# Περιεχόμενα

# Κατάλογος Σχημάτων

**Πειραματική αξιολόγηση μεθόδων**
**Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης στα ATM δίκτυα**

Γιώργος Φούσκας
Μεταπτυχιακή εργασία

Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

# Περίληψη

Τα *Ευρυζώνια Ψηφιακά Δικτύα Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών* θα έχουν τη δυνατότητα, μεταφέροντας ταυτόχρονα ήχο, εικόνα και δεδομένα, να υποστηρίζουν μία μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών, με διαφορετικές, και συχνά συγκρουόμενες, απαιτήσεις. Ο *Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης* (ATM) είναι η τεχνική μεταγωγής και πολύπλεξης σταθερού μεγέθους πακέτων που έχει συστήσει η CCITT για την υλοποίηση τέτοιων δικτύων, καθώς παρουσιάζει ευελιξία και αποτελεσματικότητα στην ταυτόχρονη εξυπηρέτηση διαφορετικών μορφών κυκλοφορίας.

Επιπλέον, στα ATM δίκτυα, μπορούμε να εξοικονομίσουμε bandwidth εφαρμόζοντας στατιστική πολύπλεξη στις υπηρεσίες που παρουσιάζουν μεταβλητό ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας. Τότε όμως δύναται να επέλθει *συμφόρηση* στο δίκτυο, δηλ. να δημιουργηθούν μεγάλες ουρές αναμονής στους μεταγωγείς, με συνέπεια την αύξηση της καθυστέρησης των πακέτων αλλά και την ενδεχόμενη αύξηση της πιθανότητας απώλειας πακέτου.

Οι προληπτικοί μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης εμφανίζονται πιο κατάλληλοι για τα ATM δίκτυα, σε σχέση με τους αντενεργούς ελέγχους που έχουν αναπτυχθεί για τα συμβατικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Μία λειτουργία του μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης είναι και ο *Ελεγχος Αποδοχής Κλήσης*, ο οποίος αποφασίζει εάν η αίτηση για παροχή υπηρεσίας μπορεί να ικανοποιηθεί από το δίκτυο, χωρίς να μειωθεί η ποιότητα

των ήδη εξυπηρετούμενων κλήσεων.

Σ' αυτή την εργασία ασχολούμαστε με το χαρακτηρισμό των πηγών δημιουργίας κυκλοφορίας και με την αξιολόγηση διαφόρων μηχανισμών Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης.

Συγκεκριμένα, παρουσιάζουμε δύο μοντέλλα για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, που θεωρήθηκαν κατάλληλα για τους σκοπούς της εργασίας, και ένα δείκτη καθορισμού του *βαθμού μεταβλητότητας* μιας πηγής, γνωστός ως *δείκτης διασποράς*. Επίσης, περιγράφουμε μία μέθοδο εκτίμησης του δείκτη διασποράς από την πραγματική κυκλοφορία στο δίκτυο, την οποία και αξιολογούμε προσομοιώνοντας την στον υπολογιστή.

Κατόπιν, παρουσιάζουμε κάποια σημαντικά αναλυτικά αποτελέσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης, δίδοντας έμφαση και ελέγχοντας την ορθότητα ενός πρόσφατου αποτελέσματος, το οποίο δεν εξαρτάται από κάποια συγκεκριμένα μοντέλλα πηγής. Με αυτό το αποτέλεσμα, μπορούμε να καθορίσουμε το φορτίο ενός ATM μεταγωγέα χρησιμοποιώντας μόνο το μέσο ρυθμό δημιουργίας και το δείκτη διασποράς για κάθε πηγή που εξυπηρετείται από αυτόν.

Τέλος, επιχειρείται μία αξιολόγηση των παραπάνω αποτελεσμάτων, προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά ενός ATM μεταγωγέα, όταν τροφοδοτείται από πηγές πραγματικού χρόνου (φωνή και video). Για την επιτάγχυνση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήσαμε μία τεχνική γρήγορης εκτίμησης της πιθανότητας υπερχείλησης ενταμιευτή, την οποία και περιγράφουμε.

Επόπτης : Κώστας Κουρκουμπέτης
Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστημίου Κρήτης.

**Experimental evaluation of**
**Call Acceptance Contol methods in ATM networks**

George Fouskas
Master of Science thesis

Department of Computer Science
University of Crete

# Abstract

A *broadband integrated services digital network* (B-ISDN) will provide support for a wide range of sevices which have differing bandwidth requirements, traffic pattern statistics and quality of service constraints. *Asynchronous Transfer Mode* (ATM) has been recommended by CCITT as the switching method for such a network, since it provides an efficient and flexible means for supporting different types of traffic.

ATM may also offer potential gains in bandwidth efficiency by statistically multiplexing variable-bit-rate traffic sources. But this may result in network congestion, i.e. not to meet cell delay and loss performance requirements for all services supported in the network.

Preventive congestion control schemes appear to be more suitable for use in ATM networks than reactive control schemes. Their objective is to prevent congestion before it happens. *Call Acceptance Control* (CAC) is a function of the congestion control mechanism which determines whether to accept or reject a new connection at the time of call setup.

This thesis focuses on traffic characterization and the evaluation of Call Acceptance Control methods.

Two different models, which can be used to characterize real-time services, and the *index of dispersion*, an index that can be used to determine the variability of a source, are considered. A technique which can be used to achieve an accurate index-of-dispersion estimate, by observing only the actual traffic flow, is presented and evaluated.

Several analytical results, that can be used in CAC, are described and evaluated, with an emphasis placed on a result which is independent of traffic source models and therefore appears to be the most promising. Based on this result, we can determine the load of an ATM switch using the average bit rate and the index of dispersion for each traffic source. Evaluation is based on simulation experiments, which use a fast-estimation technique that reduces dramatically the amount of time required to achieve an accurate cell-loss-rate estimate.

Supervisor: Costas Courcoubetis
Associate Professor of Computer Science Department
University of Crete

# Κεφάλαιο 1

# Εισαγωγή

Στην παρούσα μορφή των τηλεπικοινωνιών εμφανίζεται μία μεγάλη ποικιλία από ανεξάρτητα δίκτυα, το καθένα σχεδιασμένο για την εξυπηρέτηση συγκεκριμένων υπηρεσιών (π.χ. τα δίκτυα για μεταφορά φωνής ή τα δίκτυα για μεταφορά δεδομένων). Αυτά τα συστήματα δικτύων παρουσιάζουν δυσκολίες στην ταυτόχρονη υποστήριξη διαφορετικών υπηρεσιών, καθώς επίσης και στην ενσωμάτωση μελλοντικών υπηρεσιών.

Τα τελευταία χρόνια, με την ραγδαία εξέλιξη τόσο στα φυσικά μέσα διάδοσης (οπτικές ίνες), όσο και στην τεχνολογία σχεδιασμού και υλοποίησης μεταγωγέων υψηλής ταχύτητας, έχει καταστεί πλέον πιθανή η ανάπτυξη ενός δικτύου, το οποίο θα μπορεί να υποστηρίζει μία μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών με διαφορετικές, και συχνά συγκρουόμενες, απαιτήσεις. Αυτό το δίκτυο, που ονομάζεται *Ευρυζώνιο Ψηφιακό Δίκτυο Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών*, θα παρέχει όλο το φάσμα των υπηρεσιών στο χρήστη μέσω ενός σημείου διασύνδεσης με το δίκτυο, και με ρυθμούς μετάδοσης που φθάνουν μέχρι τα 600 Mb/s.

Ο τρόπος μετάδοσης των δεδομένων σ' αυτά τα δίκτυα υπήρξε ένα σημείο διαφωνίας για αρκετά χρόνια. Αρχικά, θεωρήθηκε κατάλληλη μία τεχνική που βασίζεται στη χρονική πολύπλεξη, αλλά τελικά υιοθετήθηκε από τη CCITT μία τεχνική μεταγωγής και πολύπλεξης σταθερού μεγέθους πακέτων, που ονομάζεται *Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης* (ATM). Στον ATM, η ροή της πληροφορίας μιας υπηρεσίας οργανώνεται σε σταθερού μεγέθους πακέτα, που καλούνται κελλιά, και το εύρος ζώνης ενός μεταγωγέα δεσμεύεται για την εξυπηρέτηση μιας κλήσης μόνο εάν υπάρχουν διαθέσιμα προς μετάδοση κελλιά απ' αυτήν την κλήση.

Οι υπηρεσίες-εφαρμογές, που θα παρέχονται στο χρήστη μέσω των ευρυζώνιων δικτύων ολοκληρωμένων υπηρεσιών, θα διαφέρουν τόσο ως προς τον όγκο και την κατανομή της κυκλοφορίας που θα εισάγουν στο δίκτυο, όσο και ως προς τις απαιτήσεις τους για ποιότητα. Π.χ. οι υπηρεσίες μεταφοράς φωνής ή video δεν επιδέχονται καθυστέρηση και απώλεια κελλιών μεγαλύτερη από ένα μικρό όριο, ενώ οι υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων μπορούν να 'υποφέρουν' μία λογική καθυστέρηση αλλά και μία πιθανότητα απώλειας κελλιού της τάξης του $10^{-5}$ (καθώς υπάρχει το χρονικό περιθώριο για την επανεκπομπή των απωλεσθέντων κελλιών).

Στα ΑΤΜ δίκτυα μπορούμε να κάνουμε αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων του μεταγωγέα εφαρμόζοντας στατιστική πολύπλεξη στις υπηρεσίες που παρουσιάζουν μεταβλητό ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας. Φυσικά, είναι δυνατόν, οι πηγές να αρχίσουν να δημιουργούν κυκλοφορία με ρυθμό που υπερβαίνει τη χωρητικότητα του μεταγωγέα. Αυτό θα δημιουργήσει μεγάλες ουρές αναμονής στους ενταμιευτές των μεταγωγέων, με συνέπεια την αύξηση της καθυστέρησης των κελλιών αλλά και την ενδεχόμενη αύξηση της πιθανότητας απώλειας κελλιού. Αν αυτές οι αυξήσεις είναι πάνω από τα επιτρεπτά όρια, τότε έχουμε υποβάθμιση της παρεχόμενης ποιότητας για κάποια υπηρεσία και λέμε ότι έχει επέλθει *συμφόρηση* στο δίκτυο.

Οι μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης, που έχουν αναπτυχθεί για τα συμβατικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων, εμπίπτουν στην κατηγορία του *Αντενεργού Ελέγχου*. Δηλαδή, ενεργοποιούνται μετά τη διαπίστωση της συμφόρησης και προσπαθούν να ελέγξουν την ροή κυκλοφορίας μεταξύ των μεταγωγέων ή/και το ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας των πηγών, έτσι ώστε να το αποσυμφορήσουν. Ομως, αυτές οι τεχνικές δεν μπορούν να μεταφερθούν εύκολα στο περιβάλλον του ΑΤΜ καθώς η ανάδραση εκτελείται πολύ αργά λόγω της υψηλής καθυστέρησης διάδοσης, συγκρινόμενη με το μικρό χρόνο μετάδοσης του κελλιού, αλλά και επειδή πολλές υπηρεσίες δεν προσφέρονται για έλεγχο ροής. Συνεπώς, ένας μηχανισμός *Προληπτικού Ελέγχου*, ο οποίος να προσπαθεί να αποτρέψει την εμφάνιση συμφόρησης στο δίκτυο, εμφανίζεται πιο κατάλληλος για τα ΑΤΜ δίκτυα.

Ο προληπτικός έλεγχος θα διενεργείται με την ταυτόχρονη συνεργαζόμενη εκτέλεση πολλών λειτουργιών. Μία τέτοια λειτουργία είναι και ο *Ελεγχος Αποδοχής Κλήσης*, ο οποίος αποφασίζει, σε πραγματικό χρόνο, εάν η αίτηση για παροχή υπηρεσίας μπορεί να ικανοποιηθεί από το δίκτυο, χωρίς να μειωθεί η ποιότητα των ήδη εξυπηρετούμενων κλήσεων.

Γενικά, το σύνολο των φορτίων κυκλοφορίας που ενδέχεται να ανατεθούν σ' ένα μεταγωγέα, μπορεί να διαμεριστεί σε δύο υποσύνολα. Σε κείνα τα φορτία κυκλοφορίας που, όταν ανατεθούν στο μεταγωγέα, ικανοποιούν τις απαιτήσεις ποιότητας των εξυπηρετούμενων υπηρεσιών, και σε κείνα τα φορτία που δεν τις ικανοποιούν. Το πρώτο υποσύνολο ορίζεται ως *περιοχή αποδοχής* του μεταγωγέα. Εάν η περιοχή αποδοχής περιγράφεται απλά, τότε ο Ελεγχος Αποδοχής Κλήσης χρειάζεται μόνο να εκτιμήσει εάν η προσθήκη μιας καινούργιας κλήσης αναγκάζει τους μεταγωγείς, που συνθέτουν μια υποψήφια διαδρομή, να λειτουργήσουν μέσα ή έξω από τις αντίστοιχες περιοχές αποδοχής των.

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με τον έλεγχο συμφόρησης στα ATM δίκτυα, δίδοντας έμφαση στο χαρακτηρισμό των πηγών δημιουργίας κυκλοφορίας και στην αξιολόγηση διαφόρων μεθόδων Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης.

Ενώ οι Poisson και οι batch Poisson διεργασίες χρησιμοποιούνται για τη μοντελλοποίηση των πηγών δεδομένων, η χρήση τους δεν μπορεί να επεκταθεί και στις πηγές πραγματικού χρόνου (φωνή και video). Και αυτό γιατί σ' αυτές τις πηγές υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων κελλιών, που οδηγεί σε υψηλό βαθμό μεταβλητότητας σε σχέση με τις Poisson διεργασίες. Εδώ παρουσιάζουμε δύο αυτοσυσχετιζόμενες στοχαστικές διεργασίες, τα 'ON/OFF Markov fluid' και 'Autoregressive Markov' μοντέλλα, που θεωρήθηκαν κατάλληλες για τους σκοπούς της εργασίας. Το πρώτο μοντέλλο έχει μελετηθεί εκτενέστατα στο παρελθόν και έχουν ήδη δημοσιευθεί σημαντικά και χρήσιμα αναλυτικά αποτελέσματα.
Ο *δείκτης διασποράς* μιας αυτοσυσχετιζόμενης πηγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό του βαθμού μεταβλητότητας της. Εδώ περιγράφουμε μία μέθοδο εκτίμησης του δείκτη διασποράς από την πραγματική κυκλοφορία στο δίκτυο, την οποία και αξιολογούμε προσομοιώνοντάς την στον υπολογιστή.

Επίσης, παρουσιάζουμε τα πιο σημαντικά, κατά τη γνώμη μας, αναλυτικά αποτελέσματα, που έχουν παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια στη βιβλιογραφία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περιγραφή της περιοχής αποδοχής ενός μεταγωγέα. Το μοντέλλο του μεταγωγέα απεικονίζεται στο σχήμα 4.2, και το κριτήριο ποιότητας των υπηρεσιών είναι η πιθανότητα απώλειας κελλιού να μην ξεπερνάει μία μέγιστη επιτρεπτή τιμή. Δίδουμε ιδιαίτερη προσοχή σ' ένα πολύ πρόσφατο αποτέλεσμα των Courcoubetis και Weber [1], το οποίο δεν εξαρτάται από κάποιο συγκεκριμένο μοντέλλο πηγής, αλλά καθορίζει το φορτίο ενός μεταγωγέα χρησιμοποιώντας μόνο το μέσο ρυθμό δημιουργίας και το δείκτη διασποράς για κάθε πηγή που εξυπηρετείται από αυτόν. Ενας έλεγχος ορθότητας αυτού του αποτελέσματος επιχειρείται στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα αναλυτικά αποτελέσματα που υπάρχουν για το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο πηγής.

Προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά ενός ATM μεταγωγέα, όταν τροφοδοτείται από πηγές που χαρακτηρίζονται από τα δύο παραπάνω μοντέλλα, εκτελέσαμε εκτεταμένα πειράματα για να ελέγξουμε την ορθότητα του Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης, όταν αυτός στηρίζεται στο αποτέλεσμα των Courcoubetis και Weber. Για να επιταγχύνουμε τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήσαμε μία τεχνική που παρουσιάζεται στο [2], την οποία και περιγράφουμε. Τέλος, για τη σύγκριση των διαφόρων μεθόδων Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης, υπολογίσαμε το μέγιστο δυνατό ποσοστό χρησιμοποίησης ενός ATM μεταγωγέα για κάθε μία από αυτές τις μεθόδους, τροφοδοτώντας τον με κυκλοφορία που αντιστοιχεί σε πραγματικές πηγές φωνής και video.

## 1.1 Οργάνωση του κειμένου

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των εννοιών, που είναι απαραίτητες για την κατανόηση του θέματος της εργασίας. Γίνεται μία κατηγοροποίηση των υπηρεσιών και περιγράφεται ένας μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης, που αποτελείται από ένα σύνολο συνεργαζόμενων λειτουργιών.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται δύο αυτοσυσχετιζόμενες στοχαστικές διεργασίες, ικανές να περιγράψουν πηγές πραγματικού χρόνου (φωνή και video), καθώς επίσης και ένας τρόπος καθορισμού του βαθμού μεταβλητότητας μιας πηγής δημιουργίας κυκλοφορίας.

Στο κεφάλαιο 4 εξηγούνται διάφορα αναλυτικά αποτελέσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης στα ATM δίκτυα. Δίδουμε έμφαση σ' ένα αποτέλεσμα, το οποίο δεν εξαρτάται από κάποια συγκεκριμένα μοντέλλα πηγών, και επιχειρούμε ένα έλεγχο ορθότητας αυτού, χρησιμοποιώντας το αναλυτικό αποτέλεσμα που παρουσιάζεται στο παράρτημα Α.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέσαμε για την αξιολόγηση των μεθόδων Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης του κεφαλαίου 4, καθώς επίσης και μία τεχνική που υλοποιήσαμε για την επιτάγχυνση των προσομοιώσεων.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 δίδεται μία περίληψη των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, και παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα και κάποιες κατευθύνσεις για μελλοντική διερεύνηση.

# Κεφάλαιο 2

# Ελεγχος συμφόρησης στα B-ISDN

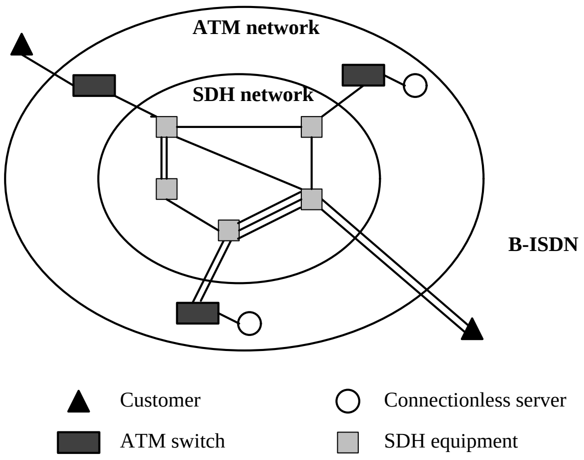
## 2.1 Τι είναι τα B-ISDN

Το 1990, λόγω των αυξημένων αναγκών σε υψηλής-ταχύτητας τηλεπικοινωνίες[1] αλλά και λόγω της εμφάνισης νέων τεχνολογιών για την υποστήριξή τους, η CCITT προχώρησε στον ορισμό του *Ευρυζώνιου Ψηφιακού Δικτύου Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών* (broadband integrated services digital network, **B-ISDN**).

Το B-ISDN μπορούμε να το θεωρήσουμε σαν ένα ψηφιακό δίκτυο γενικού σκοπού, το οποίο θα έχει τη δυνατότητα, μεταφέροντας ταυτόχρονα ήχο, εικόνα και δεδομένα, να υποστηρίζει μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών-υπηρεσιών. [4] Τα B-ISDN θα καλούνται να εξυπηρετούν ταυτόχρονα κλήσεις που έχουν μεγάλη ποικιλία ως προς τον όγκο αλλά και την κατανομή της πληροφορίας που εισάγουν στο δίκτυο, αλλά και διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την ποιότητα της, λαμβανομένης από το δίκτυο, υπηρεσίας (quality of service, **QoS**).

Μία βασική αρχή του B-ISDN είναι η παροχή όλων των υπηρεσιών (σημερινών αλλά και μελλοντικών) να γίνεται από ένα και μόνο σημείο διασύνδεσης (interface) με το δίκτυο. Δηλαδή, στο χρήστη θα παρέχεται η δυνατότητα ταυτόχρονης σύνδεσής του με

[1] Στις Η.Π.Α. οι ανάγκες για επικοινωνία κειμένου και δεδομένων θα αυξηθούν από \$36 δισ. σε \$94 δισ. και εικόνας από \$22 δισ. σε \$74 δισ. την περίοδο 1990 - 1994. [3]



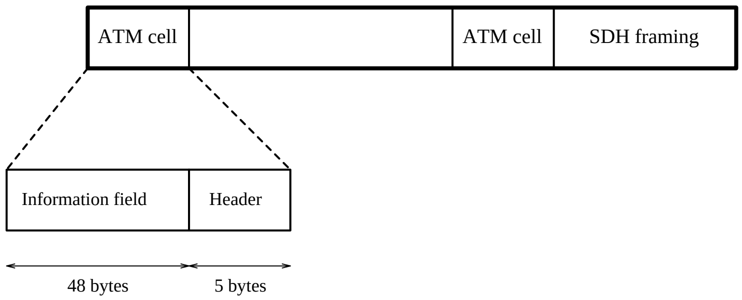

Σχήμα 2.1: Μία ενδεχόμενη μορφή των B-ISDN

πολλά διαφορετικά σημεία, ανθρώπους και υπηρεσίες χρησιμοποιώντας μόνο ένα σύνδεσμο με το δίκτυο. Στη CCITT έχουν συμφωνηθεί δύο διαφορετικοί ρυθμοί για τα σημεία διασύνδεσης, γνωστοί ως $S_B$ (155.52 Mb/s) και $T_B$ (622.08 Mb/s). Μέσα στο δίκτυο, οι ρυθμοί μετάδοσης θα είναι 622 Mb/s, 1.244 Gb/s και 2.488 Gb/s, όπως προκύπτουν από τη σύσταση **SDH** (synchronous digital hierarchy) της CCITT, η οποία καθορίζει ένα σύγχρονο τρόπο μεταφοράς δεδομένων πάνω από οπτική ίνα και έχει υιοθετηθεί για τα B-ISDN. [3] Ο τρόπος μετάδοσης, δηλ. ο τρόπος μεταγωγής και πολύπλεξης των δεδομένων, στα B-ISDN υπήρξε ένα σημείο διαφωνίας για αρκετά χρόνια. Αρχικά (1987 - 88), ο πιο κατάλληλος τρόπος θεωρήθηκε ο *Σύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης* (synchronous transfer mode, **STM**), μία τεχνική που βασίζεται στη χρονική πολύπλεξη. Τελικά όμως υιοθετήθηκε ο *Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης* (asynchronous transfer mode, **ATM**), μία υψηλού εύρους ζώνης (high bandwidth) τεχνική μεταγωγής και πολύπλεξης σταθερού μεγέθους πακέτων.

## 2.2 Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης (ATM)

Ο τρόπος διαμερισμού του bandwidth ενός B-ISDN κόμβου στις υπηρεσίες του, υπήρξε το σημείο υπεροχής του ATM έναντι του STM.

Στον STM, κάθε SDH πλαίσιο χωρίζεται σε χρονικά διαστήματα. Οπως και στην κλασσική τεχνική μεταγωγής κυκλωμάτων, κάθε τέτοιο διάστημα του πλαισίου δεσμεύεται για την εξυπηρέτηση μιας συγκεκριμένης κλήσης και μόνο. Κατά συνέπεια, μία κλήση αναγνωρίζεται από τη θέση των διαστημάτων της μέσα στο πλαίσιο. Στον STM, τα διαστήματα δεσμεύονται με βάση τον μέγιστο ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας της κλήσης, έτσι ώστε η απατούμενη QoS να μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και στην περίπτωση που η πηγή μεταδίδει με το μέγιστο ρυθμό της. Ο STM επιλέχθηκε αρχικά ως ο καταλληλότερος τρόπος μετάδοσης στα B-ISDN κυρίως λόγω της συμβατότητάς του με τα υπάρχοντα συστήματα και είναι πράγματι ιδανικός για εξυπηρέτηση υπηρεσιών που έχουν σταθερό ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας. Εάν όμως ο κόμβος κληθεί να εξυπηρετήσει μεταβλητού-ρυθμού υπηρεσίες, τότε ένα μέρος του bandwidth θα παραμείνει αχρησιμοποίητο. [4]

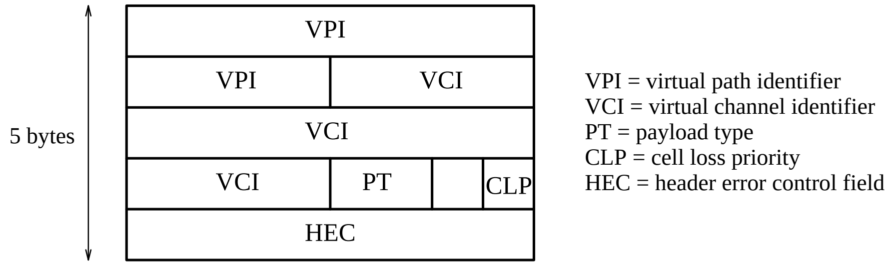



Σχήμα 2.2: Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης

Αυτό το μειονέκτημα δεν υπάρχει στον Ασύγχρονο Τρόπο Μετάδοσης. Στον ATM, η ροή της πληροφορίας μιας κλήσης οργανώνεται σε σταθερού μεγέθους πακέτα, τα οποία ονομάζονται *κελλιά* (cells). Το κελλί αποτελείται από μία επικεφαλίδα και από ένα πεδίο πληροφορίας, μεγέθους 5 και 48 bytes αντίστοιχα.[2] Κάθε SDH πλαίσιο χωρίζεται σε χρονικά διαστήματα διάρκειας ίσης με το χρόνο μετάδοσης ενός ATM κελλιού (σχήμα 2.2). Αυτά τα διαστήματα δεσμεύονται για την εξυπηρέτηση μιας κλήσης μόνο εάν υπάρχουν διαθέσιμα προς μετάδοση κελλιά απ' αυτήν την κλήση. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το bandwidth ενός κόμβου δεν καταναλώνεται παρά μόνο εάν υπάρχει πληροφορία για να μεταδοθεί.

[2]Το κελλί πρέπει να είναι μικρού μεγέθους έτσι ώστε να είναι μικρός και ο χρόνος αναμονής ενός υψηλής-προτεραιότητας κελλιού, το οποίο φτάνει στον κόμβο τη στιγμή που εξυπηρετείται ένα χαμηλής-προτεραιότητας κελλί.

Η αναγνώριση ενός κελλιού γίνεται από δύο πεδία της επικεφαλίδας του, την *ταυτότητα νοητής ατραπού* (virtual path identifier, **VPI**) και την *ταυτότητα νοητού καναλιού* (virtual channel identifier, **VCI**). Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι ο ATM απαιτεί την καθιέρωση σύνδεσης μεταξύ των ενδιαφερομένων μερών πριν τη μεταφορά πληροφορίας, έτσι ώστε να δοθούν όλα τα στοιχεία δρομολόγησης στους ενδιάμεσους κόμβους. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η δομή της επικεφαλίδας του ATM κελλιού, όπου εκτός από τα δύο παραπάνω πεδία εμφανίζονται και τα πεδία *ελέγχου σφάλματος της επικεφαλίδας* (header error control), *καθορισμού τύπου της κλήσης* (payload type) και *καθορισμού προτεραιότητας για την απόρριψη του κελλιού* (cell loss priority).




Σχήμα 2.3: Η δομή της επικεφαλίδας του ATM κελλιού

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι ο ATM παρουσιάζει τα παρακάτω σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του STM :

1. ευελιξία και αποτελεσματικότητα στην εξυπηρέτηση τόσο των υπηρεσιών με σταθερό ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας όσο και των υπηρεσιών μεταβλητού-ρυθμού,

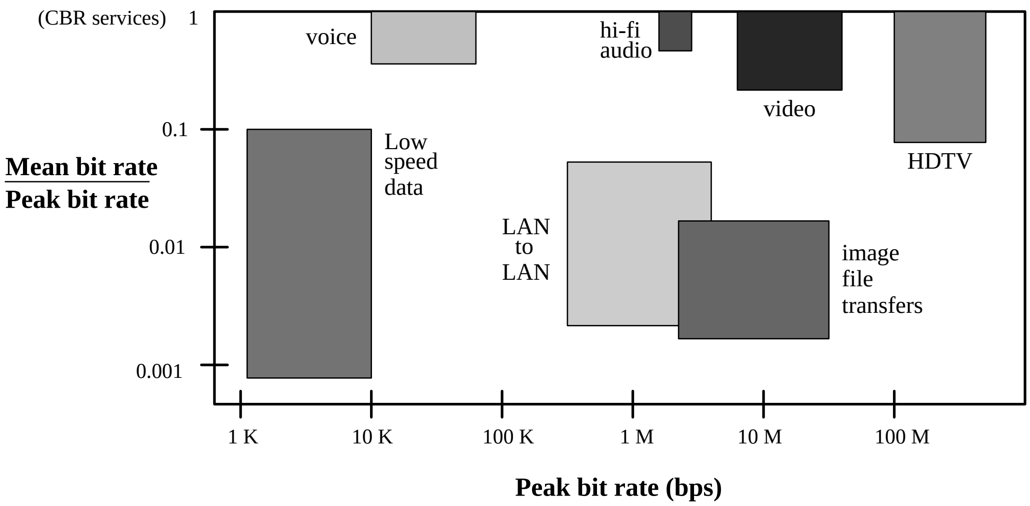
2. στο ότι δεν χρειάζεται ένα ξεχωριστό δίκτυο για τη σηματοδότηση (signalling), το οποίο απαιτείται στις αρχιτεκτονικές μεταγωγής κυκλωμάτων, και

3. ενδεχόμενη εξοικονόμιση bandwidth, με την εφαρμογή της στατιστικής πολύπλεξης σε εκείνες τις πηγές που δημιουργούν κυκλοφορία κυρίως σε μικρά χρονικά διαστήματα καθόλη τη διάρκεια ζωής των (**bursty sources**). Αυτή η εξοικονόμιση είναι επιθυμητή, αν θεωρήσουμε την επιβάρυνση των 5 bytes της επικεφαλίδας για κάθε ATM κελλί.

## 2.3 Υπηρεσίες στα B-ISDN

Τα B-ISDN, έχοντας τη δυνατότητα να μεταφέρουν ταυτόχρονα ήχο, εικόνα και δεδομένα, θα παρέχουν στο χρήστη μία μεγάλη ποικιλία από υπηρεσίες-εφαρμογές. Αυτές οι υπηρεσίες θα διαφέρουν τόσο ως προς τον όγκο και την κατανομή της κυκλοφορίας που θα εισάγουν στο δίκτυο, όσο και ως προς τις απαιτήσεις τους για ποιότητα.

Γενικά, τις υπηρεσίες μπορούμε να τις κατατάξουμε σε δύο κατηγορίες : σε εκείνες που δημιουργούν κυκλοφορία με σταθερό ρυθμό (constant ή continuous bit rate, **CBR**) και σε εκείνες που δημιουργούν κυκλοφορία με μεταβλητό ρυθμό (variable bit rate, **VBR**).




Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστικά κυκλοφορίας διαφόρων υπηρεσιών

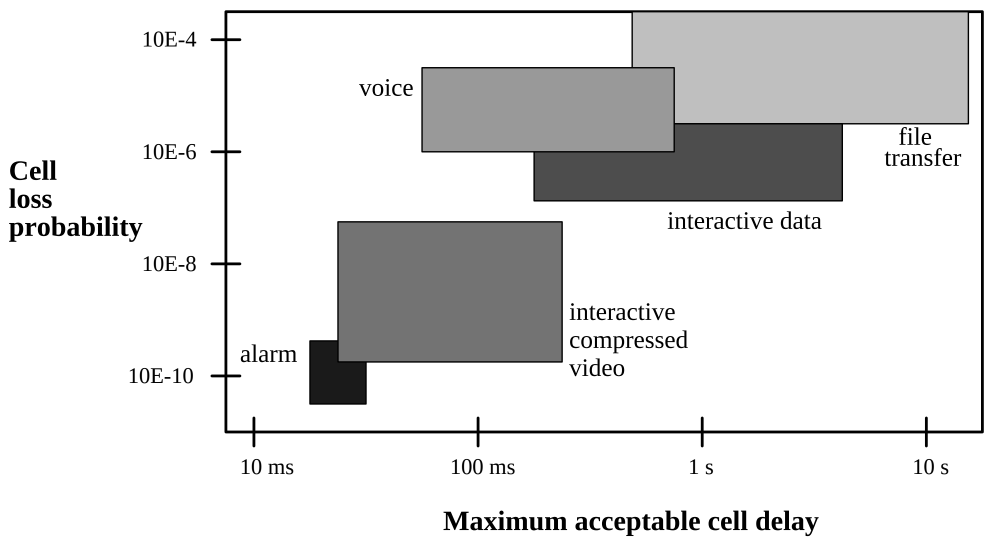
Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζονται ο μέγιστος ρυθμός δημιουργίας κυκλοφορίας για μερικές χαρακτηριστικές υπηρεσίες στα B-ISDN, όπως επίσης και ο λόγος του μέσου ως προς το μέγιστο ρυθμό κυκλοφορίας των. [5], [6] Αυτός ο λόγος χρησιμοποιείται συχνά ως μία ένδειξη της διακύμανσης του ρυθμού κυκλοφορίας μιας VBR υπηρεσίας, δηλ. για τη μέτρηση της *μεταβλητότητας* (variability) μιας VBR υπηρεσίας.
Οπως παρατηρούμε από το σχήμα, τα B-ISDN καλούνται να εξυπηρετήσουν υπηρεσίες με υψηλό μέγιστο ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας, όπως η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV) ή η μεταφορά εικόνας (π.χ. για ιατρικές ή για CAD/CAM εφαρμογές). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι ο μέγιστος ρυθμός αυτών των υπηρεσιών είναι της ίδιας τά-

ξης μεγέθους με το bandwidth του μεταγωγέα. Ομως, ταυτόχρονα θα εξυπηρετούνται υπηρεσίες πολύ χαμηλού ρυθμού, όπως η μεταφορά φωνής και fax, η σύνδεση ASCII τερματικού με μια βάση δεδομένων ή οι εφαρμογές τηλεμετρίας (π.χ. συναγερμός, remote control συσκευών κλπ.).
Επίσης, μεγάλη ποικιλία παρατηρούμε και στη μεταβλητότητα των υπηρεσιών. Τα B-ISDN θα εξυπηρετούν υπηρεσίες με σχεδόν σταθερό ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας (π.χ. μεταφορά στερεοφωνικού ήχου υψηλής πιστότητας), αλλά και υπηρεσίες με πολύ μεγάλη διακύμανση αυτού του ρυθμού (π.χ. διασύνδεση τοπικών δικτύων).

Σχετικά με την ποιότητα της, λαμβανομένης από το δίκτυο, υπηρεσίας (quality of service, **QoS**), είναι προφανές ότι ένας καθολικά αποδεκτός προσδιορισμός είναι αδύνατο να οριστεί. Για την μέτρηση του QoS, συνήθως χρησιμοποιούνται ένα υποσύνολο των παραμέτρων απόδοσης δικτύων, γνωστοί ως QoS παράμετροι.
Τέτοιοι παράμετροι είναι :

- η πιθανότητα άρνησης αποδοχής της κλήσης (call blocking),
- ο χρόνος καθιέρωσης της σύνδεσης,
- η μέγιστη και η μέση καθυστέρηση των κελλιών,
- η αστάθεια (jitter) της καθυστέρησης των κελλιών,
- η πιθανότητα απώλειας κελλιού, και
- η πιθανότητα απώλειας μιας συστοιχίας διαδοχικών κελλιών.

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζονται η μέγιστη καθυστέρηση και η πιθανότητα απώλειας κελλιού για διάφορες υπηρεσίες. [6]
Παρατηρούμε ότι έχουμε υπηρεσίες που μπορούν να 'υποφέρουν' μία μεγάλη καθυστέρηση από το δίκτυο (π.χ. η μεταφορά αρχείου), αλλά και υπηρεσίες που δεν επιδέχονται καθυστέρηση μεγαλύτερη από ένα πολύ μικρό όριο (π.χ. η μεταφορά φωνής ή video). Οι τελευταίες αυτές υπηρεσίες ονομάζονται και *υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.*
Επίσης, παρατηρούμε ότι στα B-ISDN θα εξυπηρετούνται υπηρεσίες με υψηλή επιτρεπτή πιθανότητα απώλειας κελλιού, είτε γιατί υπάρχει η δυνατότητα επαναδόμησης των απωλεσθέντων κελλιών από τα ήδη ληφθέντα (π.χ. στη μεταφορά φωνής), είτε γιατί υπάρχει το χρονικό περιθώριο επανεκπομπής αυτών (π.χ. στη μεταφορά αρχείου). Ταυ-




Σχήμα 2.5: QoS παράμετροι διαφόρων υπηρεσιών

τόχρονα όμως θα πρέπει να εξυπηρετούνται και υπηρεσίες με σχεδόν μηδενική επιτρεπτή πιθανότητα απώλειας κελλιού (π.χ. μεταφορά video).

Από τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι τα B-ISDN καλούνται να εξυπηρετήσουν μία μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών με συγκρουόμενες απαιτήσεις. Γι' αυτό και ένας κοινός μηχανισμός ελέγχου που να εφαρμόζεται σε όλες τις υπηρεσίες είναι αδύνατο να υπάρξει. Ο έλεγχός τους θα διενεργείται με την ταυτόχρονη συνεργαζόμενη εκτέλεση πολλών λειτουργιών. Η ομαδοποίηση των υπηρεσιών σε διάφορες κατηγορίες θα διευκολύνει τον προσδιορισμό και τη μελέτη αυτών των λειτουργιών. Επίσης, θα μας δώσει την δυνατότητα της εύκολης ενσωμάτωσης μιας μελλοντικής υπηρεσίας στο δίκτυο, με την απλή ένταξή της σε κάποια από τις υπάρχουσες κατηγορίες.

## 2.3.1 Κατηγορίες Υπηρεσιών

Πολλοί διαφορετικοί τρόποι κατηγοροποίησης των B-ISDN υπηρεσιών, πάνω στους οποίους στηρίζονται διάφοροι μηχανισμοί ελέγχου και διαχείρισης του δικτύου, έχουν προταθεί. [7], [8], [9], [10] Συνήθως, η κατηγοροποίηση αυτή, γίνεται με βάση τα πεδία τιμών διαφόρων QoS παράμετρων των υπηρεσιών. Στην παρούσα εργασία, ο διαχωρισμός των υπηρεσιών θα γίνει βασιζόμενος στη (μέγιστη) καθυστέρηση κελλιού και στην αστάθεια καθυστέρησης του καθώς επίσης και στην πιθανότητα απώλειας κελλιού.

| | *Μηδενική απώλεια κελλιών* | *Φραγμένη πιθανότητα απώλειας κελλιού* |
|---|---|---|
| *Φραγμένη καθυστέρηση και αστάθεια καθυστέρησης* | **Κατηγορία I**<br>Data πραγματικού χρόνου<br>Video (high-priority sub-band) | **Κατηγορία II**<br>Μεταφορά φωνής<br>Video (low-priority sub-band) |
| *Μη φραγμένη καθυστέρηση* | **Κατηγορία III**<br>Συμβατικές υπηρεσίες data - Μεταφορά αρχείων | |

Σχήμα 2.6: Κατηγορίες υπηρεσιών

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζονται οι προτεινόμενες κατηγορίες υπηρεσιών.

Στην **κατηγορία I** περιλαμβάνονται εκείνες οι υπηρεσίες που έχουν αυστηρούς περιορισμούς στην καθυστέρηση και στην αστάθεια καθυστέρησης των κελλιών, και επιπλέον η πιθανότητα απώλειας κελλιού να είναι σχεδόν μηδενική. Τέτοιες υπηρεσίες είναι η μεταφορά δεδομένων πραγματικού χρόνου (π.χ. συναγερμός) ή σημάτων video υψηλής προτεραιότητας.

Στην **κατηγορία II** ανήκουν εκείνες οι υπηρεσίες που έχουν, επίσης, αυστηρούς περιορισμούς στην καθυστέρηση και στην αστάθεια καθυστέρησης των κελλιών αλλά επιδέχονται μία μικρή απώλεια κελλιών. Τέτοιες υπηρεσίες είναι η μεταφορά φωνής ή σημάτων video χαμηλής προτεραιότητας.

Τέλος, οι υπηρεσίες, στις οποίες δεν παίζει ρόλο η αστάθεια καθυστέρησης των κελλιών αλλά και αποδέχονται οποιαδήποτε ‘λογική’ καθυστέρηση αυτών, αποτελούν την **κατηγορία III**. Στις υπηρεσίες αυτής της κατηγορίας, δεν έχει νόημα ένας περιορισμός στην πιθανότητα απώλειας κελλιού, γιατί υπάρχει το χρονικό περιθώριο για την επανεκπομπή των απωλεσθέντων κελλιών.

## 2.4 Συμφόρηση στα B-ISDN

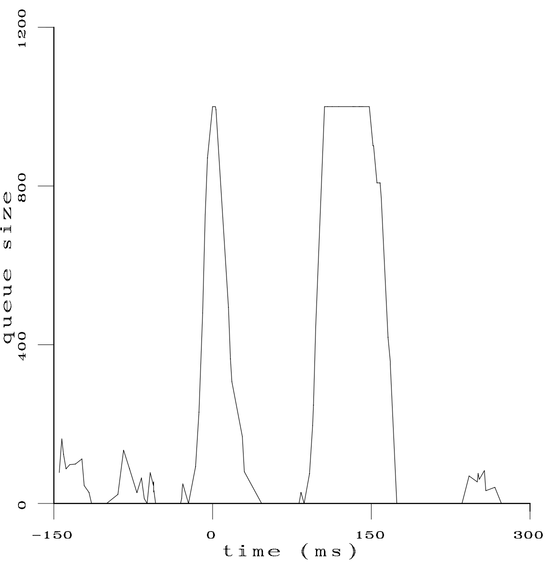
Στην παρούσα εργασία, με τον όρο *συμφόρηση* (congestion), εννοούμε την υποβάθμιση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας για κάποια κλήση στο δίκτυο. Σ' αυτήν την περίπτωση, οι QoS παράμετροι αυτής της κλήσης θα λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες από τις επιτρεπτές.
Τι είναι όμως αυτό που δημιουργεί τη συμφόρηση στα B-ISDN; Σ' αυτά τα δίκτυα, λόγω του ασύγχρονου τρόπου μετάδοσης των κελλιών, μπορούμε να εξοικονομήσουμε bandwidth πολυπλέκοντας στατιστικά τις πηγές μεταβλητού ρυθμού, και ιδίως εκείνες που δημιουργούν το μεγαλύτερο όγκο της πληροφορίας τους σε μικρά χρονικά διαστήματα, ενώ αντίθετα παραμένουν σχεδόν ανενεργές στο υπόλοιπο της ζωής τους. Τότε, το άθροισμα των μέγιστων ρυθμών δημιουργίας κυκλοφορίας των κλήσεων που εξυπηρετούνται από ένα μεταγωγέα είναι μεγαλύτερο από τη χωρητικότητά του. Και φυσικά είναι δυνατόν, πολλές πηγές να αρχίσουν, ταυτόχρονα, να δημιουργούν κυκλοφορία με ρυθμό πολύ κοντά στο μέγιστο. Αυτό, θα δημιουργήσει μεγάλες ουρές αναμονής στους μεταγωγείς, οπότε θα έχει σαν συνέπεια την αύξηση της καθυστέρησης των κελλιών αλλά και την ενδεχόμενη αύξηση της πιθανότητας απώλειας κελλιού. Αν οι παραπάνω αυξήσεις είναι πάνω από τα μέγιστα επιτρεπτά όρια, τότε θα έχουμε συμφόρηση στο δίκτυο.

Οι Fowler και Leland έχουν δημοσιεύσει μία πολύ ενδιαφέρουσα εργασία, στην οποία περιγράφουν τη μορφή της συμφόρησης που μπορεί να προκληθεί από τη διασύνδεση τοπικών δικτύων. [11] Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα, τα οποία συλλέγησαν από διάφορα Ethernet LANs κατά το διάστημα Μαρτίου '89 - Ιανουαρίου '90.

Το διαγράμμα του σχήματος 2.7 είναι αντιπροσωπευτικό των επεισοδίων συμφόρησης σε ένα ATM μεταγωγέα, και αναπαριστά τη διακύμανση της ουράς στον ενταμιευτή εξόδου του μεταγωγέα. Τη στιγμή 0 έχουμε υπερχείληση του ενταμιευτή και κατά συνέπεια απώλεια κελλιών (το μέγεθος του ενταμιευτή ήταν 1000 κελλιά).

Συνοπτικά, τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας είναι τα ακόλουθα :

- **Η συμφόρηση επέρχεται ξαφνικά και δεν εξελίσσεται βαθμιαία.** Αξίζει να




Σχήμα 2.7: Ενα επεισόδιο συμφόρησης σε ATM μεταγωγέα

σημειωθεί ότι στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Courcoubetis και Walrand μελετώντας με αναλυτικό τρόπο τη διαδικασία υπερχείλησης ενός ATM μεταγωγέα, χρησιμοποιώντας κατάλληλα, για τα B-ISDN, μοντέλλα περιγραφής της κυκλοφορίας. [2]

- Σε γενικές γραμμές, οι συνθήκες που επιφέρουν τη συμφόρηση παραμένουν για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα. Κατά τη διάρκεια αυτών, το σύστημα εισέρχεται συνεχώς σε καταστάσεις απώλειας κελλιών. Αυτές οι καταστάσεις, που διαρκούν λίγο, έρχονται και φεύγουν πολύ γρήγορα. Σ' αυτά τα διαστήματα, ο ρυθμός απώλειας κελλιών είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από τον ολικό ρυθμό απώλειας, δηλ. από το ρυθμό που παρατηρείται στη διάρκεια ζωής της κλήσης. Οπότε, ο χαμηλός ολικός ρυθμός απώλειας συνεπάγεται την **σπανιότητα της εμφάνισης επεισοδίων συμφόρησης.** Επίσης, μπορούμε να πούμε, ότι υπάρχει μία συγκέντρωση των απωλειών, που προκαλείται από το συσχετισμό (correlation) των δεδομένων μιας κλήσης.

Συνήθως, οι μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης που έχουν αναπτυχθεί για τα συμβατικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων, χρησιμοποιούν τις τεχνικές *backpressure with chocking* και *window flow control.* [7]

Στις τεχνικές backpressure with chocking, μόλις διαπιστωθεί συμφόρηση σε κάποιον κόμβο του δικτύου, αυτός ο κόμβος ενημερώνει τους υπόλοιπους κόμβους, έτσι ώστε οι κόμβοι που είναι υπεύθυνοι γι' αυτή τη συμφόρηση, να ελέγξουν την κυκλοφορία τους. Σε περιπτώσεις ελάσσονος συμφόρησης, είναι αρκετό το να μειώσουν προσωρινά οι γειτονικοί κόμβοι την κυκλοφορία τους προς τον κόμβο που έχει υποστεί τη συμφόρηση. Ομως, σε περιπτώσεις μείζονος συμφόρησης, πρέπει να μειωθεί ο ρυθμός δημιουργίας κυκλοφορίας των κλήσεων εκείνων που διέρχονται απ' αυτό τον κόμβο.
Η τεχνική window flow control ελέγχει τον μέγιστο αριθμό κελλιών μιας κλήσης (παράθυρο) που μπορούν να βρίσκονται μέσα στο δίκτυο, χρησιμοποιώντας κάποιο μηχανισμό επιβεβαίωσης (acknowledgment). Εάν σε κάποιο κόμβο διαπιστωθεί συμφόρηση, τότε μειώνονται τα παράθυρα των κλήσεων που διέρχονται απ' αυτόν τον κόμβο.

Ομως, αυτές οι τεχνικές δεν μπορούν να μεταφερθούν εύκολα στο περιβάλλον του ATM, καθώς:

1. η κυκλοφορία που δημιουργείται από υπηρεσίες πραγματικού χρόνου δεν προσφέρεται για έλεγχο ροής (π.χ. δεν μπορούμε να απαιτήσουμε από μία υπηρεσία μεταφοράς φωνής ή video να μειώσει το ρυθμό δημιουργίας της κυκλοφορίας της όταν διαπιστωθεί συμφόρηση), και

2. η ανάδραση εκτελείται πολύ αργά λόγω της υψηλής καθυστέρησης διάδοσης, συγκρινόμενη με τον υπερβολικά μικρό χρόνο μετάδοσης του κελλιού. Π.χ. απαιτούνται $10^{-3}$ sec. για να διανυθούν 250 km με την ταχύτητα του φωτός ενώ χρειάζονται λιγότερο από $10^{-6}$ sec. για τη μετάδοση ενός κελλιού από ένα μεταγωγέα χωρητικότητας 600 Mb/s. Οπότε, σ' αυτήν την περίπτωση, από τη στιγμή που θα διαπιστωθεί η συμφόρηση μέχρι τη στιγμή που θα ενεργήσει ο μηχανισμός ανάδρασης, θα έχουν διασχίσει το σύστημα 2000 κελλιά.

Από τα παραπάνω διαφαίνεται ότι η φιλοσοφία του μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης στα ATM δίκτυα πρέπει να είναι διαφορετική απ' αυτή που ίσχυε μέχρι τώρα. Αντί του *αντενεργού ελέγχου* (reactive control), ο οποίος δρά μετά τη διαπίστωση της συμφόρησης στο δίκτυο και προσπαθεί να το αποσυμφορήσει, πρέπει να εφαρμόσουμε τον *προληπτικό έλεγχο* (preventive control), ο οποίος προσπαθεί **να αποτρέψει την εμφάνιση συμφόρησης στο δίκτυο**.

Οι μορφές αντενεργού ελέγχου, που μπορούν να εφαρμοστούν στα ATM, είναι η απόρριψη των κελλιών χαμηλής προτεραιότητας από τον ενταμιευτή του κόμβου που έχει υποστεί συμφόρηση, και η τεχνική window flow control για τις υπηρεσίες της κατηγορίας III (όπου δεν υπάρχουν αυστηροί χρονικοί περιορισμοί και συνήθως απαιτείται επανεκπομπή των απωλεσθέντων κελλιών).

## 2.5 Ελεγχος συμφόρησης στα B-ISDN

Η καθυστέρηση που λαμβάνει ένα κελλί από το δίκτυο, ισούται με το *χρόνο αναμονής* στον ενταμιευτή του μεταγωγέα (queueing delay), συν το *χρόνο μετάδοσης* (transmission time), συν το *χρόνο διάδοσης* (propagation time). Επειδή οι δύο τελευταίοι χρόνοι είναι σταθεροί καθόλη τη διάρκεια της κλήσης, εάν θέλουμε να έχουμε μικρή καθυστέρηση κελλιού, τότε θα πρέπει να περιορίσουμε το χρόνο αναμονής. Επίσης, στο χρόνο αναμονής οφείλεται κυρίως και η αστάθεια καθυστέρησης ενός κελλιού.

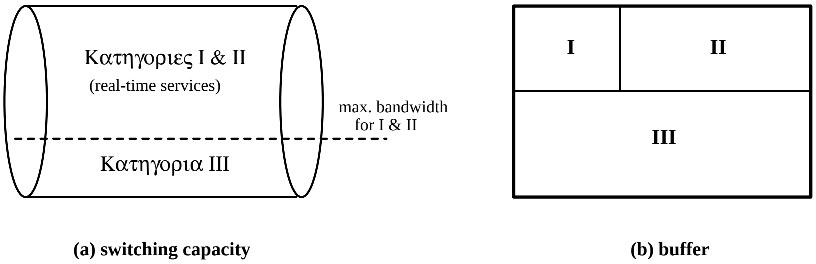
Αρα, σε κάθε κλήση πραγματικού χρόνου, θα πρέπει να αναθέσουμε την αναγκαία ποσότητα bandwidth του μεταγωγέα έτσι ώστε να διατηρηθεί ο χρόνος αναμονής τους μέσα στα επιθυμητά όρια.

Στις υπηρεσίες της κατηγορίας I, όπου επιθυμούμε σχεδόν μηδενική απώλεια κελλιών, είναι προφανές ότι πρέπει να αναθέσουμε bandwidth ίσο με το μέγιστο ρυθμό δημιουργίας της κυκλοφορίας τους.

Εκείνο που δεν είναι προφανές, είναι η ποσότητα του bandwidth που πρέπει να αναθέσουμε στις υπηρεσίες της κατηγορίας II. Κι αυτό γιατί, επειδή σ' αυτές τις υπηρεσίες υπάρχει ένα αποδεκτό ποσοστό απώλειας κελλιών, εφαρμόζουμε στατιστική πολύπλεξη για την εξοικονόμιση bandwidth. Σίγουρα θα είναι μεταξύ του μέγιστου και του μέσου ρυθμού κυκλοφορίας των, αλλά ο ακριβής προσδιορισμός του είναι ένα πάρα πολύ δύσκολο πρόβλημα.

Τέλος, για να βεβαιώσουμε και την εξυπηρέτηση των υπηρεσιών της κατηγορίας III από το μεταγωγέα, απαιτούμε το άθροισμα των bandwidths που έχουν ανατεθεί στις υπηρεσίες

I και II, να είναι μικρότερο από τη χωρητικότητα του μεταγωγέα. Φυσικά, οι υπηρεσίες III μπορούν να χρησιμοποιήσουν το bandwidth που έχει ανατεθεί στις I και II αλλά παραμένει ανεκμετάλλευτο (σχήμα 2.8).




Σχήμα 2.8: Διαμερισμός των πόρων του μεταγωγέα στις κατηγορίες υπηρεσιών

Κατ' αντίστοιχο τρόπο πρέπει να διαμερίσουμε και τον ενταμιευτή του μεταγωγέα στις τρείς κατηγορίες των υπηρεσιών (σχήμα 2.8), έτσι ώστε εάν η συμφόρηση προκληθεί από κλήσεις μιας συγκεκριμένης κατηγορίας, τότε να απορριφθούν μόνο δικά της κελλιά. Εάν οι κλήσεις της κατηγορίας II έχουν διαφορετικές επιτρεπτές πιθανότητες απώλειας κελλιού, τότε ή θα πρέπει να τηρηθεί η πιο αυστηρή από αυτές για όλες τις κλήσεις ή θα πρέπει να μοιράσουμε το μέρος II του ενταμιευτή σε τόσα μέρη όσα και οι διαφορετικές πιθανότητες.
Επίσης, δεσμεύουμε χώρο στο ενταμιευτή και για τις υπηρεσίες I, έτσι ώστε να μην υπάρξει απώλεια στην περίπτωση ταυτόχρονης άφιξης κελλιών από τις διαφορετικές εισόδους του μεταγωγέα.

Ενας μηχανισμός ελέγχου της συμφόρησης στα B-ISDN, που λαμβάνει υπόψη και το παραπάνω σχήμα διαχείρισης κυκλοφορίας αλλά και την ανάγκη για προληπτικό έλεγχο που περιγράψαμε στο προηγούμενο τμήμα, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9. Στόχος του είναι να διασφαλίσει ότι οι τιμές των QoS παραμέτρων παραμένουν μέσα στα επιθυμητά τους όρια για όλες τις υπηρεσίες στο δίκτυο. Οπως παρατηρούμε, κάθε κατηγορία υπηρεσιών ελέγχεται από ένα σύνολο λειτουργιών, που περιγράφονται παρακάτω.

### Ελεγχος Αποδοχής Κλήσης

Οταν μία κλήση επιθυμεί να εξυπηρετηθεί από το δίκτυο, τότε απευθύνεται στον *Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης* (call acceptance control), καθορίζοντας τόσο τη μορφή της κυκλοφορίας της όσο και τις απαιτήσεις της για ποιότητα. Η μορφή της κυκλοφορίας της προσδιορίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων, γνωστοί ως *περιγραφείς κυκλοφορίας* (traffic descriptors). Οι απαιτήσεις της για ποιότητα προσδιορίζονται από το σύνολο των QoS παραμέτρων.

Κατόπιν, ο Ελεγχος Αποδοχής αποφασίζει, σε πραγματικό χρόνο, εάν η αίτηση για την παροχή υπηρεσίας μπορεί να ικανοποιηθεί χωρίς να μειωθεί η ποιότητα των ήδη εξυπηρετούμενων κλήσεων.

Είναι φυσικό, το δίκτυο να μην απορρίπτει ποτέ κλήσεις της κατηγορίας III. Επίσης, για τις κλήσεις της κατηγορίας I, αρκεί να βρεθεί μία διαδρομή του δικτύου όπου να υπάρχει διαθέσιμο bandwidth ίσο με το μέγιστο ρυθμό δημιουργίας της κυκλοφορίας τους. Το πρόβλημα όμως βρίσκεται για τις κλήσεις της κατηγορίας II. Η απόφαση για αποδοχή ή απόρριψη της κλήσης δεν είναι καθόλου προφανής. Πάντως, μας αρκεί και η απάντηση στο εξής ερώτημα : γνωρίζοντας το διαθέσιμο bandwidth και το μέγεθος ενταμιευτή για την εξυπηρέτηση των υπηρεσιών της κατηγορίας II, ποιές κλάσεις και πόσες κλήσεις από κάθε κλάση αυτής της κατηγορίας μπορούμε να πολυπλέξουμε έτσι ώστε να παράσχουμε την επιθυμητή QoS για όλες αυτές τις κλήσεις (όπου με τον όρο *κλάση*, εννοούμε μία ομάδα κλήσεων με ομοειδή χαρακτηριστικά κυκλοφορίας, π.χ. η κλάση φωνής). **Αυτό είναι και το ερώτημα το οποίο εξετάζεται στην παρούσα εργασία.**

## Αστυνόμευση των πηγών

Οταν μία κλήση γίνει αποδεκτή στο δίκτυο, τότε θε πρέπει να ελέγχεται διαρκώς για να διασφαλιστεί ότι η κυκλοφορία της συμμορφώνεται με τις παραμέτρους που συμφωνήθηκαν κατά την αποδοχή της. Και αυτό γιατί, εάν μία κλήση εισάγει περισσότερη από τη συμφωνημένη κυκλοφορία, τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να οδηγηθεί το δίκτυο σε συμφόρηση.

Εάν μία κλήση εισάγει περισσότερη κυκλοφορία στο δίκτυο τότε τα επιπλέον κελλιά ή απορρίπτονται ή μαρκάρονται ως κελλιά χαμηλής προτεραιότητας, θέτοντας το πεδίο CLP της επικεφαλίδας των ίσο με 1.

Για τις υπηρεσίες της κατηγορίας I, αρκεί να αστυνομεύσουμε το μέγιστο ρυθμό δη-

| | *Ελεγχος Αποδοχής Κλήσης* | *Αστυνόμευση των πηγών* | *Απόρριψη κελλιών* | *Window flow control* |
|---|---|---|---|---|
| **Κατηγορία I** | Υπάρχει διαδρομή με διαθέσιμο το peak rate; | Αστυνόμευσε το peak rate | ΟΧΙ | ΟΧΙ |
| **Κατηγορία II** | ? | Αστυνόμευσε τους περιγραφείς κυκλοφορίας | ΝΑΙ | ΟΧΙ |
| **Κατηγορία III** | ΟΧΙ | ΟΧΙ | ΝΑΙ | ΝΑΙ |

Σχήμα 2.9: Ενας μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης

μιουργίας της κυκλοφορίας. Για τις υπηρεσίες της κατηγορίας ΙΙ όμως, πρέπει να αστυνομεύσουμε όλες τις παραμέτρους που ορίστηκαν σαν περιγραφείς κυκλοφορίας και χρησιμοποιήθηκαν από τον Ελεγχο Αποδοχής, κάτι που επίσης δεν είναι εύκολο.

### Απόρριψη κελλιών

Οταν ένας μεταγωγέας υποστεί συμφόρηση, τότε η άμεση αντίδρασή του είναι να απορρίψει επιλεκτικά ορισμένα κελλιά από τον ενταμιευτή.
Εάν υπάρχουν κελλιά με {CLP=1}, τότε φυσικό είναι να απορριφθούν τόσα απ' αυτά έτσι ώστε να αποσυμφορηθεί ο μεταγωγέας. Εκτός από τη λειτουργία της αστυνόμευσης των πηγών, κελλιά χαμηλής προτεραιότητας μπορούν να παράγουν και οι ίδιες οι πηγές (π.χ. το video).
Εάν δεν υπάρχουν τέτοια κελλιά, τότε είναι επιτακτική η ανάγκη για πιο πολύπλοκους μηχανισμούς απόρριψης. Π.χ. εάν διαπιστωθεί συμφόρηση στον ενταμιευτή των υπηρεσιών ΙΙ, τότε τα κελλιά που βρίσκουν γεμάτο τον ενταμιευτή δε θα πρέπει να απορρίπτονται, αλλά να αντικαθιστούν τα κελλιά της ίδιας κλήσης που βρίσκονται τον περισσότερο

χρόνο στην ουρά.

### Window flow control

Μ' αυτή τη λειτουργία ελέγχεται ο μέγιστος αριθμός κελλιών (παράθυρο), μιας κλήσης III, που μπορούν να βρίσκονται ταυτόχρονα μέσα στο δίκτυο.
Διάφορες εργασίες ελέγχου της ροής με δυναμικά προσαρμοζόμενα παράθυρα έχουν παρουσιαστεί για δίκτυα δεδομένων υψηλής ταχύτητας. [12]
Στο συγκεκριμένο μηχανισμό, είναι επιθυμητή η διαρκής πληρότητα του ενταμιευτή III, έτσι ώστε να μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το bandwidth που έχει ανατεθεί στις κλήσεις των κατηγοριών I & II, αλλά παραμένει αχρησιμοποίητο.

# Κεφάλαιο 3

# Χαρακτηρισμός των πηγών δημιουργίας κυκλοφορίας

Τα B-ISDN, έχοντας τη δυνατότητα να μεταφέρουν ταυτόχρονα ήχο, εικόνα και δεδομένα, θα παρέχουν στο χρήστη μία μεγάλη ποικιλία από υπηρεσίες, οι οποίες θα διαφέρουν μεταξύ τους τόσο ως προς τον όγκο όσο και ως προς την κατανομή της κυκλοφορίας που θα εισάγουν στο δίκτυο.
Ο χαρακτηρισμός αυτών των υπηρεσιών, δηλ. η χρησιμοποίηση στοχαστικών διεργασιών ικανών να περιγράψουν τις αντίστοιχες πηγές δημιουργίας κυκλοφορίας, είναι ένα ανοιχτό ερευνητικό θέμα. [13]
Σ' αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιάσουμε δύο μοντέλλα για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, τα οποία θεωρήθηκαν κατάλληλα για τους σκοπούς της εργασίας, όπως επίσης και ένα τρόπο καθορισμού της *μεταβλητότητας* (variability) μιας πηγής.

## 3.1 Μοντέλλα πηγών

Είναι γνωστό ότι οι πηγές δεδομένων μοντελλοποιούνται είτε ως Poisson διεργασίες (στο συνεχή χρόνο) είτε ως Γεωμετρικές διεργασίες (στο διακριτό χρόνο).
Ομως, η χρήση αυτών των μοντέλλων δεν μπορεί να επεκταθεί και στις πηγές πραγματικού χρόνου. Και αυτό γιατί, σ' αυτές τις πηγές, υπάρχει ισχυρή *συσχέτιση* (correlation)

μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων κελλιών, που οδηγεί σε υψηλό βαθμό μεταβλητότητας σε σχέση με τις Poisson διεργασίες. Π.χ., έχει μετρηθεί ότι ο τετραγωνικός συντελεστής της μεταβολής του χρόνου μεταξύ διαδοχικών αφίξεων για μια τυπική πηγή φωνής παίρνει την τιμή 18.1, ενώ φυσικά για μια Poisson διεργασία παίρνει την τιμή 1.0 (όπου ως τετραγωνικός συντελεστής της μεταβολής ορίζεται το πηλίκο της διασποράς προς το τετράγωνο της μέσης τιμής). [14]

Συνεπώς, για το χαρακτηρισμό των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, πρέπει να χρησιμοποιηθούν αυτοσυσχετιζόμενες στοχαστικές διεργασίες. Δύο τέτοια μοντέλλα είναι το 'ON/OFF Markov fluid' και το 'Autoregressive Markov', που παρουσιάζονται παρακάτω.

### 3.1.1 Το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο πηγής

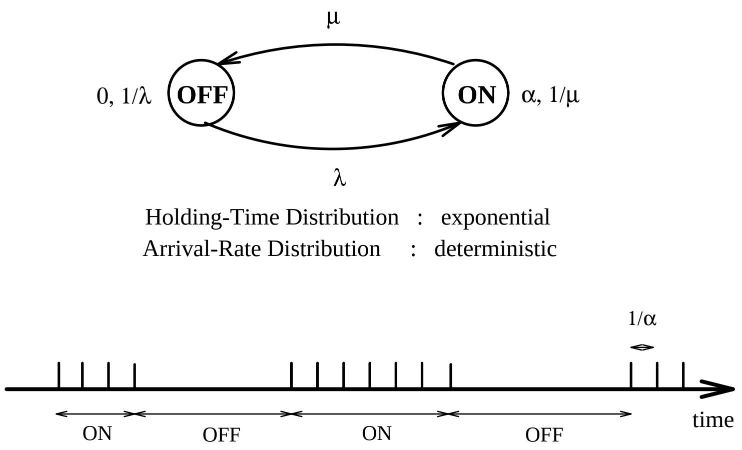
Το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο είναι μία συνεχούς χρόνου αλυσίδα Markov, που εναλλάσεται μεταξύ δύο καταστάσεων, μιας ενεργής (ON) και μιας ανενεργής (OFF). Οταν βρίσκεται στην ενεργή κατάσταση παράγει κελλιά με ντετερμινιστικό ρυθμό $\alpha$, ενώ όταν βρίσκεται στην ανενεργή κατάσταση δεν δημιουργούνται κελλιά. Ο χρόνος παραμονής σε κάθε κατάσταση είναι εκθετικά κατανεμημένος, με μέση τιμή $1/\lambda$ και $1/\mu$ για τις καταστάσεις OFF και ON αντιστοίχως (βλέπε σχήμα 3.1). Η μέση τιμή $m$ και η αυτοσυνδιασπορά[1] $C(\tau)$ του ρυθμού δημιουργίας κελλιών της πηγής θα δίδονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$m = \frac{\lambda\alpha}{\lambda+\mu},$$

$$C(\tau) = \frac{\lambda\mu\alpha^2}{(\lambda+\mu)^2}e^{-(\lambda+\mu)\tau} \qquad \tau \geq 0 \tag{3.1}$$

Είναι προφανές ότι αυτό το μοντέλλο ικανοποιεί τη βασική μας απαίτηση, που είναι η ύπαρξη συσχετισμού μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων κελλιών. Δίδοντας κατάλληλες τιμές στις παραμέτρους του μοντέλλου, μπορούμε να επιτύχουμε διαφορετικά επίπεδα μεταβλητότητας στις πηγές. Γενικά, αυτό το μοντέλλο έχει το πλεονέκτημα του ότι είναι

[1]Ως αυτοσυνδιασπορά $\tau$-τάξεως, μιας stationary στοχαστικής διεργασίας $\Lambda(t)$, ορίζεται η εξής διαφορά: $C(\tau) = E\{\Lambda(t)\Lambda(t+\tau)\} - (E\{\Lambda\})^2$




Σχήμα 3.1: Το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο πηγής

ταυτόχρονα απλό και ευέλικτο, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει από πηγές με υψηλό βαθμό μεταβλητότητας μέχρι πηγές με σταθερό ρυθμό δημιουργίας κελλιών.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο έχει μελετηθεί εκτενέστατα στο παρελθόν και έχουν ήδη δημοσιευθεί χρήσιμα αναλυτικά αποτελέσματα. [15]

### Χρήση του 'ON/OFF Markov fluid' για περιγραφή πηγών φωνής

Το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο χρησιμοποιείται συχνά στη βιβλιογραφία για να περιγράψει μία πηγή φωνής (με τιμές $\alpha = 64$ kb/s, $1/\lambda = 650$ ms και $1/\mu = 352$ ms), όταν η τεχνική κωδικοποίησης της φωνής είναι η ADPCM σε συνδυασμό με μηχανισμούς ανίχνευσης ομιλίας (speech activity detection). [14]

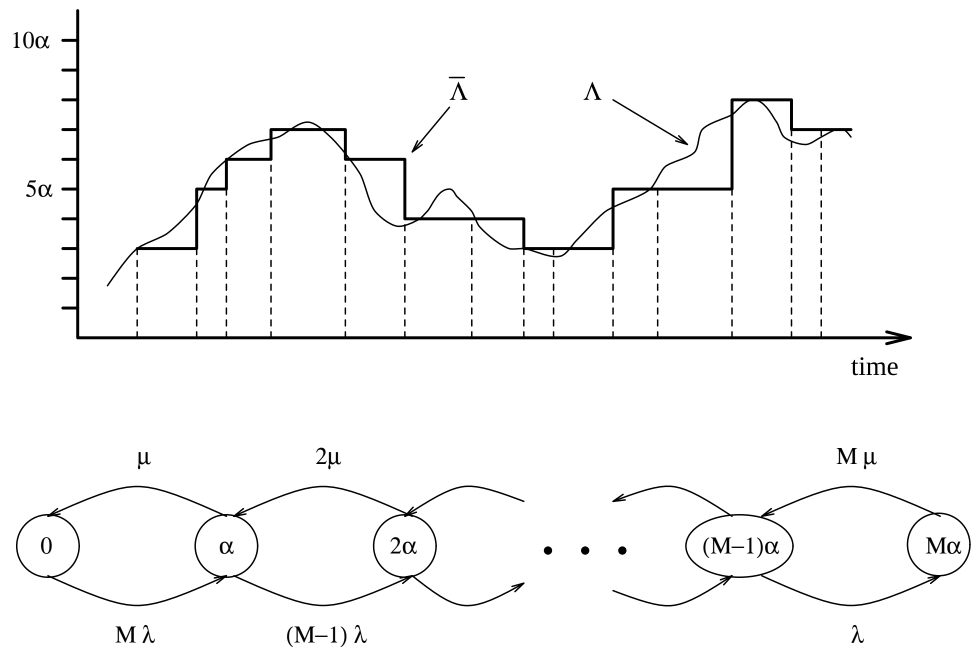
### Χρήση του 'ON/OFF Markov fluid' για περιγραφή πηγών video

Οι Maglaris et al. έχουν χρησιμοποιήσει το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο για να προσεγγίσουν τη συμπεριφορά μιας μεμονωμένης πηγής ή της επαλληλίας (superposition) πολλών ίδιων πηγών video. [16],[17]

Μια πηγή video δημιουργεί κυκλοφορία κωδικοποιώντας τα διαδοχικά πλαίσια video που δημιουργούνται με σταθερό ρυθμό ($\simeq$ 30 πλαίσια το δευτερόλεπτο). Ενα γνωστό σχήμα κωδικοποίησης είναι το ‘conditional replenishment’, κατά το οποίο μεταφέρονται μόνο εκείνα τα μέρη του τρέχοντος πλαισίου που έχουν αλλάξει από το προηγούμενο πλαίσιο. Κατά συνέπεια ο ρυθμός $\Lambda(n)$, με τον οποίο δημιουργείται κυκλοφορία στο $n$-οστό πλαίσιο του video, μεταβάλλεται με το χρόνο.

Εστω ότι ο ρυθμός $\Lambda(n)$ είναι κβαντισμένος, δηλ. ότι το $\Lambda(n)$ μπορεί να πάρει τιμές που είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας συγκεκριμένης τιμής $\alpha$. Τότε, μπορούμε να προσεγγίσουμε το ρυθμό $\Lambda(n)$ με μία συνεχούς χρόνου διεργασία $\bar{\Lambda}(t)$, εάν πάρουμε δείγματα του $\Lambda(n)$ σε τυχαίες Poisson χρονικές στιγμές (βλέπε σχήμα 3.2). Οσο μικρότερο είναι το βήμα $\alpha$ και όσο μεγαλύτερος ο ρυθμός δειγματοληψίας, τόσο καλύτερη είναι και η προσέγγιση του $\Lambda(n)$ απ' τον $\bar{\Lambda}(t)$.
Τότε όμως, ο $\bar{\Lambda}(t)$ μπορεί να χαρακτηριστεί από μία συνεχούς χρόνου αλυσίδα Markov $M+1$ καταστάσεων, από 0 έως $M$ (όπου $M$ είναι τα επίπεδα κβαντισμού του $\Lambda(n)$). Οταν βρίσκεται στην κατάσταση $i$ παράγει κυκλοφορία με ντετερμινιστικό ρυθμό $i \cdot \alpha$, ενώ ο χρόνος παραμονής σε κάθε κατάσταση είναι εκθετικά κατανεμημένος.
Για την απλοποίηση του μοντέλλου, θεωρήθηκε ότι δεν έχουμε μεγάλες μεταβολές στην εικόνα που μεταδίδει το video, δηλ. δεν έχουμε απότομες αυξομειώσεις στο ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας της πηγής. Συγκεκριμένα, έγινε η παραδοχή ότι είναι εφικτή μόνο η μετάβαση από μία κατάσταση σε μία γειτονική της, δηλ. είναι εφικτή η αυξομείωση του ρυθμού δημιουργίας κυκλοφορίας μόνο κατά ένα βήμα $\alpha$. Επιπλέον, έγινε και η ακόλουθη παραδοχή, που μπορούμε όμως να θεωρήσουμε ότι ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Οταν η πηγή μεταδίδει κελλιά με υψηλό ρυθμό, τότε το πιο πιθανό είναι να μεταδώσει με χαμηλότερο ρυθμό στο μέλλον. Και αντίστροφα, όταν μεταδίδει με χαμηλό ρυθμό, τότε το πιο πιθανό είναι να μεταδώσει με υψηλότερο ρυθμό στο μέλλον. Μ' αυτές τις παραδοχές, μπορούμε να προσεγγίσουμε τη συμπεριφορά μιας μεμονωμένης πηγής ή της επαλληλίας πολλών ίδιων πηγών video με την birth–death διεργασία του σχήματος 3.2. [16]

Οι Maglaris et al. προτείνουν το πλήθος $M$ των καταστάσεων της birth–death διεργασίας, όταν καλείται να περιγράψει την επαλληλία $N$ ίδιων πηγών, να είναι $M = 20 \times N$. Επίσης, προσεγγίζουν $N$ υπηρεσίες videotelephone (όταν κωδικοποιούνται με την τε-




Σχήμα 3.2: Ενα μοντέλλο πηγής video, χωρίς απότομες μεταβολές σκηνών

χνική 'conditional replenishment') χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες παραμέτρους :

$$\mu = \frac{3.9}{1 + \frac{5.04458N}{M}} \quad , \quad \lambda = 3.9 - \mu \quad , \quad \alpha = 0.1 + 0.52\frac{N}{M} \text{ bits/pixel}$$

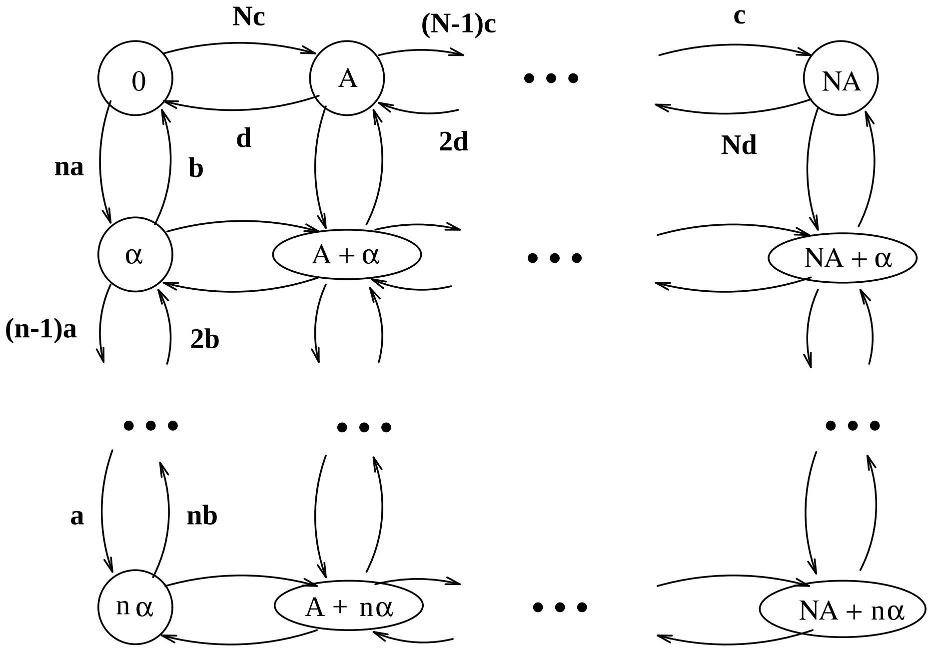
Αν εφαρμόσουμε αυτές τις τιμές στο μοντέλλο μας, θα έχουμε τα παρακάτω χαρακτηριστικά για μία πηγή videotelephone:

- $\Lambda(t) \in [0,\ 18.9]$ Mb/sec,
- $m = 3.81$ Mb/sec, και
- $C(0) = 2.87$ Mb$^2$/sec$^2$.

*Ομως, η δομή της παραπάνω birth–death διεργασίας είναι ακριβώς ίδια με αυτή της επαλληλίας $M$ ίδιων ON/OFF Markov fluids.*

Σε μια μεταγενέστερη εργασία, η ίδια ομάδα επέκτεινε το παραπάνω μοντέλλο, έτσι ώστε να μπορεί να περιγράψει και πηγές video που παρουσιάζουν απότομες μεταβολές σκηνών (π.χ. broadcast television, videoconferencing). [17]
Η βασική τους ιδέα ήταν ότι ο ρυθμός δημιουργίας της κυκλοφορίας $\Lambda(n)$ μπορεί να γραφεί σαν ακέραιος συνδυασμός δύο συγκεκριμένων τιμών $\alpha$ και A. Δηλαδή, ορίζονται

δύο βήματα κβαντισμού, το χαμηλό βήμα $\alpha$ και το υψηλό βήμα Α, όπου το Α χρησιμοποιείται στις απότομες αυξομειώσεις του ρυθμού δημιουργίας. Εδώ ως εφικτή θεωρούμε την αυξομείωση του ρυθμού δημιουργίας κυκλοφορίας μόνο κατά ένα βήμα $\alpha$ ή ένα βήμα Α, υπό τον περιορισμό του ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το πολύ $n$ χαμηλά βήματα $\alpha$ και $N$ υψηλά βήματα Α. Τότε όμως, ο $\bar{\Lambda}(t)$ μπορεί να χαρακτηριστεί από τη συνεχούς χρόνου αλυσίδα Markov του σχήματος 3.3.




Σχήμα 3.3: Ενα μοντέλλο πηγής video, με απότομες μεταβολές σκηνών

*Ομως, και η δομή της παραπάνω αλυσίδας Markov είναι ακριβώς ίδια με αυτή της επαλληλίας $n$ ON/OFF Markov fluids με παραμέτρους ($\alpha$, $1/a$, $1/b$), με $N$ ON/OFF Markov fluids με παραμέτρους (*Α*, $1/c$, $1/d$),* όπου η τριάδα ($\alpha$, $1/\lambda$, $1/\mu$) παριστάνει το μέγιστο ρυθμό δημιουργίας και τους μέσους χρόνους παραμονής στις καταστάσεις OFF και ON αντίστοιχα.

### 3.1.2 Το ‘Autoregressive Markov’ μοντέλλο πηγής

Αυτό το μοντέλλο, που παρουσιάστηκε στο [16], είναι μια continuous state autoregressive Markov διεργασία διακριτού χρόνου, που περιγράφει το ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας μιας πηγής για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα συναρτήσει του ρυθμού δημιουργίας του προηγούμενου χρονικού διαστήματος. Δηλαδή, εάν συμβολίσουμε με $\Lambda(n)$ τον ρυθμό δημιουργίας της κυκλοφορίας στο $n$-οστό πλαίσιο του video, θα έχουμε:

$$\Lambda(n) = a\Lambda(n-1) + bw(\eta)$$

όπου $w(\eta)$ είναι μια ανεξάρτητη Gaussian τυχαία μεταβλητή, με μέση τιμή $\eta$ και διασπορά 1, και $a, b$ είναι σταθερές μεταβλητές, με $a < 1$. Η μέση τιμή $m$ και η αυτοσυνδιασπορά $C(n)$ του ρυθμού δημιουργίας κυκλοφορίας θα δίδονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$m = \frac{b}{(1-a)}\eta,$$

$$C(n) = \frac{b^2}{1-a^2}a^n \qquad n \geq 0 \tag{3.2}$$

Οι Maglaris et al., ταιριάζοντας τη μέση τιμή, τη διασπορά και τη συνδιασπορά του ρυθμού δημιουργίας κυκλοφορίας του μοντέλλου (εκφρασμένου σε bits/pixel) με πραγματικά δεδομένα από τυπικές υπηρεσίες videotelephone (που παράγουν 30 πλαίσια/sec και χρησιμοποιούν 250000 pixels/πλαίσιο με τεχνική κωδικοποίησης την 'conditional replenishment'), προτείνουν τις εξής τιμές για τις σταθερές:

$$\eta \simeq 0.572 \quad , \quad a \simeq 0.8781 \quad , \quad b \simeq 0.1108$$

Αν εφαρμόσουμε αυτές τις τιμές στο μοντέλλο μας, θα έχουμε τα παρακάτω χαρακτηριστικά για μία πηγή videotelephone:

- $\Lambda(n) \in [0.0,\ 10.57]$ Mb/sec,
- $m = 3.89$ Mb/sec, και
- $C(0) = 3.01$ Mb$^2$/sec$^2$.

Αυτό που αξίζει να παρατηρήσουμε είναι ότι τόσο η αυτοσυνδιασπορά των δύο προτεινόμενων μοντέλλων όσο και αυτή που παρατηρήθηκε στα πραγματικά δεδομένα της εργασίας [16] *ακολουθούν μία εκθετική κατανομή*.

## 3.2 Δείκτης μεταβλητότητας μίας πηγής δημιουργίας κυκλοφορίας

Η κυκλοφορία που δημιουργείται από πηγές φωνής και video χαρακτηρίζεται από περιόδους έξαρσης (bursts), κατά τους οποίους οι πηγές μεταδίδουν κελλιά με ρυθμό πολύ κοντά στο μέγιστο (π.χ. στο video αυτό συμβαίνει όταν έχουμε απότομες μεταβολές σκηνών). Η ύπαρξη και η μορφή αυτών των εξάροεων καθορίζει τη μεταβλητότητα της πηγής.

Η εύρεση ενός τρόπου καθορισμού της μεταβλητότητας των πηγών δημιουργίας κυκλοφορίας είναι ένα σημαντικό θέμα στη μελέτη των B-ISDN, καθώς η απαίτηση σε bandwidth της πηγής σχετίζεται άμεσα με τη μεταβλητότητά της. Και αυτό γιατί, όταν μία πηγή έχει σταθερό ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας, τότε αρκεί να της αναθέσουμε bandwidth ίσο με αυτό το ρυθμό. Οταν όμως η πηγή δημιουργεί κυκλοφορία με μεταβλητό ρυθμό, τότε δεν είναι καθόλου προφανές τι ποσότητα bandwidth πρέπει να της αναθέσουμε.

Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι περιγραφής της μεταβλητότητας μιας πηγής, παρατηρώντας το ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας, είναι [13] :

- ο λόγος του μέγιστου προς το μέσο ρυθμό δημιουργίας,
- η διασπορά του ρυθμού δημιουργίας ($\mathrm{var}\{\Lambda(t)\}$), και
- ο τετραγωνικός συντελεστής της μεταβολής του ρυθμού δημιουργίας ($C^2\{\Lambda(t)\}$).

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά τι τιμές παίρνουν αυτές οι μεταβλητές για κάποιες συγκεκριμένες 'ON/OFF Markov fluid' πηγές. Ο μέγιστος ρυθμός αυτών των πηγών παίρνει τις τιμές {1,10} Mb/sec και οι μέσοι χρόνοι παραμονής στην κατάσταση OFF ($\text{Sojourn}_{OFF}$) και ON ($\text{Sojourn}_{ON}$) μπορεί να είναι {0.5, 0.05} και {0.125, 0.0125} sec αντίστοιχα.

Οπως παρατηρούμε, αυτοί οι δείκτες μεταβλητότητας λαμβάνουν ίδιες τιμές για εντελώς διαφορετικές πηγές. Επίσης, παρατηρούμε ότι ούτε και κάποιος συνδυασμός τους δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί (π.χ. η πρώτη και η τέταρτη πηγή, παρόλο που οι

| Peak rate (Mb/s) | Sojourn$_{OFF}$ | Sojourn$_{ON}$ | Peak/Mean rate | var$\{\Lambda(t)\}$ | $C^2\{\Lambda(t)\}$ | $\gamma$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.50 | 0.1250 | 5.0 | 0.1600 | 4.0 | 0.0320 |
| 1 | 0.50 | 0.0125 | 41.0 | 0.0238 | 40.0 | 0.0006 |
| 1 | 0.05 | 0.1250 | 1.4 | 0.2041 | 0.4 | 0.0146 |
| 1 | 0.05 | 0.0125 | 5.0 | 0.1600 | 4.0 | 0.0032 |
| 10 | 0.50 | 0.1250 | 5.0 | 16.0000 | 4.0 | 3.2000 |
| 10 | 0.50 | 0.0125 | 41.0 | 2.3795 | 40.0 | 0.0580 |
| 10 | 0.05 | 0.1250 | 1.4 | 20.4082 | 0.4 | 1.4577 |
| 10 | 0.05 | 0.0125 | 5.0 | 16.0000 | 4.0 | 0.3200 |

Πίνακας 3.1: Ενδεικτικές τιμές των δεικτών μεταβλητότητας για ‘ON/OFF Markov fluid’ πηγές

μέσοι χρόνοι παραμονής τους σε κάθε κατάσταση διαφέρουν κατά μία τάξη μεγέθους, παρουσιάζουν τον ίδιο λόγο μεγίστου προς μέσου ρυθμού, την ίδια διαπορά και τον ίδιο τετραγωνικό συντελεστή της μεταβολής του ρυθμού δημιουργίας).

Αυτά τα προβλήματα παρουσιάζονται γιατί οι παραπάνω τρόποι περιγραφής της μεταβλητότητας μιας πηγής, δε λαμβάνουν υπόψη τους το συσχετισμό που παρουσιάζεται στις διαδοχικές αφίξεις των κελλιών. Στη Στατιστική, ένας κατάλληλος τρόπος χαρακτηρισμού της μεταβλητότητας μιας αυτοσυσχετιζόμενης στοχαστικής διεργασίας είναι ο *δείκτης της διασποράς* (index of dispersion). [18]

### 3.2.1 Ο δείκτης της διασποράς

Εστω ότι ο ρυθμός δημιουργίας κυκλοφορίας μιας πηγής μπορεί να χαρακτηριστεί από την αυτοσυσχετιζόμενη ασθενώς stationary[2] διεργασία $\{X_n,\ n \geq 1\}$, όπου $X_n$ είναι η τυχαία μεταβλητή που περιγράφει τη δημιουργία κελλιών κατά τη διάρκεια του $n$-οστού χρονικού διαστήματος.

Τότε, ο δείκτης διασποράς $\gamma$ της παραπάνω διεργασίας ορίζεται ως εξής :

$$\gamma = \lim_{n \to \infty} (1/n) \mathrm{var} \left( \sum_{j=1}^{n} X_j \right)$$

Για το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο, με μέγιστο ρυθμό δημιουργίας $\alpha$ και μέσους χρόνους παραμονής στις ON και OFF καταστάσεις ίσους με $1/\lambda$ και $1/\mu$ αντίστοιχα, ο δείκτης της διασποράς $\gamma$ έχει δειχθεί στο [1] ότι ισούται με

$$\gamma = \frac{2\lambda\mu\alpha^2}{(\lambda + \mu)^3} \tag{3.3}$$

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά τι τιμές παίρνει το $\gamma$ για κάποιες συγκεκριμένες 'ON/OFF Markov fluid' πηγές, εν αντιθέσει με τους προηγούμενους τρόπους καθορισμού της μεταβλητότητας.

*Ενα σημαντικό πλεονέκτημα του δείκτη διασποράς είναι η δυνατότητα εκτίμησής του από την πραγματική κυκλοφορία στο δίκτυο.* Μία μέθοδος εκτίμησης του δείκτη διασποράς παρουσιάζεται στο επόμενο τμήμα.

### 3.2.2 Μέθοδος εκτίμησης του δείκτη διασποράς

Εστω ότι παρακολουθούμε μία πηγή δημιουργίας κυκλοφορίας για χρόνο $t$ και ότι το διάστημα $(0, t]$ διαιρείται σε $n$ διαδοχικά διαστήματα μήκους $\tau$, με $n\tau = t$. Επίσης, ας

[2]Μία στοχαστική διεργασία $\{X_n,\ n \geq 1\}$ καλείται ασθενώς stationary όταν η μέση τιμή της και η διασπορά της είναι ανεξάρτητες του $n$ και η αυτοσυνδιασπορά της εξαρτάται μόνο από την απόσταση των δύο δειγμάτων, δηλ.

$$C(X_i, X_{i+k}) = C(X_j, X_{j+k}) \quad \forall\ i, j, k$$

συμβολίσουμε με $C(k)$ την αυτοσυνδιασπορά μεταξύ του πλήθους των αφίξεων σε δύο τέτοια διαστήματα, που απέχουν μεταξύ τους $k$ παρόμοια διαστήματα.

Μία προσέγγιση του δείκτη διασποράς δίδεται από την ακόλουθη σχέση [18] :

$$\gamma = \left( C(0) + 2\sum_{k=1}^{\infty} C(k) \right) \cdot \tau \tag{3.4}$$

Επίσης, από τον ορισμό της αυτοσυνδιασποράς, προκύπτει και η ακόλουθη εκτίμηση της $C(k)$ :

$$\begin{aligned} \tilde{C}(k) \;&=\; \frac{1}{(n-k)} \sum_{j=1}^{n-k} \left( \frac{X_j}{\tau} \cdot \frac{X_{j+k}}{\tau} \right) - \frac{1}{(n-k)^2} \left( \sum_{j=1}^{n-k} \frac{X_j}{\tau} \right) \cdot \left( \sum_{j=1}^{n-k} \frac{X_{j+k}}{\tau} \right) \\ &\quad (k = 0, 1, \ldots, n-1) \end{aligned}$$

όπου $X_j$ είναι το πλήθος των αφίξεων που παρατηρήθηκαν στο $j$-στό διάστημα μήκους $\tau$.

Τότε όμως, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, μπορούμε να εκτιμήσουμε το δείκτη διασποράς από την πραγματική κυκλοφορία στο δίκτυο.

Από τη σχέση 3.4, για το 'Autoregressive Markov' μοντέλλο πηγής, μπορούμε να έχουμε και σε κλειστή μορφή το $\gamma$, καθώς από τη σχέση 3.2, ισχύει

$$\sum_{k=1}^{\infty} C(k) = \frac{b^2}{1-a^2} \sum_{k=1}^{\infty} a^k = \frac{b^2}{1-a^2} \cdot \frac{a}{1-a}$$

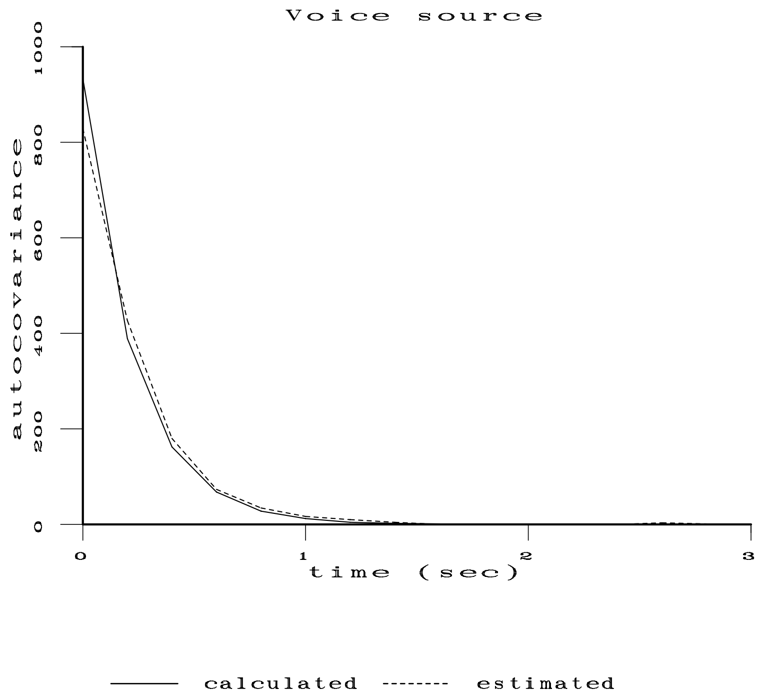
επειδή $a < 1$. Τότε όμως, θα έχω

$$\gamma = \left( \frac{b^2}{1-a^2} + 2 \cdot \frac{b^2}{1-a^2} \cdot \frac{a}{1-a} \right) \cdot \tau = \left( \frac{b}{1-a} \right)^2 \cdot \tau \tag{3.5}$$

Στα σχήματα 3.4, 3.5 και 3.6 επαληθεύεται η μέθοδος εκτίμησης της αυτοσυνδιασποράς και, κατά συνέπεια, του δείκτη διασποράς.

Στο σχήμα 3.4, απεικονίζονται η αυτοσυνδιασπορά $C$ και η εκτίμησή της $\tilde{C}$ συναρτήσει του χρόνου, για μία πηγή φωνής που χαρακτηρίζεται από το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο και ο ρυθμός δημιουργίας της κυκλοφορίας της εκφράζεται σε Kb/sec. Η πηγή παρατηρήθηκε για 10 λεπτά και το βήμα της δειγματοληψίας ήταν 0.2 sec.

Επίσης, στα σχήματα 3.5 και 3.6 απεικονίζονται η αυτοσυνδιασπορά $C$ και η εκτίμησή

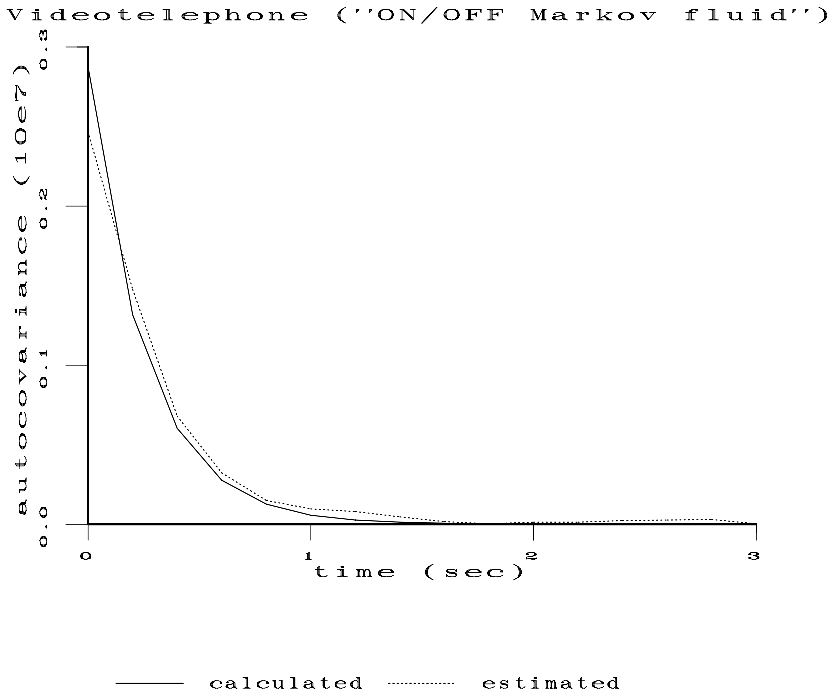



Σχήμα 3.4: Η υπολογιζόμενη και η εκτιμώμενη αυτοσυνδιασπορά μιας πηγής φωνής

της $\tilde{C}$ συναρτήσει του χρόνου, για μία πηγή videotelephone που χαρακτηρίζεται από την επαλληλία 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλων και από το 'Autoregressive Markov' μοντέλλο αντίστοιχα. Ο ρυθμός δημιουργίας της κυκλοφορίας τους εκφράζεται σε Kb/sec. Η πηγές παρατηρήθηκαν για 20 λεπτά και, στην πρώτη πηγή η δειγματοληψία γινόταν κάθε 0.2 sec., ενώ στη δεύτερη ο ρυθμός παραγωγής πλαισίων video ήταν 30 πλαίσια/sec.

Στα σχήματα 3.7, 3.8 και 3.9, δίδεται μία εικόνα του χρόνου που απαιτείται για να έχουμε ακριβή εκτίμηση του δείκτη διασποράς. Και για τις τρείς πηγές, χρησιμοποιήσαμε 50 διαφορετικές σειρές δειγμάτων που προέκυψαν θέτοντας, στα προγράμματα προσομοίωσης των πηγών, τη γεννήτρια ψευδοτυχαίων τιμών σε διαφορετικά σημεία εκκίνησης.

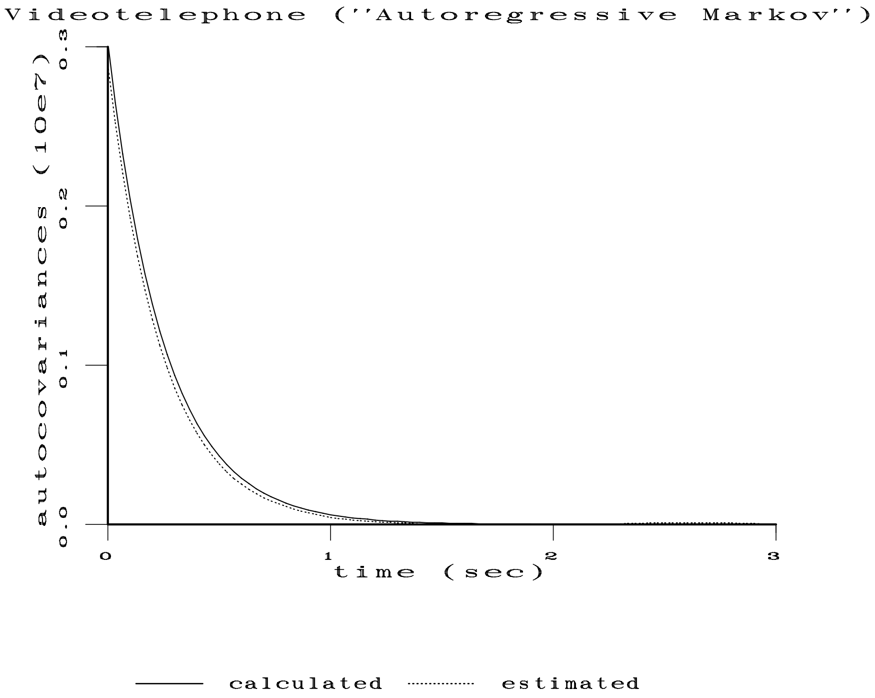
Για την πηγή φωνής, παρατηρούμε ότι απαιτείται τουλάχιστον ένα λεπτό για να έχουμε 95% επιτυχία στην εκτίμησή μας (δηλ. για να ισχύει $|\frac{\tilde{C}-C}{C}| \leq 0.05$), ενώ ήδη από τα πρώτα 30 sec η εκτίμησή μας είχε περίπου 90% επιτυχία.




Σχήμα 3.5: Η υπολογιζόμενη και η εκτιμώμενη αυτοσυνδιασπορά μιας πηγής videotelephone, που προσεγγίζεται με τη χρήση του 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλου

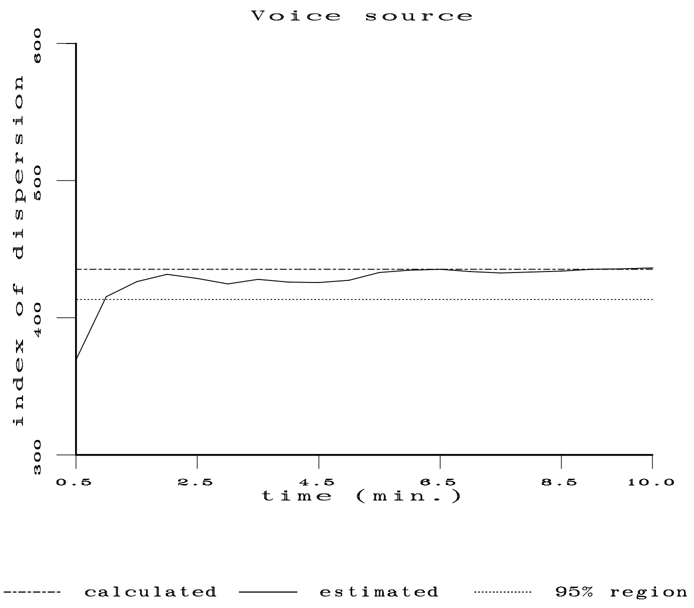
Για την πηγή videotelephone, που προσεγγίζεται με τη χρήση του 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλου, παρατηρούμε ότι απαιτούνται περίπου 10 λεπτά για να έχουμε 95% επιτυχία στην εκτίμησή μας, ενώ στα πρώτα λεπτά λαμβάναμε μία εντελώς λανθασμένη εκτίμηση.

Για την πηγή videotelephone, που προσεγγίζεται με τη χρήση του 'Autoregressive Markov' μοντέλλου, παρατηρούμε ότι δεν έχουμε ποτέ 95% επιτυχία στην εκτίμησή μας, αλλά με την πάροδο του χρόνου αυτή συγκλίνει σε μία τιμή που είναι το 0.92 του υπολογιζόμενου δείκτη διασποράς. Αυτό οφείλεται στο ότι, ενώ ο ρυθμός δημιουργίας κυκλοφορίας του μοντέλλου δύναται να πάρει αρνητικές τιμές, αυτό δεν το επιτρέπουμε στην προσομοίωση. Πράγματι, στη γεννήτρια κυκλοφορίας που προσομοιώνει τη συμπεριφορά του μοντέλλου, μηδενίζουμε το ρυθμό δημιουργίας που συναντάται αρνητικός. Πάντως, και σε αυτό το μοντέλλο, βλέπουμε ότι απαιτούνται μερικά λεπτά παρατήρησης

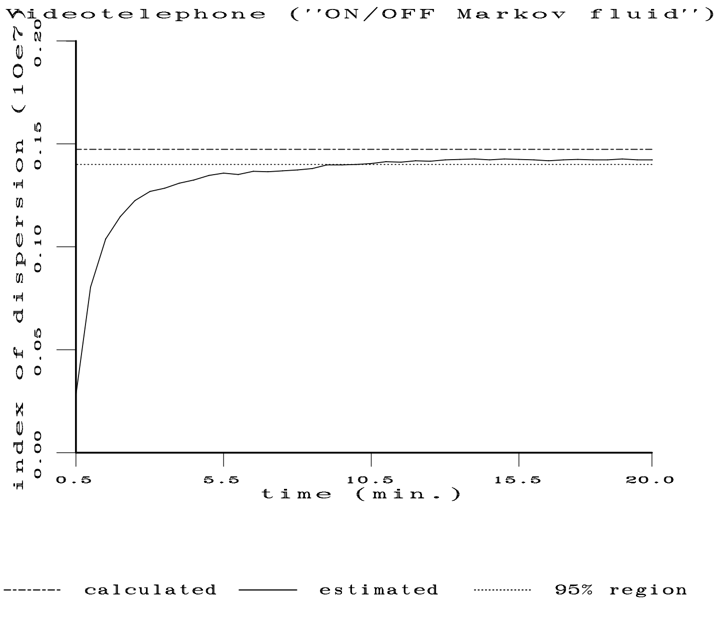



Σχήμα 3.6: Η υπολογιζόμενη και η εκτιμώμενη αυτοσυνδιασπορά μιας πηγής videotelephone, που προσεγγίζεται με τη χρήση του ‘Autoregressive Markov’ μοντέλλου

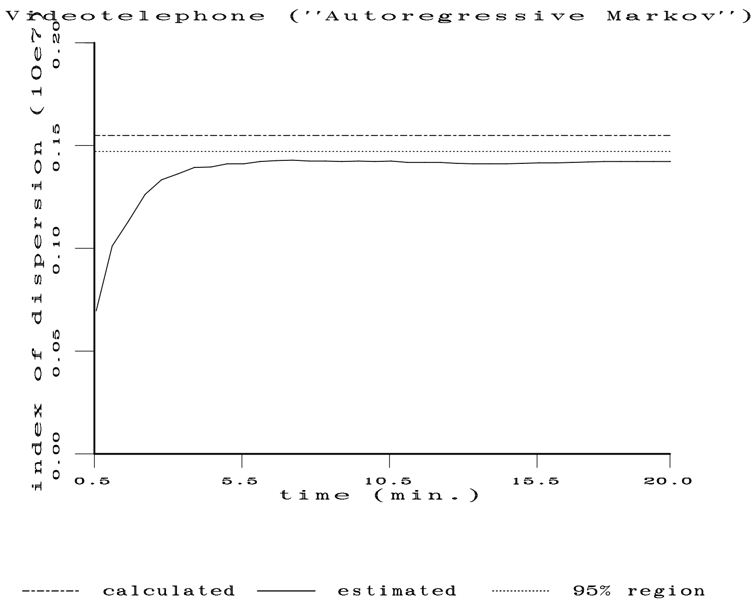
της πηγής videotelephone για να μην λάβουμε εντελώς λανθασμένη εκτίμηση του δείκτη διασποράς.




Σχήμα 3.7: Η εκτίμηση του δείκτη διασποράς ως προς τον χρόνο για μία πηγή φωνής




Σχήμα 3.8: Η εκτίμηση του δείκτη διασποράς ως προς τον χρόνο για μία πηγή videotelephone, που προσεγγίζεται με τη χρήση του 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλου




Σχήμα 3.9: Η εκτίμηση του δείκτη διασποράς ως προς τον χρόνο για μία πηγή videotelephone, που προσεγγίζεται με τη χρήση του 'Autoregressive Markov' μοντέλλου

# Κεφάλαιο 4

# Ελεγχος Αποδοχής Κλήσης

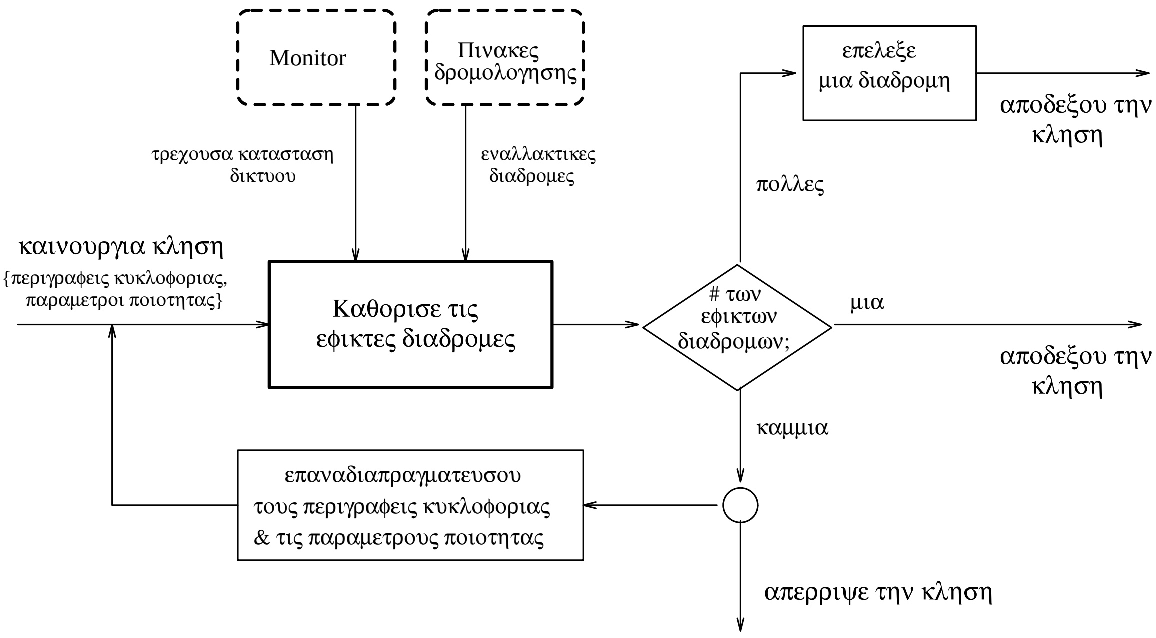
Ας θεωρήσουμε ένα B-ISDN δίκτυο, του οποίου ο μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης έχει τη μορφή του σχήματος 2.9. Οταν μία κλήση υπηρεσίας πραγματικού χρόνου επιθυμεί να εξυπηρετηθεί απ' αυτό, θα απευθύνεται στον *Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης* (call acceptance control - **CAC**), προσδιορίζοντας τους περιγραφείς κυκλοφορίας της και τις QoS παραμέτρους της.

Ο Ελεγχος Αποδοχής Κλήσης, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παραμέτρους και την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, καθορίζει τις εφικτές διαδρομές, απ' το σύνολο των εναλλακτικών διαδρομών (alternate routes) που μπορεί να διατρέξει η κλήση. Μία διαδρομή καλείται εφικτή όταν, η προσθήκη της εξυπηρέτησης της καινούργιας κλήσης στους μεταγωγείς της διαδρομής, δεν προκαλεί υποβάθμιση των παρεχομένων υπηρεσιών στο δίκτυο.

Εάν οι εφικτές διαδρομές είναι περισσότερες από μία, τότε ο CAC αποδέχεται την κλήση, επιλέγοντας και τη διαδρομή που θα ακολουθήσει.

Εάν δεν υπάρχει εφικτή διαδρομή, τότε ο CAC ή επαναδιαπραγματεύεται τους περιγραφείς κυκλοφορίας και τις QoS παραμέτρους της κλήσης ή απορρίπτει την κλήση (βλέπε σχήμα 4.1).

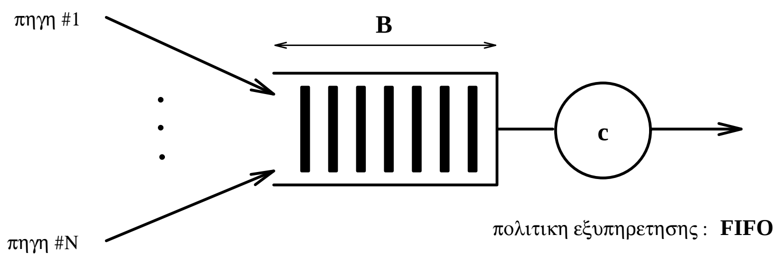
Είναι προφανές ότι ο CAC πρέπει να λαμβάνει την απόφασή του, για το αν θα δεχθεί ή όχι την κλήση στο δίκτυο, σε πραγματικό χρόνο.




Σχήμα 4.1: Ο Ελεγχος Αποδοχής Κλήσης

Γενικά, το σύνολο των φορτίων κυκλοφορίας που ενδέχεται να ανατεθούν σ' ένα μεταγωγέα, μπορεί να διαμεριστεί σε δύο υποσύνολα. Σε κείνα τα φορτία κυκλοφορίας που, όταν ανατεθούν στο μεταγωγέα, ικανοποιούν τις QoS απαιτήσεις των εξυπηρετούμενων υπηρεσιών ("καλά" σημεία), και σε κείνα τα φορτία που δεν τις ικανοποιούν ("κακά" σημεία). Το πρώτο υποσύνολο ορίζεται ως *περιοχή αποδοχής* (acceptance region) του μεταγωγέα. Εάν η περιοχή αποδοχής περιγράφεται απλά, τότε, για τον καθορισμό των εφικτών διαδρομών, ο CAC χρειάζεται μόνο να εκτιμήσει εάν η προσθήκη μιας καινούργιας κλήσης σ' ένα μεταγωγέα θα τον αναγκάσει να λειτουργήσει μέσα ή έξω από την περιοχή αποδοχής του.

Σ' αυτό το κεφάλαιο περιγράφουμε τα πιο σημαντικά, κατά τη γνώμη μας, αναλυτικά αποτελέσματα, που έχουν παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια στη βιβλιογραφία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περιγραφή της περιοχής αποδοχής ενός μεταγωγέα, δίδοντας έμφαση σ' ένα πολύ πρόσφατο αποτέλεσμα των Courcoubetis και Weber. Το μοντέλλο του μεταγωγέα, που χρησιμοποιείται σε όλα αυτά τα αποτελέσματα, απεικονίζεται στο σχήμα 4.2. Οι πηγές, κατά την άφιξή τους στο μεταγωγέα, πολυπλέκονται και αποθηκεύονται σ' έναν ενταμιευτή μεγέθους $B$, ο οποίος εξυπηρετείται με πολιτική FIFO και με σταθερό ρυθμό $c$.




Σχήμα 4.2: Το μοντέλλο του μεταγωγέα

## 4.1 Η $(m, \sigma^2)$ περιοχή αποδοχής

Σ' αυτή την κατηγορία αποτελεσμάτων, το φορτίο ενός μεταγωγέα εκφράζεται ως συνάρτηση της μέσης τιμής και της διασποράς του ρυθμού δημιουργίας κυκλοφορίας των πηγών που διέρχονται από αυτόν. Εδώ παρουσιάζονται δύο τέτοια αποτελέσματα, των Courcoubetis, Walrand και των Kãs, Kleinewillinghõfer-Kopp, στα οποία έχουν επικρατήσει οι ακόλουθες παραδοχές. Στο μεν πρώτο θεωρείται ότι οι πηγές είναι i.i.d. Gaussian, ενώ στο δεύτερο θεωρείται ότι η επαλληλία των πηγών είναι Gaussian.

### 4.1.1 Οταν οι πηγές είναι i.i.d. Gaussian

Εστω ότι $N$ ανεξάρτητες πηγές, των οποίων η κατανομή του ρυθμού δημιουργίας κυκλοφορίας είναι κανονική με μέση τιμή $m_i$ και διασπορά $\sigma_i^2$ (δηλ. $\Lambda_i(t)\,\tilde{}\,\mathrm{N}(m_i,\ \sigma_i^2)\ ,\ \ i = 1, \ldots, N$), εξυπηρετούνται από το μεταγωγέα του σχήματος 4.2. Επίσης, ας θεωρήσουμε ότι το QoS κριτήριο των πηγών είναι το ακόλουθο :

$$Pr\{\text{ υπερχείληση του ενταμιευτή }\} \quad \leq \quad \mathrm{e}^{-\delta}$$

Τότε, οι Courcoubetis και Walrand έχουν δείξει στο [19], ότι, για μεγάλο ενταμιευτή, η ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα όταν ισχύει η εξής ανισότητα

$$\sum_{i=1}^{N} m_i + \frac{\delta}{2B} \sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2 \quad \leq \quad c$$

### 4.1.2 Οταν η επαλληλία των πηγών είναι Gaussian

Εστω ότι $N$ πηγές, με μέση τιμή και διασπορά του ρυθμού δημιουργίας ίσες με $m_i$ και $\sigma_i^2$ αντίστοιχα, εξυπηρετούνται με σταθερό ρυθμό $c$. Εάν ο ρυθμός δημιουργίας της επαλληλίας αυτών των πηγών έχει κανονική κατανομή, με μέση τιμή $\left(\sum_{i=1}^{N} m_i\right)$ και διασπορά $\left(\sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2\right)$, και το QoS κριτήριο είναι

$$Pr\{ \text{ ρυθμός δημιουργίας της επαλληλίας των πηγών} > c \} \leq \epsilon$$

τότε, οι Kãs και Kleinewillinghõfer-Kopp έχουν δείξει στο [20], ότι η ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα όταν το φορτίο του μεταγωγέα ικανοποιεί την ακόλουθη ανισότητα

$$\sum_{i=1}^{N} m_i + f_\epsilon \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2} \quad \leq \quad c \tag{4.1}$$

όπου $f_\epsilon$ είναι το $\epsilon$-fractile[1] της τυπικής κανονικής κατανομής N$(0, 1)$, και μία προσέγγισή του είναι η εξής [21] :

$$f_\epsilon \simeq \sqrt{-2\ln(\epsilon) - \ln(2\pi)}$$

Κατά την εφαρμογή αυτού του αποτελέσματος, πρέπει να παρακολουθείται ο ολικός ρυθμός δημιουργίας κυκλοφορίας, έτσι ώστε να ελέγχεται η περίπτωση κατά την οποία δεν ισχύει η παραδοχή της κανονικής κατανομής. Τυπικά αυτό συμβαίνει όταν εξυπηρετούνται λίγες πηγές με μεγάλο μέγιστο ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας και με μεγάλες περιόδους έξαρσης.

[1] Εστω ότι $X$ είναι μια τυχαία μεταβλητή με τυπική κανονική κατανομή, δηλ. $X \sim$ N$(0, 1)$. Τότε η ακόλουθη σχέση περιγράφει το $\epsilon$-fractile

$$Pr\{ X \geq \sigma \} \; < \; \epsilon \quad \Leftrightarrow \quad f_\epsilon \; \leq \; \sigma$$

*Επειδή*

$$Pr\{\text{ υπερχείληση του ενταμιευτή }\} \leq Pr\{\text{ ολικός ρυθμός δημιουργίας } > c\ \},$$

*η σχέση 4.1 θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν κάτω φράγμα του επιτρεπτού φορτίου στο μεταγωγέα, όταν το QoS κριτήριο είναι*

$$Pr\{\text{ υπερχείληση του ενταμιευτή }\} \leq \epsilon \quad .$$

## 4.2 Effective bandwidth

Ας υποθέσουμε ότι μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις πηγές δημιουργίας κυκλοφορίας σε $J$ διαφορετικές κλάσεις, όπου ως κλάση θεωρούμε μία ομάδα πηγών με ομοειδή χαρακτηριστικά κυκλοφορίας (π.χ. η κλάση φωνής). Εάν $n_j$ είναι το πλήθος των κλήσεων που πολυπλέκονται στο μεταγωγέα από κάθε κλάση $j$, $j = 1, \ldots, J$, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα κριτήρια απόδοσης των υπηρεσιών τηρούνται, όταν ισχύει η ακόλουθη ανισότητα :

$$\sum_{j=1}^{J} n_j E_j \leq c$$

όπου $E_j$ είναι το *effective bandwidth* της πηγής κλάσεως $j$, το οποίο, εκτός από τα χαρακτηριστικά κυκλοφορίας της πηγής, πρέπει να εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του μεταγωγέα και από τα κριτήρια απόδοσης. Αξίζει να τονιστεί ότι, σύμφωνα με τον ορισμό, το effective bandwidth μιας πηγής $i$ είναι **ανεξάρτητο** από τα χαρακτηριστικά των άλλων πηγών, των οποίων τα κελλιά εξυπηρετούνται ταυτόχρονα με τα κελλιά της πηγής $i$ από τον μεταγωγέα.

Εάν ισχύει η έννοια του effective bandwidth για τις πηγές που εξυπηρετούνται από ένα μεταγωγέα, τότε το φορτίο κυκλοφορίας του θα εκφράζεται ως συνάρτηση του πλήθους $n_j$ των εξυπηρετούμενων κλήσεων από κάθε κλάση $j$.
Σ' αυτό το τμήμα παρουσιάζονται τρείς τρόποι καθορισμού του effective bandwidth. Στον πρώτο, των Gibbens και Hunt [22], υπολογίζεται το effective bandwidth για το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο. Στον δεύτερο, οι Kesidis και Walrand [23], και

στον τρίτο, οι Courcoubetis και Weber [1], προσεγγίζουν το effective bandwidth για οποιαδήποτε stationary πηγή δημιουργίας κυκλοφορίας.

### 4.2.1 Υπολογισμός του effective bandwidth για 'ON/OFF Markov fluids'

Εστω ότι ο μεταγωγέας του σχήματος 4.2 τροφοδοτείται από πηγές $J$ διαφορετικών κλάσεων, και ότι $n_j$ είναι το πλήθος των πηγών κλάσεως $j$, $j = 1, \ldots, J$. Εάν κάθε πηγή κλάσεως $j$ χαρακτηρίζεται από το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο, με μέγιστο ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας ίσο με $\alpha_j$ και με μέσους χρόνους παραμονής στις καταστάσεις OFF και ON ίσους με $1/\lambda_j$ και $1/\mu_j$ αντίστοιχα, τότε οι Gibbens και Hunt έχουν αποδείξει στο [22] το ακόλουθο θεώρημα :

**Θεώρημα** (Gibbens και Hunt)
*Εστω*

$$\mathcal{A}(B,p) = \{\mathbf{n} = (n_1, \ldots, n_J) \quad : \quad Pr\{\text{μήκος ουράς στον ενταμιευτή} \ \geq \ B\} \ \leq \ p\}$$

*Ας υποθέσουμε ότι* $B \to \infty$ και $\frac{\log p}{B} \to \zeta \ \in \ (-\infty, 0]$. *Επιπλέον, έστω*

$$\mathcal{A} = \left\{ \mathbf{n} \quad : \quad \sum_{j=1}^{J} E_j(\zeta) n_j \ < \ c \right\}$$

*και*

$$\bar{\mathcal{A}} = \left\{ \mathbf{n} \quad : \quad \sum_{j=1}^{J} E_j(\zeta) n_j \ \leq \ c \right\}$$

*όπου*

$$E_j(\zeta) = \frac{\zeta\alpha_j + \mu_j + \lambda_j - \sqrt{(\zeta\alpha_j + \mu_j - \lambda_j)^2 + 4\lambda_j\mu_j}}{2\zeta} \tag{4.2}$$

*Τότε*

$$\mathcal{A} \ \subseteq \ \mathcal{A}(B,p) \ \subseteq \ \bar{\mathcal{A}}$$

Από αυτό το θεώρημα, που δίδει τον τύπο υπολογισμού του effective bandwidth μιας πηγής τύπου $j$ (σχέση 4.2), προκύπτουν και οι ακόλουθες παρατηρήσεις :

1. Θέτοντας $\zeta = 0$ έχουμε
$$E_j(\zeta) = \frac{\lambda_j \alpha_j}{\lambda_j + \mu_j}.$$
Δηλαδή, το κάτω φράγμα του effective bandwidth μιας πηγής είναι ο μέσος ρυθμός δημιουργίας της. Η εξήγηση σ' αυτό είναι ότι ο χρόνος που απαιτείται για να έχουμε υπερχείληση του ενταμιευτή είναι τόσο μεγάλος, ώστε η κάθε πηγή να εναλλάσεται μεταξύ της ON και της OFF κατάστασης πάρα πολλές φορές. Οπότε, μπορούμε να πούμε ότι, ο ενταμιευτής "χωνεύει" τις διακυμάνσεις του ρυθμού δημιουργίας κυκλοφορίας των πηγών και έτσι φαίνεται ότι οι πηγές εκπέμπουν στο μέσο ρυθμό δημιουργίας των.

2. Εάν $\zeta = -\infty$, τότε $E_j(\zeta) = \alpha_j$. Δηλαδή, το άνω φράγμα του effective bandwidth μιας πηγής είναι ο μέγιστος ρυθμός δημιουργίας της. Σ' αυτή την περίπτωση, η πηγή έχει τόσο υψηλό βαθμό μεταβλητότητας που, για να επιτύχουμε την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας, θα πρέπει να θεωρούμε ότι εκπέμπει συνεχώς με το μέγιστο ρυθμό της.

### 4.2.2 Προσέγγιση του effective bandwidth για stationary πηγές

Δύο διαφορετικοί τύποι υπολογισμού του effective bandwidth για stationary πηγές δημιουργίας κυκλοφορίας παρουσιάστηκαν σχεδόν ταυτόχρονα το φθινόπωρο του '92. Για την έκδοση και των δύο αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η θεωρία της large deviation[2].

[2] Εστω $S_n = (1/n) \cdot \sum_j y_j$. Αρκετά συχνά συμβαίνει η $Pr\{|S_n - c| > \varepsilon\}$ να τείνει στο μηδέν με εκθετικό τρόπο. Δηλαδή,

$$Pr\{|S_n - c| > \varepsilon\} = \mathrm{K}(\varepsilon, c, n) \cdot \exp(-n \cdot \mathrm{I}(\varepsilon, c))$$

Η θεωρία της large deviation χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ποσοτήτων $\mathrm{I}(\cdot,\cdot)$ (κατά κύριο λόγο) και $\mathrm{K}(\cdot,\cdot,\cdot)$.

### Μέθοδος των Kesidis και Walrand

Στο [23], οι Kesidis και Walrand θεωρούν ότι ένας μεταγωγέας, χωρητικότητας $c$ και με ενταμιευτή απείρου μεγέθους, τροφοδοτείται από $n_j$ ανεξάρτητες stationary αυτοσυσχετιζόμενες πηγές κλάσεως $j$, $j = 1, \ldots, J$. Συμβολίζουμε με $\alpha_j$ το μέγιστο ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας μιας πηγής κλάσεως $j$ και με $X$ το πλήθος των πακέτων που βρίσκονται στον ενταμιευτή κατά την άφιξη ενός πακέτου.

Εάν το κριτήριο απόδοσης είναι

$$Pr\{X > B\} \leq \exp(-B\delta)$$

τότε ισχύει ότι

$$\sum_{j=1}^{J} n_j E_j \leq c$$

όπου το effective bandwidth $E_j$ είναι εκείνη η τιμή του $a$ που ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση

$$\inf_{M_j \in \mathbf{A}_j(a)} \frac{H_j(M_j)}{M_j - a} = \delta$$

με

$$\mathbf{A}_j(a) := \{M_j \ : \ a < M_j < \alpha_j\}$$

και $H_j$ είναι μια αυστηρά κυρτή και μη-αρνητική συνάρτηση.

Δυστυχώς, μία γενική αναλυτική έκφραση για την $H_j$ δεν υπάρχει. Ο καθορισμός της στηρίζεται στην αμοιβαία εντροπία της πηγής δημιουργίας κυκλοφορίας με μία αλυσίδα Markov. Στην ειδική περίπτωση που η πηγή χαρακτηρίζεται από το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο, το effective bandwidth που υπολογίζεται από τον τύπο των Kesidis-Walrand είναι ακριβώς το ίδιο με αυτό των Gibbens-Hunt.

### Μέθοδος των Courcoubetis και Weber

Στο [1], οι Courcoubetis και Weber χρησιμοποιούν το ίδιο μοντέλλο με αυτό της προηγούμενης μεθόδου. Επιπλέον, θεωρούν ότι τη χρονική στιγμή $k$, μία πηγή κλάσεως $j$ δημιουργεί πλήθος πακέτων, τα οποία κατανέμονται ως $X_k^j$, όπου $\{X_1^j, X_2^j, \ldots\}$ είναι μια stationary στοχαστική διεργασία, που χαρακτηρίζεται από συσχετιζόμενες τυχαίες μεταβλητές.

Εάν το κριτήριο απόδοσης είναι

$$Pr\{\text{ υπερχείληση του ενταμιευτή }\} \le \exp(-\delta)$$

τότε ισχύει ότι

$$\sum_{j=1}^{J} n_j \mathrm{E}_j \le c$$

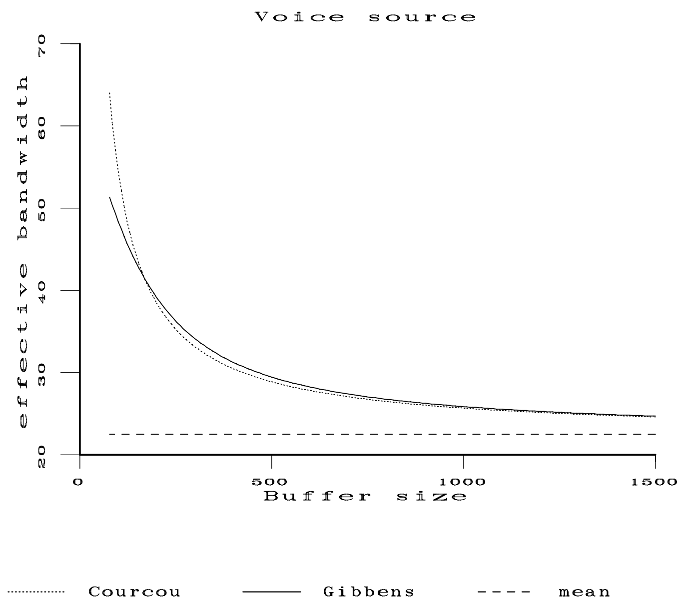
όπου

$$\mathrm{E}_j = m_j + \frac{\delta}{2B} \cdot \gamma_j + o(1/B) \tag{4.3}$$

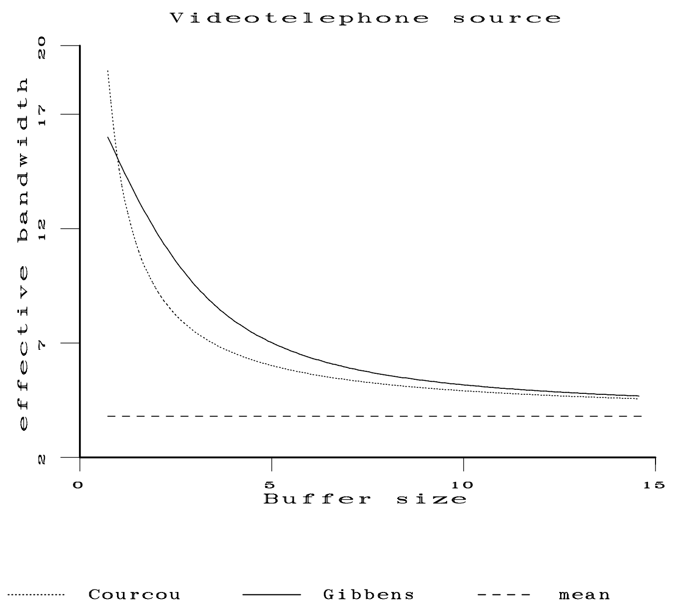
με $m_j$ να είναι ο μέσος ρυθμός δημιουργίας κυκλοφορίας της πηγής κλάσεως $j$ και $\gamma_j = \lim_{n\to\infty}(1/n)\mathrm{var}\left(\sum_{i=1}^{n} X_i^j\right)$ να είναι ο δείκτης διασποράς για την πηγή τύπου $j$ που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.
Ο όρος $o(1/B)$ ορίζεται ως εξής : $\frac{o(1/B)}{1/B} \to 0$ καθώς $1/B \to 0$.

Εκτός της απλότητάς του, *η σπουδαιότητα του παραπάνω τύπου υπολογισμού του effective bandwidth έγκειται και στο γεγονός ότι τόσο για το $m_j$ όσο και για το $\gamma_j$ μπορεί να υπάρξει μία ακριβής εκτίμηση της τιμής τους από δείγματα της πραγματικής κυκλοφορίας στο δίκτυο.* Και αυτό, γιατί είναι σχεδόν απίθανο να υπάρξει τόσο ισχυρό θεωρητικό μοντέλλο που να μπορέσει να χαρακτηρίσει όλες τις υπάρχουσες, αλλά και τις μελλοντικές, πηγές δημιουργίας κυκλοφορίας.

Στα σχήματα 4.3 και 4.4 απεικονίζονται τα effective bandwidths, που υπολογίζονται από τους τύπους 4.2 (των Gibbens-Hunt) και 4.3 (των Courcoubetis-Weber), σε σχέση με το μέγεθος του ενταμιευτή για την πηγή φωνής και videotelephone αντίστοιχα, που χαρακτηρίζονται από το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο. Η μέγιστη επιτρεπτή πιθανότητα υπερχείλησης του ενταμιευτή είναι 0.0000003 ($\simeq \mathrm{e}^{-15}$) και ο ρυθμός δημιουργίας εκφράζεται σε Kb/s για την πηγή φωνής και σε Mb/s για την πηγή videotelephone. Παρατηρούμε ότι τα δύο effective bandwidths παρουσιάζουν αρχικά διαφορετικές τιμές αλλά, όσο μεγαλώνει το μέγεθος του ενταμιευτή, συγκλίνουν σε μία τιμή κοντά στο μέσο ρυθμό δημιουργίας (κάτι που αναμένουμε άλλωστε).




Σχήμα 4.3: Το ακριβές effective bandwidth και η προσέγγισή του, για την πηγή φωνής που χαρακτηρίζεται από το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο




Σχήμα 4.4: Το ακριβές effective bandwidth και η προσέγγισή του, για την πηγή videotelephone που χαρακτηρίζεται από το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο

Τα παραπάνω σχήματα, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της large deviation έχουν εφαρμογή στον ασυμπτωτικό χώρο, όπου το μέγεθος του ενταμιευτή είναι μεγάλο και η πιθανότητα υπερχείλησής του μικρή, με προτρέπουν στο να ελέγξω την ορθότητα και την πρακτική σπουδαιότητα της σχέσης 4.3, στο επόμενο τμήμα του κεφαλαίου.

### 4.2.3 Ελεγχος ορθότητας της μεθόδου προσέγγισης του effective bandwidth

Σ' αυτό το μέρος της εργασίας επιχειρείται ένας έλεγχος ορθότητας της μεθόδου των Courcoubetis και Weber, κατά την οποία προσεγγίζεται το effective bandwidth μιας πηγής με τη χρήση του δείκτη διασποράς.

Ο έλεγχος βασίζεται στα αναλυτικά αποτελέσματα του [15], όπου οι Anick, Mitra και Sondhi παρουσίασαν μία μέθοδο υπολογισμού της πιθανότητας υπερχείλησης του ενταμιευτή ενός μεταγωγέα χωρητικότητας $c$, που τροφοδοτείται από $N$ όμοιες 'ON/OFF Markov fluid' πηγές. Αυτή η μέθοδος παρουσιάζεται περιληπτικά στο Παράρτημα Α, όπου επίσης παράγεται και ένα τύπος υπολογισμού της πιθανότητας υπερχείλησης όταν ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από μία μόνο πηγή.

Συγκεκριμένα, εξετάζονται τα παρακάτω ερωτήματα :

1. Βρίσκεται πάντοτε η προσέγγιση του effective bandwidth μιας πηγής μεταξύ του μέσου και του μέγιστου ρυθμού δημιουργίας κυκλοφορίας της;

2. Είναι δυνατόν να λάβουμε κατώτερη, από την αναμενόμενη, ποιότητα υπηρεσίας στο δίκτυο, εάν χρησιμοποιούμε τις προσεγγίσεις των effective bandwidths στον Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης;

3. Εξαρτάται η πιθανότητα υπερχείλησης του ενταμιευτή από το πλήθος των υπηρεσιών που εξυπηρετούνται ταυτόχρονα στον μεταγωγέα, εάν χρησιμοποιούμε τις προσεγγίσεις των effective bandwidths στον Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης;

**Ερώτημα πρώτο**

Από τις σχέσεις 4.3 και 3.3, προκύπτει ότι το effective bandwidth μιας 'ON/OFF Markov fluid' πηγής, με μέγιστο ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας ίσο με $\alpha$ και μέσους χρόνους παραμονής στην ON και OFF κατάσταση ίσους με $1/\mu$ και $1/\lambda$ αντίστοιχα, μπορεί να προσεγγισθεί από την εξής σχέση :

$$E = \frac{\lambda\alpha}{\lambda+\mu} + \frac{\delta}{B}\cdot\frac{\lambda\mu\alpha^2}{(\lambda+\mu)^3} \tag{4.4}$$

όπου η μέγιστη επιτρεπτή πιθανότητα υπερχείλησης είναι $\mathrm{e}^{-\delta}$ και το μέγεθος του ενταμιευτή είναι $B$.

Οπως έχουμε αναφέρει, το effective bandwidth μιας πηγής θα πρέπει να λαμβάνει τιμή μεταξύ του μέσου και του μέγιστου ρυθμού δημιουργίας κυκλοφορίας. Δηλαδή, θα πρέπει να ισχύει

$$\frac{\lambda\alpha}{\lambda+\mu} + \frac{\delta}{B}\cdot\frac{\lambda\mu\alpha^2}{(\lambda+\mu)^3} \quad\leq\quad \alpha \quad\Leftrightarrow\quad B \quad\geq\quad \delta\cdot\frac{m}{\lambda+\mu}$$

όπου $m$ είναι ο μέσος ρυθμός δημιουργίας κυκλοφορίας της πηγής.

Στην παραπάνω έκφραση ο όρος $(\lambda+\mu)$ είναι ο ολικός ρυθμός εναλλαγής κατάστασεων της πηγής (total transition rate) και ο αντίστροφός του $(1/(\lambda+\mu))$ αναφέρεται ως η *σταθερά χρόνου* της 'ON/OFF Markov fluid' πηγής. Οσο πιο μεγάλη είναι η σταθερά χρόνου της πηγής, τόσο λιγότερες είναι και οι εναλλαγές καταστάσεων της πηγής στη μονάδα του χρόνου.

Οπότε, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι, για να λαμβάνει λογικές τιμές η προσέγγιση του effective bandwidth, *το μέγεθος του ενταμιευτή πρέπει να είναι πολλαπλάσιο της μέσης ποσότητας πληροφορίας που παράγεται σε διάστημα ίσο με τη σταθερά χρόνου της πηγής.*

**Ερώτημα δεύτερο**

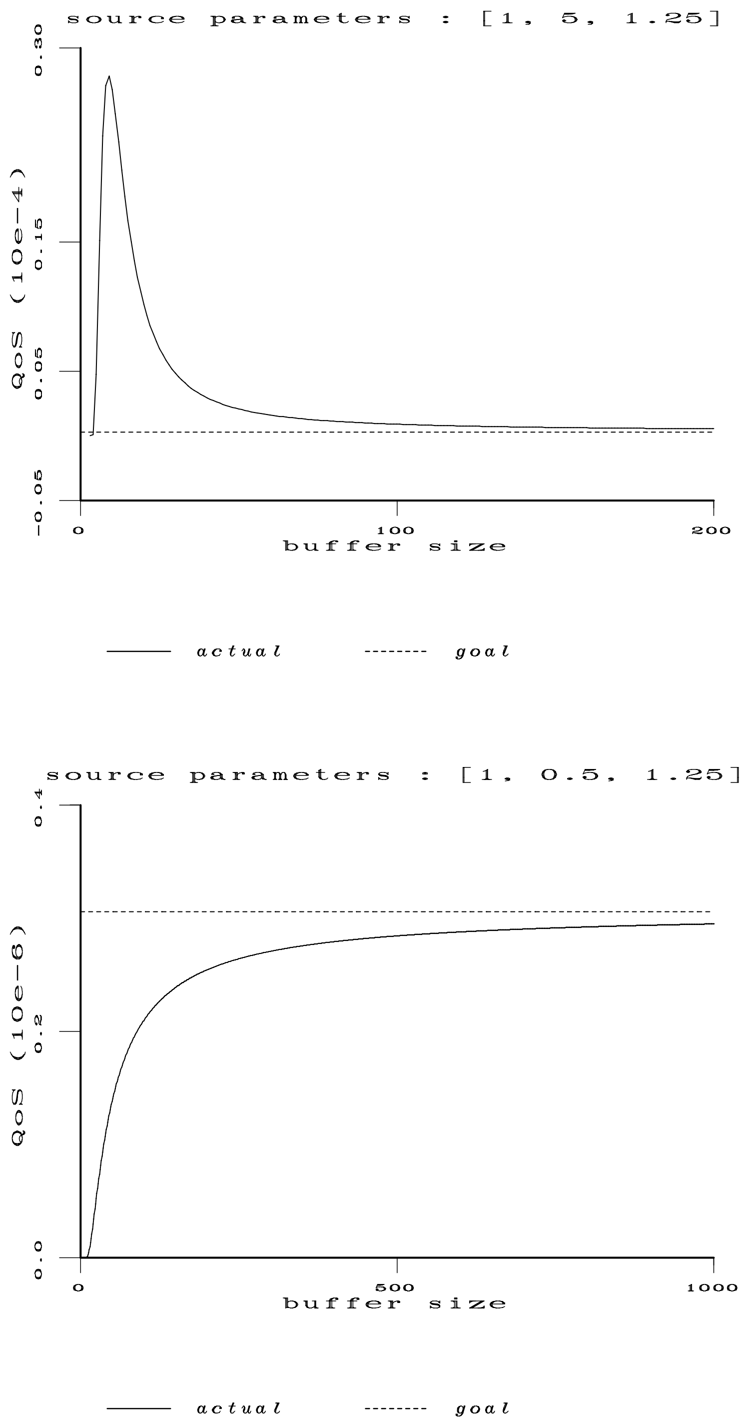
Στο παράρτημα Α έχουμε δείξει ότι η πιθανότητα υπερχείλησης ενός ενταμιευτή μεγέθους Β, που εξυπηρετείται με σταθερό ρυθμό $c$ και τροφοδοτείται από μία μόνο 'ON/OFF Markov fluid' πηγή, δίδεται από την ακόλουθη σχέση :

$$G(B) = \frac{\lambda}{1+\lambda}\cdot\frac{1}{c}\cdot\mathrm{e}^{-\frac{1+\lambda-\lambda/c}{1-c}B}$$

όπου $1/\lambda$ είναι ο μέσος χρόνος παραμονής στην ανενεργή κατάσταση. Υπενθυμίζουμε ότι σαν μονάδα χρόνου θεωρείται ο μέσος χρόνος παραμονής στην ON κατάσταση και σαν μονάδα πληροφορίας θεωρείται η ποσότητα που παράγεται από την πηγή όταν βρίσκεται σε μία τυπική ενεργή περίοδο.

Εάν η προσέγγιση του effective bandwidth είναι ορθή, τότε θέτοντας στην παραπάνω σχέση το ρυθμό εξυπηρέτησης του μεταγωγέα ίσο με το effective bandwidth της σχέσης 4.4, θα πρέπει να επιτυγχάνεται η επιθυμητή QoS. Δηλαδή, θα πρέπει η πιθανότητα υπερχείλησης του ενταμιευτή να είναι πάντα μικρότερη του $\mathrm{e}^{-\delta}$.
Για να το ελέγξουμε αυτό, υπολογίσαμε το $G(B)$ για μία μεγάλη ποικιλία από 'ON/OFF Markov fluid' πηγές. Ο μέγιστος ρυθμός αυτών των πηγών μπορεί να παίρνει τις τιμές $\{0.1,\ 1,\ 10\}$ Mb/sec και οι μέσοι χρόνοι παραμονής στην κατάσταση OFF και ON μπορεί να είναι $\{5,\ 0.5,\ 0.05\}$ και $\{1.25,\ 0.125,\ 0.0125\}$ sec αντίστοιχα. Η μέγιστη επιτρεπτή πιθανότητα υπερχείλησης του ενταμιευτή είναι 0.0000003 ($\simeq \mathrm{e}^{-15}$).

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 4.5 είναι αντιπροσωπευτικά των δύο διαφορετικών μορφών που μπορεί να λάβει η πιθανότητα υπερχείλησης, όταν ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από μία μόνο πηγή και η χωρητικότητα του ισούται με την προσέγγιση του effective bandwidth αυτής.
Παρατηρούμε ότι, για μερικές πηγές, η πιθανότητα υπερχείλησης λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από τη μέγιστη επιτρεπτή και κατόπιν συγκλίνει ασυμπτωτικά σ' αυτή. Ενώ, για κάποιες άλλες πηγές, η πιθανότητα υπερχείλησης δεν υπερβαίνει ποτέ τη μέγιστη επιτρεπτή και συγκλίνει επίσης ασυμπτωτικά σ' αυτή.
Οπότε, πρέπει να εξετάσουμε για ποιές παραμέτρους του 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλου μπορούμε να βεβαιώσουμε ότι επιτυγχάνεται πάντα η επιθυμητή QoS. Αυτό μπορούμε να το απαντήσουμε βρίσκοντας εκείνες τις παραμέτρους του μοντέλλου, για τις οποίες η παράγωγος της πιθανότητας υπερχείλησης είναι πάντοτε θετική.




Σχήμα 4.5: Οι διαφορετικές μορφές της λαμβανόμενης πιθανότητας υπερχείλησης, όταν ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από μία μόνο πηγή και η χωρητικότητα του ισούται με την προσέγγιση του effective bandwidth αυτής

Η παράγωγος της πιθανότητας υπερχείλησης $G(B)$ ενός ενταμιευτή μεγέθους B, που τροφοδοτείται από μία μόνο 'ON/OFF Markov fluid' πηγή και εξυπηρετείται με ρυθμό ίσο με την προσέγγιση του effective bandwidth αυτής, δίδεται από την ακόλουθη σχέση

$$\frac{\partial G(B)}{\partial B} = x \cdot \frac{1}{c} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{z-\lambda/c}{1-c}B} \cdot \left[\frac{y}{cB^2} + \frac{\lambda y}{c^2(1-c)B} + \frac{y(z-\lambda/c)}{(1-c)^2 B} - \frac{z-\lambda/c}{1-c}\right]$$

όπου $1/\lambda$ είναι ο μέσος χρόνος παραμονής στην ανενεργή κατάσταση, $\mathrm{e}^{-\delta}$ είναι η μέγιστη επιτρεπτή πιθανότητα υπερχείλησης και

$$x = \frac{\lambda}{\lambda+1}, \quad y = \frac{\delta\lambda}{(\lambda+1)^3}, \quad z = \lambda + 1, \quad c = x + y/B$$

Η παραπάνω έκφραση της παραγώγου είναι μία συνάρτηση των $\lambda$, $B$ και $\delta$. Υπολογίζοντας την παράγωγο για $\lambda \in [0.01,\ 100.]$, $B \in$ [μέσο ρυθμό δημιουργίας, $10000\times$ μέγιστο ρυθμό δημιουργίας] και $\delta = 15$, παρατηρούμε ότι λαμβάνει μόνο θετικές τιμές όταν $\lambda \geq 0.67$.

Αυτό που αξίζει να παρατηρήσουμε είναι ότι, για $0.38 \leq \lambda \leq 0.67$, μπορεί μεν η πιθανότητα υπερχείλησης να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μέγιστης επιτρεπτής, αλλά πάντοτε βρίσκεται στη περιοχή όπου έχουμε 95% επιτυχία, δηλ. όπου η λαμβανόμενη πιθανότητα δεν υπερβαίνει περισσότερο από 5% τη μέγιστη επιτρεπτή.

Επειδή στην παραπάνω ανάλυση θεωρήθηκε σαν μονάδα χρόνου ο μέσος χρόνος παραμονής στην ενεργή κατάσταση, η έκφραση $\lambda \geq k$ ισοδυναμεί με

$$\frac{(\text{μέσος χρόνος παραμονής στην ενεργή κατάσταση})}{(\text{μέσος χρόνος παραμονής στην ανενεργή κατάσταση})} \geq k$$

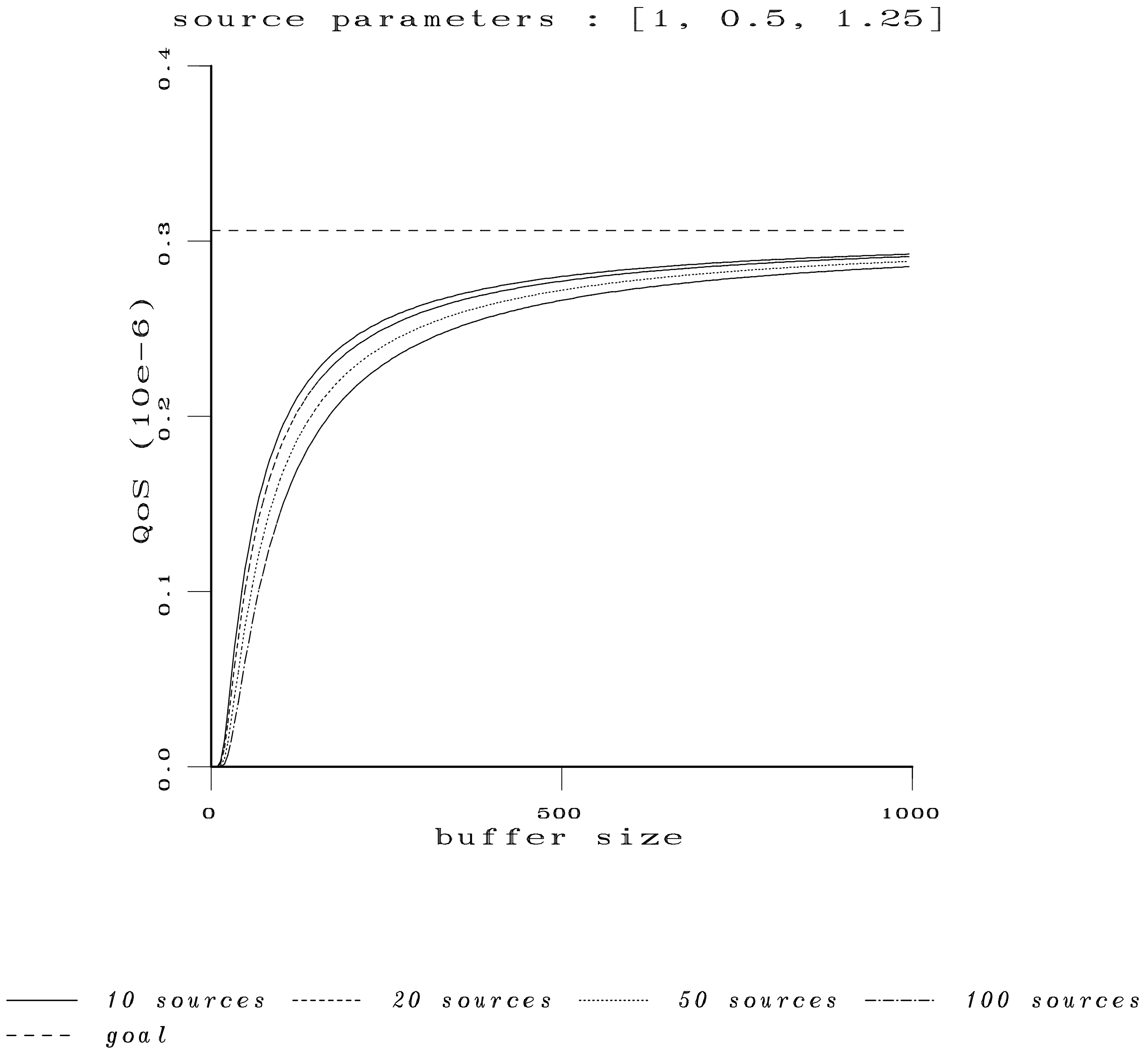
Οπότε, μπορούμε να εκφράσουμε τον ακόλουθο εμπειρικό κανόνα :

*Οταν οι πηγές δημιουργίας κυκλοφορίας δεν παραμένουν ανενεργές για χρονικά διαστήματα πολλαπλάσια της διάρκειας των ενεργών περιόδων, τότε η χρησιμοποίηση των προσεγγίσεων των effective bandwidths στον Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης μας εγγυάται την τήρηση της επιθυμητής ποιότητας υπηρεσιών στο δίκτυο.*

**Ερώτημα τρίτο**

Σύμφωνα με τον ορισμό του effective bandwidth, η πιθανότητα υπερχείλησης του ενταμιευτή ενός μεταγωγέα δεν πρέπει να εξαρτάται από το πλήθος των υπηρεσιών που εξυπηρετούνται απ' αυτόν, όταν χρησιμοποιήθηκαν τα effective bandwidths κατά τον έλεγχο αποδοχής των κλήσεων.
Για να ελέγξουμε αν ισχύει αυτή η ιδιότητα όταν το effective bandwidth προσεγγίζεται με τη χρήση του δείκτη διασποράς, χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο των Anick, Mitra και Sondhi και υπολογίσαμε την πιθανότητα υπερχείλησης για 10, 20, 50 και 100 όμοιες 'ON/OFF Markov fluid' πηγές, θέτοντας τη χωρητικότητα του μεταγωγέα ίση με το αντίστοιχο άθροισμα των προσεγγίσεων των effective bandwidths των πηγών. Ο μέγιστος ρυθμός αυτών των πηγών μπορεί να παίρνει τις τιμές $\{0.1,\ 1,\ 10\}$ Mb/sec και οι μέσοι χρόνοι παραμονής στην κατάσταση OFF και ON μπορεί να είναι $\{5,\ 0.5,\ 0.05\}$ και $\{1.25,\ 0.125,\ 0.0125\}$ sec αντίστοιχα (φυσικά εξαιρούνται οι περιπτώσεις που δεν ικανοποιούν τον εμπειρικό κανόνα του προηγούμενου ερωτήματος). Η μέγιστη επιτρεπτή πιθανότητα υπερχείλησης του ενταμιευτή είναι 0.0000003 ($\simeq \mathrm{e}^{-15}$).

Το διάγραμμα του σχήματος 4.6, όπου παρουσιάζεται η πιθανότητα υπερχείλησης ως προς το μέγεθος του ενταμιευτή, είναι αντιπροσωπευτικό για όλους τους παραπάνω τύπους πηγών. Παρατηρούμε ότι, εάν θέσουμε τη χωρητικότητα του μεταγωγέα ίση με το άθροισμα των προσεγγίσεων των effective bandwidths των πηγών που πολυπλέκονται σ' αυτόν, τότε η συμπεριφορά της λαμβανόμενης πιθανότητας υπερχείλησης ως προς το μέγεθος του ενταμιευτή δεν εξαρτάται από το πλήθος αυτών των πηγών. Οπότε, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι και *η χρήση της προσέγγισης του effective bandwidth μιας πηγής στον Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης μας δίδει πιθανότητα υπερχείλησης ενταμιευτή ανεξάρτητη του πλήθους των υπηρεσιών που εξυπηρετούνται ταυτόχρονα στο μεταγωγέα.*




Σχήμα 4.6: Η πιθανότητα υπερχείλησης ως προς το μέγεθος του ενταμιευτή, όταν ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από 10, 20, 50 και 100 πηγές και η χωρητικότητα του ισούται με το άθροισμα των προσεγγίσεων των effective bandwidths αυτών

# Κεφάλαιο 5

# Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάσαμε κάποια σημαντικά αναλυτικά αποτελέσματα, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περιγραφή της περιοχής αποδοχής ενός ATM μεταγωγέα, δίδοντας έμφαση σ' ένα πολύ πρόσφατο αποτέλεσμα, το οποίο δεν εξαρτάται από κάποιο συγκεκριμένο μοντέλλο πηγής.
Σύμφωνα μ' αυτό το αποτέλεσμα, το effective bandwidth μιας πηγής δημιουργίας κυκλοφορίας μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας μόνο το μέσο ρυθμό της και το δείκτη διασποράς της, δηλαδή από μεταβλητές που μπορούν να εκτιμηθούν από την πραγματική κυκλοφορία στο δίκτυο.

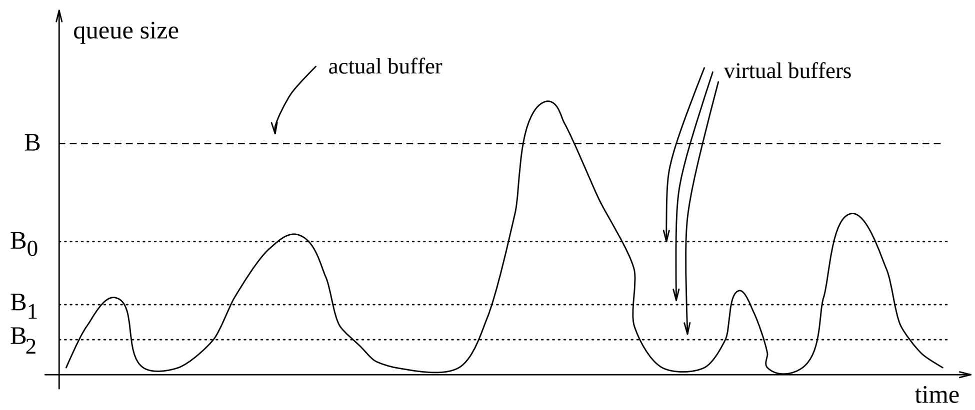
Υλοποιώντας τη μέθοδο υπολογισμού της πιθανότητας υπερχείλησης του ενταμιευτή ενός μεταγωγέα, όταν τροφοδοτείται από όμοιες 'ON/OFF Markov fluid' πηγές, που παρουσιάζεται στο παράρτημα Α, επιχειρήσαμε ένα έλεγχο ορθότητας του παραπάνω αποτελέσματος. Είδαμε ότι, η χρησιμοποίηση της προσέγγισης του effective bandwidth στην περιγραφή της περιοχής αποδοχής ενός μεταγωγέα, μας παρέχει ένα συντηρητικό Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης, αρκεί η πηγή να μην παραμένει ανενεργή για μεγάλα χρονικά διαστήματα, σε σχέση με τις ενεργές περιόδους της.

Θέλοντας να επεκτείνουμε τον έλεγχο ορθότητας, προσομοιώσαμε τη συμπεριφορά ενός ATM μεταγωγέα, όταν αυτός τροφοδοτείται από διαφορετικές 'ON/OFF Markov fluid' πηγές και από πηγές που χαρακτηρίζονται από το 'Autoregressive Markov' μοντέλλο. Για να μειώσουμε το χρόνο που απαιτείται για να έχουμε ακριβή εκτίμηση της λαμβανόμενης πιθανότητας υπερχείλησης, υλοποιήσαμε μία τεχνική που παρουσιάζεται στο [2], την οποία και περιγράφουμε.

Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου, για τη σύγκριση των διαφόρων μεθόδων Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης, παρουσιάζουμε το μέγιστο δυνατό ποσοστό χρησιμοποίησης ενός μεταγωγέα για κάθε μία από αυτές τις μεθόδους, όταν αυτός τροφοδοτείται με κυκλοφορία που αντιστοιχεί σε πραγματικές πηγές φωνής και video.

## 5.1 Η τεχνική επιτάγχυνσης των προσομοιώσεων

Στο [2] παρουσιάζεται μία τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσουμε το χρόνο που απαιτείται για να έχουμε ακριβή εκτίμηση της λαμβανόμενης πιθανότητας υπερχείλησης. Η βασική της ιδέα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1, όπου απεικονίζεται η διακύμανση της ουράς που αναπτύσσεται στον ενταμιευτή του μεταγωγέα.




Σχήμα 5.1: Η βασική ιδέα της τεχνικής επιτάγχυνσης των προσομοιώσεων

Στον ενταμιευτή, μεγέθους $B$, του μεταγωγέα αντιστοιχίζουμε τρείς μικρότερους ιδεατούς ενταμιευτές, μεγέθους $B/k_0$, $B/k_1$ και $B/k_2$ αντίστοιχα. Παρατηρώντας τη διακύμανση της ουράς που αναπτύσσεται στο πραγματικό σύστημα, εκτιμούμε τις πιθανότητες υπερχείλησης του κάθε ιδεατού ενταμιευτή, τις οποίες και συμβολίζουμε με $G_0$, $G_1$ και $G_2$ αντίστοιχα. Επειδή οι ιδεατοί ενταμιευτές είναι μικρότεροι από τον πραγματικό, αυτές οι πιθανότητες υπερχείλησης είναι πολύ μεγαλύτερες από την πιθανότητα υπερχείλησης του πραγματικού ενταμιευτή, και συνεπώς μπορούν να εκτιμηθούν επακριβώς σε αρκετά μικρότερο χρόνο. Κατόπιν, χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο, λαμβάνουμε την πιθανότητα υπερχείλησης $G$ του πραγματικού ενταμιευτή από τις πιθανότητες υπερχείλησης των ιδεατών ενταμιευτών :

$$\log G = l_0 \log G_0 + l_1 \log G_1 + l_2 \log G_2$$

όπου

$$l_0 = e_0 + \xi a_{2,1}, \quad l_1 = \xi a_{0,2}, \quad l_2 = e_2 + \xi a_{1,0}$$

και

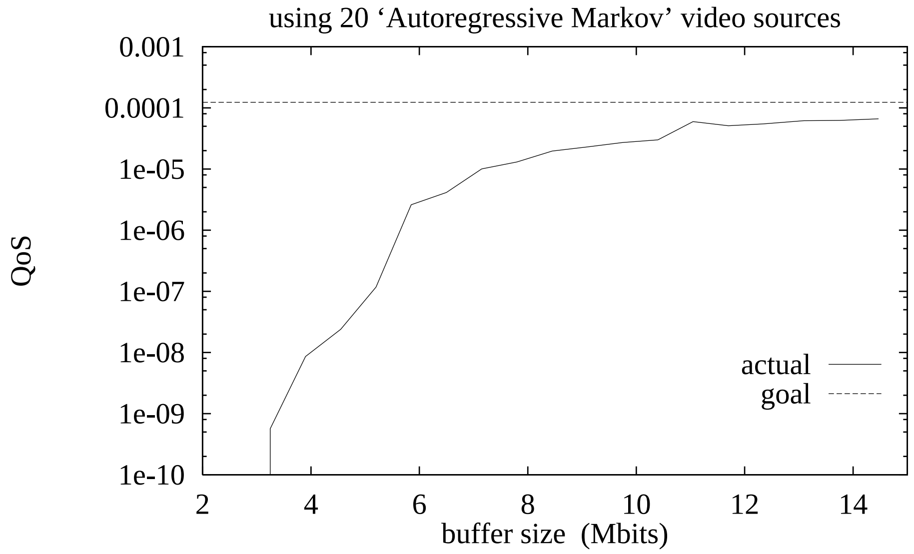
$$e_0 = \frac{-k_0(k_2-1)}{k_0-k_2}, \quad e_2 = \frac{k_2(k_0-1)}{k_0-k_2}$$
$$a_{i,j} = \frac{1}{k_i} - \frac{1}{k_j}, \quad i,j = 0,1,2$$
$$\xi = \log\left(k_0^{e_0} k_2^{e_2}\right) / \log\left(k_0^{a_{1,2}} k_1^{a_{2,0}} k_2^{a_{0,1}}\right)$$

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι η παραπάνω τεχνική επιτάγχυνσης της εκτίμησης της πιθανότητας υπερχείλησης δεν εξαρτάται από κάποια συγκεκριμένα μοντέλλα για τις πηγές δημιουργίας κυκλοφορίας.

## 5.2 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων

Θέλοντας να ελέγξουμε αν ο Ελεγχος Αποδοχής Κλήσης διατηρεί τη συντηρητική του μορφή, όταν ο μεταγωγέας τροφοδοτείται είτε από ανόμοιες 'ON/OFF Markov fluid' πηγές, είτε από πηγές που χαρακτηρίζονται από το 'Autoregressive Markov' μοντέλλο πηγής, προσομοιώσαμε τη συμπεριφορά του μεταγωγέα του σχήματος 4.2 και εκτελέσαμε εκτεταμένα πειράματα για μια μεγάλη ποικιλία μορφών κυκλοφορίας. Σε κάθε πείραμα, το μέγεθος του ενταμιευτή ήταν τέτοιο ώστε, τα effective bandwidths των πηγών που τροφοδοτούσαν τον μεταγωγέα, να λαμβάνουν πάντα τιμές μικρότερες από το μέγιστο ρυθμό τους. Επίσης, η χωρητικότητα του μεταγωγέα θέτονταν ίση με το άθροισμα των προσεγγίσεων των effective bandwidths των πηγών.

Εδώ παρουσιάζουμε αποτελέσματα που εξήχθησαν όταν τροφοδοτούσαμε το μεταγωγέα με κυκλοφορία που αντιστοιχεί σε πραγματικές πηγές φωνής και video. Συγκεκριμένα στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η λαμβανόμενη πιθανότητα υπερχείλησης σε σχέση με το μέγεθος του ενταμιευτή, όταν οι πηγές χαρακτηρίζονται με το ‘Autoregressive Markov’ μοντέλλο και η κυκλοφορία τους αντιστοιχεί σε 20 πηγές videotelephone. Επίσης, στα σχήματα 5.3 και 5.4 απεικονίζονται αποτελέσματα, όταν οι πηγές χαρακτηρίζονται με το ‘ON/OFF Markov fluid’ μοντέλλο και η κυκλοφορία τους αντιστοιχεί στην επαλληλία 5 ή 10 πηγών videotelephone με 10 ή 100 πηγές φωνής.




Σχήμα 5.2: Η πιθανότητα υπερχείλησης ως προς το μέγεθος του ενταμιευτή, όταν ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από 20 πηγές videotelephone, που χαρακτηρίζονται με το ‘Autoregressive Markov’ μοντέλλο

Οπως βλέπουμε σ’ αυτά τα διαγράμματα, και για την περίπτωση κατά την οποία ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από κυκλοφορία που αντιστοιχεί σε πραγματικές πηγές φωνής και video, η χρησιμοποίηση των προσεγγίσεων των effective bandwidths στον Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης μας εγγυάται πιθανότητα υπερχείλησης μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπτή.

Ετσι, μπορούμε να πούμε ότι, *η προσέγγιση του effective bandwidth μιας πηγής δημιουργίας κυκλοφορίας υπερεκτιμά τις πραγματικές απαιτήσεις της σε bandwidth.*

Ομως, ορισμένες φορές, αυτή η υπερεκτίμηση παρουσιάζεται υπερβολική, καθώς η λαμβανόμενη πιθανότητα υπερχείλησης είναι τάξεις μεγέθους μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπτή. Αυτό, ενδεχομένως, μπορεί να διορθωθεί χρησιμοποιώντας ως κάτω φράγμα του επιτρεπτού φορτίου ενός μεταγωγέα το αποτελέσμα των Kãs και Kleinewillinghõfer-Kopp, που παρουσιάζεται στην §3.1.2 (υπενθυμίζουμε ότι σ' αυτό το αποτέλεσμα, το φορτίο ενός μεταγωγέα εκφράζεται συναρτήσει της μέσης τιμής και της διασποράς του ρυθμού δημιουργίας κυκλοφορίας των πηγών, δηλαδή από μεταβλητές που μπορούν επίσης να εκτιμηθούν από την πραγματική κυκλοφορία στο δίκτυο).

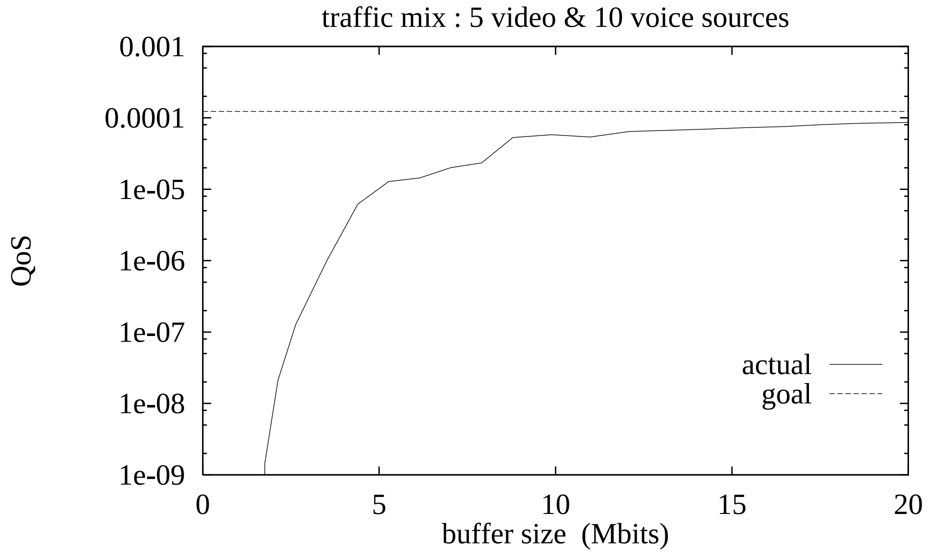
Για να το ελέγξουμε αυτό, χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο που παρουσιάζεται στο παράρτημα Α, και υπολογίσαμε το μέγιστο δυνατό ποσοστό χρησιμοποίησης ενός ATM μεταγωγέα για κάθε μία από αυτές τις μεθόδους, τροφοδοτώντας τον με κυκλοφορία που αντιστοιχεί σε πραγματικές πηγές φωνής ή video. Για να έχουμε μία πλήρη εικόνα, υπολογίσαμε επίσης την πραγματική τιμή του μέγιστου δυνατού ποσοστού χρησιμοποίησης, αλλά και αυτό που λαμβάνουμε όταν χρησιμοποιήσουμε το ακριβές effective bandwidth (αποτέλεσμα των Gibbens-Hunt, §3.2.1) ή το μέγιστο ρυθμό δημιουργίας κυκλοφορίας στον Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης.

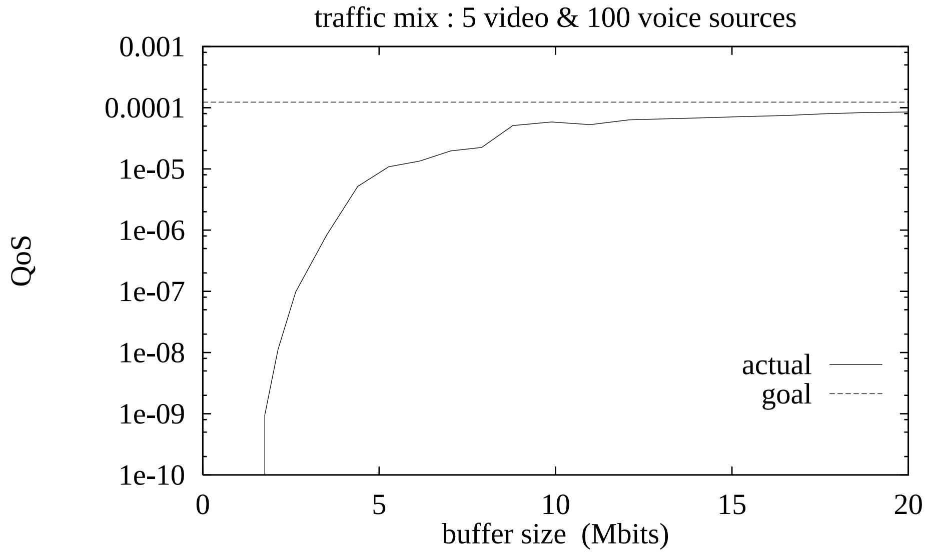
Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζεται το μέγιστο δυνατό ποσοστό χρησιμοποίησης ενός ATM μεταγωγέα, χωρητικότητας 4 Mb/s, ως προς το μέγεθος του ενταμιευτή. Ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από όμοιες 'ON/OFF Markov fluid' πηγές, οι παράμετροι των οποίων αντιστοιχούν σε πραγματικές πηγές φωνής. Το ίδιο και στο σχήμα 5.6, με τη διαφορά ότι η χωρητικότητα του μεταγωγέα είναι τώρα 25 Mb/s και τροφοδοτείται από πηγές που συνθέτουν, με την επαλληλία τους, πραγματικές πηγές videotelephone.

Οπως παρατηρούμε από αυτά τα διαγράμματα, *για πηγές με παραμέτρους που αντιστοιχούν σε πραγματικές πηγές φωνής ή videotelephone, το αποτέλεσμα των Kãs και Kleinewillinghõfer-Kopp μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμπληρωματικό του αποτελέσματος των Courcoubetis και Weber, καθώς προσδιορίζει ένα καλό κάτω φράγμα του μέγιστου επιτρεπτού φορτίου ενός μεταγωγέα.*

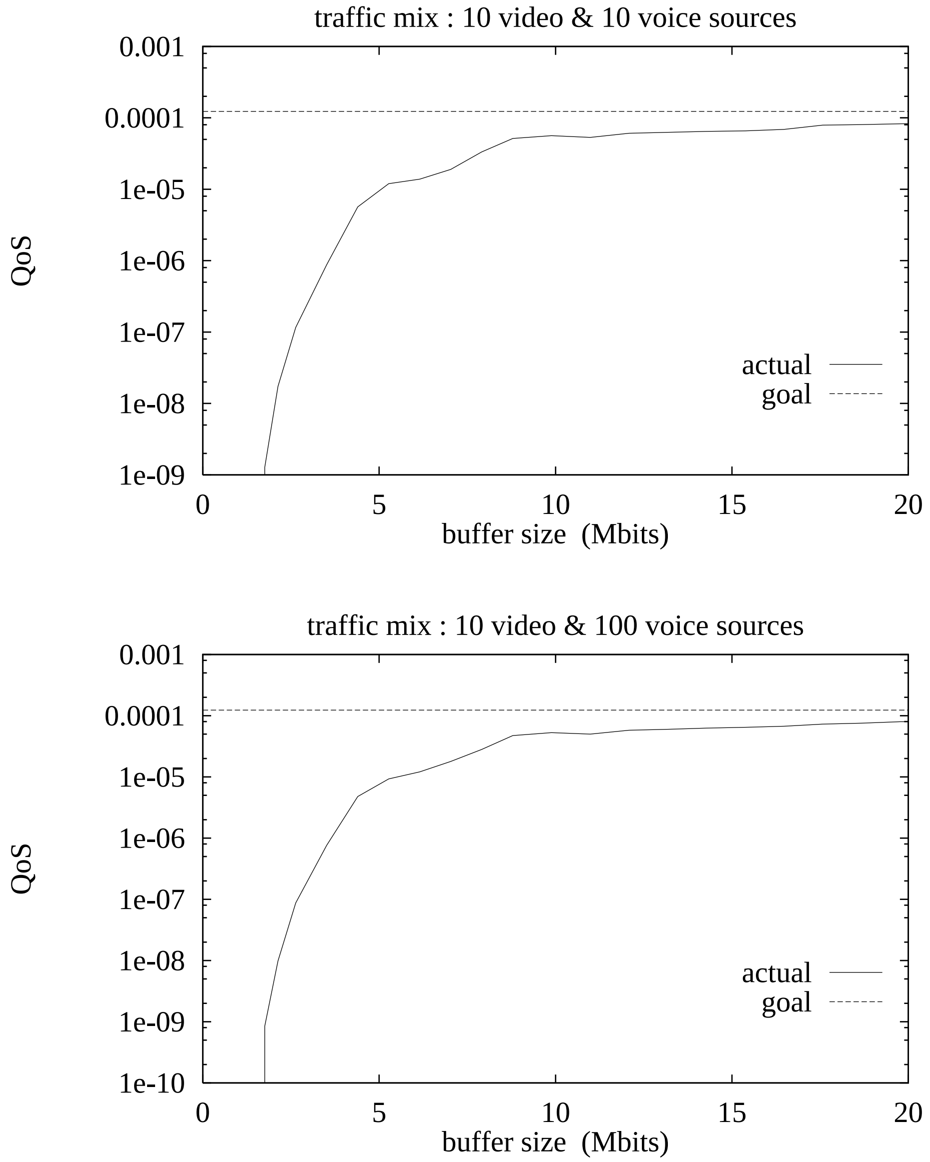
Επίσης, παρατηρούμε ότι, για τις μεθόδους με τα effective bandwidths, το μέγιστο δυνατό ποσοστό χρησιμοποίησης του μεταγωγέα συγκλίνει ασυμπτωτικά στην πραγματική του τιμή. Αυτό είναι κάτι που το περιμέναμε γιατί, ασυμπτωτικά, το effective bandwidth συγκλίνει στο μέσο ρυθμό δημιουργίας της πηγής.

Εκείνο όμως που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι το ότι, στα παραπάνω πειράματα, λαμβάνουμε καλύτερο ποσοστό χρησιμοποίησης με τη προσέγγιση παρά με την ακριβή τιμή του effective bandwidth. Καθώς δεν μπορέσαμε να δώσουμε μία απάντηση στα πλαίσια αυτής της εργασίας, το ερώτημα αυτό αφήνεται για μελλοντική διερεύνηση.

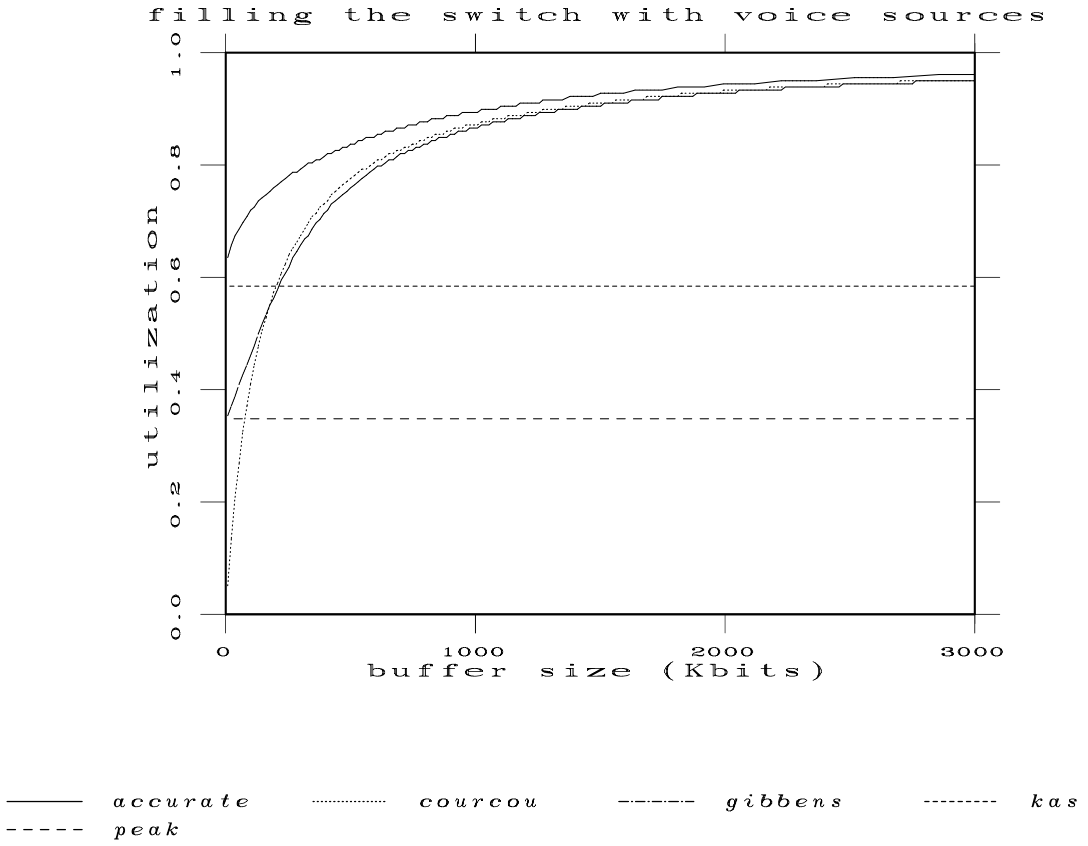


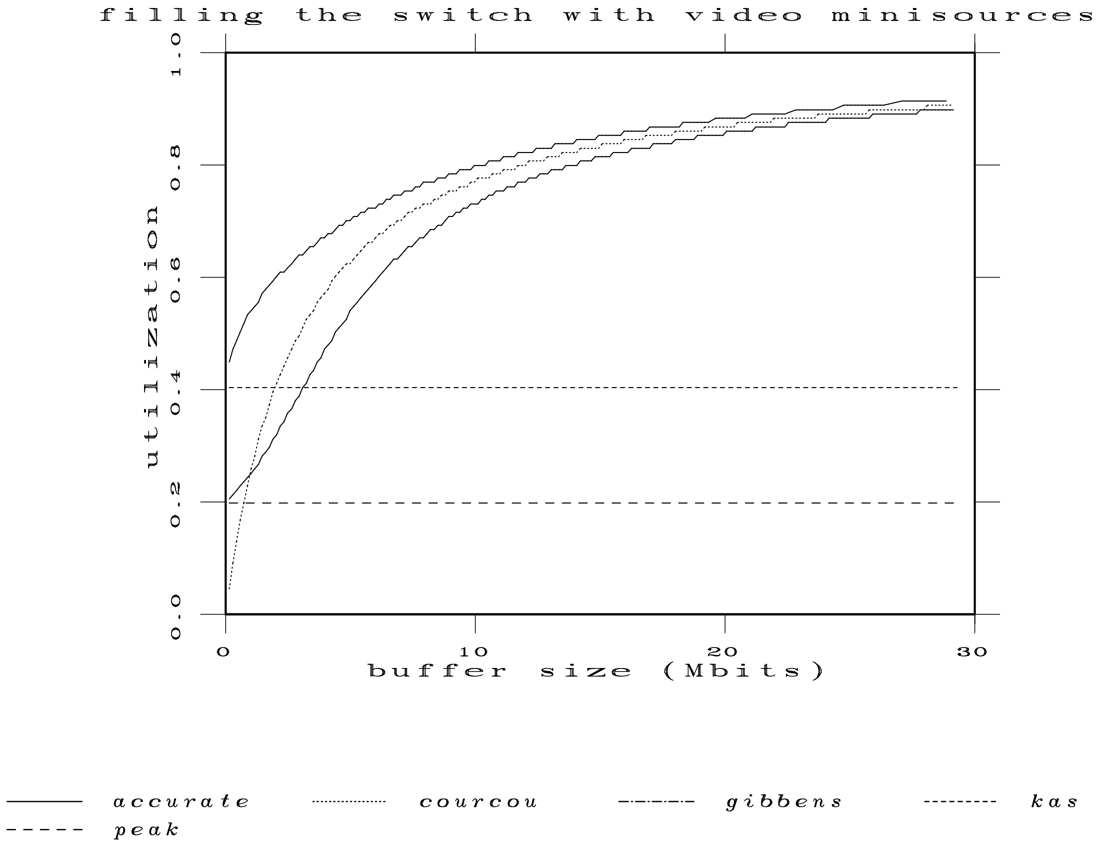

Σχήμα 5.3: Η πιθανότητα υπερχείλησης ως προς το μέγεθος του ενταμιευτή, όταν ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από 5 πηγές videotelephone και 10 ή 100 πηγές φωνής, που χαρακτηρίζονται με το ‘ON/OFF Markov fluid’ μοντέλλο




Σχήμα 5.4: Η πιθανότητα υπερχείλησης ως προς το μέγεθος του ενταμιευτή, όταν ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από 10 πηγές videotelephone και 10 ή 100 πηγές φωνής, που χαρακτηρίζονται με το 'ON/OFF Markov fluid' μοντέλλο




Σχήμα 5.5: Το μέγιστο δυνατό ποσοστό χρησιμοποίησης ενός μεταγωγέα για κάθε μία από τις μεθόδους Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης, όταν τροφοδοτείται από πηγές που αντιστοιχούν σε πραγματικές πηγές φωνής




Σχήμα 5.6: Το μέγιστο δυνατό ποσοστό χρησιμοποίησης ενός μεταγωγέα για κάθε μία από τις μεθόδους Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης, όταν τροφοδοτείται από πηγές που συνθέτουν, με την επαλληλία τους, πραγματικές πηγές videotelephone

# Κεφάλαιο 6

# Συμπεράσματα

## 6.1 Περίληψη των αποτελεσμάτων

Στην παρούσα εργασία παρουσιάσαμε αρχικά ένα δείκτη καθοριομού του βαθμού μεταβλητότητας μιας πηγής δημιουργίας κυκλοφορίας, γνωστός ως δείκτης διασποράς, και περιγράψαμε μία μέθοδο εκτίμησής του από την πραγματική κυκλοφορία στο δίκτυο. Προσομειώνοντας αυτή τη μέθοδο στον υπολογιστή και χαρακτηρίζοντας τις πηγές με δύο εντελώς διαφορετικά μοντέλλα (το 'ON/OFF Markov fluid' και το 'Autoregressive Markov'), διαπιστώσαμε την ορθότητά της. Δίδοντας τις κατάλληλες τιμές στα παραπάνω μοντέλλα, έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε πραγματικές πηγές φωνής και videotelephone, διαπιστώσαμε ότι απαιτείται τουλάχιστον ένα λεπτό για να έχουμε ακριβή εκτίμηση του δείκτη διασποράς μιας πηγής φωνής, ενώ για την πηγή videotelephone αυτός ο χρόνος είναι περίπου 10 λεπτά.

Κατόπιν, παρουσιάσαμε μερικά σημαντικά αποτελέσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περιγραφή της περιοχής αποδοχής ενός μεταγωγέα. Δώσαμε ιδιαίτερη προσοχή σ' ένα πρόσφατο αποτέλεσμα των Courcoubetis και Weber, το οποίο προσεγγίζει το effective bandwidth μιας πηγής χρησιμοποιώντας μόνο το μέσο ρυθμό δημιουργίας της και το δείκτη διασποράς της. Αυτό το αποτέλεσμα κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό καθώς μπορούμε να εκτιμήσουμε τις παραπάνω μεταβλητές από την πραγματική κυκλοφορία στο δίκτυο. Ομως, επειδή αυτό το αποτέλεσμα έχει εφαρμογή στον ασυμπτωτικό χώρο, όπου το μέγεθος του ενταμιευτή είναι μεγάλο και η πιθανότητα υπερχείλησής του μικρή, αλλά και επειδή, για ορισμένες πηγές, η προσέγγιση του effective bandwidth παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από την ακριβή του τιμή, επιχειρήσαμε ένα έλεγχο ορθότητας αυτού. Για τον έλεγχο, υλοποιήσαμε μία μέθοδο εκτίμησης της πιθανότητας υπερχείλησης, όταν ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από όμοιες 'ON/OFF Markov fluid' πηγές, και εξαγάγαμε ένα τύπο υπολογισμού αυτής της πιθανότητας, για την ειδική περίπτωση όπου ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από μία και μόνο πηγή.

Διαπιστώσαμε ότι, για να λαμβάνει η προσέγγιση του effective bandwidth τιμές μικρότερες από το μέγιστο ρυθμό της, πρέπει το μέγεθος του ενταμιευτή να είναι πολλαπλάσιο της μέσης ποσότητας πληροφορίας που παράγεται σε διάστημα ίσο με τη σταθερά χρόνου της πηγής. Επίσης, είδαμε ότι η χρησιμοποίηση των effective bandwidths στον Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης μας εγγυάται την τήρηση της επιθυμητής ποιότητας υπηρεσιών στο δίκτυο, εάν οι πηγές δεν παραμένουν ανενεργές για μεγάλα χρονικά διαστήματα, σε σχέση με τις ενεργές περιόδους τους. Τέλος, εκτελώντας εκτεταμένα πειράματα παρατηρήσαμε ότι η χρήση της προσέγγισης του effective bandwidth μιας πηγής στον Ελεγχο Αποδοχής Κλήσης μας δίδει πιθανότητα υπερχείλησης ενταμιευτή ανεξάρτητη από το πλήθος των υπηρεσιών που εξυπηρετούνται ταυτόχρονα από τον μεταγωγέα.

Θέλοντας να επεκτείνουμε τον έλεγχο ορθότητας και στις περιπτώσεις όπου ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από διαφορετικές 'ON/OFF Markov fluid' πηγές ή από 'Autoregressive Markov' πηγές, προσομοιώσαμε τη συμπεριφορά ενός ATM μεταγωγέα. Επειδή ο χρόνος που απαιτείτο, για να έχουμε μία ακριβή εκτίμηση της πιθανότητας υπερχείλησης, ήταν υπερβολικά μεγάλος (μερικές δεκάδες ώρες CPU time (!), σε συστήματα αρχιτεκτονικής RISC), υλοποιήσαμε μία τεχνική επιτάχυνσης της εκτίμησης, την οποία και παρουσιάζουμε. Εκτελέσαμε αρκετά πειράματα, τροφοδοτώντας το μεταγωγέα με πηγές που αντιστοιχούν σε πραγματικές πηγές φωνής και videotelephone, και διαπιστώσαμε επίσης ότι η προσέγγιση του effective bandwidth μιας πηγής είναι μιά υπερεκτίμηση των απαιτήσεων της για bandwidth.

Τέλος, υπολογίσαμε το μέγιστο δυνατό ποσοστό χρησιμοποίησης ενός ATM μεταγωγέα για κάθε μία από τις μεθόδους Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης, τροφοδοτώντας τον με κυκλοφορία που αντιστοιχεί σε πραγματικές πηγές φωνής ή video. Παρατηρήσαμε ότι το αποτέλεσμα των Kãs και Kleinewillinghõfer-Kopp μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμπληρωματικό του αποτελέσματος των Courcoubetis και Weber, καθώς προσδιορίζει ένα καλό κάτω φράγμα του μέγιστου επιτρεπτού φορτίου ενός μεταγωγέα.

## 6.2 Θέματα για μελλοντική διερεύνηση

Σ' ένα μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης στα ATM δίκτυα, είναι απαραίτητη η ύπαρξη αποτελεσματικής 'αστυνόμευσης των πηγών'. Οπότε, εάν ο Ελεγχος Αποδοχής Κλήσης χρησιμοποιεί την προσέγγιση του effective bandwidth, πρέπει να διασφαλίζεται ότι καμμιά πηγή κυκλοφορίας δεν θα εισάγει κυκλοφορία, η οποία να μην συμφωνεί με τις προσυμφωνημένες τιμές του μέσου ρυθμού δημιουργίας και του δείκτη διασποράς. Ενώ για την αστυνόμευση του μέσου ρυθμού δημιουργίας μιας πηγής υπάρχει ένας πολύ αποτελεσματικός μηχανισμός, γνωστός με το όνομα leaky bucket, η αστυνόμευση του δείκτη διασποράς είναι ένα ανοιχτό θέμα προς διερεύνηση. Ισως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος εκτίμησης της §3.2.2, η οποία όμως απαιτεί αρκετό χρόνο για να συγκλίνει στην ακριβή της τιμή.

Επίσης, στα κλασσικά μοντέλλα ενός δικτύου μεταγωγής κυκλωμάτων, γίνεται συχνά η υπόθεση ότι κάθε σύνδεσμος $k$ του δικτύου έχει χωρητικότητα $C_k$ και ότι κάθε κλήση κλάσεως $j$, για την εξυπηρέτησή της, απαιτεί χωρητικότητα $a_{jk}$ από το σύνδεσμο $k$. Τότε το δίκτυο μπορεί να εξυπηρετήσει $n_j$ κλήσεις κλάσεως $j$, $j = 1, 2, \ldots, J$, εάν

$$\sum_j n_j a_{jk} \leq C_k$$

για κάθε σύνδεσμο $k$ του δικτύου.

Η ομοιότητα της παραπάνω έκφρασης με το κριτήριο αποδοχής μιας κλήσης στο δίκτυο, όταν χρησιμοποιούμε την έννοια του effective bandwidth, είναι παραπάνω από εμφανής (το effective bandwidth μιας πηγής μπορεί επίσης να διαφέρει για κάθε μεταγωγέα στο δίκτυο). Συνεπώς, ένα ωραίο θέμα για μελλοντική διερεύνηση είναι το αν, και σε ποιό βαθμό, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την θεωρία, που έχει αναπτυχθεί για τα δίκτυα μεταγωγής κυκλωμάτων, στα ATM δίκτυα (π.χ. σε θέματα όπως δυναμική δρομολόγηση κλήσεων, trunk reservation, και network planning).

Τέλος, ένα ακόμη θέμα που παρουσιάζει ενδιαφέρον για περαιτέρω διερεύνηση, είναι το αν θα μπορούσε να επεκταθεί το αποτέλεσμα των Courcoubetis και Weber και σε δίκτυα υψηλής ταχύτητας, με τοπολογία δακτυλίου, όπως το FDDI ή το DQDB. Η κύρια διαφορά που παρουσιάζουν αυτά τα δίκτυα με το μοντέλλο που θεωρήσαμε στην παρούσα εργασία, είναι το ότι κάθε μεταγωγέας δεν έχει κάποια συγκεκριμένη χωρητικότητα, αλλά όλοι τους διαμοιράζονται τη χωρητικότητα του δακτυλίου.

# Βιβλιογραφία


[1] C. Courcoubetis and R. Weber. Effective Bandwidths for Stationary Sources. to appear.

[2] C. Courcoubetis, G. Kesidis, A. Ridder, J. Walrand, and R. Weber. Admission Control and Routing in ATM Networks using Inferences from Measured Buffer Occupancy. to appear.

[3] D. Delisle and L. Pelamourgues. B-ISDN and how it works. *IEEE Spectrum*, page 39, August 1991.

[4] S. E. Minzer. Broadband ISDN and Asynchronous Transfer Mode. *IEEE Communications Magazine*, page 17, September 1989.

[5] J. Walrand. *Communications Networks : A First Course*. Aksen Associates, Inc., 1991.

[6] G. M. Woodruff and R. Kositpaiboon. Multimedia Traffic Management Principles for Guaranteed ATM Network Performance. *IEEE JSAC*, 8(3):437, April 1990.

[7] A. Gersht and K. Lee. A Congestion Control Framework for ATM Networks. *IEEE JSAC*, 9(7):1119, September 1991.

[8] J. Roberts. Variable-Bit-Rate Traffic Control in B-ISDN. *IEEE Communications Magazine*, page 50, September 1991.

[9] L. Trajkovic and S. Golestani. Gongestion Control for Multimedia Services. *IEEE Network*, page 20, September 1992.

[10] M. Wernik, O. Aboul-Magd, and H. Gilbert. Traffic Management for B-ISDN Services. *IEEE Network*, page 10, September 1992.

[11] H. Fowler and W. Leland. Local Area Network Traffic Characteristics with Implications for Broadband Network Congestion Management. *IEEE JSAC*, 9(7):1139, September 1991.

[12] D. Mitra and J. Seery. Dynamic Adaptive Windows for High Speed Data Networks with Multiple Paths and Propagation Delays. In *ITC Seminar, Morristown, NJ*, 1991.

[13] Ioanis Nikolaidis and Ian F. Akyildiz. Source characterization and Statistical Multiplexing in ATM Networks. to appear.

[14] Ibrahim W. Habib and Tarek N. Saadawi. Multimedia Traffic Characteristics in Broadband Networks. *IEEE Communications Magazine*, page 48, July 1992.

[15] D. Anick, D. Mitra, and M. M. Sondhi. Stochastic Theory of a Data-Handling System with Multiple Sources. *The Bell System Technical Journal*, 61(8):1871, October 1982.

[16] B. Maglaris, D. Anastassiou, P.Sen, G. Karlsson, and J. D. Robbins. Performance Models of Statistical Multiplexing in Packet Video Communications. *IEEE Transactions on Communications*, 36(7):834, July 1988.

[17] P. Sen, B. Maglaris, N. Rikli, and D. Anastassiou. Models for Packet Switching of Variable-Bit-Rate Video Sources. *IEEE JSAC*, 7(5):865, June 1989.

[18] D. R. Cox and P. A. Lewis. *The Statistical Analysis of series of Events*. Chapman and Hall, 1966.

[19] C. Courcoubetis and J. Walrand. Note on effective bandwidth of ATM traffic.

[20] RACE Project R1022. Technology for ATD. RACE document TG-123-0006-FD-CC.

[21] R. Guérin, H. Ahmadi, and M. Naghshineh. Equivalent Capacity and Its Application to Bandwidth Allocation in High-Speed Networks. *IEEE JSAC*, 9(7):968, September 1991.

[22] R. Gibbens and P. Hunt. Effective Bandwidths for the Multi-type UAS channel, 1991. Statistical Laboratory, University of Cambridge, preprint.

[23] G. Kesidis and J. Walrand. Effective Bandwidths for Multiclass Markov fluids and Other ATM Sources. To appear.

# Παράρτημα A

## A.1 Υπολογισμός της πιθανότητας υπερχείλησης του ενταμιευτή ενός μεταγωγέα, όταν τροφοδοτείται από όμοιες 'ON/OFF Markov fluid' πηγές

Στο [15], οι Anick, Mitra και Sondhi παρουσίασαν μία μέθοδο υπολογισμού της πιθανότητας υπερχείλησης του ενταμιευτή ενός μεταγωγέα χωρητικότητας $c$, που τροφοδοτείται από $N$ όμοιες 'ON/OFF Markov fluid' πηγές. Για απλοποίηση του προβλήματος, στην ανάλυσή τους χρησιμοποίησαν ένα κανονικοποιημένο μοντέλλο, όπου σαν *μονάδα χρόνου* θεωρήθηκε ο μέσος χρόνος παραμονής στην ON κατάσταση και σαν *μονάδα πληροφορίας* θεωρήθηκε η ποσότητα που παράγεται από την πηγή όταν βρίσκεται σε μία τυπική ενεργή περίοδο. Κατά συνέπεια, η πηγή δημιουργίας κυκλοφορίας θα περιγράφεται μόνο από το μέσο χρόνο παραμονής της στην OFF κατάσταση, ο οποίος και συμβολίζεται με $1/\lambda$.

Συγκεκριμένα, εάν

$F_i(B) \triangleq$ η πιθανότητα, στην κατάσταση ισορροπίας, να βρίσκονται $i$ πηγές στην κατάσταση ON και το μέγεθος της ουράς στον ενταμιευτή να είναι μικρότερο από B

τότε έχουν δείξει ότι ισχύει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση :

$$\mathbf{D}\frac{d}{dB}\mathbf{F}(B) = \mathbf{M}\mathbf{F}(B), \quad B \geq 0,$$

όπου $\mathbf{F}(B)$ είναι ένα διάνυσμα με στοιχεία τα $F_i(B)$,

$$\mathbf{D} = \text{diag}\{-c,\ 1-c,\ 2-c,\ \ldots,\ N-c\}$$

και

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -N\lambda & 1 & & & & \\ N\lambda & -\{(N-1)\lambda+1\} & 2 & & & \\ & (N-1)\lambda & -\{(N-2)\lambda+2\} & 3 & & \\ & & \vdots & & & \\ & & 2\lambda & & -\{\lambda+(N-1)\} & N \\ & & & & \lambda & -N \end{bmatrix}$$

Η πιθανότητα υπερχείλησης του ενταμιευτή, που ισούται με

$$G(B) \ \stackrel{\triangle}{=}\ Pr\{\text{ το μήκος ουράς στον ενταμιευτή} > B\ \} = 1 - \mathbf{1}'\mathbf{F}(B), \quad B \geq 0$$

θα δίδεται από την ακόλουθη έκφραση :

$$G(B) = -\sum_{i=0}^{N-\lfloor c \rfloor -1} \mathrm{e}^{z_i B} a_i(\mathbf{1}'\phi_i)$$

όπου $z_i$ είναι μία ιδιοτιμή (eigenvalue) του $\mathbf{D}^{-1}\mathbf{M}$ και $\phi_i$ είναι το αντίστοιχο δεξί ιδιοδιάνυσμα (eigenvector)[1], και

$$a_j = -\left(\frac{\lambda}{1+\lambda}\right)^N \prod_{i=0, i\neq j}^{N-\lfloor c \rfloor -1} \frac{z_i}{z_i - z_j}, \quad 0 \leq j \leq N - \lfloor c \rfloor - 1$$

[1]Υπάρχουν $N - \lfloor c \rfloor$ αρνητικές, 1 ίση με μηδέν και $\lfloor c \rfloor$ θετικές ιδιοτιμές, οι οποίες διατάσσονται ως εξής

$$z_{N-\lfloor c \rfloor -1} \ <\ \cdots\ <\ z_1\ <\ z_0\ <\ z_N = 0\ <\ z_{N-1}\ <\ \cdots\ <\ z_{N-\lfloor c \rfloor}$$

Στην ειδική περίπτωση, όπου ο μεταγωγέας τροφοδοτείται από μία μόνο πηγή, θα υπάρχει μόνο μία ιδιοτιμή ίση με

$$z_0 = -\frac{1 + \lambda - \lambda/c}{1 - c}$$

και θα έχουμε

$$\mathbf{1}'\phi_0 = \frac{1}{c}$$

και

$$a_0 = -\frac{\lambda}{1 + \lambda}.$$

Οπότε, *η πιθανότητα υπερχείλησης ενός ενταμιευτή μεγέθους $B$, που εξυπηρετείται με σταθερό ρυθμό $c$ και τροφοδοτείται από μία μόνο 'ON/OFF Markov fluid' πηγή (με μέσο χρόνο παραμονής στην ανενεργή κατάσταση ίσο με $1/\lambda$), θα δίδεται από την ακόλουθη σχέση :*

$$G(B) = \frac{\lambda}{1 + \lambda} \cdot \frac{1}{c} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{1+\lambda-\lambda/c}{1-c}B} \tag{A.1}$$

Υπενθυμίζουμε ότι σαν μονάδα χρόνου θεωρείται ο μέσος χρόνος παραμονής στην ON κατάσταση και σαν μονάδα πληροφορίας θεωρείται η ποσότητα που παράγεται από την πηγή όταν βρίσκεται σε μία τυπική ενεργή περίοδο.