρχεται από ένα μεγάλο φάσμα πηγών. Η εύρεση μαθηματικών σχέσεων ανάμεσα στους περιγραφείς κίνησης μιας πηγής και στις απαιτήσεις αυτής σε δικτυακούς πόρους, ώστε να εξασφαλίζεται κάποια Ποιότητα Εξυπηρέτησης, απαιτεί συνηθέστερα κάποιο κατάλληλο στοχαστικό μοντέλο κίνησης. Γι' αυτό το λόγο, ο *στατιστικός χαρακτηρισμός* και η *μοντελοποίηση* κίνησης έχουν τύχει ιδιαίτερης προσοχής τα τελευταία χρόνια.

Στην σχετική με τηλε-κίνηση βιβλιογραφία, υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από άρθρα για μοντελοποίηση πραγματικών πηγών κίνησης. Για μια ανασκόπηση αυτών προτείνουμε τα άρθρα των W. Willinger *et al*. (1996), Nikolaidis and Akyildiz ([47]), Frost and Melamed (1994), και Stamoulis *et al*. (1994). Τα μοντέλα αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορες κλάσεις, ανάλογα με την προσέγγιση που επιχειρούν. Έτσι, η προσέγγιση με *μοντέλα Markov* (ή μοντέλα με έλλειψη μνήμης σε κάποια επίπεδα), είναι η πιο συνηθισμένη, γιατί η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου είναι άμεση και είναι δυνατή η θεωρητική επαλήθευση. Έτσι, Markov-Modulated Fluid (MMF) Διεργασίες (π.χ. [45]) και αυτοπαλινδρομούμενα (autoregressive) μοντέλα πεπερασμένου βαθμού (AR) (π.χ. [29]) είναι πολύ συνηθισμένα.

Τα πειράματα προσομοιώσεων σε επίπεδο πακέτων ή κελιών είναι συχνά χρονοβόρα, προκειμένου να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα. Αυτή η πολυπλοκότητα συχνά περιορίζεται με την βοήθεια μαθηματικών μοντέλων και εργαλείων των Μαθηματικών (π.χ. με ανάλυση πινάκων, ανάλυση στο διακριτό χώρο). Για παράδειγμα, στα τηλεφωνικά δίκτυα (τα οποία είναι δίκτυα μεταγωγής κυκλωμάτων και χρησιμοποιούνται πάνω από ένα αιώνα), οι αφίξεις κλήσεων έχει θεωρηθεί ότι ακολουθούν την κατανομή Poisson και η διάρκεια αυτών την Εκθετική. Η πιθανότητα φραγής κλήσεων, η πιο σημαντική παράμετρος Ποιότητας Εξυπηρέτησης, λαμβάνεται κάτω από αυτές τις υποθέσεις από την ανάλυση του συστήματος αναμονής M/M/m/m (βλέπε το βιβλίο του L. Kleinrock (1975)).

Τα τελευταία χρόνια έχει διαπιστωθεί ότι τα παραδοσιακά μοντέλα Markov αδυνατούν να μοντελοποιήσουν πραγματική κίνηση που συναντούμε στα δίκτυα ATM (ακόμα και κίνηση τηλεφωνικών κλήσεων). Πράγματι, όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 4 και έχει επισημανθεί, η έξοδος ενός MPEG κωδικοποιητή διαφέρει στατιστικά από την κίνηση του αντίστοιχου μοντέλου Markov. Συγκεκριμένα, πηγές video με Μεταβλητό Ψηφιακό Ρυθμό πληροφορίας, παρουσιάζουν ισχυρές εξαρτήσεις σε διαδοχικά χρονικά διαστήματα (αντί για "έλλειψη μνήμης"), ασχέτως κωδικοποιητή και περιεχομένων εικόνων. Το αποτέλεσμα είναι η εξαγωγή λανθασμένων συμπερασμάτων, στις περιπτώσεις που η ανάλυση αγνοεί σε αυτές τις ιδιότητες. Αυτό έδωσε το έναυσμα σε πολλούς ερευνητές να προσπαθήσουν να ενσωματώσουν σε μοντέλα αυτό το χαρακτηριστικό της κίνησης video. Τα μοντέλα αυτά που δημιούργησαν ονομάζονται αυτοπαρεμφερή (self-similar) μοντέλα (π.χ. [6], [24], [49]).

3. Η οργάνωση του κειμένου και η συνεισφορά της παρούσας εργασίας

Το παρόν κείμενο δομείται από τρεις ενότητες. Την *εισαγωγική*, (Κεφάλαια 1 και 2), της *χρέωσης* (Κεφάλαιο 3), και της *υποκατάστασης* (Κεφάλαιο 4).

Στο *Κεφάλαιο 2*, εισάγουμε την έννοια του ισοδυνάμου εύρους ζώνης πηγής, και δίνουμε την άμεση σχέση αυτού του μεγέθους με την χρέωση βάση χρήσεως. Η εισαγωγή ολοκληρώνεται με την παρουσίαση του *"ασυμπτωτικού μεγάλου N"*, στο οποίο στηρίζεται η παρούσα εργασία.

Το *Κεφάλαιο 3*, ασχολείται με χρέωση κίνησης ATM, τόσο πραγματικής όσο και κίνησης μοντέλων πηγών. Η χρέωση ανάλογα με το ισοδύναμο εύρος ζώνης κάθε πηγής, θα ήταν δίκαιη, αλλά θα απαιτούσε τον ακριβή υπολογισμό του, πράγμα που είναι πολύ δύσκολο να γίνει εκ των προτέρων. Για το λόγο αυτό, η ιδέα που χρησιμοποιούμε βασίζεται στις προβλέψεις του χρήστη πριν την κλήση και τις ακριβείς μετρήσεις μετά το πέρας αυτής. Έτσι οι χρήστες υπερχρεώνονται για τις ανακριβείς προβλέψεις (η υπερχρέωση είναι ανάλογη της ανακρίβειας). Ταυτόχρονα, γα να γίνεται χρέωση βάσει χρήσεως, χρησιμοποιούνται συναρτήσεις-άνω φράγματα του ισοδυνάμου εύρους ζώνης. Το πρώτο σχήμα, γνωστό ως "Απλή" Φόρμουλα χρέωσης, βασίζεται σε ένα απλό φράγμα, ενώ το δεύτερο, το "Tax-Band", σε μια πιο ακριβή παρεμβολή.

Στην εργασία μας, μελετούμε σε βάθος τα δύο σχήματα χρέωσης αναδεικνύοντας τις σημαντικές ιδιότητές τους. Τα υλοποιούμε με προσομοιωτές, ώστε να υπολογίζουμε τα τέλη που θα χρειαστεί να πληρώσουν κάποιες εικονικές κλήσεις. Οι κλήσεις αυτές προέρχονται τόσο από πραγματικές πηγές όσο και από μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία για χαρακτηρισμό πηγών. Στην συνέχεια προχωρούμε σε μια συγκριτική μελέτη των σχημάτων σε σχέση και με την βέλτιστη χρέωση που αντιστοιχεί στο ισοδύναμο εύρος ζώνης πηγής (εκφράζει πραγματική χρήση). Μέσα από τη μελέτη αυτή προκύπτουν ενδιαφέρονται ζητήματα, όπως η υπερεκτίμηση του ισοδυνάμου εύρους ζώνης σε σχέση με την ανακρίβεια στην δήλωση παραμέτρων χρήστη, η κατάλληλη επιλογή των φραγμάτων του "Tax-Band" σχήματος, η καταλληλότητα των σχημάτων σε κάθε τύπο κίνησης, κτλ.

Στο *Κεφάλαιο 4*, αρχικά ασχολούμαστε με ανάλυση και χαρακτηρισμό κίνησης MPEG. Ένα εκτεταμένο απόσπασμα μιας τυπικής ταινίας χρησιμοποιείται για το λόγο αυτό. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τις παραμέτρους δύο μοντέλων Markov, MMF και AR(1), με δύο μεθόδους. Το γεγονός ότι το ισοδύναμο εύρος ζώνης μπορεί εύκολα να υπολογισθεί σε κλειστή μορφή γι΄αυτά τα μοντέλα, μας ενθαρρύνει να τα χρησιμοποιήσουμε ώστε να μελετήσουμε ζητήματα επίδοσης. Συγκεκριμένα, δείχνουμε πόσο πρακτικό μπορεί να είναι αυτό το μέγεθος για υπολογισμό *ισοδύναμης κίνησης* σε προβλήματα εξομοίωσης δικτυακού περιβάλλοντος ATM. Ισοδύναμη χαρακτηρίζεται μια ροή όταν υποκαθιστά μια άλλη έτσι ώστε να διατηρείται η ίδια Ποιότητα Εξυπηρέτησης για όλους τους χρήστες, στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας του συστήματος.

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας ήταν να χρησιμοποιήσει απλά μοντέλα Markov, για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος υποκατάστασης πραγματικής κίνησης. Υποκαταστήσαμε την αθροιστική ροή N ανεξάρτητων και όμοιων ταινιών MPEG, με μία ροή μοντελοποιημένης πηγής. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτής της πηγής, χρησιμοποιήσαμε μια παραδοσιακή μέθοδο ταύτισης βασικών στατιστικών χαρακτηριστικών των δύο ροών, και μια νέα που βασίζεται στο ασυμπτωτικό "μεγάλου πλήθους πηγών" και την τοπική συμπεριφορά της συνάρτησης του ισοδυνάμου εύρους ζώνης. Στην συνέχεια κατασκευάσαμε γεννήτριες κίνησης αυτών των μοντέλων, και διοχετεύουμε τόσο την πραγματική κίνηση όσο και την προσομοιούμενη σε σύνδεσμο ATM. Μελετήσαμε συγκριτικά, την επίδοση του συνδέσμου ως προς τις απώλειες κελιών. Τα αποτελέσματα, για τα συγκεκριμένα πειράματα προσομοίωσης, έδειξαν εντυπωσιακά αποτελέσματα στην περίπτωση του 'ON/OFF MMF' μοντέλου.

Με αυτό το τρόπο, πιστεύουμε ότι η παρούσα εργασία συνέβαλε στο το κατανοηθούν κάποια προβλήματα γύρω από την χρέωση των δικτυακών υπηρεσιών και της υποκατάστασης κίνησης, προβλήματα που απασχολούν και θα απασχολήσουν τα επόμενα χρόνια.

Κεφάλαιο 2

Ισοδύναμο εύρος ζώνης πηγής

Το παρόν κεφαλαίο ασχολείται με το *ισοδύναμο εύρος ζώνης* (effective bandwidth) πηγής, μια έννοια που έχει υιοθετηθεί από πολλούς θεωρητικούς των δικτύων με σκοπό την έκφραση χρήσης πόρων. Αποτελεί ένα ισχυρό μαθηματικό εργαλείο, με πολλές τεχνολογικές εφαρμογές. Το ισοδύναμο εύρος ζώνης πηγής είναι μια ποσότητα που περιγράφει συνοπτικά τις απαιτήσεις μιας πηγής σε πόρους, με δεδομένη την Ποιότητα Εξυπηρέτησης και τις παραμέτρους του συστήματος, και η ύπαρξή της απλουστεύει δραματικά την λειτουργία του δικτύου (π.χ. μηχανισμός Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης (ΕΑΚ), μηχανισμός χρέωσης). Αν και δεν υπάρχει κοινά αποδεκτός ορισμός για το ισοδύναμο εύρος ζώνης, η τιμή του εξαρτάται από στοχαστικές ιδιότητες της πηγής κίνησης, τις απαιτήσεις της σε Ποιότητα Εξυπηρέτησης, και το σύστημα. Η στοχαστική αυτή περιγραφή, όπως φαίνεται και στους μηχανισμούς χρέωσης, δεν είναι τόσο πολύπλοκη ούτε και τόσο λεπτομερής, όσο φαίνεται αρχικά.

Αρχικά, παρουσιάζουμε έναν ορισμό για το ισοδύναμο εύρος ζώνης πηγής, και κάνουμε μια εισαγωγή στην έννοια αυτή. Το ισοδύναμο εύρος ζώνης, βασίζεται σε δύο ελεύθερες παραμέτρους, οι οποίες εκφράζουν τις ιδιότητές του στην κλιμάκωση στο χώρο και στον χρόνο αντίστοιχα. Ο υπολογισμός κατάλληλων παραμέτρων, ειδικά για πραγματικές πηγές κίνησης, είναι ένα ερευνητικό ζήτημα που έχει απασχολήσει αρκετούς τα τελευταία δύο χρόνια (παραπέμπουμε στο σχετικό άρθρο του Gibbens (1996)). Ο υπολογισμός αυτός λαμβάνει υπ' όψη του, εκτός των χαρακτηριστικών της πηγής, τα χαρακτηριστικά του συνδέσμου (χωρητικότητα, μέγεθος ενταμιευτή) και τις άλλες πηγές (ίδιου ή διαφορετικού τύπου) που πολυπλέκονται προκείμενου να διαμοιραστούν τον σύνδεσμο. Η πολιτική εξυπηρέτησης του συνδέσμου είναι FCFS.

Στην συνέχεια παρουσιάζουμε το ασυμπτωτικό *μοντέλο πολυπλεξίας*, στο οποίο βασίζονται τα αποτελέσματα τις παρούσας εργασίας. Περιγράφουμε τον τρόπο με τον οποίο ο διαμοιραζόμενος πόρος εξασφαλίζει εγγυημένη απόδοση (ως προς απώλειες πληροφορίας), περιορίζοντας τον αριθμό των πηγών που εξυπηρετούνται έτσι ώστε το συνολικό ισοδύναμο εύρος ζώνης αυτών να μην υπερβαίνει κάποιο κατώφλι. Αυτό το πρόβλημα ελέγχου που αντιμετωπίζουν τα δίκτυα εγγυημένης εξυπηρέτησης, αποτελεί ουσιαστικά και το *πρότυπο πρόβλημα ΕΑΚ*, αναδεικνύοντας έτσι τον θεμελιώδη ρόλο της έννοιας του ισοδυνάμου εύρους ζώνης.

1. Εισαγωγή στην έννοια του ισοδύναμου εύρους ζώνης πηγής

Έστω ότι J πηγές διαμοιράζονται τον ίδιο πόρο χωρητικότητας C, και έστω X_j ο στιγμιαίος φόρτος εργασίας της j-οστής πηγής. Βασική υπόθεση είναι ότι οι πηγές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, δηλαδή ότι οι τυχαίες μεταβλητές $X_j, j = 1,2,\ldots,J$ είναι ανεξάρτητες, και πιθανόν να ακολουθούν και διαφορετική κατανομή. Το πρόβλημα είναι αν κατά πόσο ο διαμοιραζόμενος πόρος, συνήθως ένας σύνδεσμος επικοινωνίας, μπορεί να εξυπηρετήσει το φορτίο που προκύπτει από την επαλληλία των πηγών. Στόχος μας είναι να εισάγουμε περιορισμούς στις κατανομές ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για Ποιότητα Εξυπηρέτησης.

Πιο συγκεκριμένα θα μας ενδιέφερε να εξασφαλίσουμε για τον συνολικό φόρτο εργασίας ότι

$$P\left\{\sum_{j=1}^{J} X_j > C\right\} \le e^{-\gamma} \tag{2.1}$$

για μια δεδομένη τιμή του γ που εκφράζει την απαίτηση σε Ποιότητα Εξυπηρέτησης. Το πρόβλημα αυτό έχει μελετηθεί εκτενώς και απαντηθεί αρκετά ικανοποιητικά τα τελευταία χρόνια. Υπάρχουν σταθερές a, C' (που εξαρτώνται από τα γ και C) τέτοιες ώστε αν

$$\sum_{j=1}^{J} \alpha(X_j) \le C'$$

όπου

$$\alpha(X_j) = a^{-1} \log \mathrm{E}\left[e^{aX_j}\right], \tag{2.2}$$

τότε η επιθυμητή συνθήκη (2.1) ικανοποιείται (η συνθήκη είναι ικανή και όχι αναγκαία). Η έκφραση (2.2) καλείται *ισοδύναμο εύρος ζώνης* της πηγής.

Ο όρος αυτός χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Kelly (1991) για μοντέλα με ενταμιευτή, αν και εννοιολογικά περιγράφηκε νωρίτερα από τον Hui (1988), αλλά για πόρους χωρίς ενταμιευτή, όπως αυτός που θεωρήθηκε παραπάνω. Είναι σημαντικό να τονισθεί, ότι το ισοδύναμο εύρος ζώνης περιγράφει πλήρως μια πηγή (χαρακτηριστικά και απαιτήσεις), και μάλιστα ανεξάρτητα από το στιγμιαίο φόρτο εργασίας των άλλων πηγών με τις οποίες διαμοιράζεται τον κοινής χρήσης πόρο.

Μέχρι σήμερα είναι γνωστό ότι για αρκετά γενικά στατιστικά μοντέλα κίνησης (π.χ. Markov, Gaussian, αυτοπαρεμφερή) και πόρων (π.χ. συστήματα χωρίς ενταμιευτή, ασυμπτωτικά μεγάλα συστήματα ως προς το πλήθος των πηγών και το μέγεθος του ενταμιευτή), είναι δυνατό να αντιστοιχήσουμε σε κάθε πηγή που πολυπλέκεται, το ισοδύναμο εύρος ζώνης της, που εξαρτάται μόνο από τα στατιστικά χαρακτηριστικά της κίνησης που εισάγει η πηγή, τις απαιτήσεις της για Ποιότητα Εξυπηρέτησης, τα χαρακτηριστικά του πόρου, και την συνολική κίνηση που διέρχεται από αυτόν. Βασική ερευνητική δουλειά έγινε τα τελευταία χρόνια κυρίως από τους Courcoubetis and Weber (1996), Courcoubetis *et al.* (1995) ([12], [13]), Botvich and Duffield (1995), Simonian and Guibert (1995), de Veciana and Warland (1995), Whitt (1993), Kesidis *et al.* (1993).

Για μια ανασκόπηση των σημαντικότερων αποτελεσμάτων, παραπέμπουμε στο άρθρο του Kelly (1996).

Ο ορισμός που θα χρησιμοποιήσουμε και έχει επικρατήσει, προκύπτει από ένα μοντέλο διακριτού χρόνου, θεωρώντας $X_j[0,t]$ το συνολικό φόρτο εργασίας (κελιά, bits) της j-οστής πηγής στο χρονικό διάστημα $(0,t]$. Υποθέτοντας ότι η στοχαστική διεργασία $\{X_j[0,t], t \geq 0\}$ έχει στατικές αυξήσεις, το ισοδύναμο εύρος ζώνης δίνεται από την

$$\alpha(s,t) = (st)^{-1} \log Z \tag{2.3}$$

όπου Z η ροπογεννήτρια της διεργασίας. Δηλαδή,

$$Z = \mathrm{E}\left[e^{stX_j[0,t]}\right] \tag{2.4}$$

όπου η μέση τιμή λαμβάνεται με βάση την κατανομή των τυχαίων διαστημάτων.

Οι παράμετροι $0 < s,t < \infty$, επιλέγονται έτσι ώστε να εκφράζουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της πηγής (π.χ. εκρηκτικότητα) και τους διαθέσιμους πόρους. Από τον ορισμό (2.3) προκύπτει ότι για σταθερό t,

$$\alpha(s,t) \to \frac{\mathrm{E}X[0,t]}{t}, \quad \mathrm{s}\to 0$$

$$\alpha(s,t) \to \frac{\overline{X}[0,t]}{t}, \quad \mathrm{s}\to \infty$$

όπου $\overline{X}[0,t]$ η μέγιστη τιμή της κίνησης. Έτσι το $\alpha(s,t)$ μεταβάλλεται από το μέσο ρυθμό στο μέγιστο, μεταβάλλοντας το s από 0 σε ∞.

Για την διαισθητική ερμηνεία αυτών των παραμέτρων και τους τρόπους υπολογισμού αυτών γίνεται αναφορά στην παράγραφο 2.3.

Μια σημαντική ιδιότητα που θα εκμεταλλευτούμε στη συνεχεία, είναι η εξής: Αν $X[0,t] = \sum_j X_j[0,t]$, όπου οι X_j ανεξάρτητες, τότε

$$\alpha(s,t) = \sum_j \alpha_j(s,t)$$

Για παράδειγμα, θεωρείστε την απλή Markov διεργασία, η οποία εναλλάσσεται μεταξύ δύο καταστάσεων. Όταν η αλυσίδα βρίσκεται στην ενεργή κατάσταση (ON), η πηγή παράγει κίνηση με σταθερό (μέγιστο) ρυθμό h, ενώ στην ανενεργή κατάσταση (OFF) δεν παράγει κίνηση. Τότε

$$P\{X = 0\} = 1 - \frac{m}{h}, P\{X = h\} = \frac{m}{h},$$

όπου m ο μέσος ρυθμός κίνησης.

Από την (2.4), έπεται

$$Z = E\left[e^{stX[\tau,\tau+t]}\right] = \left(1 - \frac{m}{h}\right)e^{st0} + \frac{m}{h}e^{sth} = 1 - \frac{m}{h} + \frac{m}{h}e^{sth}. \tag{2.5}$$

Λόγω των (2.3) και (2.5) το ισοδύναμο εύρος ζώνης είναι

$$B(m,h) = \frac{1}{st}\log\left[1 + \frac{m}{h}\left(e^{sth} - 1\right)\right]. \tag{2.6}$$

Παρατηρείστε ότι για σταθερό h η συνάρτηση $B(m)$ είναι αύξουσα και κοίλη ως προς m, μια σημαντική ιδιότητα που εκμεταλλεύονται οι μηχανισμοί χρέωσης όπως θα δούμε στην συνέχεια.

Γενικά, έστω μια στατική Markov-Modulated Fluid (MMF) πηγή η οποία περιγράφεται από μια αλυσίδα συνεχούς χρόνου με πεπερασμένο πλήθος καταστάσεων, με κατανομή π στην μόνιμη κατάσταση, πίνακα Q ρυθμού μεταβάσεων και σταθερό ρυθμό παραγωγής κίνησης h_i όταν η αλυσίδα βρίσκεται στην κατάσταση i. Από το [39] προκύπτει ότι

$$\alpha(s,t) = \frac{1}{st}\log\left\{\pi \exp\left[\left(Q + \mathbf{h}s\right)t\right]\mathbf{1}\right\} \tag{2.7}$$

όπου $\mathbf{h} = diag(h_i)_i$.

Στην παρούσα εργασία μας θεωρούμε MMF μοντέλα πηγών με δύο και τρεις καταστάσεις (Σχήματα 3.6 και 3.8), όπως και αθροιστικές MMF διεργασίες (Σχήμα 4.4).

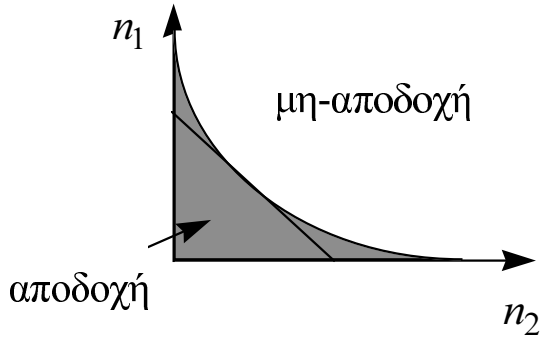
2. Χρέωση βασισμένη στο ισοδύναμο εύρος ζώνης

Η απλή καταμέτρηση της πληροφορίας που εισάγει μια πηγή στο δίκτυο (π.χ. πακέτα, bits), δεν εκφράζει την εκρηκτικότητά της, επομένως δεν είναι επαρκής για να εκφράσει τη χρήση που υφίσταται το δίκτυο από αυτή. Οι μηχανισμοί χρέωσης που βασίζονται στη χρήση πόρων, χρειάζονται ένα διαφορετικό μέτρο που να περιγράφει τις ιδιαιτερότητες κάθε πηγής (στατιστικά χαρακτηριστικά κίνησης, απαιτήσεις χρήστη) στο συγκεκριμένο περιβάλλον δικτύου (διαθέσιμη χωρητικότητα, χώρος ενταμίευσης). Και αυτό γιατί πρέπει να εξυπηρετούνται οι στόχοι στατιστικής πολυπλεξίας του ευρυζώνιου δικτύου.

Το ισοδύναμο εύρος ζώνης πηγής, όπως το ορίσαμε, είναι κατάλληλο στατιστικό μέγεθος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο στατιστικό διαμοιρασμό των πόρων. Επομένως, αφού μια παράμετρος εκφράζει την χρήση των πόρων του δικτύου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους ανάλογους μηχανισμούς χρέωσης. Αυτό φαίνεται στη συνέχεια, εξετάζοντας το *πρότυπο πρόβλημα ΕΑΚ*.

Έστω σύνδεσμος ΑΤΜ χωρητικότητας C, με συνολικό χώρο ενταμίευσης B. Ο σύνδεσμος τροφοδοτείται με k διαφορετικές κλάσεις πηγών κίνησης, με n_i πηγές από την κλάση i. Έστω επίσης ότι όλοι χρήστες εκφράζουν την ίδια απαίτηση σε Ποιότητα Εξυπηρέτησης, π.χ. *Πιθανότητα Απώλειας Κελιού* (ΠΑΚ) $\le e^{-\gamma}$. Το πρόβλημα που μελετάμε είναι η χρέωση των χρηστών, ανάλογα με την χρήση που θα κάνουν στον διαμοιραζόμενο πόρο. Είναι σημαντικό να διευκρινίσουμε ότι, σε ένα δίκαιο μηχανισμό χρέωσης, μας ενδιαφέρει αρχικά η σχετική χρέωση των χρηστών και όχι η απόλυτη εκφρασμένη σε νομισματικές μονάδες π.χ. ένας χρήστης που επιβάρυνε το σύνδεσμο διπλά από κάποιον άλλο να χρεωθεί διπλάσια.

Αρχικά, πριν χρεώσουμε τους χρήστες, πρέπει να αποφασίσουμε ποιοί θα είναι αυτοί που θα τον χρησιμοποιήσουν. Το ΑΤΜ δίκτυο στηρίζεται σε μηχανισμούς ελέγχου ώστε να αποφεύγεται η *συμφόρηση*. Σύμφωνα με την σύσταση I.371 της ITU ([33]), ως συμφόρηση ορίζεται η κατάσταση στην οποία το δίκτυο δεν είναι σε θέση να ικανοποιήσει τις συμφωνημένες απαιτήσεις Ποιότητας Εξυπηρέτησης για κάποια κλήση που ήδη εξυπηρετεί. Για την εξασφάλιση της συμφωνημένης Ποιότητας Εξυπηρέτησης στις κλήσεις και για την αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου, έχουν ορισθεί ένα σύνολο ενεργειών που διαμοιράζονται στον *Έλεγχο Κίνησης* και στον *Έλεγχο Συμφόρησης*. Ο Έλεγχος Κίνησης αναφέρεται στο σύνολο ενεργειών που λαμβάνονται από το δίκτυο με σκοπό την αποφυγή των συνθηκών συμφόρησης. Βασική λειτουργία του Ελέγχου Κίνησης είναι ο Έλεγχος Αποδοχής Κλήσης (ΕΑΚ), ο οποίος με βάση (1) την υπάρχουσα διαθέσιμη χωρητικότητα, και (2) την εξασφάλιση εγγυημένης εξυπηρέτησης στις ήδη υπάρχουσες κλήσεις, υπολογίζει την *Περιοχή Αποδοχής Κλήσεων* σε πραγματικό χρόνο. Αυτός ο υπολογισμός είναι γενικά πολύ δύσκολο να γίνει ακριβώς, και είναι συνήθως προσεγγιστικός. Το υποσύνολο αυτό του Z_+^k, έστω $A(C,B,\gamma)$, περιλαμβάνει όλα τα διανύσματα $\mathbf{n}=(n_1,\ldots,n_k)$, τέτοια ώστε να ικανοποιούνται οι παραπάνω περιορισμοί. Κάθε σημείο δηλαδή της περιοχής A αντιστοιχεί και σε μια διαφορετική αποδεκτή n-άδα πηγών. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η A για περίπτωση δύο κλάσεων πηγών.



Σχήμα 2.1: Η Περιοχή Αποδοχής Κλήσεων για την περίπτωση πηγών τύπου-1,2

Υποθέτουμε ότι το κριτήριο για τον ΕΑΚ είναι

$$n_1 \cdot h_1 + \ldots + n_k \cdot h_k < C$$

δηλ. δεσμεύομε τους πόρους με βάση τον **μέγιστο ρυθμό** κίνησης κάθε πηγής. Το κριτήριο θυμίζει μεταγωγή κυκλωμάτων, δεδομένου ότι δεσμεύει συγκεκριμένο εύρος ζώνης για κάθε πηγή, είναι υπολογιστικά απλό (γραμμικό ως προς τα n) και το σημαντικότερο, εξασφαλίζει μηδενικές απώλειες πληροφορίας με $B = \sum n_i$. Το πρόβλημα είναι ότι ο μηχανισμός αυτός είναι συντηρητικός στις αποφάσεις του, γιατί θεωρεί ότι ταυτόχρονα όλες οι πηγές θα στείλουν τη χειρότερη δυνατή κίνηση (με μέγιστο ρυθμό), και άρα δεν πετυχαίνει καθόλου στατιστική πολυπλεξία (η συνθήκη είναι ικανή). Ο μηχανισμός χρέωσης βλέποντας ότι έχει δεσμευτεί για κάθε πηγή κλάσης i εύρος ζώνης h_i, θεωρεί ότι χρησιμοποιήθηκε και τόσο καθ΄ όλη την διάρκεια της κλήσης, άσχετα με το πόσες φορές στάλθηκε κίνηση με αυτό το ρυθμό. Το αποτέλεσμα είναι ο μηχανισμός αυτός να αποδέχεται λίγους χρήστες, οι οποίοι θα επιβαρύνονται περισσότερο από το μηχανισμό χρέωσης. Η χρέωση που καλείται να πληρώσει κάθε χρήστης είναι $r \cdot ht$, όπου r σταθερός συντελεστής.

Μια δεύτερη επιλογή είναι να γίνει αποδοχή αυτών των πηγών που ικανοποιούν την

$$n_1 \cdot m_1 + \ldots + n_k \cdot m_k < C$$

δηλαδή δέσμευση πόρων με βάση τον **μέσο ρυθμό** κίνησης. Το κριτήριο είναι επίσης γραμμικό ως προς τα n, και πετυχαίνει τον καλύτερο δυνατό διαμοιρασμό του διαθέσιμου εύρους ζώνης, άρα την καλύτερη στατιστική πολυπλεξία. Όμως για να μπορέσει να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις σε χαμηλές απώλειες, χρειάζεται πολύ μεγάλο (θεωρητικά άπειρο) μέγεθος ενταμιευτή (η συνθήκη είναι αναγκαία). Για ρεαλιστικά μεγέθη ενταμιευτών, παρατηρούμε σημαντικές απώλειες κελιών, και γι' αυτά τα δίκτυα έχει υιοθετηθεί η έννοια του **ισοδυνάμου εύρους ζώνης** πηγής.

Πιο συγκεκριμένα, ως αναγκαία και ικανή συνθήκη για την Αποδοχή Κλήσεων λαμβάνεται (προσεγγιστικά) η

$$n_1 \cdot \alpha_1 + \ldots + n_k \cdot \alpha_k < C' \qquad (2.8)$$

όπου το C' εξαρτάται από τα C και B, τις απαιτήσεις σε Ποιότητα Εξυπηρέτησης των χρηστών και τη συνολική κίνηση των πηγών (σημειώστε ότι ο αναλυτικός

υπολογισμός της περιοχής A σε αυτή την περίπτωση είναι σχεδόν αδύνατος). Σε περίπτωση που η συνθήκη αυτή εφαρμοζόταν για τις πηγές του Σχήματος 2.1, το όριο της περιοχής που ορίζεται από την (2.8) θα ήταν η ευθεία του σχήματος. Παρατηρείστε ότι με αυτή τη συνθήκη, οι απαιτήσεις για Ποιότητα Εξυπηρέτησης που επηρεάζουν τον υπολογισμό της A μέσω του C', και εισέρχονται και στον υπολογισμό των ισοδυνάμων ευρών ζώνης α_i. Για το πώς ορίζεται το α_i βλέπε παράγραφο 2.1 (για απλές περιπτώσεις) και παράγραφο 2.3 (γενικά). Τέλος, προκύπτει ότι ισχύει $m_i < \alpha_i < h_i$.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε την άμεση σχέση μηχανισμού ΕΑΚ και μηχανισμών χρέωσης βάσει χρήσεως.

3. Ασυμπτωτικά μοντέλα πολυπλεξίας

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα πολυπλεξίας, προκείμενου να αναλύσουν την συμπεριφορά των μεταγωγέων ATM. Χρησιμοποιώντας την έννοια του ισοδύναμου εύρους ζώνης, προσπαθούν να εγγυηθούν κάποιο επίπεδο Ποιότητας Εξυπηρέτησης (απώλεια πληροφορίας, καθυστέρηση) περιορίζοντας τον αριθμό των πηγών που εξυπηρετούνται έτσι ώστε το συνολικό ισοδύναμο εύρος ζώνης να είναι κάτω από ένα κατώφλι. Για τον προσδιορισμό διαφόρων στατιστικών μεγεθών σε αυτή την ανάλυση, γίνεται είτε χρήση της *Θεωρίας Ουρών* είτε, συνηθέστερα, της *Θεωρίας των Μεγάλων Αποκλίσεων*. Η δεύτερη χαρακτηρίζεται ως η θεωρία των σπανίων γεγονότων, και είναι μια μοντέρνα θεωρία των Μαθηματικών. Για μια ολοκληρωμένη παρουσίαση θεωρίας και εφαρμογών συστήνουμε το βιβλίο του Bucklew (1990) και το άρθρο του Weiss (1995).

Το μοντέλο που θα παρουσιάσουμε στην συνέχεια βασίζεται σε προσεγγιστικές μεθόδους της Θεωρίας Μεγάλων Αποκλίσεων, είναι ένα ασυμπτωτικό αποτέλεσμα, αρκετά αξιόπιστο σύμφωνα με προσομοιώσεις.

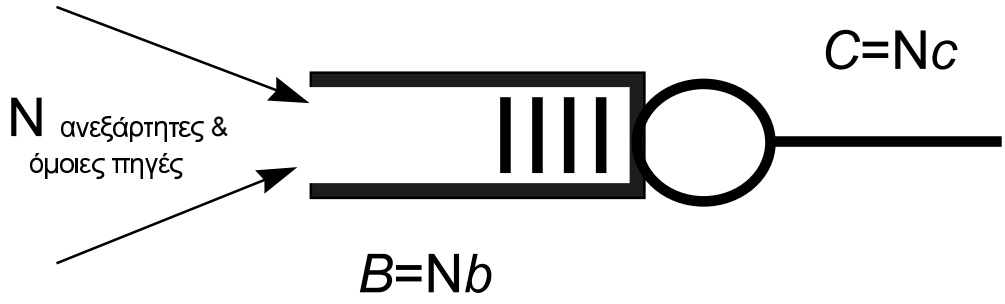
3.1. Σύστημα με μεγάλο πλήθος πηγών

Έστω ένας σύνδεσμος εξόδου με πολιτική εξυπηρέτησης FCFS, εξοπλισμένος με ενταμιευτή, που τροφοδοτείται με κίνηση στάσιμων και εργοδικών πηγών. Θα παρουσιάσουμε το ασυμπτωτικό αποτέλεσμα που ισχύει όταν το πλήθος των εξυπηρετούμενων πηγών, το μέγεθος του ενταμιευτή και το εύρος ζώνης του συνδέσμου αυξάνονται πολλαπλασιαστικά ταυτόχρονα.

Το πρόβλημα απασχόλησε αρχικά τον Weiss (1986), για την ειδική περίπτωση όπου οι πηγές κίνησης είναι ON/OFF MMF. Τα τελευταία χρόνια οι Courcoubetis and Weber (1996), Botvich and Duffield (1994) και Simonian and Guilbert (1994), έχουν δείξει ότι η ΠΑΚ φθίνει με εκθετικό τρόπο ως προς το πλήθος των εξυπηρετούμενων πηγών, όταν αυτό είναι μεγάλο. Το ασυμπτωτικό αυτό αποτέλεσμα είναι γνωστό ως "*ασυμπτωτικό μεγάλου N*", γιατί είναι πολλές οι πηγές που πολυπλέκονται. Έχει πολύ μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής από άλλα ασυμπωτικά αποτελέσματα (π.χ. "*ασυμπτωτικό μεγάλου ενταμιευτή", σύστημα χωρίς ενταμιευτή*), καλύπτοντας μια ευρεία περιοχή ενδιαφέροντος στα δίκτυα ATM.

3.1.1. Το μοντέλο και η ασυμπτωτική σχέση

Η συμπεριφορά ενός συνδέσμου εξόδου ATM σε ένα μεταγωγέα δικτύου μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια ουρά αναμονής. Η ουρά τροφοδοτείται με N όμοιες και ανεξάρτητες πηγές. Έστω b, c τα ποσά σε μέγεθος ενταμίευσης και εύρος ζώνης που αναλογούν σε καθεμία από τις πηγές. Ο συνολικός χώρος ενταμίευσης και εύρος ζώνης, κλιμακώνεται γραμμικά ως προς το N, έτσι ώστε $B = Nb$ και $C = Nc$ (βλέπε Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Το μοντέλο ανάλυσης ενός συνδέσμου εξόδου ATM για την ασυμπτωτική μελέτη συστημάτων με μεγάλο πλήθος εξυπηρετούμενων πηγών

Υποθέτουμε ότι ο χρόνος διακριτοποιείται σε μικρά χρονικά διαστήματα $n = 1,2,\ldots$, και έστω X_n^j η εισαγόμενη κίνηση από την j -οστή πηγή στο n. Υποθέτουμε επίσης ότι κατά τη διάρκεια του κάθε διαστήματος ο ρυθμός άφιξης και αναχώρησης της κίνησης είναι σταθερός και ότι η χωρητικότητα αφορά δυνατότητα μετάδοσης κατά την διάρκεια αυτού του διαστήματος. Εάν $Y_n = \sum_{j=1}^{N} X_n^j$ είναι οι συνολικές αφίξεις κατά το χρονικό διάστημα n, και W_n το μέγεθος της ουράς στην αρχή του διαστήματος, τότε ισχύει

$$W_{n+1} = \left[\min\left(\left(W_n + Y_n - C\right), B\right)\right]^+$$

όπου $[x]^+ = \max(0, x)$.

Έστω $\Phi(c,b,N) = P(W_n = B)$ η πιθανότητα υπερχείλισης του ενταμιευτή, στην μόνιμη κατάσταση. Για το πρόβλημα αυτό, οι Courcoubetis and Weber (1996), βασιζόμενοι στην θεωρία μεγάλων αποκλίσεων, έδειξαν ότι

$$\lim_{N\to\infty} \frac{1}{N} \log \Phi(c,b,N) = -\mathrm{I}(c,b)$$

όπου

$$\mathrm{I}(c,b) = \inf_t \sup_s \left[s(tc+b) - st\alpha(s,t)\right]$$

η συνάρτηση ρυθμού. Δηλαδή,

$$\log \Phi(c,b,N) \approx -\inf_t \sup_s \left[s(tC+B) - stN\alpha(s,t)\right] \qquad (2.9)$$

όπου $\alpha(s,t)$ το ισοδύναμο εύρος ζώνης καθεμιάς πηγής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ΠΑΚ μπορεί να εκτιμηθεί από την σχέση

$$\Phi(c,b,N) = \exp\left(-N\mathrm{I}(c,b) + g_1(c,b,N)\right)$$

όπου $\lim_{N\to\infty} g_1(c,b,N)/N = 0$. Το ασυμπτωτικό αυτό μας λέει στην ουσία ότι για μεγάλα συστήματα η πιθανότητα υπερχείλισης $\Phi(N)$ μπορεί να προσεγγισθεί από την

$$\Phi(N) = e^{-NI(c,b)+o(N)} = e^{-NI(c,b)}e^{o(N)} = AN^{\xi}e^{-NI(c,b)} \qquad (2.10)$$

όπου A, ξ σταθερές και $I(c,b)$ η συνάρτηση ρυθμού.

3.2. Οι παράμετροι s *και* t

Όπως προαναφέρθηκε, οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων s και t, καθορίζονται όχι μόνο από την πηγή κίνησης αλλά και από τα χαρακτηριστικά του πόρου, όπως τη χωρητικότητα, το μεγέθος του ενταμιευτή αλλά και την απαιτούμενη Ποιότητα Εξυπηρέτησης.

Μια ενδιαφέρουσα ερμηνεία του t (άμεση εξαγώγιμη από το ασυμπτωτικό), είναι ότι αυτή η παράμετρος αντιστοιχεί στο χρόνο κατά τον οποίο ο εξυπηρετητής είναι συνεχώς απασχολημένος πριν από μια επικείμενη υπερχείλιση ([16]).

Η ερμηνεία του s είναι λιγότερο διαισθητική. Αν χρησιμοποιήσουμε το "*ασυμπτωτικό μεγάλου N"* για προσδιορισμό της περιοχής αποδοχής κλήσης, η ικανή και αναγκαία συνθήκη (2.8) γίνεται

$$\sum_{j=1}^{k} n_j \alpha_j(s^*,t^*) \le C'$$

όπου τα (s^*,t^*) αποτελούν τα σημεία βελτιστοποίησης στην (2.9). Επίσης ([16]), ισχύει ότι

$$\frac{\partial I}{\partial c} = s^* t^* \quad \text{και} \quad \frac{\partial I}{\partial b} = s^*$$

Με αυτόν τον τρόπο αντιλαμβανόμαστε διαισθητικά ότι η παράμετρος s σχετίζεται με τον βαθμό πολυπλεξίας.

Επομένως, το s εκφράζει την κλιμάκωση-χώρου και το t την κλιμάκωση-χρόνου. Έτσι, οι μονάδες του s μπορεί να είναι Kbits^{-1}, και του t secs.

Η ύπαρξη ενός μηχανισμού ο οποίος θα παρέχει ακριβή και έγκαιρο υπολογισμό του ζεύγους (s^*,t^*), κρίνεται εξαιρετικά σημαντική, επειδή τα στατιστικά της $\{X_n^i\}$ δεν είναι εξ' αρχής γνωστά πλήρως. Ένας τέτοιος μηχανισμός πρέπει να λειτουργεί on-line, και λαμβάνοντας μετρήσεις να εκτιμά την ΠΑΚ, να υπολογίζει τα (s^*,t^*), και να προσεγγίζει την Περιοχή Αποδοχής Κλήσης υπολογίζοντας τα $\alpha(s^*,t^*)$ των πηγών και το σύνορο C'. Όμως, όταν η ΠΑΚ είναι μικρή, δεν είναι δυνατή η άμεση εκτίμησή της βάσει του πλήθους απωλειών.

Οι Courcoubetis *et al.* (1995) πρότεινε μια πρωτότυπη μέθοδο ταχείας εκτίμησης της ΠΑΚ βάσει μετρήσεων, η οποία βασίζεται στο ασυμπτωτικό αποτέλεσμα για μεγάλο μέγεθος ενταμιευτή (βλέπε [12]). Ο αλγόριθμος, γνωστός ως **MINOS** (Monitor to Inter Network Overflow Statistics), υλοποιείται με την τεχνική των "ιδεατών" ενταμιευτών.

Στο [13], ο Courcoubetis *et al.* παρουσιάζει μια παρόμοια μεθοδολογία για on-line εκτίμηση της ΠΑΚ, η οποία βασίζεται στο "*ασυμπτωτικό μεγάλου N".* Ακολουθώντας

την ίδια ιδέα με την μέθοδο των ιδεατών ενταμιευτών, επιλέγονται "ιδεατά" υποσυστήματα με σκοπό να προσεγγίζουν τον όρο $o(N)$ της (2.11) με το άθροισμα $\xi \log(N) + \log(A)$, υπολογίζοντας τα και A, ξ και I.

Κεφάλαιο 3

Μηχανισμοί χρέωσης για Δίκτυα ATM

Ο καθορισμός της πραγματικής χρήσης που υφίσταται το δίκτυο είναι προβληματικός από τη στιγμή που σαν χρήση δεν μπορεί να θεωρηθεί μια απλή καταμέτρηση των bits που μεταφέρονται. Στο κόσμο των τηλεπικοινωνιών, ιδιαίτερα στην βιομηχανία, υπάρχει μια έντονη ασυμφωνία γι΄αυτό το ζήτημα, που αποτυπώνεται σε δυο ακραίες τάσεις. Η μία υποστηρίζει ότι ο χρήστης θα πρέπει να γνωστοποιεί στο φορέα μια πλήρη περιγραφή για την κίνηση που πρόκειται να εισάγει στο δίκτυο, και στην συνέχεια να αστυνομεύεται η πηγή του. Η δεύτερη τάση κατανοεί αυτή την αδυναμία πρόβλεψης του χρήστη, λόγω της φύσης των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, και υποστηρίζει ότι είναι κύρια ευθύνη του δικτύου να αναλάβει αυτό το ζήτημα. Μολονότι και οι δύο τάσεις είναι ακραίες, αναγνωρίζουν την ανάγκη για στατιστική πολυπλεξία. Μια ισορροπημένη θέση θα στηριζόταν στην μέχρι ενός βαθμού αβεβαιότητα του χρήστη για τα στατιστικά χαρακτηριστικά της κίνησης και την ικανότητα του δικτύου να πολυπλέκει αποδοτικά διαφορετικές πηγές, βάσει των περιγραφών των χρηστών, των on-line μετρήσεων της κίνησης, και της Ποιότητας Εξυπηρέτησης.

Το *ισοδύναμο εύρος ζώνης* πηγής είναι ένα στατιστικό μέγεθος που εκφράζει την χρησιμοποίηση των κοινόχρηστων πόρων και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους μηχανισμούς που επιτελούν χρέωση βάσει χρήσης. (Ουσιαστικά εκφράζει τον βαθμό εκρηκτικότητας μιας πηγής και άρα οι μηχανισμοί που βασίζονται στην έννοια αυτή, χρεώνουν και την εκρηκτικότητα των πηγών).

Ιδανικά, μια χρέωση βασισμένη στην χρήση, θα ήταν ανάλογη του ισοδυνάμου εύρους ζώνης της πηγής και της διάρκειας κλήσης. Επειδή η εκτίμηση του ισοδυνάμου εύρους ζώνης είναι δύσκολη πριν την εγκατάσταση κλήσης, λόγω της απρόβλεπτης εκρηκτικής φύσης των υπηρεσιών που παρέχουν τα δίκτυα B-ISDN/ATM, καταφεύγουμε σε συναρτήσεις χρέωσης οι οποίες βασίζονται σε άνω φράγματα της συνάρτησης του ισοδυνάμου εύρους ζώνης, βάσει των περιορισμών του συμβολαίου μεταξύ χρήστη και δικτύου (τα φράγματα αυτά υπολογίζονται εύκολα).

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε τους δύο μηχανισμούς χρέωσης. Η βασική ιδέα είναι η εξής: ο χρήστης προσδιορίζει παραμέτρους της συνάρτησης χρέωσης.

Ουσιαστικά, με αυτή του την πρόβλεψη, ο χρήστης παρέχει πληροφορία στο δίκτυο για την στατιστική συμπεριφορά της κίνησης που επιθυμεί να εισάγει. Αφού γίνει δεκτή η κλήση, η χρέωση ανακοινώνεται στο τέλος, με βάση την ακρίβεια της πρόβλεψης και την πραγματική χρήση των πόρων του δικτύου. Έτσι ο χρήστης χρεώνεται συνδυασμένα και για τους πόρους που δεσμεύονται γι΄αυτόν και γι΄αυτούς που όντως χρησιμοποιούνται.

Συνεπώς, παρατηρούμε την λειτουργία του μηχανισμού χρέωσης και σαν ευρύτερου μηχανισμού ελέγχου του δικτύου. Το δίκτυο αξιοποιεί την πληροφορία του χρήστη για να διαθέσει τους πόρους του με αποτελεσματικό τρόπο, ενώ, όπως θα φανεί αργότερα, και ο χρήστης έχει οικονομικό συμφέρον να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής στις προβλέψεις του.

Οι δύο μηχανισμοί χρέωσης που θα παρουσιάσουμε στις παραγράφους 3.1 και 3.2, εκτελούν συνδυασμένη *χρονοχρέωση* και *ογκοχρέωση* στις κλήσεις των χρηστών. Βασίζονται δηλαδή τόσο στην διάρκεια της κλήσης όσο και στην ποσότητα πληροφορίας που μεταφέρεται. Οι απαραίτητες μετρήσεις, όπως και η ανάλογη μεταφορά της πληροφορίας (π.χ. για λόγους λογιστικούς), είναι εφικτό να υλοποιηθούν.

Αρχικά, παρουσιάζεται η *"Απλή" Φόρμουλα Χρέωσης*. Στην αρχική της μορφή προτάθηκε για ON/OFF πηγές με γνωστό μέγιστο ρυθμό, και βασίστηκε σε δύο σταθερές που τις καθορίζει ο χρήστης, εκτιμώντας το μέσο ρυθμό κίνησης στην κλήση του.

Ακολουθεί ένα πιο σύνθετο σχήμα, βασισμένο σε πιο πολύπλοκες μετρήσεις για μια κλήση και όχι μόνο στην συνολική διάρκειά της και πληροφορία. Είναι *το "Tax-Band" Σχήμα Χρέωσης*, με δύο διαβαθμίσεις. Βασίζεται σε πιο ακριβές φράγμα του ισοδυνάμου εύρους ζώνης, και καλείται έτσι λόγω της ομοιότητάς του με το φορολογικό σύστημα με διαβαθμίσεις. Αυτό μπορεί να γενικευθεί για μεγαλύτερο αριθμό διαβαθμίσεων.

Και τα δύο σχήματα, "Απλή" φόρμουλα και "Tax-Band", χρεώνουν την χρήση των πόρων του δικτύου, φράσσοντας άνω την καμπύλη του ισοδύναμου εύρους ζώνης κατά διαφορετικό η καθεμιά (βλέπε Παράρτημα). Για την βελτιστοποίηση της ακρίβειας υπεύθυνος είναι και ο χρήστης με τις δηλώσεις του στην αρχή της κλήσης.

Στην συνέχεια περιγράφουμε τους προσομοιωτές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία όπως και κάποια συγκριτικά αριθμητικά αποτελέσματα, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και αποτίμηση των σχημάτων χρέωσης. Η κίνηση που χρησιμοποιήθηκε για χρέωση, προέρχεται είτε από πραγματικές πηγές (ακολουθίες MPEG-I video), είτε από θεωρητικά μοντέλα πηγών Markov, συνεχούς χρόνου, δύο και τριών καταστάσεων. Τα μοντέλα αυτά είναι αρκετά διαδεδομένα για χαρακτηρισμό πηγών πραγματικού χρόνου (π.χ. φωνής, εικονο-τηλεφώνου κτλ.). Στόχος μας ήταν να διερευνήσουμε την καταλληλότητα των σχημάτων χρέωσης για κάθε τύπο κίνησης.

1. Η "Απλή" φόρμουλα χρέωσης

Το σχήμα που θα παρουσιάσουμε εισήχθη από τον Frank Kelly (1994). Χαρακτηρίστηκε έτσι λόγω της απλότητάς της, όσον αφορά τις απαιτήσεις σε πληροφορία και τις δυνατότητες υλοποίησης. Οι βασικοί στόχοι, πέραν της απλότητας, που ικανοποιούνται είναι οι εξής:

- Ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των χρηστών και του δικτύου
- Οι εκτιμήσεις των χρηστών είναι επισφαλείς για το δίκτυο
- Ύπαρξη οικονομικού κινήτρου στους χρήστες για όσο το δυνατό ακριβέστερες εκτιμήσεις
- Δικαιοσύνη

Η παρούσα παράγραφος βασίστηκε στο άρθρο [37] του Kelly.

Ας υποθέσουμε ότι είναι γνωστός στον χρήστη και στο δίκτυο, ο μέγιστος ρυθμός h μιας ON/OFF πηγής. Μια τέτοια υπόθεση είναι ρεαλιστική δεδομένου ότι οι χρήστες αναγκάζονται, από συσκευές αστυνόμευσης και εξομάλυνσης κίνησης, να στέλνουν τα δεδομένα τους με κάποιο μέγιστο ρυθμό. Ο χρήστης (ο αποκλειστικός υπεύθυνος για την πηγή) δυστυχώς, δεν μπορεί να είναι βέβαιος για το μέσο ρυθμό της κίνησης που θα εισάγει στο δίκτυο. Ουσιαστικά, δεν γνωρίζει την ποσότητα της πληροφορίας που θα στείλει κατά την διάρκεια της κλήσης. Μια υπόθεση που είναι επίσης ρεαλιστική λόγω της φύσης των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. Παρόλα αυτά, υποθέτουμε ότι του είναι γνωστή η a priori κατανομή G του μέσου ρυθμού M (π.χ. από παρατηρήσεις όμοιων κλήσεων που έχει επαναλάβει στο παρελθόν).

Για την αυτή την πηγή, αν ίσχυε $M = m$, το ισοδύναμο εύρος ζώνης θα δινόταν από την (2.6). Θα δείξουμε ότι το "a priori" μέσο ισοδύναμο εύρος ζώνης $\overline{B}$ εξαρτάται μόνο από την μέση τιμή $\mathrm{E}_G(M) = \int_0^h x dG(x)$ και όχι από ολόκληρη την κατανομή της τυχαίας μεταβλητής G. Δηλαδή,

$$\frac{1}{st}\log Z = \frac{1}{st}\log \mathrm{E}\left[e^{stX}\right] = \frac{1}{st}\log \mathrm{E}_G\left\{\mathrm{E}\left[e^{stX}\,|\,M\right]\right\}$$

$$= \frac{1}{st}\log \mathrm{E}_G\left\{1+\frac{M}{h}\left(e^{sth}-1\right)\right\} = \frac{1}{st}\log\left\{1+\frac{\mathrm{E}_G(M)}{h}\left(e^{sth}-1\right)\right\}$$

$$\Rightarrow \overline{B} = B\left(\mathrm{E}_G(M)\right)$$

Έτσι το δίκτυο για τον υπολογισμό του μέσου ισοδύναμου εύρους ζώνης κατά τον ΕΑΚ, αρκεί να γνωρίζει μόνο το $\mathrm{E}_G(M)$. Αφού του αρκεί αυτό, πρέπει μέσω του μηχανισμού χρέωσης, να ενθαρρύνει (με οικονομικά κίνητρα) τον χρήστη να του το ανακοινώσει ή να το προβλέψει, αν δεν το ξέρει, με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια. Ο χρήστης ο οποίος θα προτιμήσει το δίκτυο του οποίου η πολιτική χρέωσης βασίζεται στην "Απλή" Φόρμουλα, πρέπει απαραιτήτως πριν αρχίσει να εξυπηρετείται, να δώσει μια εκτίμηση m του M. Αυτό συνήθως γίνεται κατά την διαδικασία ΕΑΚ.

Η *συνάρτηση (ή ρυθμός) χρέωσης* $f(\cdot)$, λαμβάνει υπ' όψιν δύο παραμέτρους που σχετίζονται με την μέση τιμή: τη δηλούμενη εκτίμηση m και την πραγματική (μετρούμενη) τιμή M, που είναι γνωστή στο τέλος της κλήσης, όπου και ανακοινώνεται η ταρίφα. Η συνάρτηση $f(m;M)$ πρέπει να ορισθεί έτσι ώστε να πληρούνται οι στόχοι που προαναφέρθηκαν.

Ας υποθέσουμε ότι ο χρήστης, όπως είναι φυσιολογικό, προσπαθεί να επιλέξει το m έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει την αναμενόμενη τιμή χρέωσής του $\mathrm{E}_G\left[f(m;M)\right]$. Έστω $\hat{m} = \arg\min \mathrm{E}_G\left[f(m;M)\right]$ η βέλτιστη δήλωση, η δήλωση δηλαδή που ελαχιστοποιεί την μέση χρέωση (ανά μονάδα χρόνου). Το δίκτυο έχει σαν στόχο τον υπολογισμό του ισοδύναμου εύρους ζώνης της πηγής, εξάγοντας το $\mathrm{E}_G(M)$ από τη δήλωση. Η πιο επιθυμητή περίπτωση (λόγω απλότητας) είναι να ισχύει

$$\hat{m} = \mathrm{E}_G(M) \tag{3.1}$$

δηλ. η φόρμουλα να δίνει κίνητρο στους χρήστες να ανακοινώνουν το καλύτερο γι' αυτούς και ταυτόχρονα αυτή τους η απόφαση να είναι χρήσιμη και για το δίκτυο!

Μια δεύτερη ιδιότητα που πρέπει να ικανοποιεί το $\hat{m}$, είναι ότι η αναμενόμενη ταρίφα πρέπει να ακολουθεί τη λογική της χρέωσης βάσει χρήσης, και επομένως να εξαρτάται από το ισοδύναμο εύρος ζώνης της πηγής (π.χ. να είναι ανάλογη). Ας απαιτήσουμε λοιπόν,

$$\mathrm{E}_G\left[f(\hat{m};M)\right] = B(\hat{m}) \tag{3.2}$$

Ο Kelly (1994) ορίζει μια τέτοια συνάρτηση για πηγή ON/OFF που ικανοποιεί τις απαιτήσεις που θέσαμε. Είναι η εξίσωση εφαπτομένης της καμπύλης $B(M)$ στο σημείο $M = m$ (βλέπε Σχήμα 3.1),

$$f(m;M) = \mathrm{a}(m) + \mathrm{b}(m)\,M \tag{3.3}$$

Η απόδειξη βασίζεται στο ότι η $B(M)$ είναι κοίλη συνάρτηση. Παραγωγίζοντας την συνάρτηση (3.3) στο σημείο m μπορούμε να υπολογίσουμε τους συντελεστές της εφαπτόμενης ευθείας

$$\mathrm{b}(m) = \frac{1}{st}\,\frac{e^{sth}-1}{m\left(e^{sth}-1\right)+h}, \quad \mathrm{a}(m) = B(m) - m\mathrm{b}(m) \tag{3.4}$$

Θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ότι η σταθερά $\mathrm{a}(m)$ αναφέρεται στο *σταθερό κόστος* της χρέωσης, ενώ η σταθερά $\mathrm{b}(m)$ στο *μεταβλητό κόστος*.

Πολλαπλασιάζοντας το ρυθμό χρέωσης με την χρονική διάρκεια T της κλήσης, παίρνουμε το συνολικό κόστος

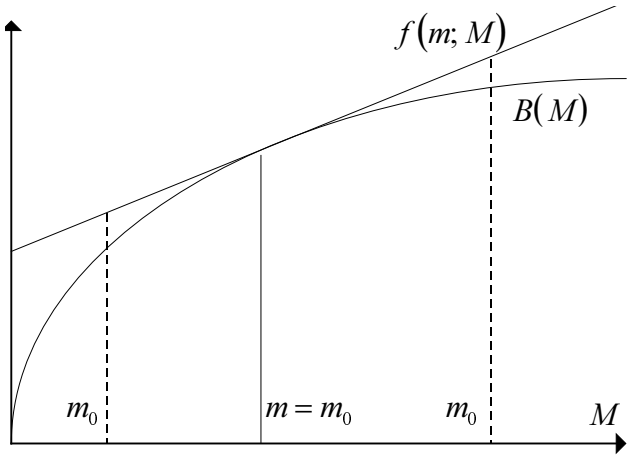
$$C(T,V) = \left[\mathrm{a}(m) + \mathrm{b}(m)\,M\right]T = \mathrm{a}(m)T + \mathrm{b}(m)V \tag{3.5}$$

όπου V η ποσότητα πληροφορίας που μεταφέρθηκε.

Άρα η $\mathrm{a}(m)$ είναι χρέωση ανά μονάδα χρόνου (π.χ. ανά δευτερόλεπτο, ώρα, μέρα), ενώ η $\mathrm{b}(m)$ είναι χρέωση ανά μονάδα κίνησης (π.χ. ανά bit, κελί, Megabit). Οι μονάδες των T, V εξαρτώνται από τη φύση της σύνδεσης (π.χ. μόνιμη ή όχι), και της υπηρεσίας. Έτσι η "Απλή" Φόρμουλα Χρέωσης είναι ταυτόχρονα μηχανισμός χρονοχρέωσης και ογκοχρέωσης (T,V). Παρατηρείστε ότι για $s = 0$ η χρέωση είναι $C(T,V) = V$, ενώ για πολύ μεγάλο s έχουμε $C(T,V) \cong hT$.

1.1. Σχολιασμός-Επεκτάσεις

Ο χρήστης ανακοινώνει τις τιμές των h, m και το δίκτυο του γνωστοποιεί τις σταθερές $\mathrm{a}(m)$, $\mathrm{b}(m)$ της φόρμουλας *(απλότητα)*. Δηλαδή ο χρήστης ορίζει την ευθεία πάνω στην οποία θα χρεωθεί (την εφαπτομένη της καμπύλης $B(M)$ στο σημείο m όπου αυτός υπέδειξε). Υπάρχουν τρία δυνατά σενάρια χρέωσης βάσει της μετρούμενης τιμής m_0 (βλέπε Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Χρέωση της "Απλής" φόρμουλας με βάση την εκτίμηση για το μέσο ρυθμό

- $m_0 = m \Rightarrow f(m; m_0) = B(m)$ Ο χρήστης χρεώνεται όσο περίμενε να χρεωθεί, αφού όντως χρησιμοποίησε ακριβώς όσους πόρους δεσμεύτηκαν γι'αυτόν
- $m_0 < m \Rightarrow B(m) > f(m; m_0) > B(m_0)$ Ο χρήστης χρεώνεται λιγότερο από αυτό που περίμενε αλλά περισσότερο από αυτό που πραγματικά χρησιμοποίησε, λόγω δέσμευσης πόρων
- $m_0 > m \Rightarrow f(m; m_0) > B(m_0) > B(m)$ Ο χρήστης χρεώνεται περισσότερο και από αυτό που περίμενε και από αυτό που χρησιμοποίησε

Παρατηρούμε, ότι αυτός ο μηχανισμός χρέωσης, "τιμωρεί" τους χρήστες στις περιπτώσεις που είναι ανακριβείς ως προς τους που δεσμεύτηκαν ότι θα χρησιμοποιήσουν. Πάνω στην καμπύλη $B(M)$ οι χρήστες χρεώνονται βέλτιστα (με βάση την χρήση των πόρων του δικτύου), ενώ πάνω στην ευθεία της ταρίφας $f(m; M)$ υπερχρεώνονται. Αυτό όμως είναι απόλυτα λογικό, σύμφωνα με το τρόπο λειτουργίας των ευρυζώνιων δικτύων. Στην πρώτη περίπτωση ο πελάτης υποχρησιμοποιεί τους πόρους που του ανατέθηκαν, δεδομένου ότι τους έχει δεσμεύσει σε όλη την διάρκεια της κλήσης, με πιθανό αποτέλεσμα το δίκτυο να μην αποδεχθεί πελάτες που πραγματικά θέλουν να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο, λόγω έλλειψης πόρων. Στην δεύτερη περίπτωση,

ο πελάτης χρησιμοποιεί περισσότερα από αυτά που ζήτησε, επηρεάζοντας συνήθως αρνητικά την λειτουργία του δικτύου (π.χ. εξυπηρέτηση άλλων πελατών).

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι υπάρχει **αμοιβαίο κίνητρο** ανάμεσα στους χρήστες και τον τηλεπικοινωνιακό φορέα για όσο το δυνατό ακριβέστερες (πιο κοντά στο m_0) προβλέψεις. Έτσι, σε περίπτωση ακριβών δηλώσεων, και αυτοί χρεώνονται βέλτιστα (όσο χρησιμοποίησαν πραγματικά) και το δίκτυο αναθέτει τους πόρους του βέλτιστα (ούτε σπαταλούνται, ούτε διαταράσσεται η λειτουργία του). Επίσης υπάρχει και η έννοια της **δικαιοσύνης** ως προς την αντιμετώπιση των χρηστών, δεδομένου ότι δεν υπάρχει περίπτωση κανείς τους να πληρώσει λιγότερο από αυτό που όντως χρησιμοποίησε, γιατί πάντοτε $f(m;m_0) \geq B(m)$. Το δίκτυο όμως φέρεται προνομιακά σ' αυτούς που προβλέπουν ακριβέστερα.

Προκύπτει επίσης ότι οι χρήστες έχουν κίνητρο να χρησιμοποιούν όλη τη γνώση τους για την κλήση που θα επακολουθήσει, και να βασίζουν την πρόβλεψή τους σε αυτή.

Η χρέωση λοιπόν με βάση την εφαπτόμενη της καμπύλης $B(M)$, εξασφαλίζει ότι ο χρήστης χρεώνεται βέλτιστα (ίσα με το ισοδύναμο εύρος πηγής), στην περίπτωση που προβλέψει ακριβώς το μέσο ρυθμό (ιδιότητα (3.2)). Αν επιμείνουμε μόνο στην ιδιότητα (3.1) για την βέλτιστη δήλωση, μπορούμε να κατασκευάσουμε και άλλα σχήματα χρέωσης, βασισμένα στις εφαπτόμενες ευθείες στο σημείο $m = M$, των αντίστοιχων κοίλων συναρτήσεων $F(M)$. Θα μπορούσαμε κάλλιστα να χρησιμοποιήσουμε αντί της ευθείας οποιαδήποτε κυρτή συνάρτηση μεγαλύτερη της $B(M)$, ακόμα και μη γραμμική.

Μη-γραμμικές (ως προς M) συναρτήσεις είναι δυνατό να μην ικανοποιούν ούτε την ιδιότητα (3.1). Για παράδειγμα, έστω $F(M)$ αύξουσα και συνεχής συνάρτηση, ώστε η χρέωση να δίνεται από την

$$f(m; M) = F(m) + \gamma \cdot \left[F(M) - F(m)\right]^+$$

όπου $[x]^+ = \max(0, x)$ και γ σταθερά. Τότε, η βέλτιστη δήλωση $\hat{m}$ είναι τέτοια ώστε

$$\Pr[M > \hat{m}] = \frac{1}{\gamma}.$$

Τέλος, θα κάνουμε μερικές παρατηρήσεις που βασίζονται στις ιδιότητες της συνάρτησης χρέωσης.

Στην περίπτωση που ο μέγιστος ρυθμός είναι μικρός σε σχέση με τη διαμοιρασμένη χωρητικότητα (π.χ. $h = 0.1\text{Mbps}$, $C = 0.1\text{Mbps}$) η σταθερά $\mathrm{a}(m)$ είναι πολύ μικρή σε σχέση με την $\mathrm{b}(m)$ και άρα $B(m) \approx M$. Επομένως αυτοί οι χρήστες έχουν μικρό κίνητρο για καλή πρόβλεψη (ούτε όμως το δίκτυο το ενδιαφέρει, λόγω εύκολης πολυπλεξίας). Αντίθετα, όταν οι πηγές έχουν μέγιστο ρυθμό συγκρίσιμο με τη χωρητικότητα (π.χ. $h = 2\text{Mbps}$, $C = 0.1\text{Mbps}$), τότε η σταθερά $\mathrm{a}(m)$ παίζει σημαντικό ρόλο.

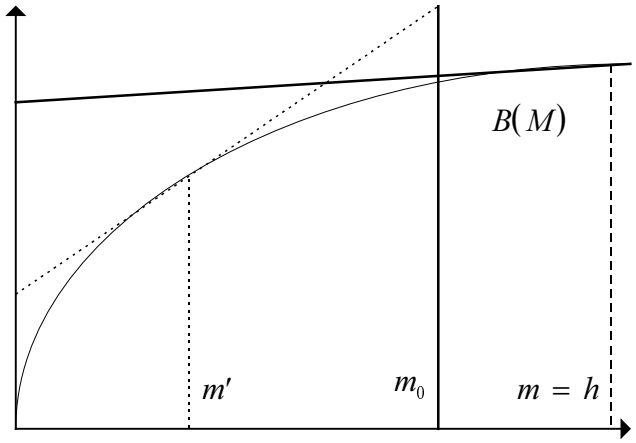
Η ιδιότητα της $B(m)$ ως κοίλης συνάρτησης απαντά και στο παρακάτω ενδιαφέρον ερώτημα των χρηστών: Υποτιθέμενος χρήστης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει δύο συνδέσμους αντί ενός, για να στείλει την ίδια ποσότητα πληροφορίας σε μικρότερο

χρονικό διάστημα, αλλά με τον ίδιο μέγιστο ρυθμό h. Αυτός ο διαμοιρασμός της κίνησης δεν αποτελεί οικονομικότερο τρόπο μετάδοσης, γιατί

$$\frac{1}{2}B(0)+\left(1-\frac{1}{2}\right)B(m)<B\left(\frac{1}{2}\cdot 0+\frac{1}{2}\cdot m\right)\Leftrightarrow B(m)<2B\left(\frac{m}{2}\right)$$

αφού $B(0)=0$. Θα δούμε στη συνέχεια ότι αυτό βοηθά και την διαχείριση πόρων του δικτύου. Σε περίπτωση όμως που ο μέγιστος και μέσος ρυθμός μειωθούν στο ήμισυ και στις δύο ταυτόχρονες συνδέσεις, ισχύει ότι $2B\left(\frac{m}{2},\frac{h}{2}\right)<B(m,h)$, που σημαίνει ότι συμφέρει το χρήστη να διαμοιράσει την κίνηση. Για την αποφυγή αυτών των περιπτώσεων που δεν συμβάλουν στην αποδοτική διαχείριση των πόρων του δικτύου, έχει προταθεί μια επιπλέον πάγια επιβάρυνση ανά σύνδεση, όπως θα δούμε στην συνέχεια.

Στην περίπτωση που ο χρήστης έχει μεγάλη άγνοια για την φύση της κίνησης που θα εισάγει στο δίκτυο, μια λύση είναι να δηλώσει $m=h$. Αν όντως η m_0 είναι κοντά στο h, η υπερχρέωση είναι αρκετά μικρότερη απ΄ότι αν είχε γίνει κάποια λάθος δήλωση m', λόγω της μορφής της καμπύλης $B(M)$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Δήλωση ίση με το μέγιστο ρυθμό

1.2. Προσαρμογή της "Απλής" Φόρμουλας Χρέωσης στις σημερινές τεχνολογίες

Για να προσαρμόσουμε την "Απλή" Φόρμουλα Χρέωσης στην πραγματικότητα των ευρυζώνιων δικτύων, πρέπει να λάβουμε υπ΄ όψη και άλλους παράγοντες. Αρχικά, ας υποθέσουμε ότι ένας χρήστης ζητά μια σύνδεση από τον φορέα και δηλώνει ως εκτιμούμενη παράμετρο του μέσου ρυθμού, $m=0$. Σύμφωνα με την (3.5), θα χρεωθεί

$$C(T,V) = [\mathrm{a}(0) + \mathrm{b}(0)] \cdot T = 0 \cdot T + \mathrm{b}(0) \cdot V = \mathrm{b}(0) \cdot V$$

Αν δεν στείλει τίποτα, τότε $C(T,V) = 0$. Στην πραγματικότητα το κόστος της χρέωσης δεν πρέπει να είναι μηδενικό. Για παράδειγμα, στα τηλεφωνικά δίκτυα χρεώνονται με μηνιαίο πάγιο χρήστες που δεν χρησιμοποιούν ποτέ το τηλέφωνό τους (γιατί έχουν δεσμεύσει αριθμό από το τηλεφωνικό κέντρο), ή σε ορισμένες χώρες (π.χ. Δανία) χρεώνονται για κλήσεις που έκαναν αλλά δεν απαντήθηκαν (γιατί το κύκλωμα εγκαταστάθηκε από το φορέα). Επίσης στα δίκτυα ATM, ο μηχανισμός ελέγχου αναθέτει μια μοναδική ετικέτα δρομολόγησης (VPI/VCI) κατά την διαδικασία εγκατάστασης κλήσης, στερώντας τη δυνατότητα σε χρήστες που πραγματικά θέλουν να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο να εισέλθουν (οι ετικέτες είναι πεπερασμένοι, όπως και οι πόροι του δικτύου). Έτσι εισάγουμε κάποια επιπλέον επιβάρυνση για να αποθαρρύνουμε αυτούς τους ζημιογόνους χρήστες, προσθέτοντας στη χρέωση *πάγιο κόστος ανά σύνδεση*. Επομένως η συνολική χρέωση είναι

$$\mathrm{a}(m) \cdot T + \mathrm{b}(m) \cdot V + c \qquad (3.6)$$

Το πάγιο c καθορίζεται από τις ιδιαιτερότητες της τεχνολογίας του δικτύου, του φορέα, της υπηρεσίας και σχετίζεται με τις σταθερές της ευθείας χρέωσης (π.χ. $c = 5\mathrm{a}+1$, ώστε να αντιπροσωπεύει την χρέωση μιας κλήσης διάρκειας 5 χρονικών μονάδων). Η ύπαρξη του παγίου αποθαρρύνει ακόμα περισσότερο τους χρήστες να διαχωρίσουν την πληροφορία, δεσμεύοντας ετικέτες δρομολόγησης, αφού χρεώνονται για κάθε επιπλέον σύνδεση που ζητάνε.

Η υλοποίηση του σχήματος είναι αρκετά εφικτή, λόγω του ότι οι μετρήσεις των T, V ανά κλήση πελάτη είναι απλές. Επίσης, το δίκτυο για να διευκολύνει τους πελάτες του μπορεί ήδη να έχει έτοιμους καταλόγους (off-line) με συντελεστές ή πίνακες με επιλογές ευθειών χρέωσης, καλύπτοντας δυνατούς τύπους χρηστών.

Στην έως τώρα μαθηματική ανάλυση του "Απλού" σχήματος χρέωσης, υπάρχει μια σιωπηλή υπόθεση ύπαρξης άπειρης χωρητικότητας. Το δίκτυο έχει κάνει την αρχική ανάθεση πόρων με βάση τις δηλώσεις των χρηστών, και αυτό δημιουργεί προβλήματα στην περίπτωση χρηστών που οι εκτιμήσεις τους για το μέσο ρυθμό είναι πολύ μικρότερες του πραγματικού. Πιθανές λύσεις είναι η ύπαρξη δεύτερου φορέα ο οποίος προμηθεύει, (μεταπουλώντας ίσως) την επιπλέον χωρητικότητα, είτε η συντηρητικότητα στην αποδοχή κλήσεων.

2. *Σχήμα χρέωσης βασισμένο στην "Φορολόγηση με Διαβαθμίσεις" ("Tax-Band")*

2.1. Το φορολογικό ανάλογο

Η ιδέα του σχήματος χρέωσης που θα παρουσιάσουμε, ανήκει στους Weber, Kelly και Κουρκουμπέτη ([16]). Είναι βασισμένο στην φορολόγηση με διαβαθμίσεις ή ζώνες ("Tax-Band"), που εφαρμόζεται στις περισσότερες χώρες. Αν υποθέσουμε ότι υπάρχουν δύο διαβαθμίσεις ή ζώνες φορολόγησης, και I το δηλωθέν ετήσιο εισόδημα, τότε ο φόρος υπολογίζεται με βάση τον Πίνακα 3-1,

Διαβαθμίσεις Φορολόγησης	Φόρος
$0 \le I \le k$	$\alpha_0 + I\alpha_3$
$k \le I$	$\alpha_0 + k\alpha_3 + (I-k)\alpha_4$

Πίνακας 3-1: Φορολόγηση με Διαβαθμίσεις

όπου $k > 0$ το μεσαίο όριο (μεταξύ των διαβαθμίσεων) και $0 < \alpha_3 < \alpha_4 < 1$ συντελεστές φορολόγησης για τις δύο διαβαθμίσεις. Το α_0 μπορεί να θεωρηθεί "πάγιος" φόρος, ο οποίος καταβάλλεται από όλους ανεξαρτήτως τους φορολογουμένους.

Έτσι ο συνολικός φόρος που πρέπει να καταβληθεί σε διάστημα χρόνων T είναι

$$\alpha_0 T + \alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \alpha_3 I_1 + \alpha_4 I_2$$

όπου T_1 (αντίστοιχα T_2) τα χρόνια που ο φορολογούμενος ανήκε στην χαμηλή (αντίστοιχα υψηλή) βαθμίδα, I (αντίστοιχα I_2) τα συνολικά εισοδήματα αυτών των ετών και $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = \alpha_0 + k(\alpha_3 - \alpha_4)$.

Η σημαντική παρατήρηση είναι ότι αυτή η διάκριση ετών και εισοδημάτων, επιβαρύνει περισσότερο τους φορολογούμενους, των οποίων τα δηλωθέντα εισοδήματα μεταβάλλονται συχνά ανά έτος. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι δύο φορολογούμενοι δήλωσαν ίσα συνολικά εισοδήματα I τα τελευταία T χρόνια. Ο πρώτος δηλώνει σταθερά ετήσιο εισόδημα I/T, ενώ τα εισοδήματα του δευτέρου μεταβάλλονται σε I_1 και I χρόνο με το χρόνο ($I = I_1 + I_2$). Ο πρώτος θα έχει πληρώσει στην εφορία λιγότερα σε σχέση με τον πρώτο. Αυτή η αδικία (που έχει επισημανθεί και πολλές κυβερνήσεις έχουν φροντίσει να εξαλείψουν), εξυπηρετεί τη χρέωση δικτυακών υπηρεσιών, γιατί υπερχρεώνει χρήστες με μεγάλη μεταβλητότητα όσο αναφορά τα στατιστικά χαρακτηριστικά των πηγών τους (κυρίως εκρηκτικότητα κίνησης).

2.2. Χρέωση Δικτυακών Υπηρεσιών

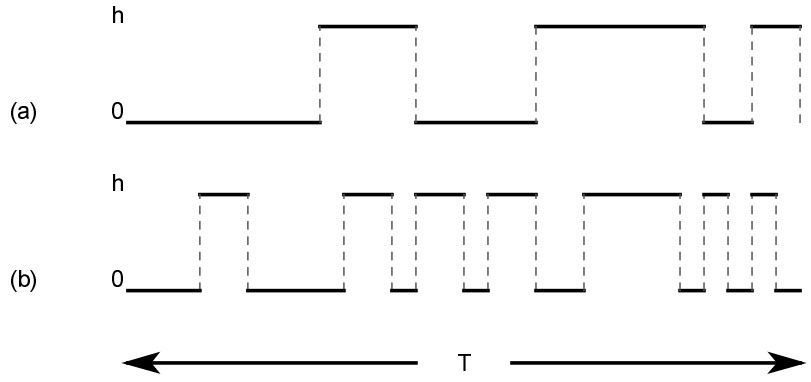
Θα χρησιμοποιήσουμε το "Tax-Band" σχήμα δύο διαβαθμίσεων $L = 2$, για χρέωση δικτυακών υπηρεσιών.

Έστω h ο μέγιστος ρυθμός με τον οποίο η πηγή στέλνει κίνηση στο δίκτυο. Τότε h είναι το άνω φράγμα της δεύτερης διαβάθμισης, 0 το κάτω φράγμα της πρώτης διαβάθμισης, και έστω k το μεσαίο φράγμα (δηλαδή το όριο μεταξύ των διαβαθμίσεων), όλα σε ίδιες μονάδες π.χ. κελιά/sec. Αν T η συνολική διάρκεια της κλήσης, διαιρούμε αυτό το διάστημα σε T/t υποδιαστήματα (όπου η παράμετρος t είναι ίδια με αυτή που εμφανίζεται στην (2.3)). Κάθε τέτοιο υποδιάστημα θα καλείται *περίοδος χρέωσης* (κατ΄ αναλογία με την φορολόγηση που στηρίζεται στα εισοδήματα κάθε έτους χωριστά).

Η "Απλή Φόρμουλα" χρέωσης χρεώνει σύμφωνα με την (3.5) τα εξής

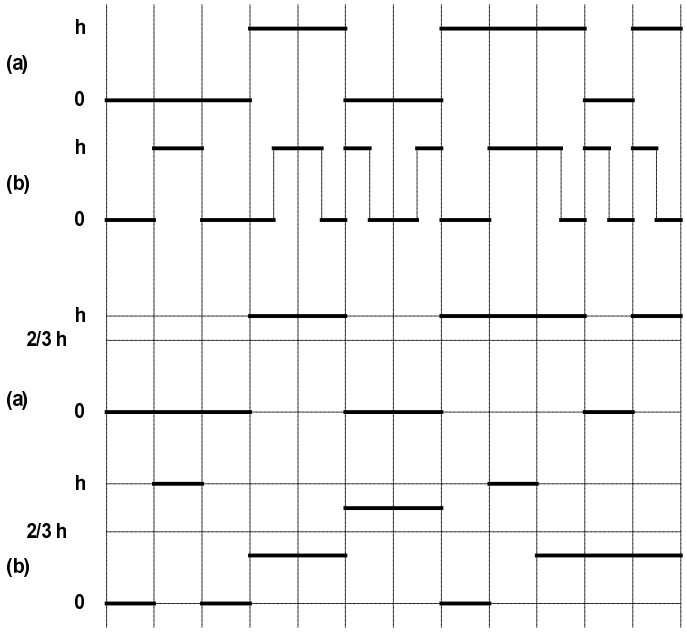
$$a_0[\ldots]T + a_1[\ldots]V,$$

για οποιαδήποτε κλήση διάρκειας T που μεταδίδει πληροφορία V. Έτσι, με βάση αυτό το μηχανισμό, οι πηγές ON/OFF του Σχήματος 3.3, θα χρεωθούν το ίδιο, παρότι η (α) είναι εκρηκτικότερη της (β) (οι εκρήξεις μεγάλης διάρκειας δυσχεραίνουν την στατιστική πολυπλεξία).



Σχήμα 3.3: Χρέωση εκρηκτικότητας με την "Απλή" Φόρμουλα

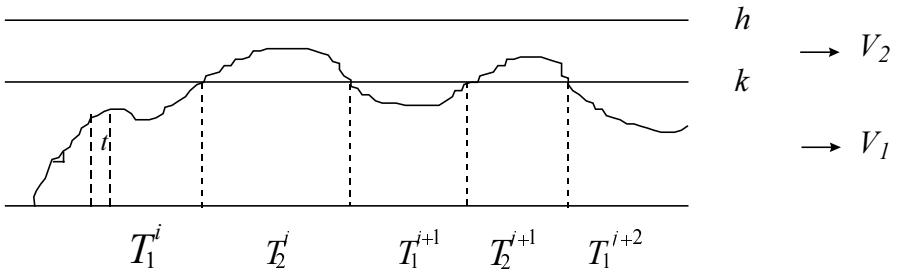
Αν χρησιμοποιούσαμε το σχήμα "Tax-Band" για χρέωση, θα υπήρχε διάκριση αυτών των δύο πηγών. Για παράδειγμα, ας διαιρέσουμε το T σε 12 περιόδους χρέωσης διάρκειας t, και ας υπολογίσουμε την μέση τιμή κίνησης σε καθεμιά από αυτές. Έστω επίσης $k = 2/3\,h$ το μεσαίο φράγμα (βλέπε Σχήμα 3.4). Παρατηρούμε ότι η (α) βρίσκεται 6 φορές στην υψηλή διαβάθμιση χρέωσης (η μέση κίνηση ξεπερνά το μεσαίο φράγμα), ενώ η (β) 4 φορές. Άρα η (α) πληρώνει σε δύο περιόδους χρέωσης (και συνολικά) περισσότερο, αφού εισάγει πιο εκρηκτική κίνηση.



Σχήμα 3.4: Χρέωση εκρηκτικότητας με το "Tax-Band" Σχήμα

2.2.1. Η Φόρμουλα Χρέωσης

Ας διαιρέσουμε την συνολική διάρκεια κλήσης T σε T/t περιόδους χρέωσης, και έστω k το μεσαίο φράγμα, $0 < k < h$. Διαχωρίζουμε τις περιόδους χρέωσης σαν διαστήματα τύπου Ι ή ΙΙ, ανάλογα με το αν η συνολική κίνηση που παράγεται σε αυτό το διάστημα είναι $\le kt$ ή $> kt$ (βλέπε Σχήμα 3.5). Έτσι αν T_1, T_2 η συνολική διάρκεια των διαστημάτων τύπου Ι και ΙΙ αντίστοιχα, ισχύει ότι: $T = T_1 + T_2$. Όμοια, αν V_1, V_2 η συνολική κίνηση κατά τη διάρκεια των διαστημάτων τύπου Ι και ΙΙ αντίστοιχα, ισχύει ότι: $V = V_1 + V_2$.



Σχήμα 3.5: Παράδειγμα κίνησης προς χρέωση με το "Tax-Band" Σχήμα

Ορίζουμε $\Phi_i = T_i/T$, $i = 1,2$ ο μέσος χρόνος στον οποίο η πηγή βρίσκεται στην i διαβάθμιση και $M_i = V_i/T$, $i = 1,2$ η συνεισφορά κάθε διαβάθμισης στο μέσο ρυθμό κίνησης M $(= M_1 + M_2)$. Υποθέτουμε ότι ϕ_i, m_i οι εκτιμήσεις του χρήστη γι' αυτές τις

παραμέτρους. Στο [16], ο Courcoubetis *et al.* (1997) προτείνουν για έκφραση του ρυθμού χρέωσης, τη γραμμική συνάρτηση

$$f\left(\phi_1,\phi_2,m_1,m_2:\Phi_1,\Phi_2,M_1,M_2\right) = a_0'[\ldots]+a_1'[\ldots]\Phi_1+a_2'[\ldots]\Phi_2+b_1[\ldots]M_1+b_2[\ldots]M_2 \tag{3.7}$$

Η έκφραση αυτή είναι η εξίσωση ενός υπερεπιπέδου το οποίο εφάπτεται σε εκτιμήτρια συνάρτηση του ισοδυνάμου εύρους ζώνης στα σημεία $\Phi_1=\phi_1$, $\Phi_2=\phi_2$, $M=m$ και $M_2=m_2$ (έτσι υπολογίζονται και οι σταθερές της φόρμουλας). Αυτό βρίσκεται σε πλήρη αντιστοιχία με την εφαπτόμενη ευθεία της "Απλής" φόρμουλας (βέβαια στην περίπτωση αυτή η εκτιμήτρια είναι συνάρτηση των Φ_i, M_i και παριστάνεται ως μια επιφάνεια στο χώρο). Για μια πλήρης απόδειξη της σχέσεως των συναρτήσεων χρέωσης με άνω φράγματα του ισοδυνάμου εύρους ζώνης, παραπέμπουμε στο Παράρτημα.

Πολλαπλασιάζοντας την (3.7) με την διάρκεια T της κλήσης, προκύπτει η συνολική χρέωση της κλήσης

$$\begin{aligned} C\left(T_i,V_i\right) &= a_0'[\ldots]T+a_1'[\ldots]T_1+a_2'[\ldots]T_2+b_1[\ldots]V_1+b_2[\ldots]V_2 \\ &= a_1[\ldots]T_1+a_2[\ldots]T_2+b_1[\ldots]V_1+b_2[\ldots]V_2, \text{ αφού } T=T+T_2 \end{aligned} \tag{3.8}$$

όπου οι συντελεστές δίνονται σαν συνάρτηση $[\ldots]$ των φραγμάτων h, k του μηχανισμού χρέωσης, των παραμέτρων s, t του δικτύου και των εκτιμήσεων ϕ_1, ϕ_2, m_1, m_2 του χρήστη, από τους παρακάτω τύπους

$$a_1'[\ldots]=\frac{1}{D},$$

$$a_2'[\ldots]=\frac{1}{D}\left(\frac{he^{skt}-ke^{sht}}{h-k}\right),$$

$$b_1[\ldots]=\frac{1}{D}\left(\frac{e^{skt}-1}{k}\right),$$

$$b_2[\ldots]=\frac{1}{D}\left(\frac{e^{sht}-e^{skt}}{h-k}\right),$$

$$a_0'[\ldots]=\frac{1}{st}\log D-a_1[\ldots]\phi_1-a_2[\ldots]\phi_2-b_1[\ldots]m_1-b_2[\ldots]m_2,$$

όπου

$$D=\phi_1+\left(\frac{e^{skt}-1}{k}\right)m_1+\left(\frac{he^{skt}-ke^{sht}}{h-k}\right)\phi_2+\left(\frac{e^{sht}-e^{skt}}{h-k}\right)m_2.$$

Αν $\Phi_i=\phi_i$ και $M_i=m_i$ (δηλαδή ο χρήστης προβλέψει σωστά) τότε

$$f\left(\phi_1,\phi_2,m_1,m_2:\Phi_1,\Phi_2,M_1,M_2\right)$$
$$=\frac{1}{st}\log\left[\Phi_1+\left(\frac{e^{skt}-1}{k}\right)M_1+\left(\frac{he^{skt}-ke^{sht}}{h-k}\right)\Phi_2+\left(\frac{e^{sht}-e^{skt}}{h-k}\right)M_2\right]$$

η οποία είναι η μικρότερη δυνατή χρέωση.

Το "Tax-Band" σχήμα είναι και αυτό μηχανισμός χρονοχρέωσης και ογκοχρέωσης ταυτόχρονα. Για την χρέωση ανά μονάδα χρόνου ισχύει ότι $a_1[\ldots]>a_2[\ldots]$, ενώ για την χρέωση ανά μονάδα κίνησης $b_1[\ldots]<b_2[\ldots]$. Επομένως σε περιόδους μεγάλης κίνησης, ο χρήστης έχει μικρότερη χρονοχρέωση και μεγαλύτερη ογκοχρέωση. Τέλος, αν ο χρήστης προβλέψει την συμπεριφορά της κίνησης του, έτσι ώστε $\Phi_i=\phi_i$ και $M_i=m_i$, η χρέωση θα είναι βέλτιστη (μικρότερη δυνατή), όπως και στο μηχανισμό χρέωσης της "Απλής" Φόρμουλας.

Η θεωρητική βάση για τον υπολογισμό των συντελεστών, όπως και η σχέση της φόρμουλας με το ισοδύναμο εύρος ζώνης πηγής δίνεται στο Παράρτημα.

2.2.2. Παρατηρήσεις και σχολιασμοί

Ο μηχανισμός χρέωσης λειτουργεί ως εξής: γνωστοποιούνται στο χρήστη που επιλέγει να εξυπηρετηθεί από "Tax-Band" φορέα, οι παράμετροι s, t του δικτύου. Ο χρήστης ανακοινώνει τα φράγματα και ξέρει πως είναι προς το συμφέρον του να προβλέψει κατά το δυνατόν ακριβέστερα την κίνηση που θα εισάγει, μέσω των εκτιμητριών ϕ_1, ϕ_2, m_1, m_2. Έτσι ουσιαστικά ορίζει τους συντελεστές χρονοχρέωσης και ογκοχρέωσης (ανά ζώνη) της φόρμουλας. Το δίκτυο για να διευκολύνει τους πελάτες του μπορεί ήδη να έχει έτοιμους καταλόγους (off-line) με συντελεστές, καλύπτοντας δυνατούς τύπους χρηστών. Η υλοποίηση του σχήματος είναι εφικτή δεδομένου ότι το δίκτυο χρειάζεται για κάθε κλήση να κατηγοριοποιεί τις περιόδους χρέωσης σε τύπου Ι, τύπου ΙΙ και να διατηρεί ένα συγκριτή και δύο αθροιστές, ώστε στο τέλος της κλήσης να επιστρέφει τα T_1, T_2, V_1, V_2. Πάντως η υλοποίηση του σχήματος είναι πιο δύσκολη από αυτή της "Απλής" Φόρμουλας, λόγω των περιοδικών συγκρίσεων.

Ο χρήστης έχει κίνητρο να κάνει λιγότερο εκρηκτική την πηγή του, πιο ομοιόμορφη δηλαδή την κίνηση που εισάγει. Έτσι οι εκτιμήσεις του θα είναι πιο εύκολο να γίνουν.

Το "Tax-Band" σχήμα μπορεί να γενικευτεί και για περισσότερες διαβαθμίσεις ($L>2$), αλλά γίνεται πιο πολύπλοκο και πιο δύσκολο να υλοποιηθεί. Ο χρήστης πάλι δηλώνει τις τιμές ϕ_i,m_i, $i=1,\ldots L$ για τις παραμέτρους Φ_i,M_i $i=1,\ldots L$, και το δίκτυο υπολογίζει την χρέωση σύμφωνα με την φόρμουλα

$$f=\sum_i a_i[\ldots]T_i+\sum_i b_i[\ldots]V_i$$

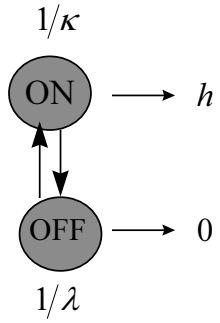
η οποία είναι ανάλογη της (3.8).

3. Στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης

3.1. Μοντέλα πηγών

3.1.1. Το 'ON/OFF MMF' μοντέλο

Το ON/OFF MMF μοντέλο κίνησης, περιγράφεται από μια αλυσίδα Markov συνεχούς χρόνου δύο καταστάσεων: την ενεργή κατάσταση (ON) και την ανενεργή κατάσταση (OFF). Όταν η αλυσίδα βρίσκεται στην ενεργή κατάσταση, η πηγή παράγει κίνηση με σταθερό (μέγιστο) ρυθμό h, ενώ στην ανενεργή κατάσταση δεν παράγει κίνηση. Ο χρόνος παραμονής ανά κατάσταση είναι εκθετικά κατανεμημένος, με μέση τιμή $1/\lambda$ και $1/\kappa$ για τις καταστάσεις OFF και ON αντιστοίχως (βλέπε Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Το 'ON/OFF MMF' μοντέλο πηγής

Στο διακριτό χρόνο, οι χρόνοι παραμονής ανά κατάσταση ακολουθούν τη γεωμετρική κατανομή, που είναι το ανάλογο της εκθετικής. Έστω χρονικό διάστημα t μονάδων και X ο ρυθμός κίνησης της πηγής. Τότε, στη μόνιμη κατάσταση και ανά χρονικό διάστημα t, έχουμε

$$p_{OFF} = P\{X = 0\} = 1 - \frac{m}{h}, \quad p_{ON} = P\{X = h\} = \frac{m}{h}$$

όπου m ο μέσος ρυθμός κίνησης του μοντέλου (η p_{ON} είναι ουσιαστικά το ποσοστό του χρόνου που η πηγή είναι στην κατάσταση ON, και αντίστοιχα η p_{OFF} για την κατάσταση OFF). Ο μέσος ρυθμός κίνησης γι΄αυτό το μοντέλο πηγής δίνεται από την

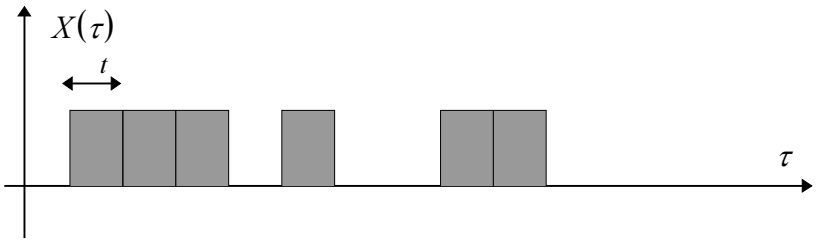
$$m = \frac{1/\kappa}{1/\kappa + 1/\lambda} h = \frac{\lambda}{\kappa + \lambda} h . \tag{3.9}$$

Αν και ο στιγμιαίος ρυθμός κίνησης μιας ρεαλιστικής πηγής μπορεί να πάρει περισσότερες από δύο διαφορετικές πηγές, το ON/OFF μοντέλο είναι πολύ δημοφιλές. Επιπλέον για δεδομένο μέσο ρυθμό και απαιτήσεις σε ποιότητα εξυπηρέτησης, ON/OFF πηγές συχνά αποτελούν το χειρότερο τύπο κίνηση για συστήματα χωρίς ενταμιευτή.

Μια τέτοια πηγή μπορεί εύκολα να προσομοιωθεί, γεννώντας μια ομοιόμορφα κατανεμημένη τυχαία μεταβλητή U, επιλέγοντας ένα τυχαίο αριθμό μεταξύ του 0 και του 1, και θεωρώντας τα εξής:

- Κατάσταση *OFF:* $X = 0$ αν $U < p_{OFF}$
- Κατάσταση *ON:* $X = h$ αν $U < p_{ON}$

Οι επιλογές του U λαμβάνονται ανεξάρτητα σε κάθε χρονικό διάστημα. Το Σχήμα 3.7 δείχνει παράδειγμα κίνησης μιας ON/OFF πηγής στο διακριτό χρόνο.



Σχήμα 3.7: Κίνηση ON/OFF πηγής στο διακριτό χρόνο

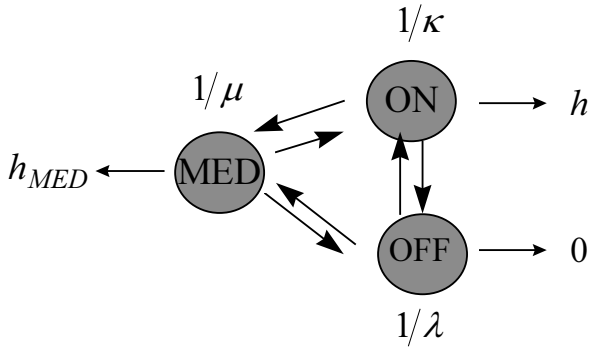
3.1.2. Το '3-καταστάσεων MMF' μοντέλο

Η σχετική επέκταση του ON/OFF MMF μοντέλου είναι το '3-καταστάσεων MMF', μια συνεχούς χρόνου αλυσίδα Markov με τρεις καταστάσεις. Ο χρόνος παραμονής σε κάθε κατάσταση είναι επίσης εκθετικά κατανεμημένος (γεωμετρικά στον διακριτό χρόνο), με μέση τιμή $1/\lambda$, $1/\mu$ και $1/\kappa$ για τις καταστάσεις OFF, MED και ON αντιστοίχως (βλέπε Σχήμα 3.8). Τότε,

$$p_{OFF} = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu + 1/\kappa}, p_{MED} = \frac{1/\mu}{1/\lambda + 1/\mu + 1/\kappa} \text{ και } p_{ON} = \frac{1/\kappa}{1/\lambda + 1/\mu + 1/\kappa},$$

και ο μέσος ρυθμός κίνησης του μοντέλου είναι

$$m = p_{ON} \cdot h + p_{MED} \cdot h_{MED} + p_{OFF} \cdot 0.$$



Σχήμα 3.8: Το '3-καταστάσεων MMF' μοντέλο πηγής

Έστω διάστημα διάρκειας t χρονικών μονάδων στο διακριτό χρόνο. Ο ρυθμός κίνησης X που παράγεται σε κάθε χρονικό διάστημα t είναι μια τυχαία μεταβλητή με δυνατές τιμές 0, h_{MED}, και h σύμφωνα με τις πιθανότητες (στην μόνιμη κατάσταση)

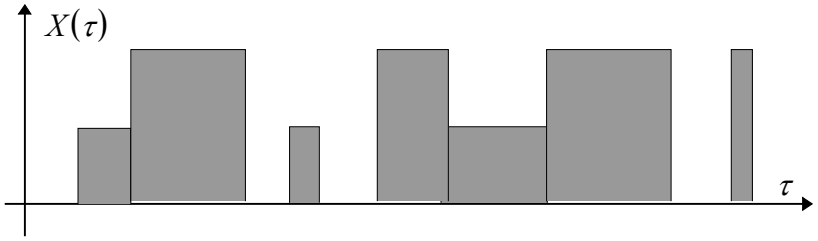
$$p_{OFF} = P\{X = 0\}, p_{MED} = P\left\{X = h_{MED}\right\}, p_{ON} = P\{X = h\}\left(= 1 - p_{OFF} - p_{MED}\right)$$

όπου $p_{OFF} + p_{MED} < 1$ και $0 < h_{MED} < h$.

Μια τέτοια πηγή μπορεί εύκολα να προσομοιωθεί, γεννώντας μια ομοιόμορφα κατανεμημένη τυχαία μεταβλητή U, επιλέγοντας ένα τυχαίο αριθμό μεταξύ του 0 και του 1, και θεωρώντας ότι

- Κατάσταση *OFF* (κάτω φράγμα), $X = 0$ αν $U < p_{OFF}$
- Κατάσταση *MED* (μεσαίο φράγμα), $X = h_{MED}$ αν $p_{OFF} \le U < p_{OFF} + p_{MED}$
- Κατάσταση *ON* (άνω φράγμα), $X = h$ αν $p_{OFF} + p_{MED} \le U \le 1$

Οι επιλογές του U λαμβάνονται ανεξάρτητα σε κάθε χρονικό διάστημα. Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται παράδειγμα κίνησης από πηγή 3-καταστάσεων στο διακριτό χρόνο.



Σχήμα 3.9: Κίνηση πηγής 3-καταστάσεων στο διακριτό χρόνο

3.2. Προσομοίωση των αλγορίθμων χρέωσης

3.2.1. Ο "Απλός" αλγόριθμος χρέωσης

Για να προσομοιώσουμε την "Απλή" φόρμουλα χρέωσης, παράγουμε κίνηση συνολικής διάρκειας $T = Kt$, όπου K τα χρονικά διαστήματα που διαρκεί η κλήση. Τότε η χρέωση είναι

$$\left[\mathrm{a}(m) + \mathrm{b}(m)\, M\right] \cdot T = \mathrm{a}(m) \cdot T + \mathrm{b}(m) \cdot V$$

όπου V η συνολική παραγόμενη κίνηση της πηγής, και $M = {}^{V}\!/_{T}$ η πραγματική (δηλ. μετρούμενη) μέση τιμή. Στο τέλος της κλήσης υπολογίζουμε την συνολική χρέωση με βάση την δήλωση m, την μέτρηση M και το ισοδύναμο εύρος ζώνης του ON/OFF μοντέλου (απαραίτητο στον υπολογισμό των παραμέτρων $\mathrm{a}(m)$ και $\mathrm{b}(m)$ στην Σχέση 3.4). Κατά την διάρκεια των K βημάτων της προσομοίωσης, δεν είναι απαραίτητο να διατηρούμε όλες τις τιμές του X, δεδομένου ότι στο τέλος μόνο το αθροιστικό φορτίο $\sum_{i=1}^{K} X(it) = V$ απαιτείται για τους υπολογισμός μας.

Η κίνηση μπορεί να προέρχεται είτε από κάποιο μοντέλο πηγής είτε να είναι πραγματική ακολουθία κίνησης. Ο προσομοιωτής του αλγορίθμου χρέωσης δέχεται σαν είσοδο την πρόβλεψη m του χρήστη, τη δήλωση h, και με το πέρας της κλήσης υπολογίζει την συνολική χρέωση.

3.2.2. Ο "Tax-band" αλγόριθμος χρέωσης

Για να χρεώσουμε κλήση μιας πηγής με το "Tax-Band" σχήμα για $L = 2$, μεσαίο φράγμα k και προσομοίωση, ενεργούμε ως εξής: Έστω $T = Kt$ η συνολική διάρκεια της κλήσης και έστω επίσης K_1 ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων στα οποία η πηγή βρίσκεται στην πρώτη βαθμίδα ($X \le k$), και K_2 τα χρονικά διαστήματα στα οποία βρίσκεται στην δεύτερη (τότε $T_1 = K_1 t$ και $T_2 = K_2 t$). Ο προσομοιωτής χρέωσης διαχωρίζει σε κάθε βήμα της προσομοίωσης (περίοδο χρέωσης) τα διαστήματα σε τύπου Ι ή ΙΙ, και υπολογίζει στο τέλος της κλήσης τα μεγέθη $\Phi_i = T_i / T$ και $M_i = V_i / T$, $i = 1,2$, όπως και τους συντελεστές της συνάρτησης χρέωσης (3.8). Τέλος, ο υπολογισμός των T_i και V_i είναι αθροιστικός σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, ενώ στο τέλος υπολογίζεται η διάρκεια της κλήσης. Ο ίδιος προσομοιωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χρέωση είτε πραγματικής κίνησης είτε κίνησης μοντέλων.

3.3. Οι προσομοιωτές της παρούσας εργασίας

3.3.1. Οι προσομοιωτές πηγών

Οι προσομοιωτές πηγών χρησιμοποιούν τις MMF πηγές που αναφέρθηκαν σε πειράματα διακριτού χρόνου. Κατά την διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος t δεν έχουμε περισσότερες από μια εναλλαγές κατάστασης.

Προσομοιωτής 'ON/OFF MMF' πηγής: Ο προσομοιωτής δέχεται σαν παραμέτρους τους τα λ, κ και h, την διάρκεια του χρονικού διαστήματος t, και τη διάρκεια παραγωγής κίνησης (ακέραιο πολλαπλάσιο του t). Σε κάθε χρονικό διάστημα αποφασίζει ανεξάρτητα την κατάσταση στην οποία μεταβαίνει η αλυσίδα. Επίσης δίνεται και η παράμετρος που ενεργοποιεί την γεννήτρια τυχαίων αριθμών (seed).

Προσομοιωτής πηγής '3-καταστάσεων MMF': Ο προσομοιωτής δέχεται σαν παραμέτρους του τα λ, κ, μ και h. Επίσης δέχεται την παράμετρο f_{MED} έτσι ώστε $h_{MED} = f_{MED} \cdot h$. Τέλος, την διάρκεια του χρονικού διαστήματος t και τη διάρκεια παραγωγής κίνησης (ακέραιο πολλαπλάσιο του t). Σε κάθε χρονικό διάστημα αποφασίζει ανεξάρτητα την κατάσταση στην οποία μεταβαίνει η αλυσίδα. Επίσης δίνεται και η παράμετρος που ενεργοποιεί την γεννήτρια τυχαίων αριθμών (seed).

Η δημιουργία τυχαίας τιμής από την ομοιόμορφη κατανομή που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματα προσομοίωσης, βασίζεται στον αλγόριθμο του L'Ecuyer (βλέπε στο βιβλίο των Press *et al*. (1994), σελ. 280). Ο αλγόριθμος, αν και πολύπλοκος, κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην ταυτόχρονη δημιουργία πολλών ανεξάρτητων ψευδοτυχαίων τιμών ομοιόμορφα κατανεμημένων στο διάστημα $(0,1)$. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτού του αλγορίθμου είναι η πολύ μεγάλη περίοδος (της τάξης του 10^{18}) της ακολουθίας ψευδοτυχαίων τιμών που δημιουργεί.

3.3.2. Οι προσομοιωτές των αλγορίθμων χρέωσης

Και οι δύο προσομοιωτές των αλγόριθμων χρέωσης, στο τέλος της κλήσης, συγκρίνουν τον ρυθμό χρέωσης και με το ισοδύναμο εύρος ζώνης που υπολογίζεται εμπειρικά από την ακόλουθη έκφραση

$$\hat{\alpha}(s,t) = \frac{1}{st}\log\left(\frac{1}{T/t}\sum_{i=1}^{T/t} e^{sX[(i-1)t,it]}\right)$$

όπου $X[(i-1)t,it]$ η κίνηση της πηγής (πραγματική ή προσομοίωσης) στο διάρκειας t i -οστό διάστημα. Η έκφραση αυτή προκύπτει με αντικατάσταση στην (2.3) με τον αριθμητικό μέσο, και θεωρείται η ακριβής χρέωση βάσει του ισοδυνάμου εύρους ζώνης.

Επίσης συγκρίνεται και με την χρέωση που αντιστοιχεί στην βέλτιστη δήλωση παραμέτρων.

Προσομοιωτής "Απλής" φόρμουλας: Ο προσομοιωτής δέχεται σαν είσοδο:
- Δήλωση h
- Πρόβλεψη m
- Παραμέτρους s , t
- Ακολουθία κίνησης σε περίπτωση πραγματικής κλήσης ή
- Παραμέτρους μοντέλου οι οποίοι μεταβιβάζονται στον αντίστοιχο προσομοιωτή πηγής

Η έξοδος, εκτός της χρέωσης, περιλαμβάνει:
- Διάρκεια κλήσης T
- Ακριβή μέτρηση M
- Ακρίβεια m/M

Προσομοιωτής σχήματος "Tax-Band": Ο προσομοιωτής δέχεται σαν είσοδο:
- Δηλώσεις h , k
- Προβλέψεις ϕ , m_i
- Παραμέτρους s , t
- Ακολουθία κίνησης σε περίπτωση πραγματικής κλήσης ή
- Παραμέτρους μοντέλου οι οποίοι μεταβιβάζονται στον αντίστοιχο προσομοιωτή πηγής

Η έξοδος, εκτός της χρέωσης, περιλαμβάνει:

- Διάρκεια κλήσης και διάρκεια διαστημάτων τύπου I-II
- Ακριβείς μετρήσεις των Φ_i, M_i
- Ακρίβεια προβλέψεων για τα ϕ_i, m_i

4. Ρεαλιστική κίνηση video με κωδικοποίηση MPEG

Το βασικό χαρακτηριστικό των πηγών πραγματικού χρόνου που συναντάμε στα δίκτυα B-ISDN/ATM είναι ο *Μεταβλητός Ψηφιακός Ρυθμός* (VBR) παραγωγής κίνησης. Είναι γεγονός ότι οι περισσότεροι σύγχρονοι κωδικοποιητές κίνησης video υπερτερούν αυτών σταθερού ρυθμού (CBR), σε ζητήματα ποιότητας εικόνας και καθυστέρησης. Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό που θα μας απασχολήσει στο Κεφάλαιο 4, είναι η *εκρηκτικότατα* αυτών των πηγών.

Λόγω της μεγάλης απαίτησης σε εύρος ζώνης από την ασυμπίεστη ροή δεδομένων πηγών video, έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι κωδικοποίησης. Αυτή τη στιγμή, το σχήμα MPEG χρησιμοποιείται ευρέως, σχεδόν σε όλους τους τύπους των video εφαρμογών. Υπάρχουν δύο σχήματα, το MPEG-I ([31], [40]) και το MPEG-II ([18]), με το δεύτερο να καλύπτει την λειτουργικότητα του πρώτου. Στην παρούσα εργασία ασχολούμαστε και πειραματιζόμαστε με δεδομένα κωδικοποιημένα κατά MPEG-I.

4.1. Η κωδικοποίηση MPEG-I

Η είσοδος στον κωδικοποιητή MPEG είναι μια σειρά από *καρέ* ή *πλαίσια*, καθένα αποτελούμενο από ένα διδιάστατο πίνακα με *pixels*. Η *λωρίδα*, είναι ένα οριζόντιο κομμάτι της εικόνας και αποτελεί τη μικρότερη αυτόνομη μονάδα του MPEG-I, καθώς η κωδικοποίηση καθεμίας λωρίδας γίνεται ανεξάρτητα από τις γειτονικές της. Ο αριθμός των καρέ ανά δευτερόλεπτο όπως επίσης ο αριθμός των λωρίδων ανά καρέ και των pixels ανά λωρίδα εξαρτώνται από τα πρότυπα που ακολουθούν οι διάφορες χώρες.

Η βασική ιδέα του MPEG-I είναι να κωδικοποιούνται περιοδικά ορισμένα καρέ και οι διαφορές γειτονικών σε σχέση με κάποιο καρέ αναφοράς. Συγκεκριμένα, προβλέπεται αρχικά η κίνηση από καρέ σε καρέ (πλεονασμός στον χρόνο) και κατόπιν να χρησιμοποιείται ο μηχανισμός DCT (Discrete Cosine Transform) για την κωδικοποίηση και την οργάνωση της περιττής πληροφορίας σε κάθε καρέ (πλεονασμός στο χώρο). Κατόπιν, κάθε καρέ συμπιέζεται με κωδικοποίηση εντροπίας Huffman. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικούς τύπους καρέ:

- **I-καρέ:** δεν χρησιμοποιούν πληροφορία από τα γειτονικά καρέ και κωδικοποιούνται σαν μια μεμονωμένη εικόνα και όχι σαν μέρος ταινίας (χρησιμοποιείται μόνο κωδικοποίηση εσωτερικά στο καρέ, βασισμένη σε DCT και Huffman)
- **P-καρέ:** χρησιμοποιούν τον ίδιο αλγόριθμο κωδικοποίησης με τα I-καρέ, αλλά με προσθήκη αποκατάστασης κίνησης με βάση το προηγούμενο I ή P-καρέ
- **B-καρέ:** είναι όμοια με τα P-καρέ, με τη διαφορά ότι η κίνηση προβλέπεται από το προηγούμενο I ή P-καρέ, το επόμενο I ή P-καρέ ή κάποιο συνδυασμό αυτών.

Τυπικά, τα I-καρέ απαιτούν περισσότερα bits από τα P-καρέ, ενώ τα B-καρέ έχουν την μικρότερη απαίτηση σε εύρος ζώνης.

Μετά την κωδικοποίηση, τα καρέ στέλνονται με μια προκαθορισμένη περιοδική ακολουθία κωδικοποίησης, π.χ. "IBBPBB" "IBBPBBPBBPBB", η οποία καλείται *Group of Pictures (GOP)*. Έτσι, μια ταινία MPEG μπορεί να εισάγει στο δίκτυο διαφορετική

κίνηση, ανάλογα με το GOP που χρησιμοποιήθηκε κατά την κωδικοποίησή της (μέγεθος και ακολουθία κωδικοποίησης). Για περισσότερες πληροφορίες για την κωδικοποίηση του προτύπου MPEG-I παραπέμπουμε στο άρθρο του Le Gall (1991).

4.2. Ταινίες που χρησιμοποιήθηκαν για χρέωση

Το κριτήριο επιλογής των αποσπασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για χρέωση, ήταν οι ταινίες τους να καλύπτουν όσο το δυνατό πληρέστερα την θεματολογία της κίνησης video που συναντούμε στα δίκτυα υπολογιστών. Χρησιμοποιήθηκαν αποσπάσματα από αρκετές κινηματογραφικές ταινίες, αθλητικά γεγονότα και τηλεοπτικές σειρές. Οι ακολουθίες αυτές φαίνονται στον Πίνακα 3-2.

Περιεχόμενο Ταινίας	**Συντομογραφία**
Ταινίες (εμπορικές κασέτες)	
"Jurassic Park"	*dino*
"The Silence of the Lambs"	*lamps*
Αθλητικά Γεγονότα (μαγνητοσκοπημένα από καλωδιακή TV)	
Τελικός Παγκοσμίου Κυπέλλου Ποδοσφαίρου 1994: Βραζιλία - Ιταλία	*soccer*
Τελικός Αμερικάνικου Ποδοσφαίρου 1995: San Diego-San Francisco	*sbowl*
Αγώνας της Formula-1 στο Hockenheim της Γερμανίας 1994	*race*
Τελικός στο ATP τένις: Becker-Sampras	*atp*
Τηλεοπτικές Σειρές & Ταινίες (μαγνητοσκοπημένες από καλωδιακή TV)	
Κινούμενα Σχέδια	*asterix*
Δύο επεισόδια από τη σειρά Κιν. Σχεδίων "The Simpsons"	*simpsons*
Talk show	*talk1*
Πολιτική συζήτηση	*talk2*
Ειδήσεις από την Γερμανική τηλεόραση	*news*
"Terminator II"	*terminator*
Τρία επεισόδια της κωμικής σειράς "Mr.Bean"	*mr.bean*
MTV μουσικά clips	*mtv*
"Star Wars"	*starwars*

Πίνακας 3-2: Οι MPEG ακολουθίες που χρησιμοποιούνται για χρέωση

Τα *ίχνη* αυτών των αποσπασμάτων, είναι αρχεία δεδομένων που αναπαριστούν τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης της εξόδου ενός VBR video κωδικοποιητή που ακολουθεί το πρότυπο MPEG. Κάθε αρχείο περιέχει το μέγεθος των καρέ video του αποσπάσματος σε bits. Τα δεκατέσσερα πρώτα είναι διαθέσιμα δημόσια από τον O. Rose στο: ftp://ftp-info3.informatik.uni-wuerzburg.de/pub/. Κατασκευάστηκαν στο Ινστιτούτο Επιστήμης Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Wuerzburg της Γερμανίας, χρησιμοποιώντας τον κωδικοποιητή MPEG-I του UC-Berkeley (έκδοση 1.3) ([27]), με τις εξής παραμέτρους:

- Καρέ/sec: 25
- Λωρίδες/καρέ: 1

- Μέγεθος GOP: 12
- Ακολουθία κωδικοποίησης: IBBPBBPBBPBB
- Τιμές κβαντιστή: I=10, P=14, B=18
- Πλήθος καρέ: 40,000 (περίπου 30 min διάρκεια)
- Ανάλυση (pixel): 384 × 288

Το τελευταίο ίχνος, αναφέρεται σε απόσπασμα διάρκειας 20 λεπτών από την ταινία του Mark Garrett, *Star Wars*, και θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στο επόμενο κεφάλαιο. Κατασκευάστηκε στα εργαστήρια της Bellcore, και είναι διαθέσιμο δημόσια από τον M. Garett στο: ftp://thumper.bellcore.com/pub/. Η κωδικοποίηση έγινε με ρυθμό 24 καρέ/sec.

5. Σύγκριση των σχημάτων χρέωσης με αριθμητικά αποτελέσματα

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε τα σχήματα χρέωσης με βάση αριθμητικά αποτελέσματα. Συγκρίνουμε του δύο αλγορίθμους χρέωσης, δοκιμάζοντας διαφορετικές πηγές κίνησης είτε ρεαλιστικές είτε μοντέλα πηγών με προσομοίωση. Σκοπός μας είναι να επαληθεύσουμε τα όσα θεωρητικά διατυπώθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο.

5.1. Χρέωση κίνησης MPEG

Θεωρούμε τα αποσπάσματα κίνησης video που περιγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο. Καθεμία αποτελεί και μια κλήση-υπηρεσία δικτύου, που τροφοδοτεί ένα σύνδεσμο ATM χωρητικότητας C=155Mbps και χώρου ενταμίευσης $B = 1000$ κελιών. Με βάση τη σχέση (2.9) του *"ασυμπτωτικού μεγάλου N"* για $\Phi \approx 10^{-5}$, υπολογίζουμε τις τιμές $s^* = 0.011\text{kbits}^{-1}$, $t^* = 40\text{ms}$ για τα ίχνη του Wuerzburg και $t^* = 41\text{ms}$ για την ταινία "Star Wars". Οι συγκρίσεις βασίζονται σε βέλτιστες δηλώσεις του χρήστη τόσο για την "Απλή" φόρμουλα χρέωσης (m) όσο και για το "Tax-band" σχήμα (ϕ_i, m_i). Το μεσαίο φράγμα του "Tax-band" σχήματος ισούται με $h/3$, όπου h είναι ο μέγιστος ρυθμός της κάθε ακολουθίας (η επιλογή αυτή δικαιολογείται στη συνέχεια). Σημειωτέον ότι η χρέωση έχει γίνει αφού προηγηθεί η δημιουργία κελιών ATM, η οποία προσαύξησε τους ρυθμούς κατά $53/48$. Επίσης η χρέωση εκφράζεται σαν ρυθμός (Mbps), ώστε να είναι άμεση η σύγκριση με το ισοδύναμο εύρος ζώνης.

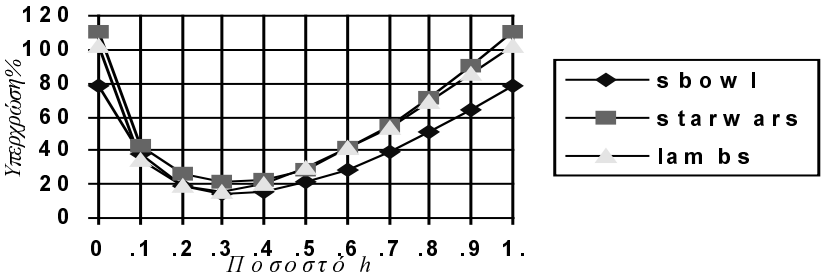
MPEG Ακολουθίες	Ισ. Εύρος Ζώνης [Mbps]	Tax-Band [Mbps]	"Απλή" [Mbps]
dino	0.408	0.473 (+ 16%)	0.705 (+ 72 %)
lambs	0.231	0.270 (+ 17%)	0.470 (+102 %)
soccer	0.892	1.085 (+ 22%)	1.867 (+109 %)
sbowl	0.722	0.828 (+ 15%)	1.289 (+ 78 %)
race	0.943	1.147 (+ 22%)	2.205 (+133 %)
atp	0.697	0.870 (+ 25%)	1.645 (+135 %)
asterix	0.702	0.820 (+ 17%)	1.289 (+ 83 %)
simpsons	0.606	0.798 (+ 32%)	1.960 (+223 %)
talk1	0.461	0.527 (+ 14%)	0.711 (+ 54 %)
talk2	0.569	0.679 (+ 19%)	0.993 (+ 74 %)
news	0.511	0.652 (+ 28%)	1.289 (+146 %)
terminator	0.325	0.354 (+ 09%)	0.466 (+ 74 %)
mr.bean	0.583	0.764 (+ 31%)	1.773 (+204 %)
mtv	0.792	1.006 (+ 27%)	2.209 (+178 %)
starwars	0.487	0.590 (+ 21%)	1.026 (+110 %)

Πίνακας 3-3: Συγκριτική χρέωση MPEG ακολουθιών σε δίκτυο ATM

Ο Πίνακας 3-3 επιβεβαιώνει ότι το σχήμα "Tax-Band" φράσσει ακριβέστερα το ισοδύναμο εύρος ζώνης. Συγκεκριμένα, ενώ η "Απλή" Φόρμουλα ενδέχεται να υπερχρεώσει τον χρήστη μέχρι και 200% (περιπτώσεις *simpsons*, *mr.bean*), η "Tax-Band" υπερχρέωση δεν υπερβαίνει το 32% για τις ίδιες κλήσεις.

5.1.1. Η επιλογή του μεσαίου φράγματος

Για να επιλέξουμε βέλτιστα το φράγμα k (όριο μεταξύ των δύο ζωνών), πειραματιστήκαμε με διάφορες τιμές αυτού, θεωρώντας το ποσοστό του μεγίστου ρυθμού h. Και σε αυτά τα πειράματα του "Tax-Band" σχήματος, θεωρήσαμε βέλτιστη δήλωση παραμέτρων. Το Σχήμα 3.10 απεικονίζεται η υπερχρέωση (σαν ποσοστιαία αύξηση του ισοδυνάμου εύρους ζώνης) σε πειράματα για τις ταινίες *sbowl*, *starwars* και *lambs*. Η επιλογή των ενδεικτικών αυτών ταινιών έγινε με βάση τον λόγο μεγίστου/μέσου ρυθμού (καλύπτουν μεγάλο εύρος του λόγου αυτού). Είναι φανερό ότι υπάρχει μια περιοχή ($k \in [0.2 \cdot h, 0.4 \cdot h]$), στην οποία η ακρίβεια βελτιστοποιείται (ελαχιστοποιείται το ποσοστό της υπερχρέωσης). Έτσι θεωρήσαμε ότι για αυτού του τύπου κίνησης ATM και για το συγκεκριμένο σύστημα, η επιλογή $k = h/3$ είναι λογική. Σημειώστε επίσης ότι στα δύο άκρα του διαστήματος, όσο δηλαδή θεωρούμε για το k τιμές κοντά στο 0 ή το h, η χρέωση αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς, ώστε για $k = 0$ ή h, να ταυτίζεται με αυτή της "Απλής" Φόρμουλας. Αυτό είναι διαισθητικά προφανές, γιατί μια από τις ζώνες εξασφαλίζεται και η άλλη καλύπτει όλο το εύρος $[0, h]$.



Σχήμα 3.10: Επιλογή κατάλληλου μεσαίου φράγματος για χρέωση MPEG ακολουθιών από το "Tax-band" Σχήμα

5.2. Χρέωση κίνησης ON/OFF πηγής με την "Απλή" φόρμουλα

Δημιουργήσαμε κίνηση διάρκειας 5 λεπτών με τον προσομοιωτή ON/OFF MMF πηγής. Η μέση διάρκεια της κατάστασης ON είναι 350ms και της OFF 450ms. Επομένως, $\lambda = 1/0.65 = 1.5384 \text{ sec}^{-1}$ και $\kappa = 1/0.35 = 2.8571 \text{ sec}^{-1}$. Στην ενεργή κατάσταση η πηγή δημιουργεί κίνηση (bits), με σταθερό ρυθμό 64Kbps. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται συχνά στην βιβλιογραφία για να περιγράψουν μια τυπική πηγή φωνής (βλέπε [28]). Έτσι ο μέσος ρυθμός κίνησης του μοντέλου είναι σύμφωνα με την (3.9) ίσος με $0.35 \cdot (64) = 22.4\text{Kbps}$. Η πραγματική μέση τιμή της κίνησης που

χρησιμοποιήθηκε για το συγκεκριμένο πείραμα (seed=1), ήταν πάρα πολύ κοντά σε αυτή του μοντέλου (M =20.7Kbps).

Στην συνέχεια, η κίνηση με αυτά τα χαρακτηριστικά διοχετεύεται σε σύνδεσμο ATM με $C = 155\text{Mbps}$ και $B = 200$ κελιά, αφού προηγουμένως μετατραπεί σε αντίστοιχη ATM (με την ανάλογη επιβάρυνση της επικεφαλίδας του κελιού ATM), για να ικανοποιηθεί απαίτηση σε Ποιότητα Εξυπηρέτησης της τάξης $\Phi \approx 10^{-7}$. Από την σχέση (2.9) βρίσκουμε τις βέλτιστες τιμές $s^* = 0.021\text{Kbits}^{-1}$ και $t^* = 100\text{ms}$.

Δήλωση Χρήστη (*m*)	**Υπερχρέωση (%)**
-15% M	1.024
-10% M	1.014
-5% M	1.004
5% M	0.981
10% M	0.969
15% M	0.956

Πίνακας 3-4: Υπερχρέωση της "Απλής" φόρμουλας για πηγές 'ON/OFF MMF'

Παρατηρήσαμε ότι για την συγκεκριμένη κλήση, η υπερχρέωση είναι κοντά στο 1% της βέλτιστης, για προβλέψεις στην περιοχή $\pm 15\%$ του M (βλέπε Πίνακα 3-4).

5.3. Χρέωση κίνησης πηγής 3-καταστάσεων

Στην σειρά αυτή πειραμάτων αναλύσαμε την χρέωση κίνησης πηγών MMF 3-κατστάσεων. Ο προσομοιωτής πηγής '3-καταστάσεων MMF' ενεργοποιήθηκε στην κάθε περίπτωση για 5 λεπτά. Θεωρούμε ότι η αλυσίδα βρίσκεται ισοπίθανα σε καθεμιά από τις τρεις καταστάσεις ($\lambda = \kappa = \mu$), και ότι ο μέσος χρόνος παραμονής στην κάθε κατάσταση είναι 333ms (η επιλογή αυτή έγινε θεωρώντας ότι ο συνολικός χρόνος παραμονής και στις τρεις καταστάσεις θα ισούται με τον αντίστοιχο χρόνο του ON/OFF MMF μοντέλου). Ενεργοποιούμε τον προσομοιωτή της πηγής μεταβάλλοντας σε κάθε πείραμα την παράμετρο f_{MED}, το ρυθμό δηλαδή της κατάστασης MED h_{MED}. Ο μέγιστος ρυθμός κίνησης είναι ξανά 64Kbps.

Στην συνέχεια δημιουργούμε την αντίστοιχη κίνηση ATM, η οποία τροφοδοτεί σύνδεσμο ATM με χαρακτηριστικά $C = 155\text{Mbps}$ και $B = 200$ κελιά. Οι παράμετροι $s^* = 0.031\text{Kbits}^{-1}$ και $t^* = 100\text{ms}$ που χρησιμοποιήθηκαν εξασφαλίζουν απώλειες της τάξης $\Phi \approx 10^{-}$.

Θεωρούμε ξανά βέλτιστη δήλωση παραμέτρων για τη χρέωση. Η επιλογή μεσαίου φράγματος ίση με την πραγματικό μέσο ρυθμό της κίνησης, $k = M$, δικαιολογείται στην συνέχεια.

Ρυθμός στην MED [Kbps]	**Ισ. Εύρος Ζώνης [Kbps]**	**Υπερχρέωση του Tax-Band [Kbps]**	**Υπερχρέωση της "Απλής" φόρμουλας [Kbps]**

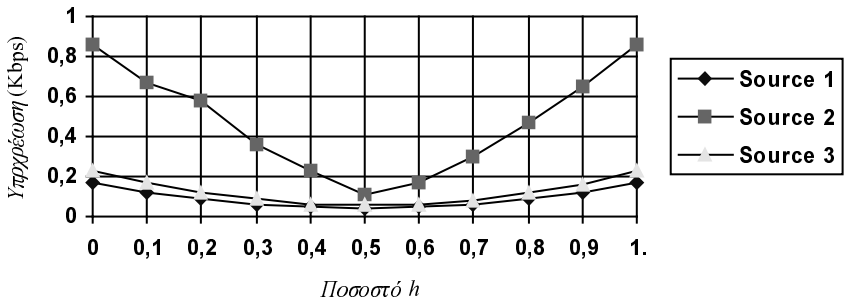
0.0*h	25.4	0.05	1.16
0.1*h	28.7	0.14	0.51
0.2*h	31.3	0.17	0.69
0.3*h	34.0	0.15	0.80
0.4*h	35.5	0.13	0.84
0.5*h	38.3	0.09	0.85
0.6*h	41.0	0.15	0.80
0.7*h	42.7	0.16	0.74
0.8*h	45.5	0.16	0.59
0.9*h	48.4	0.11	0.37
1.0*h	50.0	0.07	0.22

Πίνακας 3-5: Ακρίβεια χρέωσης σε MMF πηγή 3-καταστάσεων

Είναι προφανές από τον Πίνακα 3-5 ότι για το συγκεκριμένο μοντέλο πηγής, και τα δύο σχήματα χρεώνουν πολύ κοντά στο βέλτιστο, με το "Tax-Band" σχήμα να προσεγγίζει το ισοδύναμο εύρος ζώνης με μεγαλύτερη ακρίβεια, όπως αναμενόταν (ο πίνακας δεν δίνει ποσοστά υπερχρέωσης γιατί είναι ελάχιστα).

5.3.1. Η επιλογή του μεσαίου φράγματος

Για να επιλέξουμε βέλτιστα το φράγμα k (όριο μεταξύ των δύο ζωνών), πειραματιστήκαμε ξανά με τον ίδιο τρόπο, θεωρώντας δηλαδή διάφορα ποσοστά του μεγίστου ρυθμού h και βέλτιστη δήλωση παραμέτρων. Το Σχήμα 3.11 αναφέρεται σε πειράματα τριών πηγών με $h_{MED} = 0,\ 0.5 \cdot h,\ h$ αντίστοιχα (παρατηρείστε ότι οι πηγές 1 και 3 είναι ON/OFF).



Σχήμα 3.11: Επιλογή κατάλληλου μεσαίου φράγματος για χρέωση MMF πηγής '3-καταστάσεων' από το "Tax-band"

Όπως είναι φανερό, υπάρχει μια περιοχή, ($k \in [0.3 \cdot h, 0.7 \cdot h]$), στην οποία οι συναρτήσεις υπερχρέωσης είναι αρκετά ομαλές, και στην οποία υπάρχει ελάχιστο σημείο. Σημαντικό είναι ότι σε αυτή την περιοχή ανήκουν και οι μέσες τιμές της συγκεκριμένης κίνησης ($M = 24.4,\ 38.3,\ 50$Kbps). Έτσι θεωρήσαμε ότι για αυτού του τύπου ATM κίνησης και για το συγκεκριμένο σύστημα, η επιλογή $k = M$ είναι λογική.

Τέλος, και σε αυτά τα πειράματα για $k = 0$ ή h, η χρέωση ταυτίζεται με την χρέωση της "Απλής" Φόρμουλας.

6. Συμπεράσματα - Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Στα δίκτυα B-ISDN/ATM πολλαπλών υπηρεσιών, οι χρήστες απαιτούν συγκεκριμένα επίπεδα Ποιότητας Εξυπηρέτησης, με αποτέλεσμα το δίκτυο να διακρίνει και να επιλέγει τους πελάτες του. Η χρέωση και κοστολόγηση υπηρεσιών, είναι εκείνος ο μηχανισμός ελέγχου που συμμερίζεται αυτή την πραγματικότητα και ενεργεί κατάλληλα. Για παράδειγμα, οι μηχανισμοί χρέωσης που περιγράψαμε, ωθούν τους χρήστες προς μια εξομάλυνση της κίνησης της πηγής. Είναι σημαντικό το ότι με αυτή την ενέργεια επωφελείται ολόκληρο το σύστημα: οι πελάτες και το δίκτυο. Με αυτό τον έμμεσο τρόπο *ελέγχου ανάδρασης*, το σύστημα ωθείται σε ένα αποδοτικό σημείο λειτουργίας όπου οι χρήστες ελαχιστοποιούν τα έξοδά τους και το δίκτυο λειτουργεί αποδοτικά, με αποτέλεσμα τη συνολική κοινωνική ευημερία.

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα που ικανοποιούν τα σχήματα χρέωσης που μελετήσαμε, είναι η δικαιοσύνη. Οι χρήστες χρεώνονται αναλογικά με την χρήση που επιφέρουν στο δίκτυο, δεν γίνεται καμιά διάκριση αυτών δεδομένου ότι λαμβάνονται υπ' όψη οι ανακρίβειες στις δηλώσεις παραμέτρων. Επίσης, και οι δύο μηχανισμοί είναι εύκολο να υλοποιηθούν, χωρίς να απαιτούν εξεζητημένες μετρήσεις. Έτσι με απλούς, παραδοσιακούς, τρόπους ογκοχρέωσης και χρονοχρέωσης, και με απαιτήσεις για περιγραφή πηγών που συναντάμε στα σύγχρονα δίκτυα, αναπτύχθηκαν οι μηχανισμοί της παρούσας εργασίας.

Με την βοήθεια πειραμάτων προσομοίωσης μελετήθηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα των ρυθμών χρέωσης σε κίνηση ATM διαφορετικού τύπου (MPEG-I video, ON/OFF MMF, '3-καταστάσεων MMF'). Ως κριτήριο για βέλτιστη χρέωση θεωρήσαμε το πραγματικό, μετρούμενο στο τέλος της κλήσης, ισοδύναμο εύρος ζώνης. Έτσι , η *"Απλή" Φόρμουλα χρέωσης* αποδείχθηκε ικανοποιητικά ακριβής όσο αφορά την κίνηση των στοχαστικών μοντέλων προσομοίωσης. Αντίθετα, το "Tax-Band" Σχήμα υπερτερεί στην ακρίβεια χρέωσης της πραγματικής κίνησης. Επίσης διερευνήσαμε την επιλογή κατάλληλου μεσαίου φράγματος, διαπιστώνοντας την διαφορετικότητα των βέλτιστων φραγμάτων για διαφορετικές περιπτώσεις κίνησης ($k = h/3$ για τις ταινίες MPEG, $k = M$ για κίνηση μοντέλων). Όλα τα πειράματα προσομοίωσης εκτελέστηκαν με την υπόθεση βέλτιστων προβλέψεων από την πλευρά του χρήστη, για λόγους αντικειμενικότητας. Τέλος, διερευνήσαμε το αποτέλεσμα της ακρίβειας στην πρόβλεψη του χρήστη στον μηχανισμό "Απλής" χρέωσης, για κίνηση ON/OFF πηγής.

Κάποιες κατευθύνσεις προς τις οποίες θα μπορούσαμε να κινηθούμε μελλοντικά, είναι οι παρακάτω:

- Χρέωση περαιτέρω πραγματικής κίνησης (π.χ. κίνηση που συναντούμε σε LANs/WANs). Εύρεση κατάλληλων βαθμίδων για το "Tax-Band" Σχήμα.
- Χρέωση άλλων διαδεδομένων μοντέλων κίνησης (π.χ. AR(k), αυτοπαρεμφερή μοντέλα).
- Ανάπτυξη πιθανοθεωρητικού μοντέλου για την μελέτη της ακρίβειας στην δήλωση παραμέτρων του "Tax-Band" σχήματος που εξετάσαμε
- Σύγκριση με άλλα σχήματα χρέωσης βάσει χρήσης

Κεφάλαιο 4

Υποκατάσταση Κίνησης ATM

Στα δίκτυα B-ISDN/ATM, σύντομα ο κυρίαρχος τύπος κίνησης θα οφείλεται σε πηγές πολυμέσων, όπως το εικονο-τηλέφωνο, τα τερματικά τηλεδιασκέψεων, οι εξυπηρετητές για video-κατ'απαίτηση κτλ. Ο αλγόριθμος κωδικοποίησης κίνησης video αναμένεται να χρησιμοποιεί το πρότυπο MPEG (Moving Picture Expert Group) της ISO ([31], [40], [18]). Ο νέος αυτός τύπος κίνησης, εγείρει σημαντικά ζητήματα επίδοσης και αρχιτεκτονικής υπηρεσιών στα σύγχρονα ευρυζώνια δίκτυα. Για να αντιμετωπίσουν και να κατανοήσουν τη φύση και συμπεριφορά αυτών των εφαρμογών, οι επιστήμονες καταφεύγουν στο στατιστικό χαρακτηρισμό και την αναζήτηση κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων. Ενδεικτικά αναφέρουμε μερικά ανοιχτά ερευνητικά ζητήματα που καλύπτουν όλο το φάσμα της αρχιτεκτονικής υπηρεσιών video: κατάλληλος σχεδιασμός του υλικού των μεταγωγέων ATM, μορφοποίηση της κίνησης με κατάλληλες συσκευές, ανάλυση επίδοσης, κτλ.

Το αρχικό στάδιο της προσπάθειας ανεύρεσης κατάλληλων θεωρητικών μοντέλων, είναι η στατιστική ανάλυση και περιγραφή των δεδομένων, ώστε να κατανοηθεί επακριβώς η στοχαστική συμπεριφορά της πραγματικής πηγής. Γνωστά στατιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται γι' αυτό το λόγο είναι οι ροπές τυχαίων μεταβλητών, το QQ-διάγραμμα, συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης σε διάφορες χρονικές κλίμακες, το RS-διάγραμμα, η παράμετρος Hurst, ο δείκτης διασποράς κτλ.

Στο παρόν κεφάλαιο ασχολούμαστε με την παραγωγή *ισοδύναμης κίνησης* προς αυτή που παράγει μια πραγματική video πηγή, ώστε να διατηρείται η ίδια Ποιότητα Εξυπηρέτησης. Χρησιμοποιούμε δύο μοντέλα πηγών για να *υποκαταστήσουμε* την ρεαλιστική κίνηση. Για να κατανοήσουμε το πρόβλημα, μελετήσαμε εκτεταμένο απόσπασμα τυπικής MPEG-I ταινίας. Η στατιστική ανάλυση και περιγραφή είναι βασισμένη σε τεχνικές Ανάλυσης Χρονοσειρών, ένα κλάδο της θεωρίας στοχαστικών ανελίξεων. Εκτός των απλών στατιστικών μεγεθών, χρησιμοποιήσαμε το *διάγραμμα αυτοσυσχέτισης*, προκειμένου να χαρακτηρίσουμε τη στατιστική εξάρτηση του ρυθμού κίνησης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, ενώ ως κατάλληλο μέτρο απαίτησης πόρων θεωρήσαμε το ισοδύναμο εύρος ζώνης.

Το πρώτο μοντέλο είναι μια *Markov αλυσίδα γεννήσεων-θανάτων M* καταστάσεων, που συμπίπτει με την επαλληλία *M* ομοειδών και ανεξάρτητων ON/OFF MMF πηγών. Το βασικό πλεονέκτημα του ON/OFF MMF μοντέλου, το οποίο περιγράφεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο (παράγραφος 3.3), είναι ότι είναι ταυτόχρονα απλό και ευέλικτο. Είναι πειστικό στην αναλυτική μελέτη, και αυτό έχει σαν συνέπεια την ύπαρξη μιας σειράς χρήσιμων αναλυτικών αποτελεσμάτων.

Το δεύτερο μοντέλο πηγής, είναι ένα αυτοπαλινδρομούμενο Gaussian πρώτης τάξης (*AR(1)*). Τα μοντέλα αυτής της κλάσης έχουν χρησιμοποιηθεί για να περιγράψουν πηγή εικόνας με χαμηλό βαθμό κίνησης, όταν το σχήμα κωδικοποίησης-συμπίεσης λαμβάνει υπ'όψη την πληροφορία από τις γειτονικές εικόνες, και η χρονική μονάδα παραγωγής κίνησης είναι αυτή του καρέ (βλέπε σχετικά άρθρα των Maglaris *et al.* (1988), και Nomura *et al.* (1989)). Και οι δύο πηγές, ON/OFF MMF και AR(1), εμφανίζουν ασθενείς εξαρτήσεις στο ρυθμό κίνησης. Το πρώτο είναι μοντέλο συνεχούς χρόνου ενώ το δεύτερο διακριτού.

Η υποκατάσταση στηρίχθηκε σε δύο μεθόδους επιλογής παραμέτρων των μοντέλων: η πρώτη μέθοδος βασίζεται στην συμφωνία βασικών *στατιστικών μεγεθών* και η δεύτερη στις ασυμπτωτικές ιδιότητες της συνάρτησης του *ισοδυνάμου εύρους ζώνης*. Για τον προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων, χρησιμοποιήσαμε τεχνικές επίλυσης γραμμικών και μη-γραμμικών συστημάτων. Κατόπιν αξιολογήσαμε την ισοδύναμη κίνηση χρησιμοποιώντας ως κριτήριο την εγγύτητα της ΠΑΚ στον ενταμιευτή ενός συνδέσμου FCFS οποίος τροφοδοτείται με την κίνηση του κάθε μοντέλου, με την αντίστοιχη πιθανότητα όταν ο σύνδεσμος τροφοδοτείται με την πραγματική κίνηση. Με αριθμητικά αποτελέσματα και πειράματα προσομοίωσης, αξιολογούμε τις δύο μεθόδους υποκατάστασης.

1. Ορισμός του Προβλήματος

Έστω N όμοιες ανεξάρτητες πηγές πραγματικής κίνησης. Θεωρώντας την επαλληλία αυτών των πηγών, δημιουργούμε αθροιστική κίνηση η οποία διοχετεύεται σε σύνδεσμο ATM χωρητικότητας $C = Nc$ και συνολικού χώρου ενταμίευσης $B = Nb$. Για την μελέτη του προβλήματος θα θεωρήσουμε το ασυμπτωτικό μοντέλο πολυπλεξίας "*μεγάλου* N" που μελετήσαμε στο Κεφάλαιο 2. Έτσι, c είναι το εύρος ζώνης που αντιστοιχεί σε κάθε μία από τις πηγές που πολυπλέκονται και b ο αντίστοιχος χώρος ενταμίευσης. Χρησιμοποιώντας την ασυμπτωτική σχέση (2.9), υπολογίζουμε τις τιμές των παραμέτρων s^*, t^* ώστε να εξασφαλίζεται κάποιο επίπεδο στην Ποιότητα Εξυπηρέτησης, π.χ. $\Pi\text{AK} \le e^{-\gamma}$. Το ζεύγος (s^*, t^*), καλείται *Σημείο Λειτουργίας* του συστήματος (έχουμε αναφερθεί στην διαισθητική ερμηνεία αυτών των παραμέτρων τους παράγοντες που τους επηρεάζουν). Σκοπός είναι να διερευνήσουμε την ύπαρξη ισοδύναμης προς την πραγματική κίνηση. *Ισοδύναμη* καλείται μια κίνηση η οποία μπορεί να υποκαταστήσει πλήρως την πραγματική, χωρίς να μεταβληθεί το σημείο λειτουργίας του συστήματος και η ΠΑΚ.

Για την ανεύρεση ισοδύναμης κίνησης, θεωρήσαμε κάποια απλά, γενικά, θεωρητικά μοντέλα Markov που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην βιβλιογραφία. Επιδιώξαμε τον προσδιορισμό κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους αυτών των μοντέλων, με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται σε εξισώσεις που εξασφαλίζουν ταύτιση κάποιων βασικών στατιστικών μεγεθών (π.χ. ροπές πρώτου και δευτέρου βαθμού), ενώ η δεύτερη σε εξισώσεις που βασίζονται στο ασυμπτωτικό και στην τοπική συμπεριφορά της συνάρτησης του ισοδυνάμου εύρους ζώνης πηγής. Στην εργασία μας αναζητάμε την κίνηση *μιας* μοντελοποιημένης πηγής (τα μοντέλα είναι τέτοια ώστε η επαλληλία πολλών τέτοιων πηγών να συνιστά πηγή ίδιου τύπου).

Στα πειράματα, δημιουργούμε γεννήτριες κίνησης για αυτά τα μοντέλα, οι οποίες ενεργοποιούνται με τις παραμέτρους των μοντέλων, κάποιες παραμέτρους για την εξασφάλιση τυχαιότητας και παραμέτρους χρονικής διάρκειας.

Αξιολογούμε τα υποθετικά ισοδύναμα συστήματα με πειράματα προσομοίωσης. Στα πειράματα αυτά, τροφοδοτούμε τον σύνδεσμο ATM με την νέα κίνηση και ελέγχουμε την αξιοπιστία της μεθόδου υποκατάστασης, με βάση την απώλεια κελιών. Συμπερασματικά, μας δίνεται η δυνατότητα να κρίνουμε τη γενικότερη θεώρηση γύρω από την μοντελοποίηση πραγματικών πηγών MPEG, την καταλληλότητα των μοντέλων, και τα καθοριστικά χαρακτηριστικά κίνησης που πρέπει να ενσωματώνουν οι παράμετροι των μοντέλων.

2. Χαρακτηρισμός ρεαλιστικής κίνησης video

2.1. Στατιστικά εργαλεία

Η Θεωρία των Στοχαστικών Ανελίξεων αποτελεί τη δυναμική της Θεωρίας των Πιθανοτήτων, καθώς οι στοχαστικές ανελίξεις περιγράφουν την εξέλιξη των φαινομένων στο χρόνο σύμφωνα με τους νόμους των πιθανοτήτων.

Η *Στοχαστική Ανέλιξη* ορίζεται ως μια απειροπληθής οικογένεια τυχαίων μεταβλητών $\{X(t), t \in T\}$, όπου T είναι το σύνολο των χρονικών στιγμών στις οποίες ορίζεται η ανέλιξη. Η τυχαία μεταβλητή στη χρονική στιγμή t θα συμβολίζεται με $X(t)$ εάν το σύνολο T είναι συνεχές, και με X_t εάν το T είναι διακριτό σύνολο. Μια εκτενής παρουσίαση του θέματος γίνεται στο βιβλίο του Papoulis (1990).

Η *Χρονοσειρά* είναι μια συλλογή παρατηρήσεων που έγιναν με κάποια συγκεκριμένη σειρά. Συνήθως, τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των παρατηρήσεων είναι ισομήκη. Κάποια συγκεκριμένη χρονική σειρά μπορούμε να τη δούμε ως μια πραγματοποίηση μιας στοχαστικής ανέλιξης. Η Ανάλυση Χρονοσειρών ασχολείται με τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του πιθανοτικού μοντέλου επί του οποίου δημιουργήθηκε η παρατηρούμενη χρονική σειρά. Σε αυτό το τμήμα παρουσιάζουμε τα βασικά στοιχεία της Ανάλυσης Χρονοσειρών, τα οποία χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία. Το βιβλίο του Chatfield (1975) είναι ένα εξαιρετικό εγχειρίδιο αυτής της θεωρίας, το οποίο συμβουλευτήκαμε και συστήνουμε στον αναγνώστη.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος περιγραφής μιας στοχαστικής ανέλιξης είναι ο προσδιορισμός των *ροπών* της, και συγκεκριμένα των ροπών πρώτης και δεύτερης τάξης, που καλούνται συναρτήσεις μέσης τιμής, διασποράς και αυτοσυνδιασποράς, συμβολίζονται με $\mu(t)$, $\sigma^2(t)$ και $\gamma(t_1, t_2)$ αντίστοιχα, και ορίζονται ως εξής:

- *Συνάρτηση μέσης τιμής* $\mu(t) = \mathrm{E}[X_t]$,
- *διασποράς* $\sigma^2(t) = Var[X_t]$ και
- *αυτοσυνδιασποράς* $\gamma(t_1, t_2) = Cov(X_{t_1}, X_{t_2}) = \mathrm{E}\left[\left(X_{t_1} - \mu(t_1)\right)\left(X_{t_2} - \mu(t_2)\right)\right]$

Η συνάρτηση διασποράς είναι μια ειδική περίπτωση της $\gamma(t_1, t_2)$ όταν $t_1 = t_2$. Για στάσιμες διεργασίες ισχύει $\gamma(t_1, t_2) = \gamma(t_2 - t_1)$.

Δύο μεγέθη που έχουν χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσουν την *εκρηκτικότητα* μιας πηγής είναι ο *συντελεστής μεταβλητότητας* του ρυθμού κίνησης (ορίζεται ως το πηλίκο $\sqrt{\sigma^2}/\mu$) και ο λόγος του μεγίστου προς τον μέσο ρυθμό κίνησης. Διαισθητικά, μια πηγή χαρακτηρίζεται ως εκρηκτική όταν η κίνηση παρουσιάζει ορατές συστοιχίες (εκρήξεις) κατά την απεικόνιση στον άξονα του χρόνου. Με άλλα λόγια, όταν μια σειρά

αφίξεων σε μικρά διαδοχικά διαστήματα ακολουθείται από ένα αρκετά μεγάλο διάστημα αδράνειας. Και τα δύο παραπάνω μεγέθη δε λαμβάνουν υπ'όψη το χρονικό συσχετισμό της κίνησης. Όμως, τα στατιστικά που εξαρτώνται από το χρόνο, είναι σημαντικά στην περίπτωση της κίνησης video που μελετάμε, γιατί η χρονική συσχέτιση μπορεί να προκαλέσει προβλήματα απόδοσης δικτύου (κύρια την συχνή υπερχείλιση των ενταμιευτών στους μεταγωγείς). Για το λόγο αυτό, ένα σημαντικό εργαλείο που χρησιμοποιήσαμε για την στατιστική ανάλυση μιας χρονοσειράς είναι ο *συντελεστής αυτοσυσχέτισης*, συμβολίζεται με $\rho(\tau)$ σαν συνάρτηση της χρονικής απόστασης τ, που μετρά το συσχετισμό μεταξύ των παρατηρήσεων X_t και $X_{t+\tau}$ της σειράς. Στην πράξη, οι δείκτες αυτοσυσχέτισης μιας στάσιμης εργοδικής σειράς υπολογίζονται συναρτήσει της αυτοσυνδιασποράς της από τον τύπο

$$\rho(\tau) = \hat{\gamma}(\tau)/\hat{\gamma}(0)$$

όπου $\hat{\gamma}(\tau)$ είναι μια εκτίμηση της αυτοσυνδιασποράς τ-τάξεως της σειράς. Για μια χρονική σειρά N παρατηρήσεων, μια συνεπής εκτιμήτρια της $\gamma(\tau)$, που αποτελεί άμεση εφαρμογή του ορισμού της, είναι η ακόλουθη

$$\hat{\gamma}(\tau) = \frac{1}{N-\tau}\sum_{t=1}^{N-\tau}\left(X_t - \overline{X}\right)\left(X_{t+\tau} - \overline{X}\right), \quad \tau \geq 0$$

όπου $\overline{X} = \left(1/N\right)\sum_{t=1}^{N} X_t$.

Μια βασική ιδιότητα του συντελεστή αυτοσυσχέτισης, που προκύπτει άμεσα από τον ορισμό της, είναι ότι $\left|\rho(\tau)\right| \leq 1$, με $\rho(0) = 1$.

Το *διάγραμμα αυτοσυσχέτισης* είναι η γραφική απεικόνιση του συντελεστή αυτοσυσχέτισης ως προς την χρονική απόσταση τ, και αποτελεί ένα σημαντικό εποπτικό εργαλείο για την ερμηνεία και την κατανόηση της στατιστικής συμπεριφοράς χρονοσειρών. Συγκεκριμένα οι χρονοσειρές των οποίων ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης $\rho(\tau)$ φθίνει εκθετικά, παρουσιάζουν ασθενείς *εξαρτήσεις* (ή συσχετίσεις). Αντίθετα, οι σειρές με ισχυρές εξαρτήσεις χαρακτηρίζονται από μια συνάρτηση αυτοσυσχέτισης που φθίνει καθ' υπερβολή.

2.2. Στατιστική ανάλυση ταινιών MPEG-I

Στον Πίνακα 4-1 φαίνονται κάποια απλά στατιστικά χαρακτηριστικά των πηγών MPEG που χρησιμοποιήσαμε για χρέωση (τα μεγέθη αναφέρονται μετά την μετατροπή της κίνησης σε κελιά). Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι τυπικές ακολουθίες που αναφέρονται σε ειδήσεις, σπορ, μουσικά video clips, έχουν υψηλό μέγιστο ρυθμό και υψηλό λόγο μεγίστου/μέσου. Αντίθετα, στα αποσπάσματα από τις ακολουθίες ταινιών (*terminator*, *lambs*) και τα κινούμενα σχεδία (*simpsons*, *asterix*), δεν έχουμε απότομες αλλαγές στην απαιτούμενη πληροφορία κωδικοποίησης.

MPEG	Μέσος Ρυθμός	Τυπική	Συντελεστής	Λόγος

Ακολουθίες	[Mbps]	Απόκλιση [Mbps]	Μεταβολής	Μεγίστου/ Μέσου
dino	0.366	0.407	1.11	9.0
lambs	0.207	0.309	1.49	17.9
soccer	0.754	0.716	0.95	6.8
sbowl	0.654	0.516	0.78	5.9
race	0.854	0.584	0.68	6.5
atp	0.609	0.563	0.92	8.6
asterix	0.622	0.556	0.89	6.5
simpsons	0.518	0.570	1.10	12.8
talk1	0.406	0.456	1.12	7.2
talk2	0.499	0.503	1.00	7.3
news	0.429	0.525	1.25	12.2
terminator	0.306	0.280	0.91	7.1
mr.bean	0.492	0.569	1.15	12.8
mtv	0.684	0.636	0.92	8.6

Πίνακας 4-1: Απλά στατιστικά χαρακτηριστικά των ακολουθιών MPEG που χρησιμοποιήθηκαν για χρέωση. Σημ. Τα μεγέθη αναφέρονται στην αντίστοιχη κίνηση ATM.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των πηγών MPEG που έχει επισημανθεί από πολλούς ερευνητές, και έχει τονισθεί τα τελευταία χρόνια, είναι οι *πολλαπλές κλίμακες χρόνου*. Η συσχέτιση (ή εξάρτηση) δηλαδή που παρουσιάζει ο ρυθμός κίνησης είναι διαφορετικός στις διάφορες χρονικές κλίμακες. Οι εξαρτήσεις αυτές σχετίζονται άμεσα με τα διάφορα επίπεδα θεώρησης της κίνησης MPEG στα δίκτυα ATM (επίπεδο καρέ, κελιού κτλ.). Ο Πίνακας 4-2 αναφέρεται στις χρονικές εξαρτήσεις που παρουσιάζει η πληροφορία σε καθένα από αυτά τα επίπεδα. Ένα μοντέλο κίνησης είναι δύσκολο να είναι αρκετά γενικό ώστε να καλύψει τα στατιστικά χαρακτηριστικά σε όλες αυτές τις κλίμακες. Τα περισσότερα μοντελοποιούν την πληροφορία σε επίπεδο καρέ, και αυτό το επίπεδο μας απασχολεί στην παρούσα εργασία.

Επίπεδο	Χρονικές Κλίμακες	Περιγραφή
Ολόκληρη ταινία ή κλήση video	Λεπτά ή ώρες	Ολόκληρη η ακολουθία
Σκηνή	Μερικά secs	Διαστήματα όπου το περιεχόμενο των εικόνων είναι σχεδόν το ίδιο
GOP	msecs (εκατοντάδες)	Περίοδος ενός GOP
Καρέ	msecs (δεκάδες)	Περίοδος ενός καρέ
κελί ATM	microsecs	Περίοδος ενός κελιού

Πίνακας 4-2: Εξάρτηση του ρυθμού MPEG κίνησης στις διάφορες χρονικές κλίμακες (επίπεδα).

2.2.1. Ανάλυση της προς υποκατάσταση κίνησης

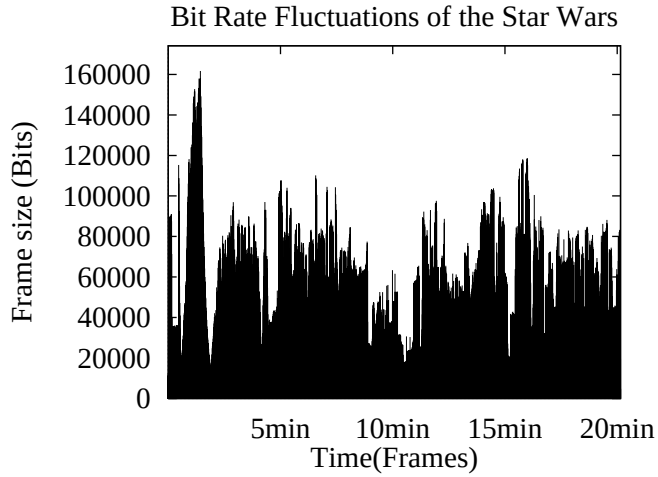
Αναλύσαμε μια εκτεταμένη (20 min) χρονική σειρά πραγματικής κίνησης από πηγή MPEG, και συγκεκριμένα, ένα απόσπασμα από την αρχή της ταινίας “Star Wars”. Είναι ένα αρκετά διαδεδομένο ίχνος που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην βιβλιογραφία.

Ο Πίνακα 4-3 περιέχει μερικά στατιστικά δεδομένα για τα μεγέθη των καρέ.

Τίτλος Ταινίας	Star Wars
Διάρκεια (min)	20
GOP	IBBPBBPBBPBB
Καρέ/sec	24
Ανάλυση (pixel)	352 × 240
Μέγιστος Ρυθμός [Mbps]	3.944
Ελάχιστος Ρυθμός [Mbps]	0.013
Μέσος Ρυθμός [Mbps]	0.373
Λόγος Μεγίστου/Μέσου	10.57
Τυπική Απόκλιση [Mbps]	0.452
Συντελεστής Μεταβολής	0.825

Πίνακας 4-3: Χαρακτηριστικά της ταινίας “Star Wars” της οποίας κίνηση ATM χρησιμοποιήθηκε για χρέωση. Σημ. Τα μεγέθη αναφέρονται πριν την δημιουργία κελιών ATM.

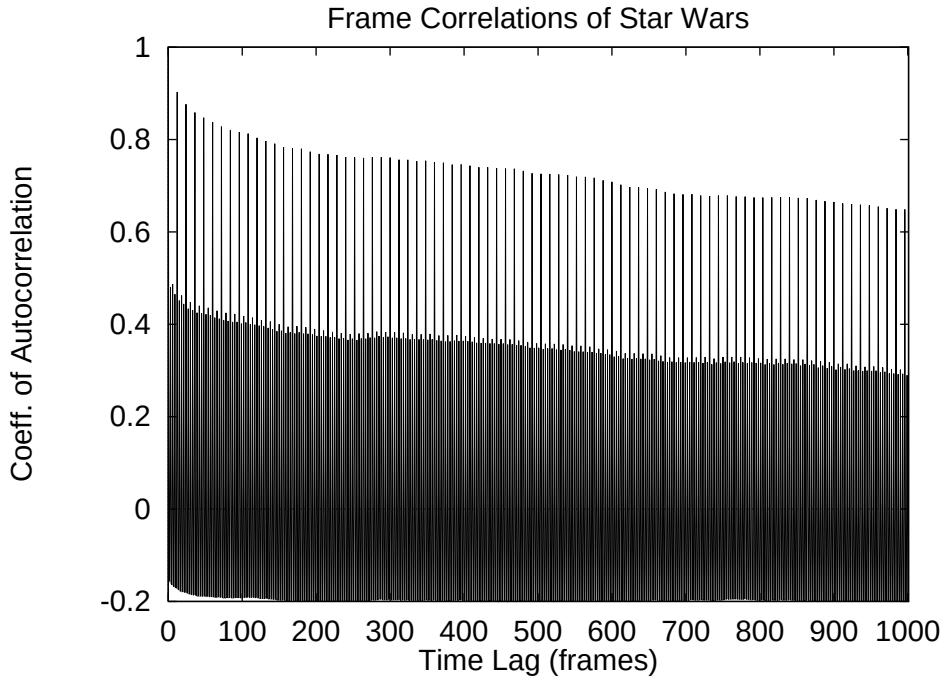
Το Σχήμα 4.1 απεικονίζει τα μεγέθη των καρέ από το ίχνος της ταινίας, όπου διακρίνονται αρκετές απότομες μεταβολές.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα του ρυθμού κίνησης ως προς το χρόνο για την ταινία *Star Wars*

Το Σχήμα 4.2 απεικονίζει το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης. Η καμπύλη $\rho(\tau)$ φθίνει καθ’ υπερβολή, και αυτό οφείλεται στην περιοδικότητα της ακολουθίας κωδικοποίησης και στα χαρακτηριστικά των διαφορετικού τύπου καρέ (I, B, P). Έτσι βλέπουμε ότι και για χρονική απόσταση της τάξεως των 1000 καρέ (διάρκεια περίπου 41 secs), η συσχέτιση όχι μόνο δεν εκμηδενίζεται αλλά εξακολουθεί να είναι ισχυρή. Η συσχέτιση

των Ι-καρέ φαίνεται να είναι υπεύθυνη για τις απότομες, περιοδικές, μεταβολές της συνάρτησης.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης από την στατιστική ανάλυση της ταινίας *Star Wars*

3. Το αθροιστικό MMF μοντέλο

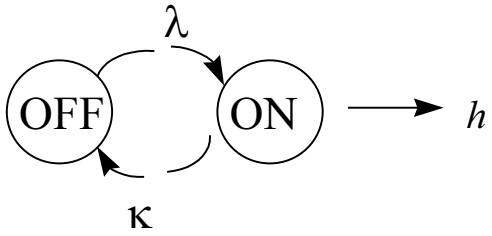
Θεωρείστε το 'ON/OFF Markov Modulated Fluid (MMF)' μοντέλο κίνησης, το οποίο χρησιμοποιήσαμε εκτενέστατα στο προηγούμενα κεφάλαια και απεικονίζουμε στο Σχήμα 4.3. Η μέση τιμή μ δίνεται από την σχέση (3.9) και η αυτοσυνδιασπορά $\gamma(\tau)$ του ρυθμού παραγωγής κίνησης δίνεται από την

$$\gamma(\tau) = \frac{\lambda\kappa h^2}{(\lambda+k)^2} e^{-(\lambda+\kappa)\tau}, \quad \tau \geq 0$$

Η διασπορά σ^2 δίνεται για $\tau = 0$ και είναι

$$\sigma^2 = \frac{\lambda\kappa h^2}{(\lambda+\kappa)^2}.$$

Όπως παρατηρούμε από την παραπάνω σχέση, η συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς φθίνει με εκθετικό τρόπο, οπότε οι ON/OFF MMF πηγές κίνησης χαρακτηρίζονται ως πηγές με ασθενείς εξαρτήσεις. Δίνοντας κατάλληλες τιμές στις παραμέτρους λ, κ και h του μοντέλου, μπορούμε να δημιουργήσουμε κίνηση διαφορετικής εκρηκτικότητας.



Σχήμα 4.3: Η ON/OFF MMF mini-πηγή

Σημαντικό πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι το 'ON/OFF MMF' έχει μελετηθεί εκτενέστατα στο παρελθόν και έχουν ήδη δημοσιευθεί χρήσιμα αναλυτικά αποτελέσματα (ενδεικτικά αναφέρουμε την μέθοδο AMS ([3])), με την οποία υπολογίζεται αναλυτικά ένα άνω φράγμα της πιθανότητας υπερχείλισης του ενταμιευτή ενός συνδέσμου FCFS όπου η διεργασία άφιξης χαρακτηρίζεται από την επαλληλία ομοειδών πηγών κίνησης). Επίσης, το μοντέλο αυτό κίνησης είναι απλό, ευέλικτο (περιγράφει πηγές διαφορετικής εκρηκτικότητας), και εύκολα υλοποιήσιμο όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 3.

Οι Gibbens and Hunt (1991) έχουν αποδείξει ότι το ισοδύναμο εύρος ζώνης για μια ON/OFF MMF πηγή ισούται με (βλέπε (2.7))

$$\alpha(s,t) = \frac{1}{st}\log\left\{\begin{pmatrix}\lambda & \kappa\\ \lambda+k & \lambda+\kappa\end{pmatrix}\exp\left[\begin{pmatrix}-\kappa+hs & \kappa\\ \lambda & -\lambda\end{pmatrix}t\right]\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}\right\}$$

δηλαδή ([15])

$$\alpha(s,t) = \frac{1}{st}\log\left(\frac{\omega_2\kappa+\lambda(\omega_2-sh)}{(\omega_2-\omega_1)(\lambda+\kappa)}e^{\omega_1 t} + \frac{-\omega_1\kappa+\lambda(sh-\omega_1)}{(\omega_2-\omega_1)(\lambda+\kappa)}e^{\omega_2 t}\right), \quad (4.1)$$

όπου

$$\omega_1 = \frac{-(\lambda+\kappa-sh)-\sqrt{(\lambda+\kappa-sh)^2+4sh\lambda}}{2},$$
$$\omega_2 = \frac{-(\lambda+\kappa-sh)+\sqrt{(\lambda+\kappa-sh)^2+4sh\lambda}}{2}.$$

Το μοντέλο που χρησιμοποιούμε για υποκατάσταση κίνησης προέρχεται από την επαλληλία M ανεξάρτητων και ομοειδών ON/OFF MMF πηγών που στην βιβλιογραφία χαρακτηρίζονται σαν mini-πηγές. Είναι ένα αθροιστικό μοντέλο πηγής με μια μόνο μετάβαση ανά χρονική στιγμή. Σύμφωνα με αυτό, η κατάσταση k υποδηλώνει την ύπαρξη k mini-πηγών στην ενεργή (ON) κατάσταση (βλέπε Σχήμα 4.4). Είναι ένα Markov μοντέλο συνεχούς χρόνου με πεπερασμένο πλήθος καταστάσεων.

Έστω ότι η $\{X_n;\ n=1,2,\ldots,N\}$ στοχαστική ανέλιξη περιγράφει το ρυθμό κίνησης στην n-οστή μονάδα χρόνου. Τότε, στη μόνιμη κατάσταση, η X_n ακολουθεί την Διωνυμική κατανομή $bin(M,p)$, δηλαδή

$$P\{X_n = kh\} = \binom{M}{k} p^k (1-p)^{M-k}$$

με

$$p = \frac{\lambda}{\lambda+k},$$

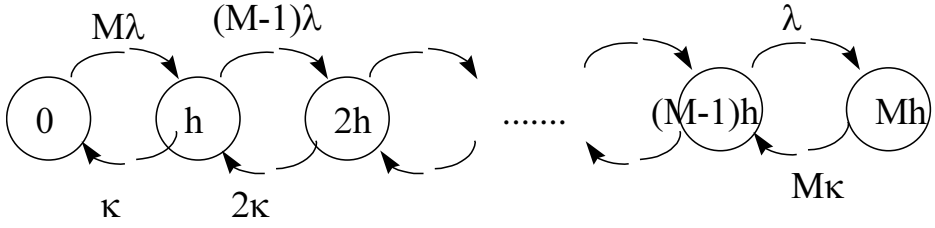
και μπορεί εύκολα και αυτό να αναλυθεί μαθηματικά. Συγκεκριμένα η μέση τιμή, η διασπορά και η αυτοσυνδιασπορά δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$\mu = Mhp \tag{4.2}$$
$$\sigma^2 = Mh^2 p(1-p) \tag{4.3}$$
$$\gamma(\tau) = \sigma^2 e^{-(\lambda+\kappa)\tau}$$

Επίσης ο μέγιστος ρυθμός του μοντέλου είναι η κίνηση που δημιουργεί βρισκόμενο στην κατάσταση M, όπου όλες οι mini-πηγές είναι ενεργές. Ο ρυθμός αυτός είναι

$$A = Mh \tag{4.4}$$

Λόγω της ανεξαρτησίας των ON/OFF MMF mini-πηγών που υποθέσαμε, εκμεταλλευόμαστε την ιδιότητα του ισοδυνάμου εύρους ζώνης που αναφέραμε στην παράγραφο 2.1 του Κεφαλαίου 2. Έτσι το ισοδύναμο εύρος ζώνης του μοντέλου ισούται με $M\alpha(s,t)$, όπου $\alpha(s,t)$ το ισοδύναμο εύρος ζώνης κάθε mini-πηγής (δίνεται από την (4.1)).



Σχήμα 4.4: Το αθροιστικό MMF μοντέλο

Οι Maglaris *et al.* (1988), χρησιμοποίησαν το μοντέλο αυτό για να περιγράψουν μία πηγή εικονο-τηλεφώνου, αλλά και γενικότερα μια πηγή video χαμηλού βαθμού κίνησης στην οποία δεν παρατηρούνται απότομες μεταβολές σκηνών (short-term variability model) π.χ. video τηλεδιάσκεψης. Η κωδικοποίηση του εικονο-τηλεφώνου ήταν PCM (Pulse Code Modulation) και ο μηχανισμός συμπίεσης βασιζόταν σε μια τεχνική κατά την οποία μεταφέρονται μόνο εκείνα τα μέρη του τρέχοντος καρέ που έχουν αλλάξει από το προηγούμενο καρέ. Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως conditional replenishment. Το μέγεθος του κάθε καρέ ήταν 250,000 pixels και ο ρυθμός απεικόνισης των εικόνων ήταν σταθερός και ίσος με 30 καρέ/sec. Οι τιμές παραμέτρων που χρησιμοποίησαν ήταν $M = 20$, $h = 945$ Kbps, $\lambda = 0.7856$ sec^{-1}, και $\kappa = 3.1144$ sec^{-1}.

Σε μια μεταγενέστερη εργασία, οι Sen *et al.* (1989), χρησιμοποίησαν την επαλληλία ετερογενών ON/OFF MMF πηγών για να περιγράψουν πηγές εικόνας με πολλαπλά επίπεδα κίνησης.

Δεδομένου ότι οι mini-πηγές είναι ανεξάρτητες ON/OFF MMF, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τις παραμέτρους M, h, λ, κ του αθροιστικού μοντέλου βασιζόμενοι είτε στα στατιστικά μεγέθη της πραγματικής κίνησης είτε στην έννοια του ισοδυνάμου εύρους ζώνης. Είναι προφανές ότι η επαλληλία πολλών ομοειδών και ανεξάρτητων τέτοιων πηγών μοντέλου, συνιστούν επίσης μια αλυσίδα Markov γεννήσεων-θανάτων ίδιου τύπου. (Οι Maglaris *et al.*, πρότειναν $M = 20 \times N$, για N όμοιες με το εικονο-τηλέφωνο που μελετούσαν πηγές).

Τέλος, το μοντέλο είναι γνωστό στη Θεωρία Ουρών σαν ένα σύστημα γεννήσεων-θανάτων σε πεπερασμένο πληθυσμό πελατών με ανατροφοδότηση - άπειρο αριθμό εξυπηρετητών ($M / M / \infty / / M$) (δες το βιβλίο του L. Kleinrock (1975)).

3.1. Ο προσομοιωτής για το MMF μοντέλο

Για την παραγωγή κίνησης που προέρχεται από την επαλληλία M ανεξάρτητων και ομοειδών ON/OFF MMF πηγών, χρησιμοποιήσαμε τον προσομοιωτή που περιγράφεται στην παράγραφο 2.3.1 του προηγούμενου κεφαλαίου. Για την εξασφάλιση της ανεξαρτησίας κίνησης των πηγών αυτών τροποποιήθηκε ο αλγόριθμος L'Ecuyer ώστε να επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη δημιουργία πολλών ανεξάρτητων ακολουθιών ψευδοτυχαίων τιμών. Η γεννήτρια κίνησης, δέχεται εκτός των παραμέτρων του προσομοιωτή (λ , κ , h , t), τη διάρκεια παραγωγής κίνησης, το seed, και το πλήθος M των ON/OFF MMF mini-πηγών. Για αυτή την σειρά πειραμάτων, η ισοδύναμη κίνηση ήταν διάρκειας 20 λεπτών με $t = 41$ ms, ίσο με το χρόνο πλαισίου (ο προσομοιωτής δηλαδή παραμένει στην ίδια κατάσταση για 41 ms), ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμη με την πραγματική.

4. Το αυτοπαλινδρομούμενο Gaussian μοντέλο AR(1)

Το μοντέλο αυτό, είναι μια αυτοπαλινδρομούμενη διεργασία πρώτης τάξης, AR(1), διακριτού χρόνου, που περιγράφει το ρυθμό παραγωγής κίνησης για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα συναρτήσει του ρυθμού παραγωγής στο προηγούμενο χρονικό διάστημα.

Δηλαδή αν η $\{X_n;\ n=1,2,\ldots,N\}$ περιγράφει το ρυθμό κίνησης στην n-οστή μονάδα χρόνου, το AR(1) μοντέλο θα είναι το ακόλουθο

$$X_n = aX_{n-1} + (1-a)\mu + \varepsilon_n, \quad n = 1,\ldots,N$$

όπου $|a|<1$ σταθερά, μ η μέση τιμή και $\{\varepsilon_n\}$ μια ανεξάρτητη Gaussian τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και διασπορά η^2 (λευκός θόρυβος).

Η διασπορά του ρυθμού παραγωγής κίνησης μπορεί εύκολα να δειχθεί ότι δίνεται από την σχέση

$$\sigma^2 = \frac{\eta^2}{(1-\alpha^2)}. \tag{4.5}$$

Οι Courcoubetis and Weber (1996), δίνουν το ισοδύναμο εύρος ζώνης για αυτή την πηγή κίνησης που είναι

$$\alpha(s,t) = \mu + \sigma_t^2 s/2 \tag{4.6}$$

όπου

$$t\sigma_t^2 = \mathrm{var}\left(\sum_{i=1}^{t} X_i\right) = t\gamma - 2\frac{a(1-a^t)}{(1-a)^2}\sigma^2 \tag{4.7}$$

και

$$\gamma = \frac{(1+a)}{(1-a)}\sigma^2.$$

Θα σταθούμε λίγο στην εξίσωση (4.7), την οποία θα χρησιμοποιήσουμε στην μέθοδο υποκατάστασης. Για $t=2$, και σύμφωνα με τους ορισμούς που δώσαμε, ισχύει

$$2\sigma_2^2 = 2\frac{(1+a)}{(1-a)}\sigma^2 - 2\frac{a(1-a^2)}{(1-a)^2}\sigma^2 = 2(1+a)\sigma^2. \tag{4.8}$$

Τέλος, είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι η επαλληλία M ανεξαρτήτων και ομοειδών AR(1) πηγών, a συνιστά AR(1) πηγή επίσης. Έτσι, στα πειράματα για υπολογισμό ισοδύναμης κίνησης, θα υποκαταστήσουμε το σύνολο των πραγματικών πηγών με μια μόνο πηγή μοντέλου AR(1), αποφεύγοντας την στατιστική πολυπλεξία. Πράγματι, έστω i όμοιες πηγές με ίδιο a, μέση τιμή μ και διασπορά σ^2. Η καθεμία από αυτές δημιουργεί κίνηση

$$X_n^{(i)} = aX_{n-1}^{(i)} + (1-a)\mu + \varepsilon_n^{(i)}$$

ανεξάρτητα από τις άλλες. Τότε το αθροιστικό μοντέλο περιγράφεται από την

$$\left\{\sum_{i=1}^{M} X_n^{(i)}\right\} = a\left\{\sum_{i=1}^{M} X_{n-1}^{(i)}\right\} + (1-a)\,M\mu + \left\{\sum_{i=1}^{M} \varepsilon_n^{(i)}\right\}$$

$$\Leftrightarrow\ Z_n = aZ_{n-1} + (1-a)\,M\mu + w_n$$

Είναι δηλαδή και αυτό AR(1) πηγή με την ίδια σταθερά a, μέση τιμή $M\mu$ και λευκό θόρυβο $\{w_n\}$ διασποράς $M\eta^2$.

4.1. Ο προσομοιωτής AR(1) πηγής

Η υλοποίηση του μοντέλου AR(1) είναι εύκολη και απαιτεί τη δημιουργία τυχαίων τιμών από την Gaussian κατανομή με μέση τιμή μ και διασπορά σ^2, δηλ. $X \sim N(\mu, \sigma^2)$. Αν και η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της Gaussian κατανομής δεν είναι αντιστρέψιμη, ο αλγόριθμος δημιουργίας των τιμών που χρησιμοποιούμε είναι σχετικά απλός, βασίζεται στο Κεντρικό Οριακό Θεώρημα και περιγράφεται στο βίβλο του Knuth (1981). Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος εκτελεί τα εξής βήματα:

1. Δημιούργησε 12 τυχαίες τιμές $U_1,\ldots,U_{12}$ από την ομοιόμορφη κατανομή $U_n(0,1)$
2. $Z \leftarrow \sum_{i=1}^{12} U_i - 6$
3. $X \leftarrow \mu + Z\sigma$
4. Επέστρεψε την τιμή X.

Η γεννήτρια κίνησης δέχεται σαν παραμέτρους εκτός από αυτές του προσομοιωτή πηγής (a, μ, η), την διάρκεια του χρονικού διαστήματος $t = 41$ ms παραγωγής ενός καρέ (όπως και στον προσομοιωτή του προηγούμενου μοντέλου), και τη συνολική διάρκεια της κίνησης σαν ακέραιο πολλαπλάσιο του t (περίπου 20 λεπτά). Ο αλγόριθμος δημιουργίας λευκού θορύβου, καλείται ανεξάρτητα σε κάθε χρονικό διάστημα t. Τέλος, για τις περιπτώσεις όπου $X_n < 0$, αποφασίζουμε $X_n = 0$ (αυτό έχει σαν συνέπεια την όχι σημαντική αλλοίωση των στατιστικών χαρακτηριστικών της μοντελοποιημένης κίνησης σε σχέση με την πραγματική).

5. Υποκατάσταση βάσει στατιστικών χαρακτηριστικών

Χρησιμοποιήσαμε τα μοντέλα πηγών και τις γεννήτριες αντίστοιχης κίνησης, με σκοπό να υποκαταστήσουμε την κίνηση που δημιουργούν N πηγές όμοιες με αυτή που εξετάσαμε. Υπολογίσαμε κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους των δύο μοντέλων (αθροιστικό Markov, AR(1)), βασιζόμενοι σε τεχνικές που στηρίζονται στην στατιστική συμπεριφορά της πραγματικής κίνησης. Σε αυτή την παράγραφο περιγράφουμε αυτή την μεθοδολογία υπολογισμού ισοδύναμης κίνησης για υποκατάσταση της πραγματικής.

5.1. Πηγές αθροιστικού MMF μοντέλου

Οι παράμετροι των MMF πηγών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την σειρά πειραμάτων επελέγησαν με βάση τις εξισώσεις (4.4), (4.2) και (4.3), δηλαδή

$$A = 3944N, \quad Ap = 373N, \quad Mh^2 p(1-p) = (452)^2 N$$

(τα μεγέθη εκφράζονται σε Kbps), επιδιώκοντας την ταύτιση βασικών μεγεθών της στατιστικής συμπεριφοράς των δύο κινήσεων.

Για τον υπολογισμό της τιμής της τέταρτης παραμέτρου του μοντέλου, ενεργήσαμε με βάση μια ευριστική τεχνική. Θέσαμε κάποιο *κατώφλι (Thr)*, στο μέγεθος καρέ της ταινίας (π.χ. $0.1 \cdot 373 \cdot 41$ bits που αποτελεί το 10% της μέσης κίνησης). Θεωρήσαμε ότι εάν σε ένα χρονικό διάστημα παραγωγής καρέ (41 ms), το μέγεθος του καρέ είναι μικρότερο από αυτό το κατώφλι, η πηγή βρίσκεται σε μια υποθετική ανενεργή κατάσταση. Μετρήσαμε το μέσο χρόνο συνεχούς παραμονής στην κατάσταση αυτή και υπολογίσαμε την παράμετρο της αλυσίδας από την σχέση

$$1/\lambda = mean_sojurn_OFF,$$

όπου $\lambda \cong 0.0182 \text{ sec}^{-1}$, για διάφορες τιμές του Thr στο $[13 \cdot 41,\ 0.1 \cdot 373]$ (σημειώστε ότι 13 Kbps είναι ο ελάχιστος ρυθμός κίνησης και 373 Kbps ο μέσος).

Από τα παραπάνω βλέπουμε, ότι η τιμή της πιθανότητας p είναι ανεξάρτητη από το πλήθος N των πηγών, και ίση με 0.094 σε όλα τα πειράματα που εκτελέσαμε. Επομένως, και η τιμή της παραμέτρου κ είναι σταθερή και ίση με 0.1742 sec^{-1}. Έτσι υπολογίζεται και ο μέγιστος ρυθμός της κάθε mini-πηγής, $h \cong 605$ Kbps. Τέλος, το πλήθος των καταστάσεων της αλυσίδας δίνεται σαν συνάρτηση του N για κάθε πείραμα, από την σχέση $M = A/h \cong \frac{3944}{605} N$.

5.2. Οι AR(1) πηγές

Οι παράμετροι των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν για παραγωγή κίνησης, επελέγησαν πάλι με σκοπό την προσέγγιση βασικών στατιστικών μεγεθών των N πραγματικών πηγών.

Για να αξιοποιήσουμε την εξίσωση (4.8), υπολογίσαμε το στατιστικό αυτό μέγεθος για την πραγματική πηγή κίνησης, δημιουργώντας την κατάλληλη ακολουθία. Προσθέτοντας το μέγεθος γειτονικών καρέ, βρέθηκε ότι $2\sigma_2^2 = (588)^2$ Kbps.

Ο μέσος ρυθμός κίνησης του μοντέλου θα πρέπει να είναι $\mu = 373N$ Kbps και η τυπική απόκλιση να ισούται με $\sigma = 452\sqrt{N}$ Kbps. Έτσι από το σύστημα εξισώσεων (4.8) και (4.5), έχουμε

$$2(1+a)\sigma^2 = (588)^2 N, \quad \frac{\eta^2 N}{(1-a^2)} = (452)^2 N$$

απ΄ όπου μπορούν να προκύψουν οι τιμές των άλλων δύο παραμέτρων a και η.

Παρατηρείστε ότι οι τιμές αυτές είναι ανεξάρτητες από το πλήθος N των προς υποκατάσταση πραγματικών πηγών. Για την σειρά των πειραμάτων που πραγματοποιήσαμε, οι τιμές αυτές είναι a = -0.15389635 και $\eta \cong 446$ Kbps. Έτσι κάθε πηγή διαφέρει από αυτές των άλλων πειραμάτων μόνο στην τιμή της παραμέτρου μ.

6. Υποκατάσταση με βάση τις ασυμπτωτικές ιδιότητες του ισοδυνάμου εύρους ζώνης

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ταύτιση των ασυμπτωτικών ιδιοτήτων της συνάρτησης, και συγκεκριμένα της τοπικής συμπεριφοράς των ισοδυνάμων ευρών ζώνης της πραγματικής πηγής και της ισοδύναμής της. Έστω $\alpha_R(s^*,t^*)$ το ισοδύναμο εύρος ζώνης της πραγματικής πηγής, και $\alpha_M(s^*,t^*)$ της μοντελοποιημένης, στο σημείο λειτουργίας του συστήματος (s^*,t^*). Προφανώς, η πρώτη θεμελιώδης σχέση αφορά την ισότητα στο σημείο λειτουργίας, και δίνεται από την εξίσωση

$$\alpha_R(s^*,t^*)\cdot N = \alpha_M(s^*,t^*) \tag{4.9}$$

(Παρατηρείστε ότι λόγω ανεξαρτησίας των N πηγών λάβαμε $\alpha_R(s^*,t^*)\cdot N$ το ολικό εύρος ζώνης). Θεωρήσαμε ότι N όμοιες πηγές του τύπου της MPEG ταινίας που μελετήσαμε στην παράγραφο 4.2.2.1, τροφοδοτούν σύνδεσμο ATM χωρητικότητας $C = 34$ Mbps και ενταμιευτή B=100 κελιών. Αυτή η αθροιστική κίνηση συνιστά και την πραγματική που επιδιώκουμε να αντικαταστήσουμε με ισοδύναμη. Προκείμενου να προσδιορίσουμε τα σημεία λειτουργίας αυτού του συνδέσμου, χρησιμοποιήσαμε το ασυμπτωτικό της σχέσης (2.9) για διάφορες απαιτήσεις σε απώλειας κελιών. Τα σημεία λειτουργίας προσδιορίζονται από τις τιμές του Πίνακα 4-4.

N	$-\log_{10}\Phi$	s^* (Kbits^{-1})	t^* (ms)
80	0.022	0.001	41
75	0.059	0.001	41
70	0.177	0.011	41
65	0.655	0.011	41
60	1.132	0.011	41
55	1.609	0.011	41
50	2.128	0.021	41
45	3.225	0.021	41
40	4.322	0.021	41

Πίνακας 4-4: Σημεία λειτουργίας συνδέσμου ATM με $C = 34$ Mbps, B=100 κελιά και πραγματική κίνηση MPEG.

Για να μπορέσει να διατηρηθεί ίδια η ΠΑΚ στην ασυμπτωτική σχέση (2.9), θα πρέπει το σημείο (s^*,t^*) να εξακολουθεί να είναι σημείο βελτιστοποίησης για το συγκεκριμένο σύστημα. Επομένως, βασισμένοι στην τοπική συμπεριφορά της συνάρτησης $\alpha(s,t)$, στο γεγονός δηλαδή ότι τα σημεία βελτιστοποίησης του ασυμπτωτικού δεν μεταβάλλονται πολύ (ειδικά για μεγάλα συστήματα), θα θέλαμε οι συναρτήσεις $\alpha_R(s,t)$ και $\alpha_M(s,t)$ να παραμένουν ίσες σε μια περιοχή μικρών διακυμάνσεων των s^* και t^*. Για να εκφράσουμε τις μεταβολές αυτές, χρησιμοποιήσαμε τις μερικές παραγώγους των συναρτήσεων $\alpha_R(s,t)$ και $\alpha_M(s,t)$, ως προς τις

μεταβλητές s και t, στο σημείο (s^*,t^*). Έτσι, οι δύο ακόλουθες σχέσεις συμπληρώνουν το σύστημα εξισώσεων της μεθόδου υποκατάστασης,

$$\frac{\partial}{\partial s}\alpha_R(s,t^*)\Big|_{s=s^*}\cdot N=\frac{\partial}{\partial s}\alpha_M(s,t^*)\Big|_{s=s^*} \tag{4.10}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\alpha_R(s^*,t)\Big|_{t=t^*}\cdot N=\frac{\partial}{\partial t}\alpha_M(s^*,t)\Big|_{t=t^*} \tag{4.11}$$

Εξισώσαμε δηλαδή το ολικό ισοδύναμο εύρος ζώνης κάθε κίνησης, όπως και τις μερικές παραγώγους στο σημείο (s^*,t^*). Θα αποκαλούμε αυτή τη μέθοδο, *"Μέθοδο των Ασυμπτωτικών Ιδιοτήτων"*.

Η επίλυση αυτού του συστήματος εξισώσεων δεν είναι συχνά εύκολη, για το λόγο ότι οι εξισώσεις μπορεί να είναι μη-γραμμικές. Για εύρεση ριζών, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι Αριθμητικής Ανάλυσης, όπως αυτή των Newton-Raphson (βλέπε σελ. 379 στο βιβλίο των Press *et al.* (1994)).

Μπορούμε να προσεγγίσουμε τις ισότητες των εξισώσεων μερικών παραγώγων με μεταβολές. Έστω λοιπόν, $t'=t^*+\Delta t$ και $s'=s^*+\Delta s$ γειτονικό σημείο του (s^*,t^*). Τότε οι εξισώσεις (4.10), (4.11) γράφονται ως εξής

$$a_R(s^*+\Delta s,t^*)\cdot N=a_M(s^*+\Delta s,t^*)\cong a_M(s^*,t^*)+\frac{\partial}{\partial s}a_M(s,t^*)\Big|_{s=s^*}\cdot(\Delta s) \tag{4.12}$$

και

$$a_R(s^*,t^*+\Delta t)\cdot N=a_M(s^*,t^*+\Delta t)\cong a_M(s^*,t^*)+\frac{\partial}{\partial t}a_M(s^*,t)\Big|_{t=t^*}\cdot(\Delta t) \tag{4.13}$$

Από τις τρεις εξισώσεις (4.9), (4.12) και (4.13), προκύπτει το σύστημα των μη-γραμμικών εξισώσεων, $\mathbf{F}(x_1,x_2,\ldots x_n)=\mathbf{0}$, $n\geq 3$, που λύνουμε αριθμητικά.

Θεωρήσαμε $\Delta t=1$ ms και $\Delta s=0.001$ Kbits^{-1}. Στον Πίνακα 4-5 αναφέρονται οι τιμές του ισοδυνάμου εύρους ζώνης στα σημεία (s,t), (s',t^*), (s^*,t'), όπου $s'=s^*+\Delta s$ και $t'=t^*+\Delta t$.

ΣΗΜΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	$\alpha_R(s^*,t^*)$ [Kbps]	$a_R(s',t^*)$ [Kbps]	$a_R(s^*,t')$ [Kbps]
N=80,75	422.4	417.6	412.3
N=70,65,60,55	487.5	495.6	475.9
N=50,45,40	586.8	599.4	572.8

Πίνακας 4-5: Το ισοδύναμο εύρος ζώνης MPEG πηγής σε γειτονικά σημεία των σημείων λειτουργίας (s^*,t^*).

Στην περίπτωση του MMF μοντέλου, δεδομένου ότι οι εξισώσεις δεν επαρκούν για τον υπολογισμό και των τεσσάρων αγνώστων του μοντέλου (M, h, κ και λ), θεωρούμε την τιμή του $\lambda=0.0182$ sec^{-1}, με το σκεπτικό που αναλύθηκε στην

προηγούμενη μέθοδο. Κατόπιν, εισάγουμε την τιμή αυτή του λ στις άλλες τρεις εξισώσεις.

7. Πειραματική αξιολόγηση των μεθόδων υποκατάστασης

Σε αυτή την παράγραφο, αξιολογούμε τις προτεινόμενες μεθόδους υποκατάστασης με πειράματα προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, προσομοιώσαμε την συμπεριφορά ενός συνδέσμου ATM, με πολιτική εξυπηρέτησης FCFS, όταν τροφοδοτείται με τις πηγές κίνησης του κεφαλαίου αυτού. Το κύριο εκτιμώμενο μέγεθος ήταν η ΠΑΚ και το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτών των πειραμάτων, ήταν το μεγάλο χρονικό διάστημα προσομοίωσης που απαιτείται για την ακριβή εκτίμηση αυτού του μεγέθους. Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι το πότε το εκτιμώμενο μέγεθος έχει εισέλθει σε ένα επιθυμητό διάστημα εμπιστοσύνης και πότε έχει συγκλίνει σε μια συγκεκριμένη τιμή, ώστε να τερματιστεί η εκτέλεση του πειράματος. Στα πειράματά μας, επιλέξαμε ως κριτήριο τερματισμού και ακρίβειας, την πραγματοποίηση 500,000 υπερχειλίσεων του ενταμιευτή. Η εμπειρία μας έδειξε ότι η συνθήκη αυτή ήταν αρκετή για να θεωρηθεί η εκτίμηση της ΠΑΚ αξιόπιστη.

Μια άλλη σημαντική παρατήρηση που εξάγαμε από τα πειράματα προσομοίωσης, σχετίζεται με την διαισθητική ερμηνεία του t^*. Παρατηρήσαμε όλα τα διαστήματα κατά τα οποία ο ενταμιευτής είναι συνεχώς γεμάτος κελιά και καταλήγουν στην υπερχείλιση. Διαπιστώσαμε ότι η μέση τιμή αυτών των διαστημάτων είναι πολύ κοντά στην τιμή του t^*, που χρησιμοποιήσαμε στους υπολογισμούς του ισοδυνάμου εύρους ζώνης.

Τέλος, μας δόθηκε η ευκαιρία να ελέγξουμε την συντηρητικότητα του ασυμπτωτικού για "μεγάλο N", συγκρίνοντας τις τιμές ΠΑΚ του Πίνακα 4-4 με αυτές τις προσομοίωσης, για τον σύνδεσμο ATM με $C = 34$ Mbps και B=100 κελιά.

Στην συνέχεια παρουσιάζουμε το μοντέλο του προσομοιωτή που αναπτύξαμε.

7.1. Η προσομοίωση του FCFS συνδέσμου

Το σύστημα που προσομοιώνουμε είναι μια ουρά μεγέθους B, που τροφοδοτείται από ένα σύνολο N πηγών και εξυπηρετείται με σταθερό ρυθμό C. Για την εξασφάλιση της ανεξαρτησίας στη διαδικασία στατιστικής πολυπλεξίας, χρησιμοποιήσαμε την γνωστή τεχνική των *τυχαίων φάσεων*, αρχίζοντας την ταινία σε διαφορετικά σημεία, τυχαία επιλεγόμενα κάθε φορά (ανάγνωση του αρχείου ίχνους σε N τυχαία σημεία). Έτσι δεν εκτελούμε συνέχεια αντίγραφο του ίδιου πειράματος, δεδομένου ότι σε κάθε νέα εκτέλεση του πειράματος, η κίνηση της κάθε πηγής είναι μετατοπισμένη στο χρόνο σε σχέση με τις άλλες, και αποφεύγεται ο συγχρονισμός των πηγών. Η ανεξαρτησία αυτή της πολυπλεξίας ελέγχεται μέσω μιας παραμέτρου seed.

Στα πειράματά μας, ο χρόνος διακριτοποιείται σε μικρά διαστήματα, διάρκειας t το καθένα. Ο μηχανισμός λειτουργίας, περιλαμβάνει ουσιαστικά μια καταμέτρηση των κελιών ATM που έχουν εισαχθεί και έχουν απολεσθεί λόγω υπέρβασης ενός κατωφλίου στο μήκος ουράς. Η κατάσταση της προσομοίωσης περιγράφεται με τις ακόλουθες μεταβλητές:

- X_i, $i = 1,\ldots,N$: η ποσότητα κίνησης που εισάγει η i-οστή πηγή στο τρέχον χρονικό διάστημα

- Y : η ολική ποσότητα κίνησης που εισέρχεται στον σύστημα στο τρέχον χρονικό διάστημα
- Z : το μήκος της ουράς στο τρέχον χρονικό διάστημα
- L : η συνολική ποσότητα κίνησης που έχει απολεσθεί λόγω υπερχείλισης ενταμιευτή
- D : η συνολική ποσότητα κίνησης που έχει εισέλθει στο σύστημα από την αρχή της προσομοίωσης.
- V : το πλήθος των υπερχειλίσεων που έχουν παρατηρηθεί από την αρχή της προσομοίωσης.

Αρχικά δίνουμε μηδενικές τιμές στις μεταβλητές Z, L, D και V. Για κάθε χρονική μονάδα t, γίνεται αλλαγή κατάστασης στην προσομοίωση εκτελώντας τα εξής βήματα:

1. Προσδιόρισε την ποσότητα κίνησης X_i που εισάγει η i -οστή πηγή.
2. $Y \leftarrow \sum_i X_i$
3. $D \leftarrow D + Y$
4. $Z \leftarrow Z + Y - C \cdot t$

   Εάν $(Z < 0)$ τότε $Z = 0$

   Εάν $(Z > B)$

   $L \leftarrow L + (Z - B)$

   $Z = B$

   $V \leftarrow V + 1$

Ο προσομοιωτής επιστρέφει την τιμή L/D ως εκτιμήτρια της ΠΑΚ.

7.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα Μεθόδου Στατιστικών

Στον Πίνακα 4-6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την μέθοδο υποκατάστασης βάσει στατιστικών (είναι αρκετά σύνηθες να χρησιμοποιείται ο αρνητικός λογάριθμος της ΠΑΚ). Το σύμβολο "<<" αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου παρατηρήθηκαν πολύ λίγες απώλειες, η τιμή της ΠΑΚ δεν συνέκλινε, με αποτέλεσμα να μην έχουμε μια αξιόπιστη εκτίμηση. Παρατηρείστε ότι η συμπεριφορά της κίνησης του AR(1) είναι πολύ καλύτερη από την κίνηση της ON/OFF πηγές σε δύο σημεία λειτουργίας του συστήματος. Επιπλέον για $N = 80$ και $N = 75$, η μέθοδος υποκατάστασης με στατιστικά του AR(1) μοντέλου έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα. Βέβαια, τα αποτελέσματα αποκλίνουν από την συμπεριφορά της πραγματικής κίνησης καθώς το πλήθος των πηγών video που αντικαθίστανται μειώνονται.

$-\log_{10}$ ΠΑΚ

N	MPEG	ON/OFF	AR(1)
40	6.465	<<	<<
45	5.321	<<	<<
50	4.644	<<	<<
55	3.909	<<	5.542
60	3.228	<<	3.790
65	2.663	5.573	2.933
70	2.178	4.485	3.316
75	1.773	3.195	1.844
80	1.447	2.113	1.480

Πίνακας 4-6: Η "Μέθοδος των Στατιστικών" για σημεία λειτουργίας συνδέσμου ATM με $C = 34$ Mbps, B=100 κελιά και πραγματική κίνηση MPEG.

7.3. Αριθμητικά Αποτελέσματα Μεθόδου Ασυμπτωτικών Ιδιοτήτων

Στον Πίνακα 4-7 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την μέθοδο υποκατάστασης βάσει ασυμπτωτικών ιδιοτήτων, για τις πηγές ON/OFF.

$-\log_{10}$ ΠΑΚ		
N	MPEG	ON/OFF
40	6.465	??
45	5.321	5.271
50	4.644	4.727
55	3.909	4.232
60	3.228	3.277
65	2.663	2.561
70	2.178	2.074
75	1.773	1.716
80	1.447	1.375

Πίνακας 4-7: Η "Μέθοδος των Ασυμπτωτικών Ιδιοτήτων" για σημεία λειτουργίας συνδέσμου ATM με $C = 34$ Mbps, B=100 κελιά και πραγματική κίνηση MPEG.

Δυστυχώς, η κίνηση των μοντελοποιημένων AR(1) πηγών δεν μπόρεσαν να υποκαταστήσουν την πραγματική ροή. Συγκεκριμένα, και στα τρία σημεία λειτουργίας, το σημείο βελτιστοποίησης της ασυμπτωτικής σχέσης δεν συνέπιπτε (και στην πραγματικότητα απείχε σημαντικά) από το αντίστοιχο της πραγματικής κίνησης, για τις ίδιες βέβαια απαιτήσεις σε ΠΑΚ. Αντίθετα, η κίνηση της μοντελοποιημένης ON/OFF πηγής, έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις (πλην της

περίπτωσης $N = 40$ όπου παρουσιάστηκε τεχνικό πρόβλημα στον προσομοιωτή). Έτσι, με απλό, εύκολα ελέγξιμο μοντέλο πηγής και με την νέα μέθοδο που εισάγουμε σε αυτή την εργασία, καταφέραμε να παράγουμε ισοδύναμη κίνηση ικανή να υποκαταστήσει ένα αρκετά μεγάλο πλήθος πηγών video, διατηρώντας της ίδιας τάξεως απαιτήσεις σε ΠΑΚ.

8. Συμπεράσματα - Μελλοντικές κατευθύνσεις

Παρότι γενικά συμπεράσματα θα ήταν πολύ πρόωρο να διατυπωθούν, μπορούμε να διατυπώσουμε ορισμένους ισχυρισμούς μα βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων προσομοίωσης. Έτσι,

- Μια νέα μέθοδος, βασισμένη στις ασυμπτωτικές ιδιότητες και την τοπική συμπεριφορά της συνάρτησης του ισοδυνάμου εύρους ζώνης, έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα για ένα απλό Markov μοντέλο κίνησης σε συγκεκριμένη θεώρηση (βλέπε Πίνακα 4-7)
- Υπάρχει άμεση σχέση μοντέλου και τύπου κίνησης ATM δεδομένου ότι το AR(1) μοντέλο προσέγγισε καλύτερα τον αλγόριθμο κωδικοποίησης του MPEG-I (βλέπε Πίνακα 4-6)
- Η μέθοδος των ασυμπτωτικών ιδιοτήτων, λόγω του ότι στηρίζεται στην τοπική συμπεριφορά της συνάρτησης και στο "ασυμπτωτικό μεγάλου N" (από την φύση του προσεγγιστικό, βλέπε Πίνακα 4-4), είναι κάπως περιοριστική με την έννοια ότι ασχολείται με τοπικά και όχι ολικά βέλτιστα σημεία. Βέβαια το μεγάλο της πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να υποκαταστήσει συνολική κίνηση διαφορετικής σύστασης (από πηγές διαφορετικού τύπου), δεδομένου ότι όλη η πληροφορία που χρειάζεται συνοψίζεται στο σημείο λειτουργίας του συστήματος. Αντίθετα, η μέθοδος των στατιστικών είναι πιο δύσκολο να εφαρμοστεί έτσι ώστε η κίνηση της μοντελοποιημένης μίας πηγής να ταυτίζεται στατιστικά με την αθροιστική κίνηση διαφορετικών τύπων πηγών (θα πρέπει οι θεωρούμενες παράμετροι να είναι όλες αθροιστικές).

Κάποιες κατευθύνσεις προς τις οποίες θα μπορούσε να συνεχιστεί αυτή η εργασία στο άμεσο μέλλον, είναι:

- Συγκέντρωση δεδομένων από ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και στατιστική ανάλυση αυτών (π.χ. κίνηση κλήσεων τηλεφωνικού δικτύου, κίνηση από δίκτυα LANs/WANs, αιτήσεις σε κρυφές μνήμες εξυπηρετητών κτλ.). Εφαρμογή και έλεγχος των μεθόδων υποκατάστασης για αυτού του τύπου κίνηση που συναντούμε στα δίκτυα ATM. Έλεγχος γενικότητας των μοντέλων Markov.
- Θεώρηση άλλων διαδεδομένων μοντέλων κίνησης (π.χ. AR(k), DAR(1), Scenic), ειδικά μοντέλων για τα οποία μπορούμε να υπολογίσουμε το ισοδύναμο εύρος ζώνης τους σε κλειστή μορφή (π.χ. περιοδικά, αυτοπαρεμφερή μοντέλα).
- Αναλυτική προσέγγιση των ζητημάτων επίδοσης με κατασκευή μοντέλων αναμονής, και σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, ως προς την συντηρητικότητα.
- Θεώρηση πραγματικής κίνησης που προέρχεται από την πολυπλεξία $\mathbf{N} = \left(N_1, N_2, \ldots, N_J\right)$ πηγών διαφορετικού τύπου. Εύρεση του σημείου λειτουργίας του συστήματος και υποκατάσταση ενός υποσυνόλου της αθροιστικής κίνησης.

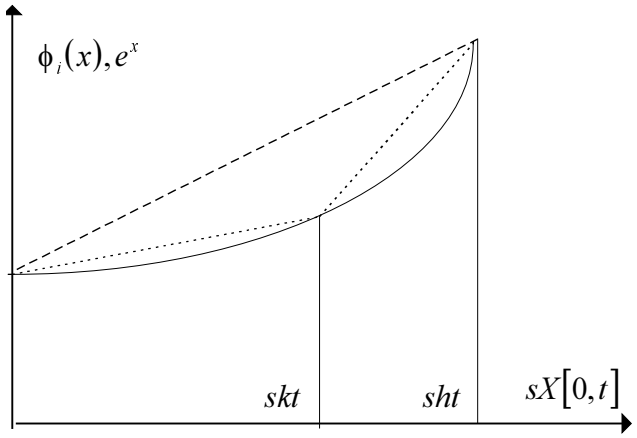
Παράρτημα

Σχέση σχημάτων χρέωσης με φράγματα του ισοδυνάμου εύρους ζώνης

Αυτό που επιχειρούμε μέσω των συναρτήσεων χρέωσης είναι να φράξουμε το ισοδύναμο εύρος ζώνης $\alpha(s,t)$ με την βοήθεια γραμμικών συναρτήσεων $\phi(x)$. Τότε,

$$\alpha(s,t) = \frac{1}{st}\log \mathrm{E}\left[e^{sX[0,t]}\right] \le \frac{1}{st}\log \mathrm{E}\left[\phi\left(sX[0,t]\right)\right] \Leftrightarrow$$

$$\mathrm{E}\left[e^{sX[0,t]}\right] \le \mathrm{E}\left[\phi\left(sX[0,t]\right)\right]$$



Σχήμα 1: Οι συναρτήσεις χρέωσης ως άνω φράγματα του ισοδυνάμου εύρους ζώνης

Ας εξετάσουμε την περίπτωση της "Απλής" φόρμουλας, δηλαδή να θεωρήσουμε την απλούστερη συνάρτηση παρεμβολής (βλέπε Σχήμα 1)

$$\phi_1(x) = \frac{x}{sht}\left(e^{sht} - 1\right) + 1.$$

Τότε

$$\mathrm{E}\left[\phi_1\left(sX[0,t]\right)\right] = \frac{\mathrm{E}\left[X[0,t]\right]}{th}\left(e^{sht} - 1\right) + 1$$

και ασφαλώς

$$\alpha(s,t) \le \frac{1}{st}\mathrm{E}\left[\phi_1\left(sX[0,t]\right)\right] = \frac{1}{st}\left[\frac{m}{h}\left(e^{sht} - 1\right) + 1\right] \qquad (\Pi.1)$$

Παρατηρείστε ότι το δεξιό μέρος της ισότητας στην (Π.1), είναι ίσο με την προσέγγιση που χρησιμοποιεί η "Απλή" φόρμουλα χρέωσης για το ισοδύναμο εύρος ζώνης μιας πηγής, θεωρώντας την ON/OFF (βλέπε Σχέση 2.6).

Στην περίπτωση των δύο βαθμίδων χρησιμοποιούμε την συνάρτηση

$$\begin{aligned}\phi_2(x) = &\left\{1 + \frac{x}{skt}\left(e^{skt} - 1\right)\right\} \cdot \mathbf{1}(x < skt) \\ &+ \left\{e^{skt} + \frac{x - skt}{sht}\left(e^{sht} - e^{skt}\right)\right\}\mathbf{1}(x > skt)\end{aligned}$$

και αποδεικνύεται (βλέπε κατωτέρω) ότι

$$\alpha(s,t) \le \frac{1}{st}\mathrm{E}\left[\phi_2\left(sX[0,t]\right)\right]. \qquad (\Pi.2)$$

Άρα, και στις δύο περιπτώσεις ("Tax-Band" με $L = 1$ και "Απλή" φόρμουλα), χρησιμοποιείται η ίδια συνάρτηση-φράγμα για χρέωση. Συνεπώς, οι συναρτήσεις $\phi_1(x)$, $\phi_2(x)$ με τις οποίες κάνουμε παρεμβολή, δεν είναι άλλες από αυτές που χρησιμοποιούν τα δύο σχήματα χρέωσης που έχουμε δει έως τώρα. Έτσι το "Tax-Band" Σχήμα είναι μια λογική γενίκευση της "Απλής" φόρμουλας, που προσεγγίζει ακριβέστερα την καμπύλη $\alpha(s,t)$. Για δεδομένα σημεία παρεμβολής (αντίστοιχα βαθμίδες χρέωσης $L = 1, 2$) η χρέωση (ανά μονάδα χρόνου) είναι κατά μέση τιμή μεγαλύτερη από το ισοδύναμο εύρος ζώνης (ασυμπτωτικά ίσο, για μεγάλες τιμές των L και T).

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι στην περίπτωση υποθετικής πηγής, για την οποία $X[\tau,\tau+t]\in\{0,kt,ht\}$, η ανισότητα (Π.2) γίνεται ισότητα. Αντίστοιχα για την (Π.1) αν $X[\tau,\tau+t]\in\{0,ht\}$. Έτσι η ON/OFF προσέγγιση κίνησης είναι η χειρότερη όσο αφορά το ισοδύναμο εύρος ζώνης. Η προσέγγιση που επιχειρεί το "Tax-Band" με κίνηση τριών επιπέδων είναι ακριβέστερη.

Το "Tax-Band" ως άνω φράγμα του ισοδυνάμου εύρους ζώνης

Θα αποδείξουμε την σχέση ενός άνω φράγματος για το ισοδύναμου εύρους ζώνης $\alpha(Z)$, στο οποίο βασίζεται η χρέωση του "Tax-Band" σχήματος.

Έστω πηγή με μέγιστο ρυθμό κυκλοφορίας h, και k το μεσαίο φράγμα. Αν T η συνολική διάρκεια της κλήσης, υπολογίζουμε τα T/t υποδιαστήματα διάρκειας t. Έστω ότι το ht έχει μεγάλη και ακέραια τιμή. Συμβολίζουμε με N_u τον αριθμό των διαστημάτων στα οποία η κυκλοφορία της πηγής ισούται με *u,* όπου *u* ακέραιος μεταξύ του 0 και ht (αυτός είναι ο μέγιστος αριθμός μονάδων κυκλοφορίας που μπορεί να παραχθεί στη διάρκεια ενός υποδιαστήματος). Τότε

$$\alpha(Z)=\frac{1}{st}\log Z$$

$$\approx\frac{1}{st}\log\left[\frac{1}{T/t}\sum_{u=0}^{ht}N_u e^{su}\right] \qquad (\Pi.3)$$

$$=\frac{1}{st}\log\left[\frac{1}{T/t}\sum_{u=0}^{kt}N_u e^{su}+\frac{1}{T/t}\sum_{u=kt+1}^{ht}N_u e^{su}\right]$$

$$\le\frac{1}{st}\log\left[\frac{1}{T/t}\sum_{u=0}^{kt}N_u\left(\frac{(kt-u)+ue^{skt}}{kt}\right)+\frac{1}{T/t}\sum_{u=kt+1}^{ht}N_u\left(\frac{(ht-u)e^{skt}+(u-kt)e^{sht}}{ht-kt}\right)\right] \qquad (\Pi.4)$$

$$=\frac{1}{st}\log\left[\sum_{u=0}^{kt}\frac{N_u kt+uN_u\left(e^{skt}-1\right)}{kT}+\sum_{u=kt+1}^{ht}\frac{N_u\left(hte^{skt}-kte^{sht}\right)+uN_u\left(e^{sht}-e^{skt}\right)}{(h-k)T}\right]$$

$$= \left[\left[\frac{T_1}{T} \right] + \left[\frac{V_1}{T} \right] \left(\frac{e^{skt} - 1}{k} \right) + \left[\frac{T_2}{T} \right] \left(\frac{he^{skt} - ke^{sht}}{h-k} \right) + \left[\frac{V_2}{T} \right] \left(\frac{e^{sht} - e^{skt}}{h-k} \right) \right]$$

$$= \frac{1}{st} \log \left[\Phi_1 + \left(\frac{e^{skt} - 1}{k} \right) M_1 + \left(\frac{he^{skt} - ke^{sht}}{h-k} \right) \Phi_2 + \left(\frac{e^{sht} - e^{skt}}{h-k} \right) M_2 \right]$$

$$= \tilde{\alpha}(\Phi_1, \Phi_2, M_1, M_2),$$

όπου $\Phi_i = T_i / T$ και $M_i = V_i / T$. Παρατηρείστε ότι στην περίπτωση παρατεταμένων μετρήσεων, π.χ. $T / t -> \infty$, η (Π.3) ισχύει σαν ισότητα, με αποτέλεσμα η ανισότητα (Π.4) να εξασφαλίζει ένα συντηρητικό εκτιμητή του ισοδύναμο εύρος ζώνης, τον

$$\tilde{\alpha}(Z) = \lim_{T/t \to \infty} \tilde{\alpha}(\Phi_1, \Phi_2, M_1, M_2).$$

Είδαμε ότι η "Απλή" Φόρμουλα χρέωσης χρεώνει βέλτιστα όταν ο χρήστης προβλέψει σωστά το μέσο ρυθμό της κίνησης του, δεδομένου ότι η (3.3) είναι εφαπτόμενη της $B(M)$ στο σημείο $m = M$. Αντίστοιχα η συνάρτηση (3.7) είναι το εφαπτόμενο υπερεπίπεδο της επιφάνειας $\tilde{\alpha}(\Phi_1, \Phi_2, M_1, M_2)$ στα σημεία $\Phi_1 = \phi_1$, $\Phi_2 = \phi_2$, $M = m$ και $M_2 = m_2$ (έτσι υπολογίζονται και οι σταθερές της φόρμουλας). Όταν ο χρήστης προβλέψει σωστά, χρεώνεται και με αυτό το σχήμα βέλτιστα.

Βιβλιογραφία

[1] The ATM Forum (1996). *ATM Forum Traffic Management Specification: Version 4.0.*

[2] Alles, A. (1995). ATM Internetworking. *Technical report*, Cisco Systems. **URL**: http://www.cisco.com/warp/public/614/12.html.

[3] Anick, D., D. Mitra, and M. M. Sondhi (Oct. 1982). Stochastic theory of a data-handling system with multiple sources. *The Bell System Technical Journal*, **61**(8):1871-1894.

[4] Bailey, J. P. and L. Mcknight (1996). *Internet Economics*. MIT Press, Massachusetts.

[5] Bucklew, J. A. (1990). *Large Deviation Techniques in Decision, Simulation and Estimation*. John Wiley & Sons, New York.

[6] Beran. J., S. Sherman, M. S. Taqqu, and W. Willinger (1995). Variable-bit-rate video traffic and long-range dependence. *IEEE Transactions on Communications*, **43**:1566-1579.

[7] Botvick, D. D. and N. Duffield (1995). Large deviations, the shape of the loss curve, and economies of scale in large multiplexers. *Queueing systems*, 20: 293-320.

[8] Chatfield, C. (1975). *The Analysis of Time Series: Theory and Practice*. Chapman and Hall.

[9] CASHMAN. Charging and Accounting Schemes in Multi-service ATM Networks (Ca$hMAN), ACTS Project (AC-039). **URL**: http://www.isoft.intranet.ge/cashman/.

[10] Charmantzis, F. C., C. Courcoubetis, V. A. Siris, and G. D. Stamoulis (1996). A Comparative Study of Usage-Based Charging Schemes. In *Proceedings of the Colloquium on Charging For ATM*, IEE, London.

[11] Courcoubetis, C. and R. Weber (1995). Effective bandwidths for stationary sources. *Prob. Eng. Inf. Sci*., **9**, 285-296.

[12] Courcoubetis, C., G. Kesidis, A. Ridder, J. Walrand, and R. Weber (1995). Admission control and routing in ATM networks using inferences from measured buffer occupancy. *IEEE Transactions on Communications*, **43**, 1778-1784.

[13] Courcoubetis, C., G. Fouskas, and R. Weber (1995). An on-line estimation procedure for cell-loss probabilities in ATM links. In *Proceedings of the 3rd IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM Networks*.

[14] Courcoubetis, C., V. A. Siris, G. D. Stamoulis, and Y. Markopoulos (1995). Charging issues for services in broadband networks. In *Proceedings of the OECD Conference on The Economics of the Information Society*.

[15] Courcoubetis, C. and R. Weber (1996). Buffer overflow asymptotics for a buffer handling many traffic sources. *Journal of Applied Probability*, **33**.

[16] Courcoubetis, C., F. P. Kelly, and R. Weber (1997). Measurement-based Charging in Communications Networks. *In preparation*.

[17] Courcoubetis, C., F. P. Kelly, V. A. Siris, G. D. Stamoulis, and R. Weber (1997). ABR pricing experiments in real network. *International Conference on Telecommunications-ICT97*, Melbourne, Australia.

[18] Draft International Standard: ISO/IEC DIS 13818-2 (1993). *Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Part 2*, *Video.*

[19] Deering, S. (1995). Internet protocol version 6 (ipv6) specification. *RFC 1883*. **URL**: http://www.globecom.net/(nobg,sv)/ietf/rfc/rfc1883.shtml

[20] de Veciana, G. and J. Walrand (1995). Effective bandwidths: call adission, traffic policing and filtering for ATM networks. *Queueing Systems*, **20**, 37-59.

[21] de Veciana, G. and R. Baldick (Jan. 1995). Resource allocation in multi-service networks via pricing. *Technical Report*, Univ. Of Texas at Austin.

[22] Edell, R., N. McKeown, and P. P. Varaiya (Sept. 1995). Billing users and pricing for TCP. *IEEE J. Selected Areas in Communications*, **13**(7):1162-1175.

[23] Frost, V. S. and B. Melamed (March 1994). Traffic modeling for telecommunications networks. *IEEE Communications Magazine,* 32(3):70-81.

[24] Garett, M. W. and W. Willinger (Aug. 1994). Analysis, modeling and generation of self-similar VBR video traffic. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM 94,* London, UK*,* 269-280.

[25] Gibbens, R. J. (1996). Traffic characterisation and effective bandwidths for broadband network traces. In F. P. Kelly, S. Zachary and I. Ziedins, editors, *Stochastic Networks: Theory and Applications.* Oxford University Press, Oxford.

[26] Gibbens, R. J. and P. J. Hunt (1991). Effective bandwidths for the multi-type UAS channel. *Queueing Systems*, **9**(1):17-28.

[27] Gong, K. L. (1994). Berkeley MPEG-1 Video Encoder, User's Guide. *University of California, Berkeley,* Computer Science Division-EECS.

[28] Habib, I. W. and T. N. Saadawi (July 1992). Multimedia traffic characteristics in broadband networks. *IEEE Communications Magazine,* 48-54.

[29] Heyman, D. P., A. Tabatabai, and T. V. Laksman (March 1992). Statistical analysis and simulation study of video teleconference traffic in ATM networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, **29**(1):49-59.

[30] Hui, J. Y. (1988). Resource allocation for broadband networks. *IEEE J. Selected Areas in Communications*. **6**(9):1598-1608.

[31] International Standard: ISO/IEC IS 11172-2 (1993). *Coding of Moving Pictures and associated Audio for Digital Storage Media up to 1.5 Mbit/s Part 2, Video.*

[32] ITU Recommendation I.121 (1992). Broadband Aspects of ISDN. Geneva.

[33] ITU Recommendation I.371 (1994). Traffic control and congestion control in B-ISDN. Geneva.

[34] Kleinrock, L. (1975). *Queueing Systems*. John Wiley & Sons, New York.

[35] Knuth, D. (1981). *Seminumerical Algorithms*, vol. **2** of *The Art of Computer Programming*. Addison-Wesley

[36] Kelly, F. P. (1991). Effective bandwidths at multi-class queues. *Queueing Systems*, **9**:5-16.

[37] Kelly, F. P. (1994). On tariffs, policing and admission control of multiservice networks. *Operations Research Letters*, **15**:1-9.

[38] Kelly, F. P. (1996). Notes on effective bandwidths. In F. P. Kelly, S. Zachary and I. Ziedins, editors, *Stochastic Networks: Theory and Applications*, pp. 141-168. Oxford University Press, Oxford.

[39] Kesidis, G., J. Walrand, and C. S. Chang (Aug. 1993). Effective bandwidths for multiclass Markov fluids and other ATM sources. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **1**:424-428.

[40] Le Gall, D. (April 1991). MPEG: A video compression standard for multimedia applications. *Communications of the ACM*, **34**(4):46-58.

[41] Low, S. H. and P. P. Varayia (Oct. 1993). A new approach to service provisioning in ATM networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1(3):547-553.

[42] Mackie-Mason, J. K. and H. R. Varian (1994). Pricing the Internet. *Public Access to the Internet*, B. Kahin, and J. Keller, Eds. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.

[43] Mitchell, B. M. And I. Vogelsang (1991). *Telecommunications Pricing Theory and Practice*. Cambridge University Press.

[44] Mackie-Mason, J. K. and H. R. Varian (1993). Some economics of the Internet. *Technical Report*, Univ. Of Michigan.

[45] Maglaris, B., D. Atastassiou, P. Sen, G. Karlsson, and J. D. Robbins (July 1988). Performance models of statistical multiplexing in packet video communications. *IEEE Transactions on communications*, **36**(7):834-843.

[46] Murphy, J., L. Murphy, and E. C. Posner (1994). Distributed pricing for embedded ATM networks. *ITC 94, ed. J. Labetoulle and J. W. Roberts*.

[47] Nikolaidis, I. and Ian F. Akyildiz. An overview of source characterization in ATM networks. To appear as chapter in the upcoming book *State-of-the-art in Performance Modeling and Simulation: Networks*, E.Gelenbe, J. Warland, K. Bagchi, G.Zobrist, editors. Gordon & Breach Publishing Group.

[48] Nomura, M., T. Fujii, and N. Ohta (June 1989). Basic characteristics of variable rate video coding in ATM environment. *IEEE J. Selected Areas Commun.*, **7**(5):752-760.

[49] Norros, I. (1994). A storage model with self-similar input. *Queueing Systems*, 16:387-396.

[50] Papoulis, A. (1990). *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, New York, third edition.

[51] Press, W., S. Teukolsky, W. Vetterling, and B. Flannery (1994). *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press.

[52] Sen, P., B. Maglaris, N. Rikli, and D. Anastassiou (June 1989). Models for packet switching of Variable-Bit-Rate video sources. *IEEE J. Selected Areas Commun.*, **7**(5):865-869.

[53] Simonian, A. and J. Guilbert (1995). Large deviations approximation for fluid queues fed by a large number of on-off sources. *IEEE J. Selected Areas Commun.*, **13**, 1017-1027.

[54] Siu, K. and R. Jain (1995). A Brief Overview of ATM: Protocol Layers, LAN Emulation, and Traffic Management. *Computer Communications Review* (ACM SIGCOMM).

[55] Stamoulis, G. D., M. E. Anagnostou, and A. D. Georgantas (1994). Traffic source models for ATM networks: a survey. *Computer Communications*, **17**, 428-438.

[56] Varian, H. R. (1992). *Microeconomic Analysis*. W. W. Norton, New York.

[57] Varian, H. R. (1993). *Intermediate Microeconomics: A Modern Approach*. W. W. Norton, New York.

[58] Warland, J. and P. P. Varaiya (1996). *High-Performance Communication Networks*. Morgan Kaufmann, San Francisco.

[59] Weiss, A. (1986). A new technique for analysing large traffic techniques. *Adv. Appl. Prob.*, **18**, 506-532.

[60] Weiss, A. (1995). An introduction to Large Deviations for communications networks. *IEEE JSAC*, **13**(6):938-952.

[61] Whitt, W. (1993). Tail probabilities with statistical multiplexing and effective bandwidths in multi-class queues. *Telecommunication Systems*, **2**, 17-107.

[62] Willinger, W., M. S. Taqqu, and A. Erramilli (1996). A bibliographic guide to self-similar traffic and performance modeling for modern high-speed networks. In F. P. Kelly, S. Zachary and I. Ziedins, editors, *Stochastic Networks: Theory and Applications.*

[63] Zhang, L., S. Deering, D. Estin, S. Shenker, and D. Zappala (Sept. 1993). RSVP: A new resource ReSerVation Protocol. *IEEE Network Mag.*, **7**(5):8-18.

Αντιστοιχία Αγγλικών - Ελληνικών όρων

Access	Πρόσβαση
Accounting	Λογιστικά
Asynchronous Transfer Mode (ATM)	Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης (ATM)
Autocorrelation	Αυτοσυσχέτιση
Autocovariance	Αυτοσυνδιασπορά
Autoregressive Source	Αυτοπαλινδρομούμενη Πηγή
Available Bit Rate (ABR)	Διαθέσιμου Ψηφιακού Ρυθμού
Bandwidth	Εύρος Ζώνης
Benefit	Κέρδος
Bill	Λογαριασμός
Bound	Φράγμα
Broadband Integrated Service Digital Network (B-ISDN)	Ευρυζώνια Ψηφιακά Δίκτυα Ενοποιημένων Υπηρεσιών
Buffer	Ενταμιευτής
Burstiness	Εκρηκτικότητα
Cache	Κρυφή Μνήμη
Call Admission Control (CAC)	Έλεγχος Αποδοχής Κλήσης
Call Blocking	Φραγή Κλήσεων
Call Setup	Εγκατάσταση Κλήσης
Cannibalization	Κανιβαλισμός
Capacity	Χωρητικότητα
Cell	Κελί
Cell Loss Probability (CLP)	Πιθανότητα Απώλειας Κελιού (ΠΑΚ)
Central Limit Theorem	Κεντρικό Οριακό Θεώρημα

Charging	Χρέωση
Circuit Switched Network	Δίκτυο Μεταγωγής Κυκλωμάτων
Coefficient of Variation	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Competitive Environment	Ανταγωνιστικό Περιβάλλον
Confidence Interval	Διάστημα Εμπιστοσύνης
Congestion-based-Charging	Χρέωση βάσει Συμφόρησης
Congestion Control	Έλεγχος Συμφόρησης
Connection	Σύνδεση
Connection Oriented Service	Υπηρεσία Με Σύνδεση
Connectionless Service	Υπηρεσία Χωρίς Σύνδεση
Constant Bit Rate (CBR)	Σταθερού Ψηφιακού Ρυθμού
Contention	Ανταγωνισμός
Cost	Κόστος
Cross-Subsidization	Διασταυρωμένη Επιδότηση
Game Theory	Θεωρία Παιγνίων
Demand	Ζήτηση
Delay Jitter	Διακύμανση Καθυστέρησης
Dependence	Εξάρτηση/Συσχέτιση
Effective Bandwidth	Ισοδύναμο Εύρος Ζώνης
End User	Τελικός Χρήστης
Equilibrium Point	Σημείο Ισσοροπίας
Ergodic Stochastic Process	Εργοδική Στοχαστική Ανέλιξη
Estimator	Εκτιμητής
Fairness	Δικαιοσύνη
Feedback	Ανάδραση
Flow Control	Έλεγχος Ροής
Frame	Καρέ/Πλαίσιο
Guaranteed Service	Εγγυημένη Υπηρεσία
Heuristic Method	Ευριστική Μέθοδος
i.i.d RVs	Ανεξάρτητες και Ισόνομες ΤΜ
Index of Dispersion	Δείκτης Διασποράς

Interactive Service	Αλληλεπιδραστική Υπηρεσία
Label Switching	Μεταγωγή Ετικετών
Large Deviations Theory	Θεωρία των Μεγάλων Αποκλίσεων
Leased Line	Μισθωμένη Γραμμή
Link	Σύνδεσμος Επικοινωνίας
Locality	Τοπικότητα
Logarithmic Moment Generating Function	Λογάριθμος Ροπογεννήτρια
Market Segmentation	Κατάτμηση Αγοράς
Minimum Cell Rate (MCR)	Ελάχιστος Ρυθμός Μεταφοράς Κελιών
Moment	Ροπή
Moment Generating Function	Ροπογεννήτρια Συνάρτηση
Monetary Unit	Νομισματική Μονάδα
Monopoly	Μονοπώλιο
Multicast	Πολλαπλή Αποστολή
Multimedia Applications	Εφαρμογές Πολυμέσων
Multiplexing Gain	Κέρδος Πολυπλεξίας
Multiservice Network	Δίκτυο Πολλαπλών Υπηρεσιών
Node	Κόμβος
Overflow	Υπερχείλιση
Overcharge	Υπερχρέωση
Packet-Switched Network	Δίκτυο Μεταγωγής Πακέτων
Point-to-multipoint Connection	Σύνδεση από σημείο-σε-πολλαπλά σημεία
Point-to-point Connection	Σύνδεση από σημείο-σε-σημείο
Price Elasticity	Ελαστικότητα Τιμής
Pricing	Κοστολόγηση
Profit	Κέρδος
Quality-of-Service (QoS)	Ποιότητα Εξυπηρέτησης
Real Time Traffic	Κίνηση Πραγματικού Χρόνου
Recommendation	Σύσταση
Reselling	Μεταπώληση
Resource Reservation	Δέσμευση Πόρων

Resource Sharing	Κοινή Χρήση Πόρων
Revenue	Έσοδο
Routing Label	Ετικέτα Δρομολόγησης
Self-Similar Model	Αυτοπαρεμφερές Μοντέλο
Service Provider	Παροχέας Υπηρεσιών
Shadow Price	Σκιώδης Τιμή
Shared Resources	Κοινόχρηστοι Πόροι
Signaling	Σηματοδότηση
Slice	Λωρίδα
Smooth Traffic	Ομαλή Κίνηση
Social Welfare	Κοινωνική Ευημερία
Source Policing	Αστυνόμευση Πηγής
Specification	Προδιαγραφή
Standard Deviation	Τυπική Απόκλιση
Standard	Πρότυπο
Stationary Source	Στατική Πηγή
Stationary Stochastic Process	Στάσιμη Στοχαστική Ανέλιξη
Statistical Multiplexing	Στατιστική Πολυπλεξία
Stochastic Process	Στοχαστική Ανέλιξη/Διεργασία
Substitute Goods	Υποκατάστατα Αγαθά
Sufficient Statistic	Επαρκές Στατιστικό
Superposition	Επαλληλία
Supply	Προσφορά
Surplus	Πλεόνασμα
Switch	Μεταγωγέας
Switching	Μεταγωγή
Tariff	Ταρίφα/Τέλος
Telecommunication Carrier	Τηλεπικοινωνιακός Φορέας
Teleconference	Τηλεδιάσκεψη
Throughput	Διέλευση/Παροχή
Time Lag	Χρονική Απόσταση

Time Scale	Κλίμακα Χρόνου
Time-Series	Χρονοσειρά
Trace	Ίχνος
Trade-off	Αντιστάθμιση
Traffic Generator	Γεννήτρια Κίνησης
Traffic Shaping	Εξομάλυνση Κίνησης
Traffic Stream	Ροή Κίνησης
Unspecified Bit Rate (UBR)	Ακαθόριστου Ψηφιακού Ρυθμού
Usage-based-Charging	Χρέωση βάσει Χρήσης
Utilization	Χρησιμοποίηση
Variable Bit Rate (VBR)	Μεταβλητού Ψηφιακού Ρυθμού
Variance	Διασπορά
Video-on-Demand (VoD)	Video κατ'απαίτηση
Video-telephone	Εικονο-τηλέφωνο
Virtual Path	Εικονικό Μονοπάτι
Verification	Επαλήθευση
Workload	Φόρτος Εργασίας