

Κεφάλαιο 5:

Θέματα τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε ATM δίκτυα

5.1 Εισαγωγή

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των ATM δικτύων είναι το λεγόμενο *κέρδος στατιστικής πολύπλεξης*, το οποίο προκύπτει όταν ATM πακέτα μιας υπηρεσίας ή, κυρίως, διαφορετικών υπηρεσιών, μοιράζονται από κοινού (πολυπλέκονται σε) ένα VP. Σε STM δίκτυα όπου η πληροφορία μεταδίδεται με σταθερό ρυθμό (fixed bit rate), το απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι σταθερό και υπολογίζεται πολύ απλά ως το άθροισμα όλων των επί μέρους ρυθμών. Σε ATM δίκτυα, βασιζόμενοι στο γεγονός ότι οι ξεχωριστοί χρήστες του δικτύου δε ζητούν ταυτόχρονα τη μέγιστη τιμή εύρους ζώνης που χρειάζονται, το συνολικό εύρος ζώνης ενός VP μπορεί να ελαττωθεί για σταθερό φορτίο κινήσεως, ή διατηρώντας σταθερό το εύρος ζώνης του VP περισσότερη κίνηση μπορεί να διεκπεραιωθεί από το VP. Το φαινόμενο καλείται **κέρδος στατιστικής πολύπλεξης (Statistical Multiplexing Gain)**.

Η στρατηγική διαχείρισης των Virtual Paths (VP management strategy), η αποτελεσματικότητα κωδικοποίησης του μεταβλητού ρυθμού (Variable Rate Coding) και η καταλληλότητα των παραμέτρων κίνησης (Source Traffic Descriptor), μπορούν να αξιολογηθούν σε σχέση με αυτό το κέρδος. Σ' αυτό το τμήμα του κεφαλαίου υπολογίζεται το κέρδος στατιστικής πολύπλεξης κυρίως σε επίπεδο κλήσεων (στατιστική πολύπλεξη των κλήσεων) και συζητούνται θέματα που σχετίζονται με τον υπολογισμό της στατιστικής πολύπλεξης σε επίπεδο ATM πακέτων. Αυτά τα θέματα περιλαμβάνουν μαθηματικό μοντέλο για τους κόμβους ενός ATM δικτύου, μοντέλα της διαδικασίας άφιξης των ATM πακέτων (Cell Arrival Process) καθώς και μαθηματικούς τύπους υπολογισμού των απωλειών αυτών. Τέλος συζητούνται θέματα ελέγχου της ATM κινήσεως.

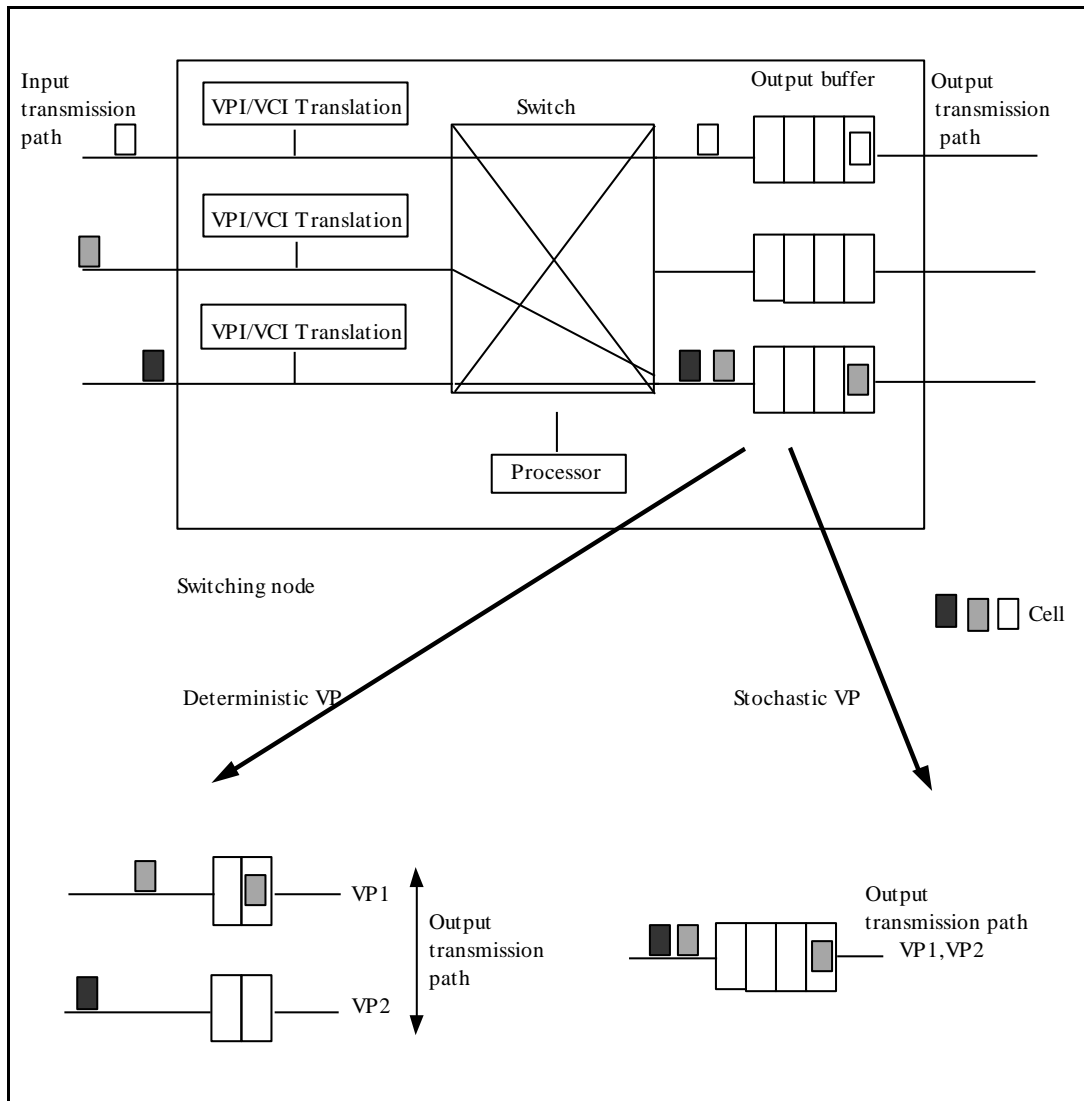
5.2 ATM Δίκτυο και ATM Κόμβος

Οι κόμβοι μεταγωγής ATM είναι συνδεδεμένοι δια μέσου των transmission paths που περιέχουν τα VPs. Ανάμεσα στους συντελεστές που προκαλούν χειροτέρευση της ποιότητας των ATM δικτύων, είναι οι καθυστερήσεις στην δημιουργία των ATM πακέτων και οι καθυστερήσεις διάδοσης σ' ένα transmission path. Αυτές οι καθυστερήσεις είναι σταθερές και δε μεταβάλλονται ως προς την κίνηση. Επίσης κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, η απώλεια ATM πακέτου και η λανθασμένη δρομολόγησή του εξ αιτίας λάθους στο πεδίο της επικεφαλίδας είναι ανεξάρτητα της κίνησης. Οι κύριοι συντελεστές στο επίπεδο ATM πακέτων που προκαλούν χειροτέρευση της απόδοσης των ATM δικτύων, είναι η απώλεια ATM πακέτων και η καθυστέρηση αυτών στους ATM κόμβους.

Κάθε κόμβος (σχήμα 5.2α) μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα σύνολο από buffers (μονάδες προσωρινής αποθήκευσης) εξόδου ενός διακόπτη υψηλής ταχύτητας του οποίου η απόδοση δεν έχει σχεδόν καθόλου απώλειες (Nonblocking) λόγω της προηγμένης τεχνολογίας **Large Scale Integration (LSI)**. Αν έχουμε μια VC σύνδεση που περνά από ένα κόμβο ενός ATM δικτύου, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε αυτόν τον κόμβο ως έναν απλό εξυπηρετητή ουράς (Single Server Queue), όπου ένας εξυπηρετητής αντιστοιχεί σ' ένα VP (ή σ' ένα Path μετάδοσης) και μία υπηρεσία που εκτελείται από τον εξυπηρετητή είναι η μετάδοση ενός ATM πακέτου. Με άλλα λόγια, η ποιότητα της VC σύνδεσης μπορεί να αξιολογηθεί αναλύοντας το διπλό μοντέλο ουράς (Tandem Queueing Model), όπου κάθε εξυπηρετητής είναι ένα VP ή ένα transmission path. Εάν σ' ένα transmission path τα VPs είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους λόγω του VP Shaping (αυτό σημαίνει ότι τα VPs είναι ντετερμινιστικά), τότε ο εξυπηρετητής θα πρέπει να αποτελεί μοντέλο του VP. Ωστόσο, εάν σ' ένα transmission path τα VPs πολυπλέκονται στατιστικά (στατιστικά VPs), τότε το κέρδος στατιστικής πολύπλεξης επιτυγχάνεται μεταξύ των VPs. Σ' αυτή την περίπτωση ο εξυπηρετητής θα πρέπει να αποτελεί μοντέλο του transmission path.

Γι' ένα VP, το VP Shaping εκτελείται σ' ένα Shaper. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο VP Shaping είναι ίδιες με αυτές του VC Shaping. Κανονικά, το VP Shaping εκτελείται από ένα Spacer. Σ' ένα VP το ελάχιστο διάστημα εκπομπής ATM πακέτου ελέγχεται έτσι ώστε να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από τον αντίστροφο αριθμό ATM πακέτων που το VP μπορεί να μεταδώσει στη μονάδα του χρόνου. Σ' ένα transmission path τα ντετερμινιστικά VPs εξυπηρετούνται κυκλικά. Κάθε πότε το κάθε VP θα μεταδίδει ATM πακέτα καθορίζεται ανάλογα με το VP Bandwidth και οι buffers διαμοιράζονται λογικά και ανατίθενται σε κάθε ένα VP. Ακόμα κι' αν σ' ένα VP δεν υπάρχει ATM πακέτο για μετάδοση, δίδεται κυκλικά κάποιος

χρόνος στο VP για να μεταδώσει ATM πακέτα (ανεξαρτήτως του αριθμού των ATM πακέτων που θα μεταδοθεί σ' ένα VP). Γι' αυτό μπορούμε να μοντελοποιήσουμε ανεξάρτητα τα ξεχωριστά ντετερμινιστικά VPs. Από την άλλη πλευρά, στα στοχαστικά VPs ενός transmission path, τα ATM πακέτα μεταδίδονται με βάση την αρχή **FIFO** (εάν δεν υπάρχει προτεραιότητα χρόνου) ανεξαρτήτως των VPIs. Σ' ένα transmission path οι buffers μοιράζονται στα VPs. Στο ίδιο transmission path, η κίνηση σε κάθε VP επηρεάζει την κίνηση σε άλλα VPs.

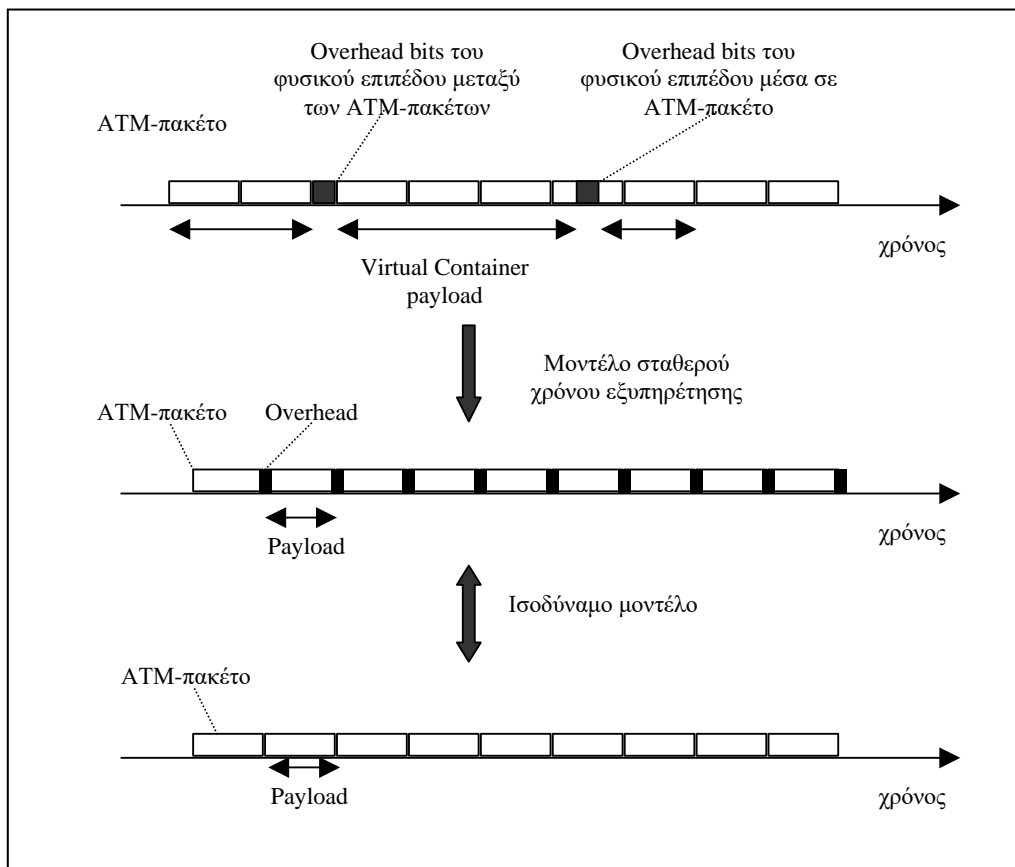


Σχήμα 5.2α Μοντέλο ATM κόμβου μεταγωγής.

Για να απλοποιήσουμε την επεξήγηση, στο υπόλοιπο τμήμα του κεφαλαίου θα εξετάσουμε ντετερμινιστικά VPs. Εάν παραλείψουμε το Physical Layer Overhead, ο χρόνος

εξυπηρέτησης μπορεί να θεωρηθεί σταθερός, διότι ο χρόνος μετάδοσης ATM πακέτων είναι σταθερός. Ένας διακόπτης θεωρείται ότι είναι χωρίς απώλειες (nonblocking) και δεν προκαλεί χειροτέρευση της απόδοσης. Αυτό το μοντέλο είναι μια προσέγγιση “πρώτης τάξεως” και πρέπει να μοντελοποιήσουμε και να αναλύσουμε ένα διακόπτη για να δείξουμε ότι ο ρυθμός απώλειας ATM πακέτων (Cell Loss Ratio-CLR) σε έναν διακόπτη είναι αμελητέος σε σύγκριση με το CLR στην έξοδο ενός buffer.

Για την ακρίβεια, το Physical Layer Overhead εισάγεται μεταξύ των ATM πακέτων ή μέσα σε αυτά. Η χωρητικότητα των μεταδιδόμενων ATM πακέτων είναι το Virtual Container Payload, όταν η διεπαφή (interface) που χρησιμοποιείται βασίζεται στο σύστημα SDH, και το μοντέλο σταθερού χρόνου εξυπηρέτησης υποδηλώνει ότι το Physical Layer προσεγγίζεται έτσι ώστε το Overhead να είναι ομοιόμορφο (σχήμα 5.2β).



Σχήμα 5.2β Μοντέλο μετάδοσης ATM πακέτου

5.3 Μοντέλα Διαδικασίας Αφίξεως ATM Πακέτων - Μοντελοποίηση Πηγών Κινήσεως

Στην προηγούμενη παράγραφο δείξαμε ότι κάθε VP και οι buffers του μπορούν να μοντελοποιηθούν από ένα απλό εξυπηρετητή με buffers πεπερασμένης χωρητικότητας. Επιπρόσθετα από αυτό το μοντέλο, χρειαζόμαστε ένα μοντέλο διαδικασίας άφιξης ATM πακέτων για να υπολογίσουμε το κέρδος στατιστικής πολύπλεξης. Η χρήση ενός μοντέλου διαδικασίας άφιξης ATM πακέτων για την αξιολόγηση της στατιστικής πολύπλεξης, συνεισφέρει:

- Στον καθορισμό της ευαισθησίας που έχει το κέρδος ως προς τις παραμέτρους της διαδικασίας άφιξης ATM πακέτων.
- Στην επιλογή των χαρακτηριστικών κίνησης μιας πηγής.
- Στην εκτίμηση των δυνατοτήτων του ATM δικτύου.

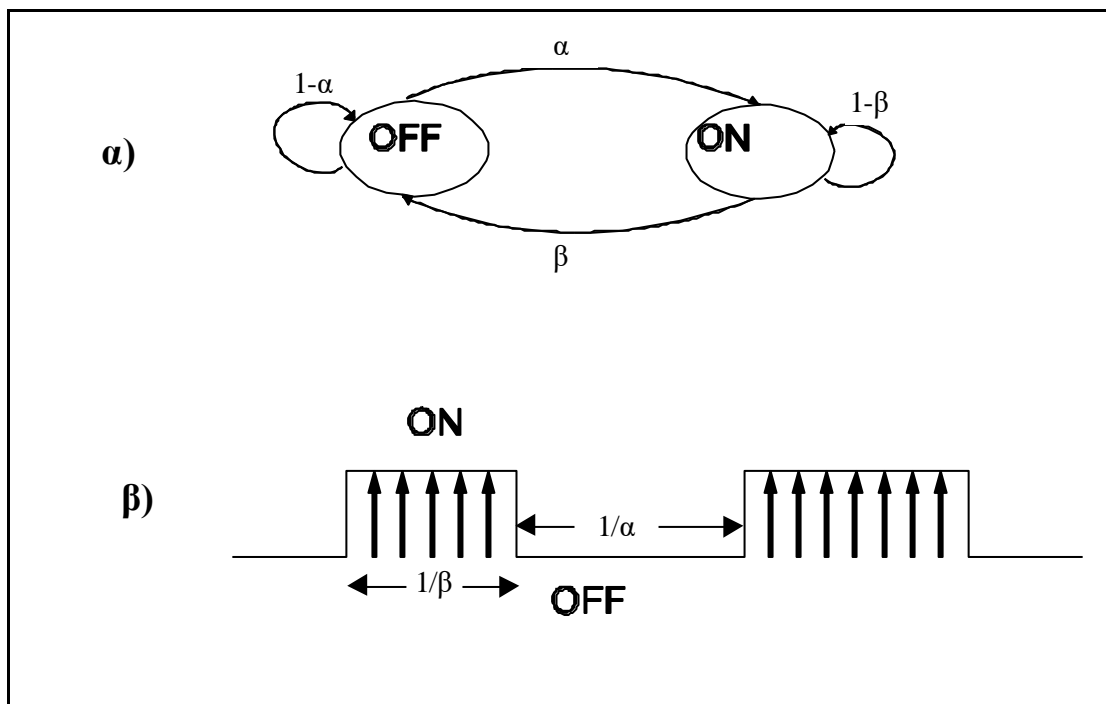
Όπως έχουμε αναφέρει, τα ATM δίκτυα υποστηρίζουν διαφόρους τύπους υπηρεσιών, όπως μετάδοση δεδομένων (Data), φωνής (Voice), και εικόνας (Video), κάθε μία από τις οποίες έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά κίνησης. Επίσης έχουν την δυνατότητα μετάδοσης συγχρόνως φωνής, εικόνας και δεδομένων, δηλ. μετάδοσης "πολυμέσων".

Για να υπολογίσουμε την απόδοση των δικτύων ATM, απαιτείται ακριβής μοντελοποίηση των πηγών κίνησης (των κλήσεων, π.χ. τηλεφωνικών κλήσεων). Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα απλούστερα μοντέλα, που χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία, για την περιγραφή της κίνησης πηγών σε ATM δίκτυα. Παρουσιάζεται δηλαδή ο τρόπος μοντελοποίησης πηγών δεδομένων, ομιλίας (φωνής), εικόνας και πολυμέσων.

5.3.1 Μοντελοποίηση Πηγών Φωνής

Στα δίκτυα ATM υπάρχουν δύο εναλλακτικοί τρόποι για τη μετάδοση της κίνησης φωνής (voice traffic). Ο πρώτος τρόπος είναι να μεταδώσουμε την ομιλία ως CBR κίνηση (σταθερός ρυθμός μετάδοσης). Κωδικοποιούμε δηλαδή το ηχητικό σήμα με σταθερό ρυθμό χρησιμοποιώντας π.χ. 64 kbps διαμόρφωση PCM ή 32 kbps **ADPCM (adaptive differential PCM)** και κάνουμε χρήση του πρωτοκόλλου τύπου 1 της AAL (class-A service). Ο εναλλακτικός τρόπος είναι να χρησιμοποιήσουμε ανιχνευτή ομιλίας (**Speech Activity Detector - SAD**) και μια τεχνική παρεμβολής ψηφιακής ομιλίας (**digital speech interpolation - DSI**). Σ' αυτή την περίπτωση η κίνηση φωνής είναι VBR κίνηση και επομένως χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο τύπου 2 για μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης (class-B service).

Όταν η κίνηση φωνής είναι σταθερού ρυθμού μετάδοσης η άφιξη των ATM πακέτων μπορεί να χαρακτηριστεί περιοδική αν αμελήσουμε την διακύμανση των καθυστερήσεων αυτών (CDV) και, επομένως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα μοντέλα κινήσεως για CBR κινήσεις. Όταν τα σήματα φωνής κωδικοποιούνται με μεταβλητό ρυθμό bits, η διαδικασία παραγωγής των ATM πακέτων έχει ως ακολούθως. Κατά τη διάρκεια μιας κλήσεως εναλλάσσονται μια σειρά ενεργών (ομιλία) και ανενεργών (σιγή) περιόδων. Κατά τη διάρκεια των ενεργών περιόδων παράγονται ATM πακέτα ομιλίας (voice cells) περιοδικά, ένα ATM πακέτο εντός χρονικού διαστήματος T , ενώ κατά τη διάρκεια των ανενεργών περιόδων δεν παράγονται ATM πακέτα. Επομένως, ο συνολικός αριθμός των ATM πακέτων που μεταδίδεται μπορεί να μειωθεί κατά 35%-40% σε σύγκριση με τη μετάδοση σταθερού ρυθμού. Αυτή η διαδικασία έχει περιγραφεί στη βιβλιογραφία με τα λεγόμενα ON-OFF μοντέλα, όπου μια πηγή ομιλίας (κλήση) χαρακτηρίζεται από καταστάσεις ON (αντιστοιχούν στις ενεργείς περιόδους) και από καταστάσεις OFF (αντιστοιχούν στις ανενεργείς περιόδους). Οι δύο αυτές καταστάσεις εμφανίζονται κατά τρόπο περιοδικό. Η μετάβαση από την κατάσταση ON στην κατάσταση OFF γίνεται με πιθανότητα β , ενώ η μετάβαση από την κατάσταση OFF στην κατάσταση ON γίνεται με πιθανότητα α (Σχήμα 5.3.1α(α)). Η εκπομπή ATM πακέτων στην ON κατάσταση θεωρείται ή σταθερή και ίση με το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης της πηγής, ή χαρακτηρίζεται από μια κατανομή Poisson με μέσο ρυθμό λ (Σχήμα 5.3.1α(β)).

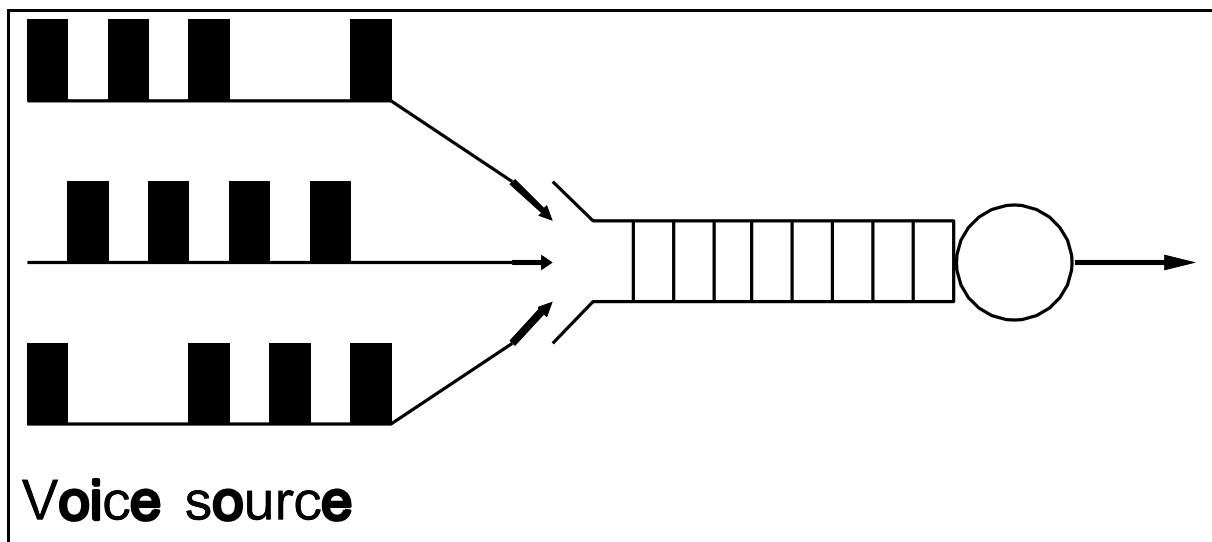


Σχήμα 5.3.1α Μοντέλο ON - OFF

Η διάρκεια των καταστάσεων ON ($1/\beta$) και OFF ($1/\alpha$) ακολουθούν την εκθετική κατανομή με μέσες ενδεικτικές τιμές 325 msec και 650 msec, αντιστοίχως. Ωστόσο, τα πειραματικά δεδομένα δεν υποστήριζαν επαρκώς τις υποθέσεις αυτές. Ας σημειωθεί ότι τα πειραματικά αποτελέσματα εξαρτώνται από το σχεδιασμό του SAD, η ομιλούμενη γλώσσα και το φύλο των ομιλητών. Παρατηρήθηκε π.χ. ότι η στατιστική κατανομή της περιόδου σιγής έχει μακρύτερη "ουρά" απ' ό,τι μια εκθετική κατανομή.

Όσον αφορά στη διαδικασία άφιξης κλήσεων ομιλίας (voice calls), ας μη ξεχνάμε ότι αυτή χαρακτηρίζεται από την Poisson κατανομή και ότι η διάρκεια των κλήσεων ακολουθεί την (αρνητική) εκθετική κατανομή.

Ακολούθως θέλουμε να αξιολογήσουμε την απόδοση ενός πολυπλέκτη των ATM πακέτων φωνής. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3.1β στον πολυπλέκτη γίνεται υπέρθεση πολλών διαδικασιών αφίξεως των ATM πακέτων φωνής και για την υπέρθεση αυτήν χρειαζόμαστε νέο μοντέλο. Στην βιβλιογραφία έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο M/D/1 αλλά είναι πολύ ανακριβές, με παραδεκτή ακρίβεια μόνο όταν ο αριθμός των κλήσεων (voice sources) είναι πολύ μεγάλος, η κίνηση μικρή, ή το μήκος της ουράς αναμονής μικρό.

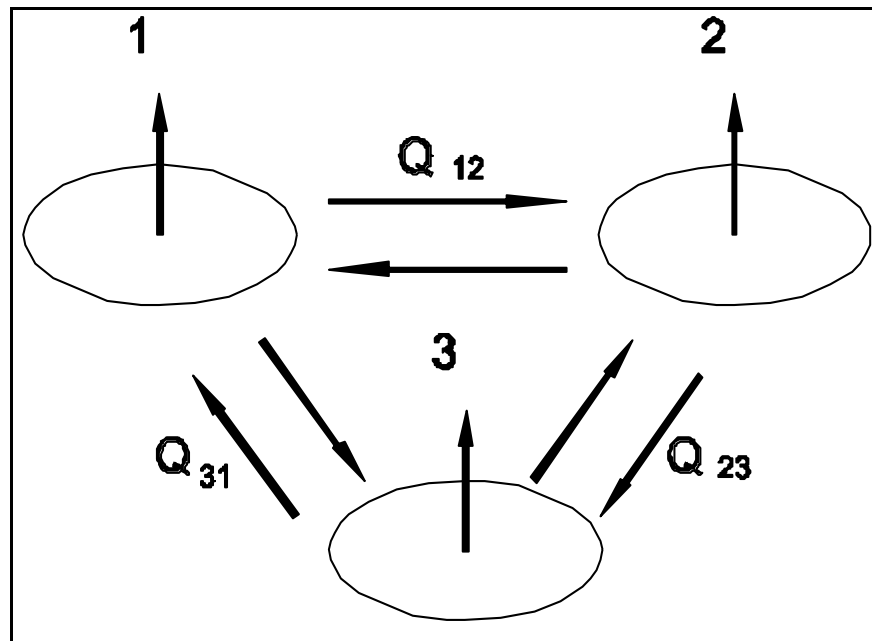


Σχήμα 5.3.1β Στατιστικά πολύπλεξη πακέτων φωνής

Πολύ καλύτερα αποτελέσματα για τη μοντελοποίηση της κίνησης N πολυπλεγμένων κλήσεων ομιλίας προκύπτουν από το μοντέλο **Markov Modulated Poisson Process (MMPP)** με 2^N καταστάσεις (στην πράξη ο αριθμός καταστάσεων μειώνεται σε $N+1$). Κάθε μια από τις N πηγές περιγράφεται με το ON-OFF μοντέλο. Για παράδειγμα, όταν δύο πηγές ομιλίας πολυπλέκονται, η συνολική παραγόμενη κίνηση μπορεί να περιγραφεί από μια MMPP τριών καταστάσεων: μια κατάσταση για την περίπτωση που και οι δύο πηγές είναι στην ON περίοδο, μια

κατάσταση για την περίπτωση που μια πηγή είναι στην ON περίοδο και η άλλη στην OFF και μια τρίτη κατάσταση όταν και οι δύο πηγές είναι στην OFF κατάσταση. Ένα μειονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι η αύξηση των καταστάσεων όταν ο αριθμός N των υπερτεθειμένων πηγών είναι μεγάλος. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται μια απλουστευμένη μορφή της MMPP, η **Switched Poisson Process (SPP)**.

Ας θεωρήσουμε μια συνεχούς χρόνου Μαρκοβιανή διαδικασία (καλούμενη phase process) με m καταστάσεις (χώρος καταστάσεων $\{1, \dots, m\}$). Κατά τη διάρκεια παραμονής της διαδικασίας σε μια κατάσταση i υπάρχει μια διαδικασία αφίξεως Poisson με ρυθμό λ_i . Αυτό ισχύει για όλες τις καταστάσεις και η διαδικασία καλείται MMPP m καταστάσεων (m -state MMPP, σχήμα 5.3.1γ). Αν ο χώρος καταστάσεων της Μαρκοβιανής αλυσίδας είναι $m=2$ ($\{1,2\}$) τότε η 2-state MMPP καλείται SPP. Μια διαδικασία SPP με μηδενικό τον ένα από τους δύο ρυθμούς αφίξεως (λ_1 ή $\lambda_2 = 0$) καλείται "**Interrupted Poisson Process**" (IPP).



Σχήμα 5.3.1γ MPPP τριών καταστάσεων (3-state MMPP)

Για την ακριβή περιγραφή της διαδικασίας που προκύπτει από την υπέρθεση πηγών φωνής έχει προταθεί, από τους Heffes και Loucantoni, η διαδικασία SPP με 4 παραμέτρους: τη μέση διάρκεια της κάθε κατάστασης (Q_1 και Q_2) και το ρυθμό εκπομπής ATM πακέτων σε κάθε κατάσταση (λ_1 και λ_2). Η μέτρηση των 4 αυτών παραμέτρων γίνεται μετρώντας πειραματικά τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- α) το μέσο ρυθμό άφιξης ATM πακέτων από τις N πηγές $[X_1]$.

- β) το λόγο της διασποράς προς τη μέση τιμή του αριθμού των αφίξεων εντός του χρονικού διαστήματος $(0, t_1)$ $[X_2(t_1)]$.
- γ) το λόγο της διασποράς προς τη μέση τιμή του αριθμού των αφίξεων εντός πολύ μεγάλης χρονικής περιόδου (long term) $[X_3]$.
- δ) την τρίτη ροπή του αριθμού των αφίξεων εντός χρονικής περιόδου $(0, t_2)$ $[X_4(t_2)]$.
(όπου ενδεικτικές τιμές των t_1 και t_2 είναι: $t_1=0.5$ sec και $t_2=1$ sec).

Οι παράμετροι Q_1 , Q_2 , λ_1 , λ_2 υπολογίζονται από την επίλυση τεσσάρων μη γραμμικών εξισώσεων που δίνουν τις παραμέτρους αυτές σε σχέση με τα χαρακτηριστικά X_1 , X_2 , X_3 , X_4 που μπορούν να μετρηθούν πειραματικά.

5.3.2 Μοντελοποίηση Πηγών Εικόνας

Η κίνηση που προέρχεται από μετάδοση εικόνων απαιτεί πολύ bandwidth. Στην τηλεόραση π.χ. ένα πλαίσιο με ευκρίνεια 512×512 μεταδίδεται κάθε $1/30$ sec και επομένως αν χρησιμοποιήσουμε PCM κωδικοποίηση των 8 bits θα παραχθούν $512 \times 512 \times 8 \times 30$ bits/sec (δηλ. περίπου 63 Mbits/sec). Ως εκ τούτου, οι εικόνες συνήθως συμπιέζονται βάσει μιας interframe κωδικοποίησης μεταβλητού ρυθμού που κωδικοποιεί μόνο τις σημαντικές διαφορές μεταξύ δύο γειτονικών πλαισίων. Αυτό προκαλεί μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των αφίξεων των ATM πακέτων για δύο διαδοχικά πλαίσια.

Μια πηγή εικόνας παράγει συσχετιζόμενα ATM πακέτα τα οποία σχηματίζουν μια διαδικασία αφίξεως με πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά από τη διαδικασία αφίξεως των ATM πακέτων φωνής. Στη διαδικασία γεννήσεως των video ATM πακέτων υπάρχουν δύο τύποι συσχετίσεων: συσχέτιση μικρής και μεγάλης περιόδου. Η συσχέτιση μικρής περιόδου αντιστοιχεί σε επίπεδα ομοιόμορφης δραστηριότητας (δηλ. σε μικρές διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης των bits) και τα αποτελέσματά της διαρκούν ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα (της τάξεως των ολίγων εκατοντάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου). Η συσχέτιση μεγάλης περιόδου αντιστοιχεί σε ξαφνικές αλλαγές του τοπίου των εικόνων οι οποίες προκαλούν μεγάλο ρυθμό αφίξεων και τα αποτελέσματά της διαρκούν περισσότερο χρόνο (της τάξεως των ολίγων δευτερολέπτων).

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε δύο μοντέλα για πηγές video, συσχετίσεως μικρής περιόδου, παραλείποντας τη συσχέτιση μακράς περιόδου. Τα μοντέλα αυτά είναι εφαρμόσιμα σε πηγές όπου δεν έχουν σημαντική αλλαγή του ρυθμού μετάδοσης μεταξύ δύο συνεχόμενων πλαισίων (frames) δηλ. για video χωρίς αλλαγές σκηνών (τοπίων) π.χ. videophone όπου ένα πρόσωπο εμφανίζεται στην εικόνα του τηλεφώνου να μιλάει. Το πρώτο προσεγγίζει την πηγή της

εικόνας με μια αναδρομική σχέση (**Autoregressive - AR - model**). Όμως λόγω της πολυπλοκότητάς του το μοντέλο αυτό δεν είναι εφαρμόσιμο στην μαθηματική ανάλυση ενός πολυπλέκτη με βάση τη θεωρία ουρών. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε εξομοιώσεις πηγών video. Για το λόγο αυτό παρουσιάζεται ένα δεύτερο μοντέλο το οποίο προσεγγίζει μια πηγή video πολύ καλά με το μοντέλο Markov (διακριτών καταστάσεων).

Μοντέλο Α: Continuous-state AR Markov model

Στο μοντέλο αυτό μια μοναδική πηγή video προσεγγίζεται με μια αναδρομική (AR - autoregressive) συνάρτηση:

$$\lambda(n) = \sum_{m=1}^M \alpha_m \lambda(n-m) + b w(n)$$

Έχει αποδειχθεί ότι το μοντέλο πρώτης τάξεως είναι εφαρμόσιμο με πολύ καλά αποτελέσματα για την περιγραφή της πηγής video. Έτσι:

$$\lambda(n) = \alpha_1 \lambda(n-1) + b w(n)$$

Υποθέτοντας ότι το $w(n)$ έχει μέση τιμή η και διασπορά 1 και ότι $|\alpha_1| < 1$, οι τιμές των α_1 και b μπορούν να υπολογιστούν μετρώντας τη μέση τιμή του ρυθμού αφίξεως λ ($E(\lambda)$) στη μόνιμη κατάσταση και την αυτοσυσχέτιση $C(n)$ και γνωρίζοντας ότι αυτά δίνονται από τις σχέσεις:

$$E(\lambda) = \frac{b}{1-\alpha_1} \eta, \quad C(n) = \frac{b^2}{1-\alpha_1^2} \alpha_1^n, \quad n \geq 0$$

Από μετρήσεις έχουμε:

$$E(\lambda) = 0.52 \text{ bits/pixel} \text{ και } C(n) = 0.0536 (e^{-0.13})^n (\text{bits/pixel})^2$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις των $E(\lambda)$ και $C(n)$ έχουμε:

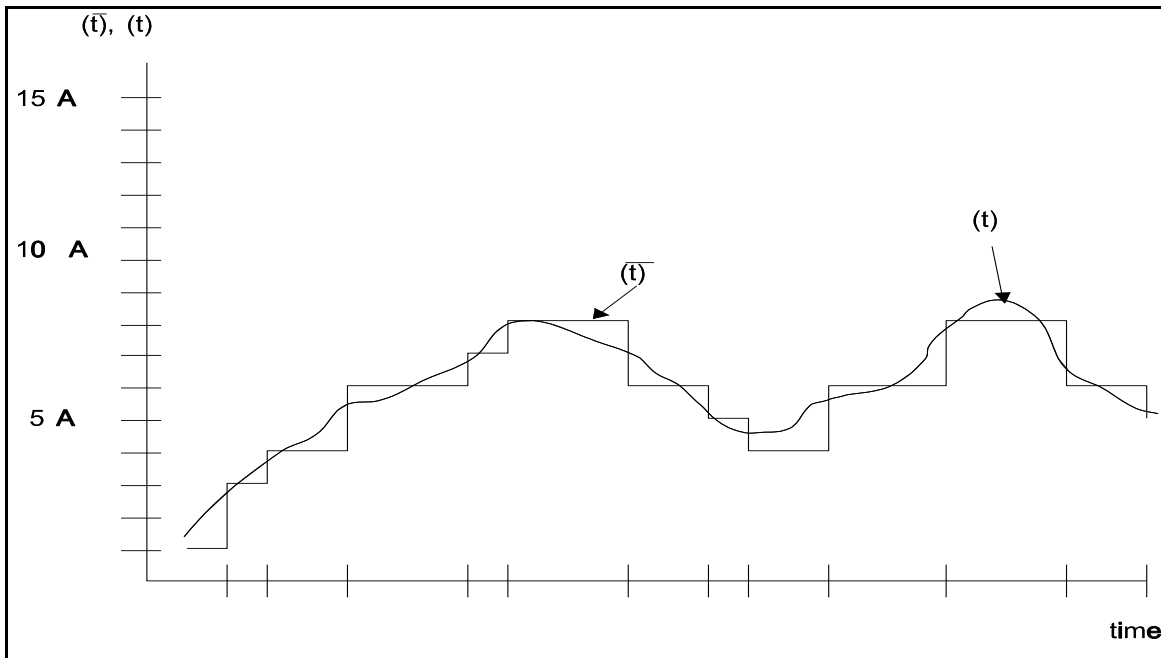
$$a=0.8781, b=0.1108 \text{ και } \eta=0.572$$

Για μεγαλύτερη ακρίβεια στο μοντέλο πρέπει να αυξήσουμε την τάξη $m > 1$, πράγμα που έχει σαν συνέπεια την αύξηση της δυσκολίας των υπολογισμών.

Για την εξαγωγή των παραπάνω τύπων Maglaris, Anastassiou, Sen, Karlsson, Robbins πειραματίστηκαν σε video διάρκειας 10 secs, με 30 frame/sec και 250.000 pixel/frame οπότε 1 bit/pixel αντιστοιχεί σε 7.5 Mbits/sec.

Μοντέλο Β: Discrete-state, continuous-time Markov Process

Ο ρυθμός μετάδοσης $\lambda(t)$ (continuous-time, continuous-state process) μιας πηγής video χωρίς σημαντικές αλλαγές στις σκηνές δειγματοληπτείται σε τυχαίους χρόνους και κβαντοποιείται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.2α. Με άλλα λόγια ο $\lambda(t)$ προσεγγίζεται από μια continuous-state process $\bar{\lambda}(t)$ με διακριτά βήματα σε τυχαίους χρόνους. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να βελτιωθεί μειώνοντας το βήμα κβαντισμού A και αυξάνοντας το ρυθμό δειγματοληψίας.



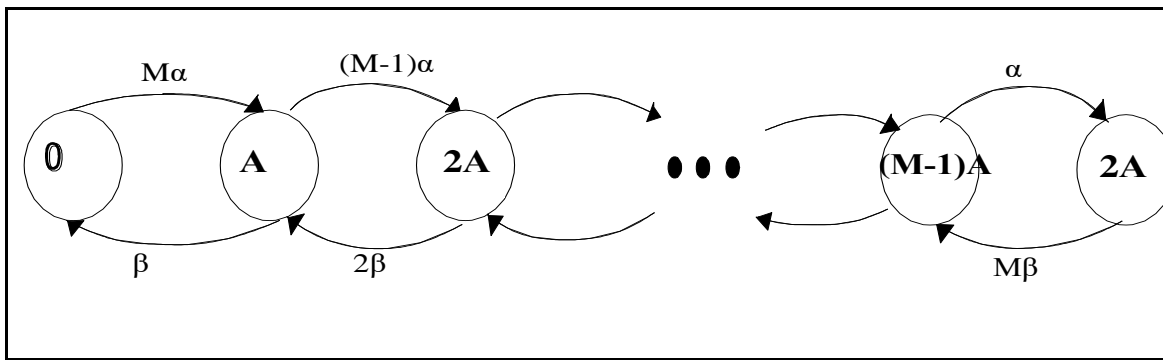
Σχήμα 5.3.2α Δειγματοληψία και κβαντοποίηση του ρυθμού μετάδοσης

Το διάγραμμα μεταπτώσεων του $\bar{\lambda}(t)$ φαίνεται στο Σχήμα 5.3.2β. Ο ρυθμός $\bar{\lambda}(t)$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τη μοντελοποίηση μιας μοναδικής πηγής όσο και για τη μοντελοποίηση της κίνησης που προέρχεται από τον πολύπλεξη πολλών πηγών. Η συνολική διαδικασία αφίξεως που προκύπτει από την πολύπλεξη N πηγών video μπορεί να μεταβαίνει από κατάσταση σε κατάσταση ανάμεσα σε $M+1$ επίπεδα (καταστάσεις). Στο σχήμα 5.3.2β το νούμερο

σε κάθε κατάσταση δείχνει το ρυθμό μετάδοσης σε κάθε κατάσταση (το A είναι σταθερό). Για τον υπολογισμό των A , α , β χρησιμοποιούνται πειραματικά δεδομένα για το μέσο ρυθμό μετάδοσης $E[\bar{\lambda}(t)]$, για τη διασπορά $\bar{C}_N(0)$ και τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $\bar{C}_N(\tau)$.

Επίσης :

$$E(\bar{\lambda}_N) = MA \frac{\alpha}{\alpha + \beta}, \quad \bar{C}_N(0) = MA^2 \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \left(1 - \frac{\beta}{\alpha + \beta}\right), \quad \bar{C}_N(\tau) = \bar{C}_N(0) e^{-(\alpha + \beta)\tau}$$



Σχήμα 5.3.2β Διάγραμμα μεταπτώσεως των καταστάσεων

Με τη χρήση των παραπάνω εξισώσεων μπορούμε να υπολογίσουμε τα α , β και A σε συνάρτηση του αριθμού των πηγών video που πολυπλέκονται μαζί καθώς επίσης και του αριθμού των επιπέδων κβαντοποίησης:

$$\beta = 3.9 / \left(1 + \frac{5.04458N}{M}\right)$$

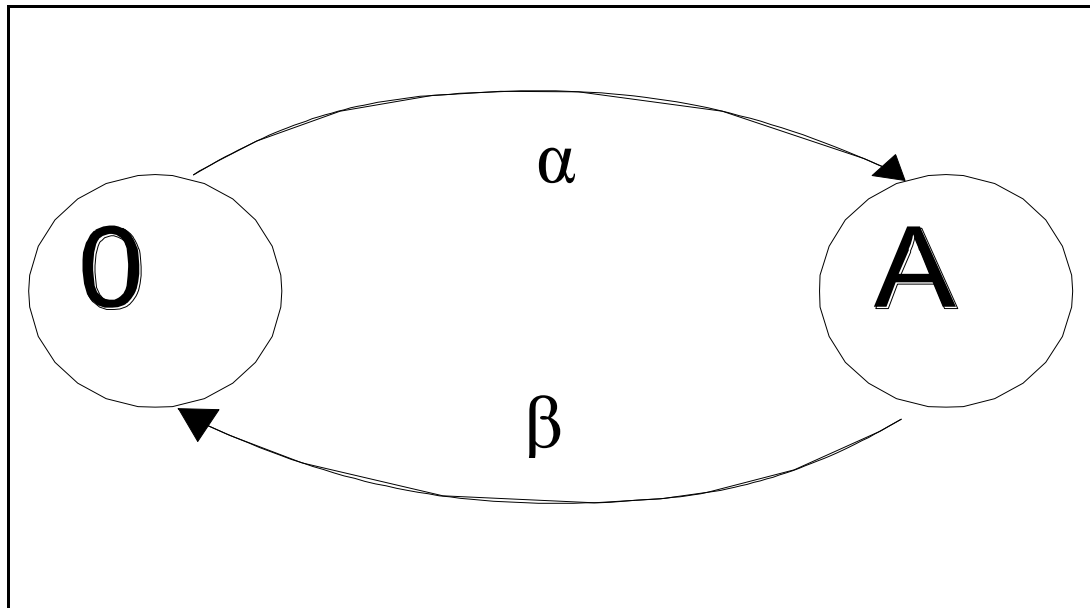
$$\alpha = 3.9 - \beta$$

$$A = 0.1 + 0.52 \frac{N}{M}$$

Τυπική τιμή για την παράμετρο M είναι $20 \times N$.

Τέλος, η διαδικασία που φαίνεται στο Σχήμα 5.3.2β μπορεί να ληφθεί από την υπέρθεση M ανεξάρτητων minisources καθεμιά από τις οποίες μεταβαίνει μεταξύ μιας κατάστασης όπου ο ρυθμός μετάδοσης είναι 0 bit/pixel (OFF κατάσταση) και μιας κατάστασης όπου ο ρυθμός

μετάδοσης είναι A bit/pixel (ON κατάσταση). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.2γ η μετάβαση από την κατάσταση OFF στην κατάσταση ON γίνεται με ρυθμό α και από την ON στην κατάσταση OFF με ρυθμό β . Τα α και β δίνονται από τους παραπάνω τύπους.



Σχήμα 5.3.2γ Mini-source model

μετάδοσης είναι A bit/pixel (ON κατάσταση). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.2γ η μετάβαση από την κατάσταση OFF στην κατάσταση ON γίνεται με ρυθμό α και από την ON στην κατάσταση OFF με ρυθμό β . Τα α και β δίνονται από τους παραπάνω τύπους.

5.3.3 Μοντελοποίηση Πηγών Δεδομένων

Η κίνηση που παράγεται από μια πηγή δεδομένων μπορεί να περιγραφεί από μια Poisson κατανομή (περίπτωση συνεχούς χρόνου), δηλ. ο χρόνος μεταξύ δύο συνεχόμενων αφίξεων δίνεται από μια εκθετική κατανομή. Στην περίπτωση διακριτού χρόνου, ο χρόνος μεταξύ δύο συνεχόμενων αφίξεων δίνεται από μια γεωμετρική κατανομή. Κάθε άφιξη μπορεί να χαρακτηρίζεται από ένα μόνο ATM πακέτο (περίπτωση interactive εφαρμογών) ή από την άφιξη μεγάλου αριθμού ATM πακέτων (batch arrivals) ταυτόχρονα (περίπτωση file transfer).

Σε δίκτυα ATM η διαδικασία αφίξεως των data-cells δεν έχει ακόμη καθορισθεί πλήρως. Πρέπει επομένως να εκτιμήσουμε τις ιδιότητες των διαφόρων διαδικασιών αφίξεως data-cells από τη στατιστική ανάλυση των data πακέτων. Ένα χαρακτηριστικό των πακέτων δεδομένων είναι ότι η

κατανομή του μήκους των είναι η "bimodal". Αφού ένα πακέτο δεδομένων εμφανίζεται ως ριπή (burst) από ATM πακέτα, αν τα data-cells γεννώνται από κάποιο πακέτο δεδομένων που δίδεται ως AAL SDU (ATM adaptation layer, service data unit) και η AAL είναι γρήγορη, λόγω της "bimodal" κατανομής του μήκους των πακέτων, η ριπή των data-cells μπορεί να ακολουθεί την "bimodal" κατανομή.

Αν ένας συνδρομητής παράγει μια μεγάλη ριπή (long burst), δηλ. ένα μακρύ πακέτο δεδομένων (π.χ. μεταφορά αρχείων), ανάμεσα σε μικρές ριπές (short burst) (π.χ. commands H/Y), η γενική κατάσταση που περιγράφει την κίνηση μιας κλήσεως (traffic source) αποτελείται από καταστάσεις long-burst και short-burst. Άρα, αν και η διαδικασία αφίξεως των ATM πακέτων μιας ριπής εξαρτάται από τον τρόπο εφαρμογής του πρωτοκόλλου των υψηλότερων επιπέδων του PRM (όπως π.χ. το AAL) και δεν μπορεί ακόμη να καθορισθεί, η διαδικασία αφίξεως των data πακέτων είναι πολύ πιθανόν να είναι μια "Switched Poisson" διαδικασία, δηλ. ή Interrupted Poisson Process (IPP), ή γεωμετρικώς διαμορφωμένη ντετερμινιστική διαδικασία (GMDP) ή Switched Batch Bernoulli Process (SBBP).

5.3.4 Μοντελοποίηση Ετερογενών, Υπερτεθειμένων Πηγών Κινήσεως

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των ATM δικτύων είναι ότι διεκπεραιώνουν κίνηση από υπέρθεση ετερογενών πηγών. Για να βρούμε το μοντέλο της υπερτεθειμένης κινήσεως δύο μέθοδοι έχουν επινοηθεί: η μέθοδος της στατιστικής υπέρθεσης και η μέθοδος της υπέρθεσης των επί μέρους μοντέλων.

Η μέθοδος της στατιστικής υπέρθεσης υπολογίζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά των επί μέρους χαρακτηριστικών και εν συνεχεία τα χρησιμοποιεί για να υπολογίσει τα στατιστικά χαρακτηριστικά της συνισταμένης διαδικασίας. Τελικώς υπολογίζει ένα μοντέλο στο οποίο ταιριάζουν τα χαρακτηριστικά της συνισταμένης διαδικασίας. Αφού τα στατιστικά χαρακτηριστικά της συνισταμένης διαδικασίας πρέπει να υπολογισθούν από τα χαρακτηριστικά των επί μέρους διαδικασιών, θα πρέπει να είναι κατάλληλα για τέτοιους υπολογισμούς. Θα πρέπει παραδείγματος χάριν να είναι στατιστικά αριθμητικών διαδικασιών (counting process statistics). Μια κατάλληλη μέθοδος έχει προταθεί από τους Heffes και Loucantoni. Είναι αυτή που ανεφέρθη ανωτέρω, στη μοντελοποίηση κλήσεων ομιλίας (πηγών φωνής). Τα τέσσερα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αυτή είναι στατιστικά χαρακτηριστικά για την "counting process" του αριθμού των αφικνούμενων ATM πακέτων. Αν παραγάγουμε αυτά τα χαρακτηριστικά για μια πηγή κινήσεως μπορούμε άμεσα να βρούμε τα στατιστικά χαρακτηριστικά της υπέρθεσης

(συνισταμένης διαδικασίας). Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου της υπέρθεσης των στατιστικών είναι:

- δεν απαιτείται το μοντέλο των επί μέρους διαδικασιών,
- η μέθοδος έχει εύκολους σχετικά υπολογισμούς,
- ο χώρος καταστάσεων για τη συνισταμένη διαδικασία δεν αυξάνει πολύ.

Η μέθοδος της υπέρθεσης των μοντέλων υπολογίζει πρώτα τα μοντέλα των επί μέρους διαδικασιών και εν συνεχεία τα υπερθέτει. Η μέθοδος αυτή είναι εφαρμόσιμη μόνο όταν το υπερτεθειμένο μοντέλο μπορεί να προκύψει άμεσα από τα επί μέρους μοντέλα, όπως είναι τα MMPPs, Phase-type Markov Renewals, **Markovian arrival processes (MAP)**, MAP διακριτού χρόνου, κ.α. Αν π.χ. το μοντέλο MMPP χρησιμοποιηθεί για τα επί μέρους μοντέλα, αποδεικνύεται ότι το υπερτεθειμένο μοντέλο μπορεί να περιγραφεί με ένα MMPP με μεγάλο χώρο καταστάσεων.

5.4 Στατιστική Πολύπλεξη στο Επίπεδο των ATM Πακέτων

Για να υπολογίσουμε το κέρδος στατιστικής πολύπλεξης πρέπει να μοντελοποιήσουμε τον κόμβο μεταγωγής ATM (ATM switching node), το ATM δίκτυο και τις διαδικασίες αφίξεως των ATM πακέτων όπως περιγράψαμε ανωτέρω.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της στατιστικής πολύπλεξης σε επίπεδο ATM πακέτων στα ATM δίκτυα είναι:

1. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης των ATM πακέτων (peak cell rate) έχει μεγάλη επίδραση στο κέρδος στατιστικής πολύπλεξης και η επίδραση αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη όσο αυξάνει ο λόγος του VC bandwidth προς το VP bandwidth.
2. Το μήκος της ριπής (burst length) επηρεάζει τη στατιστική πολύπλεξη όταν η ριπή είναι μικρότερη από το μέγεθος του buffer στην είσοδο του VP, αλλά όχι πάρα πολύ μικρότερη.
3. Όταν ο αριθμός των πολυπλεγμένων VC συνδέσεων σε ένα VP είναι μεγάλος ή ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης σε ένα VC είναι μικρός, τότε ο μέσος ρυθμός μετάδοσης (average bit rate) είναι μια σημαντική παράμετρος για τη στατιστική πολύπλεξη.

4. Όταν το VP bandwidth είναι σταθερό, το κέρδος στατιστικής πολύπλεξης γίνεται μεγάλο όταν πολυπλέκονται ομοιογενή VCs.
5. Ας θεωρήσουμε δύο VPs: VP1 με bandwidth B_1 και VP2 με bandwidth B_2 . Όταν τα VPs χρησιμοποιούνται ξεχωριστά από δύο υπηρεσίες τότε και οι buffers τους μήκους K_1 και K_2 χρησιμοποιούνται ξεχωριστά από τα VCs των VP1 και VP2 (σχήμα 5.3). Όταν τα VPs χρησιμοποιούνται από κοινού από τα VCs τότε το διαθέσιμο bandwidth είναι B_1+B_2 και το μήκος του buffer είναι K_1+K_2 . Η συνολική απώλεια ATM πακέτων, CLR, στην από κοινού χρήση των VP1 και VP2, είναι μικρότερη απ' ό τι η μέση τιμή απώλειας ATM πακέτων στη ξεχωριστή χρήση των VP1 και VP2. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι στην από κοινού χρήση των VPs η ποιότητα εξυπηρέτησεως (QOS) για κάθε μία υπηρεσία είναι καλύτερη απ' ό τι στη ξεχωριστή χρήση των VPs. Οι παρατηρήσεις αυτές ισχύουν για τα λεγόμενα ντετερμινιστικά VPs, όπου δεν υπάρχει στατιστική πολύπλεξη μεταξύ των VPs. Δηλαδή, κάθε ένα VP ακόμη και αν είναι στο ίδιο transmission path, μεταδίδει ATM πακέτα ξεχωριστά και ανεξάρτητα. Η ανεξαρτησία αυτή παρέχεται από το λεγόμενο "VP shaping" το οποίο καθορίζει το δικαίωμα της μετάδοσης ανεξάρτητα από τον αριθμό των προς μετάδοση ATM πακέτων.

Με άλλα λόγια τα 1. και 3. δηλώνουν τη σπουδαιότητα του peak cell rate και του average cell rate ως παραμέτρους κινήσεως, το 2. υποδηλώνει ότι το burst length είναι πολύ σημαντικό στο καθορισμό της ποιότητας εξυπηρέτησεως QOS και τα 4. και 5. υποδηλώνουν την ανάγκη υπάρξεως σχεδίου προτεραιότητας στη χρήση των buffers και κατάλληλη διαχείριση των VPs, λαμβάνοντας υπόψη το bandwidth και το QOS των VCs.

5.5 Στατιστική Πολύπλεξη των Κλήσεων

Οι χρήστες των ATM δικτύων δημιουργούν ATM πακέτα σύμφωνα με το ποσό της πληροφορίας που θέλουν να μεταφέρουν. Το ποσό των πόρων του δικτύου που απαιτείται από κάθε χρήστη, αλλάζει συνεχώς ανάλογα με τον αριθμό των ATM πακέτων που δημιουργούνται ανά μονάδα χρόνου. Γενικά οι πόροι του δικτύου μοιράζονται από τους χρήστες (για την ακρίβεια, οι πόροι του δικτύου μοιράζονται είτε με VC συνδέσεις είτε με VP συνδέσεις που εγκαθίστανται από τις απαιτήσεις των χρηστών). Τα ποσά C_1, C_2, \dots, C_N των πόρων που απαιτούνται από τους χρήστες $1, 2, \dots, N$, δεν παίρνουν ταυτόχρονα τις μέγιστες τιμές τους

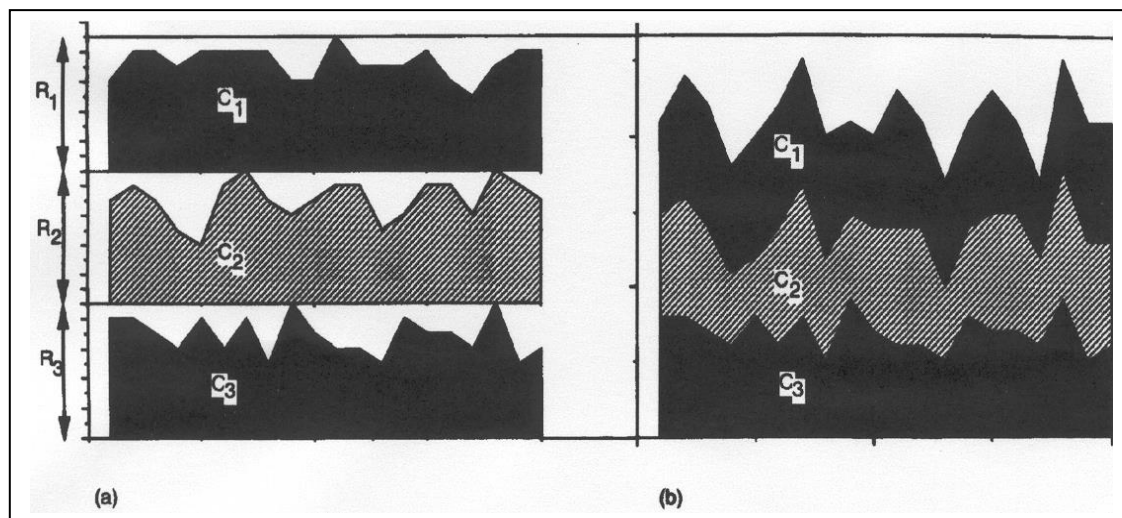
R_1, R_2, \dots, R_N (σχήμα 5.5.1). Έτσι για ένα σταθερό αριθμό χρηστών το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιήσει λιγότερους πόρους από ότι θα χρησιμοποιούσε αν οι πόροι προσδιορίζονταν σύμφωνα με τις μέγιστες τιμές που ζητεί κάθε χρήστης, ή, το δίκτυο μπορεί να αυξήσει τους χρήστες που θα χρησιμοποιήσουν ένα σταθερό ποσό πόρων.

Η κατάσταση που περιγράψαμε προηγουμένως καλείται *κέρδος στατιστικής πολύπλεξης* και είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των ATM δικτύων. Υπολογίζοντας αυτό το κέρδος μπορούμε να απαντήσουμε στις παρακάτω ερωτήσεις:

- Ποια στρατηγική διαχείρισης των VPs μπορεί να μας δώσει ένα μεγάλο κέρδος στατιστικής πολύπλεξης.
- Πόσο μπορούμε να μειώσουμε το κόστος επικοινωνίας χρησιμοποιώντας την κωδικοποίηση μεταβλητού ρυθμού.
- Ποιες παράμετροι κίνησης είναι κατάλληλες ως τα χαρακτηριστικά κίνησης μιας πηγής (source traffic descriptor).

5.5.1 Αποτελέσματα της από Κοινού Χρήσεως των Πόρων του Δικτύου (Resource Sharing Effect)

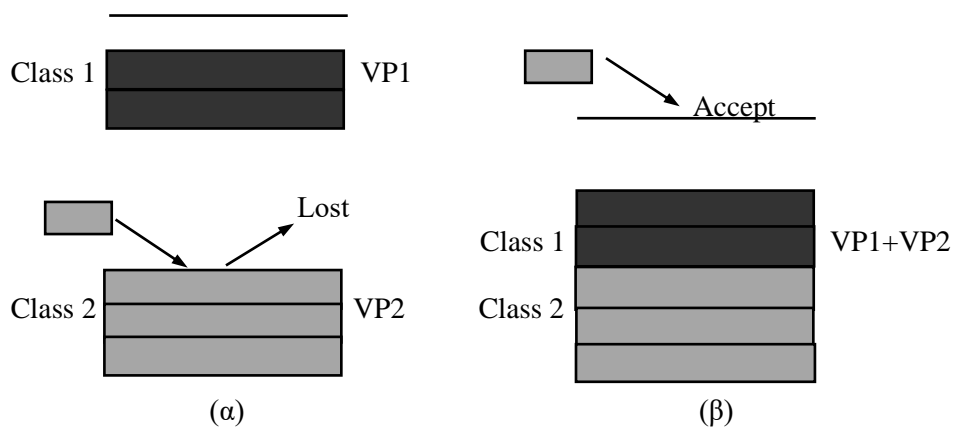
Το κέρδος στατιστικής πολύπλεξης προκαλείται από τις συνολικές ροές των ATM πακέτων (διαδικασίες άφιξης ATM πακέτων) στους πόρους, οι οποίοι μοιράζονται αυτή τη συνολική ροή. Υπ' αυτή την έννοια το κέρδος είναι ιδιότητα του ATM Πακέτου-επιπέδου.



Σχήμα 5.5.1α Κέρδος στατιστικής πολύπλεξης: (α) χωρίς κέρδος στατιστικής πολύπλεξης
(β) με κέρδος στατιστικής πολύπλεξης

Επίσης το αποτέλεσμα του κέρδους στατιστικής πολύπλεξης από την από κοινού χρήση των πόρων του δικτύου μπορεί να εμφανιστεί στο επίπεδο κλήσης και έχει μελετηθεί στις αναλύσεις δικτύων μεταγωγής κυκλώματος, υποθέτοντας ετερογενή κίνηση (πολλαπλές κατηγορίες κίνησης). Αυτό το θέμα θα το εξετάσουμε εδώ λαμβάνοντας υπόψη ότι:

1. Μια ίδια ιδιότητα με τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος παρατηρείται στο κέρδος στατιστικής πολύπλεξης. Αφού κατανοήσουμε το αποτέλεσμα του Resource Sharing στο επίπεδο κλήσης, θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε το κέρδος στατιστικής πολύπλεξης.
2. Το κέρδος πρέπει να εξεταστεί και από την άποψη του ATM πακέτου και από την άποψη της κλήσης. Μερικές φορές υπάρχει ένας συμβιβασμός (trade off) μεταξύ του κέρδους στατιστικής πολύπλεξης (επίπεδο ATM Πακέτου) και του αποτελέσματος του Resource Sharing στο επίπεδο κλήσης.
3. Το αποτέλεσμα του Resource Sharing στο επίπεδο κλήσης επηρεάζει τη στρατηγική διαχείριση των VPs.



Σχήμα 5.5.1β Το αποτέλεσμα του Resource Sharing:

(α) VP αφιερωμένο σε μία κατηγορία,

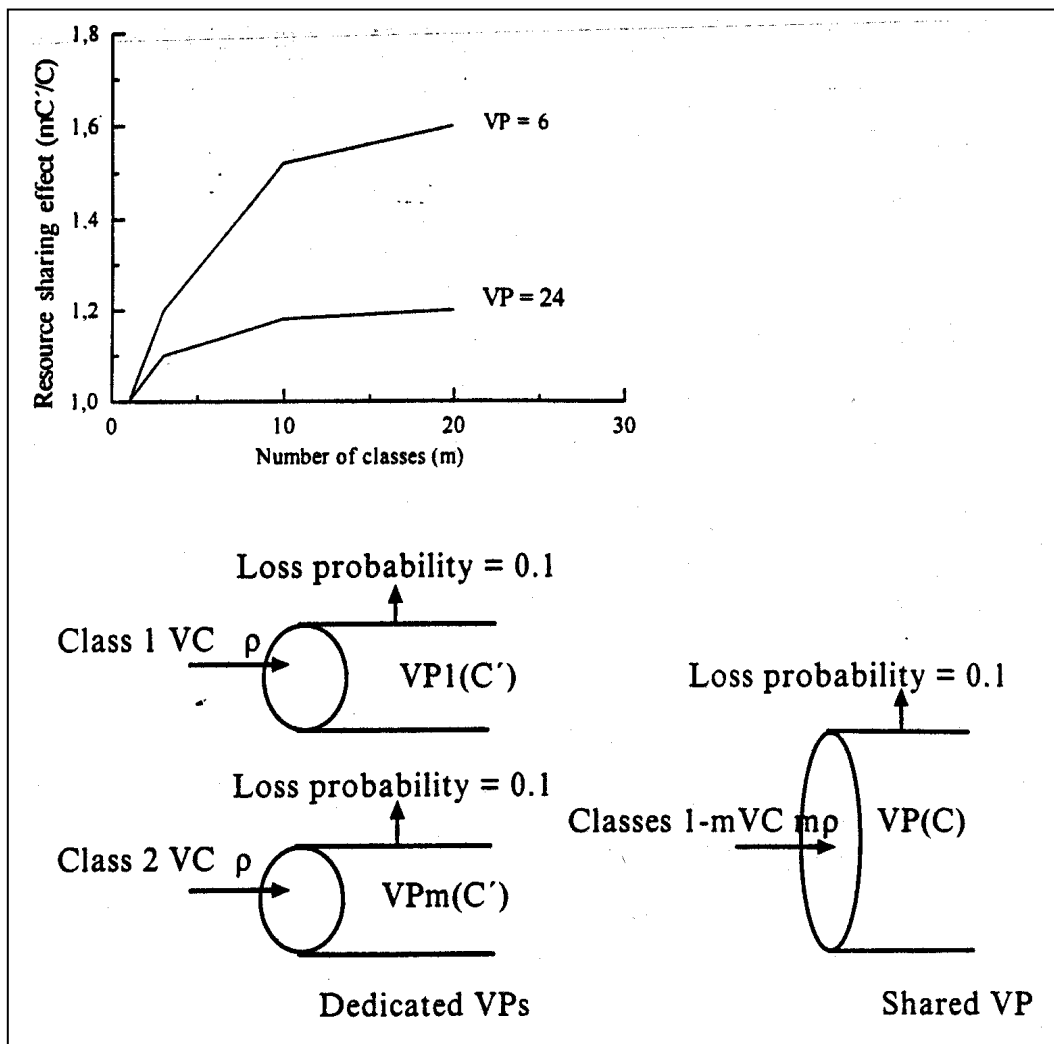
(β) το VP το μοιράζονται από κοινού οι δύο κατηγορίες κίνησης.

Ακολούθως εξετάζεται η επίδραση της στατιστικής πολύπλεξης των κλήσεων (resource sharing στο επίπεδο των κλήσεων) αναφορικά με:

- α) τον αριθμό των κατηγοριών των πηγών που προσφέρουν την κίνηση. Ωστόσο κάθε κατηγορία ή κλάση όπως λέμε (service-class ή απλά class) έχει τα ίδια χαρακτηριστικά κίνησης,

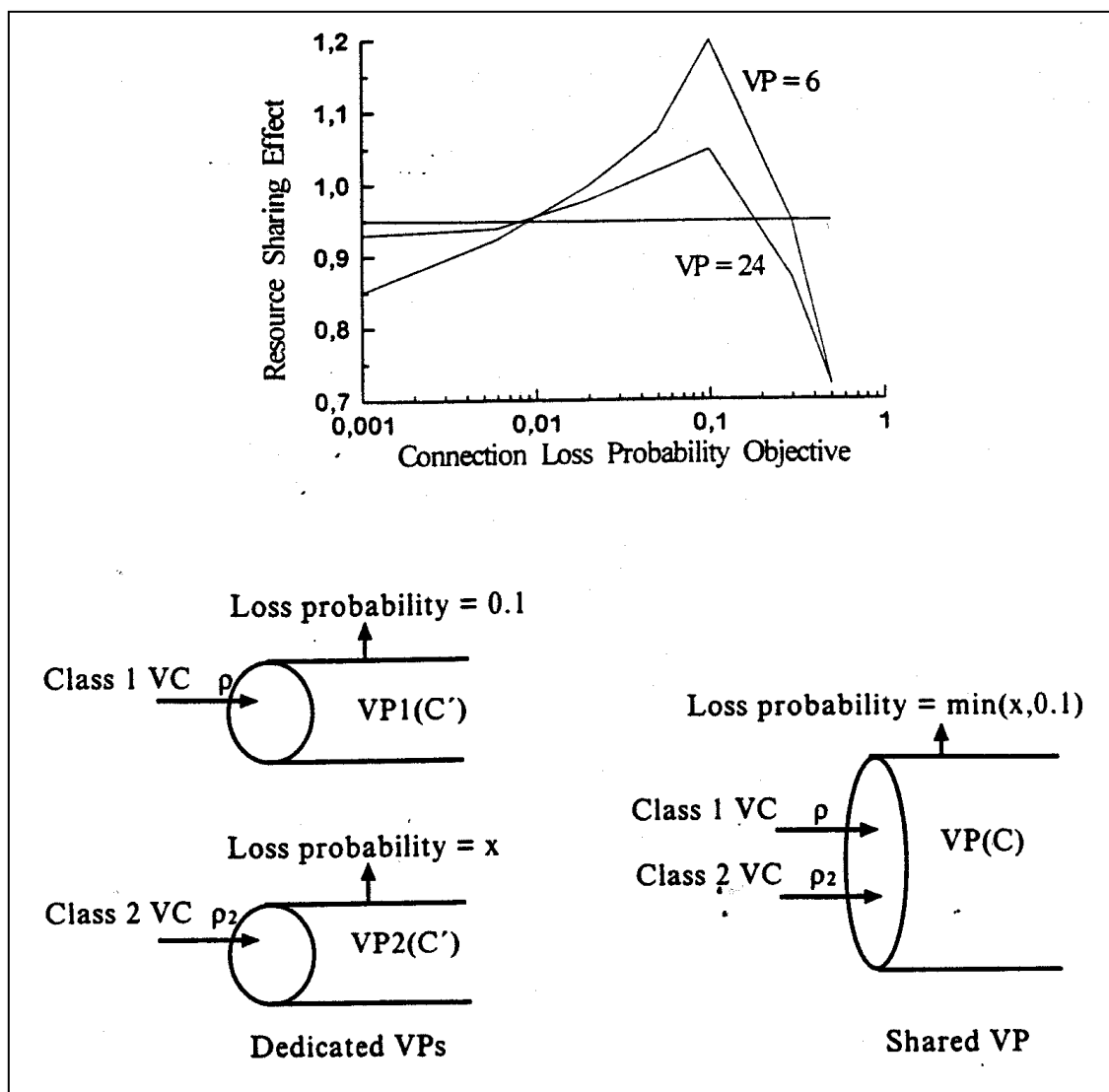
- β) την πιθανότητα απώλειας κλήσεως (call blocking probability, ή loss probability),
 γ) το απαιτούμενο εύρος ζώνης ανά κλήση (bandwidth/call) όταν έχουμε δύο κατηγορίες πηγών κίνησης (δηλ. δύο υπηρεσίες π.χ. τηλεφωνική υπηρεσία και υπηρεσία video).

Εξετάζουμε ένα παράδειγμα στο οποίο ένα VC της κατηγορίας i καταλαμβάνει bandwidth C_i καθ' όλη τη διάρκεια της κλήσης (ή της συνδέσεως όπως λέμε). Εάν ένα VP είναι αφιερωμένο σε μία κατηγορία VCs και το i -ιοστό VP είναι πλήρως κατειλημμένο, τότε ένα VC της κατηγορίας i δεν μπορεί να μπει στο VP ακόμη και αν υπάρχει αρκετό ελεύθερο bandwidth σε κάποιο άλλο VP. Όμως, εάν το bandwidth όλων των VPs μπορούν να το μοιραστούν όλες οι κατηγορίες, τότε το VC μπορεί να μπει στο σύστημα (σχήμα 5.5.1β). Το υπόλοιπο αυτής της παραγράφου αναλύει πιο λεπτομερώς και ποσοτικά το αποτέλεσμα του Resource Sharing.



Σχήμα 5.5.1γ(α) Το αποτέλεσμα του Resource Sharing σε σχέση με τον αριθμό των κατηγοριών.

Για να αναλύσουμε τις στατιστικές ιδιότητες στο επίπεδο κλήσης, πρέπει να εξετάσουμε τη διαδικασία άφιξης και την κατανομή του χρόνου διάρκειας (holding time) μιας κλήσης. Αυτά είναι δύσκολα να υπολογιστούν. Αλλά ακόμα και όταν έχουμε Multipoint και Multiconnection υπηρεσίες οι οποίες προκαλούν ποικίλες διαδικασίες άφιξης VC, μπορούμε να υποθέσουμε ότι μια διαδικασία άφιξης ακολουθεί την Poisson κατανομή και ο χρόνος διάρκειας των κλήσεων ακολουθεί την εκθετική κατανομή. Επομένως, αυτή την υπόθεση θα τη χρησιμοποιήσουμε στα επόμενα παραδείγματα.



Σχήμα 5.5.1γ(β) Το αποτέλεσμα του Resource Sharing σε σχέση με την επιθυμητή πιθανότητα απώλειας κλήσης

Το σχήμα 5.5.1γ δείχνει την αποτελεσματικότητα του Resource Sharing. Το σχήμα 5.5.1γ(α) δείχνει το αποτέλεσμα του Resource Sharing που ορίζεται από το λόγο του αναγκαίου bandwidth δίχως Resource Sharing (mC') ως προς το αναγκαίο bandwidth με Resource Sharing (C). Έχουμε υποθέσει ότι κάθε VC οποιασδήποτε κατηγορίας απαιτεί 1 μονάδα bandwidth και η επιθυμητή πιθανότητα απώλειας κλήσης να είναι 0.1 για κάθε κατηγορία. Οι δύο καμπύλες σε αυτό το σχήμα δείχνουν τα αποτελέσματα όταν το bandwidth C' ενός VP που είναι αφιερωμένο σε μία κατηγορία, είναι 6 ή 24 μονάδες bandwidth.

Σε κάθε περίπτωση, για ένα VP το οποίο είναι αφιερωμένο σε μία κατηγορία (δηλ. δίχως Resource Sharing), μπορούμε να υπολογίσουμε το προσφερόμενο φορτίο ρ και επίσης να υπολογίσουμε το αναγκαίο bandwidth C προσαρμόζοντας το προσφερόμενο φορτίο $m\rho$ με Resource Sharing, όπου m είναι ο αριθμός των κατηγοριών. Επειδή υποθέσαμε ότι η άφιξη VC ακολουθεί την Poisson κατανομή, η πιθανότητα απώλειας κλήσης σ' ένα VP (με C' μονάδες bandwidth) δίνεται από τον τύπο Erlang-B όπου $C'=6$ ή 24 μονάδες bandwidth. Επομένως το φορτίο ρ δίνεται από τη λύση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\frac{\rho^{C'} / C!}{\sum_{k=0}^{C'} \rho^k / k!} = 0.1 \quad (5.5.1)$$

Όταν υπάρχουν m κατηγορίες VC σ' ένα VP, το συνολικό προσφερόμενο φορτίο στο VP το οποίο μοιράζονται όλες τις κατηγορίες είναι $m\rho$ και η πιθανότητα απώλειας κλήσης για κάθε κατηγορία δίνεται ξανά από τον τύπο Erlang-B. Έτσι λύνοντας την παρακάτω εξίσωση παίρνουμε το απαιτούμενο bandwidth C :

$$\frac{(m\rho)^C / C!}{\sum_{k=0}^C (m\rho)^k / k!} = 0.1 \quad (5.5.2)$$

Αν ο x -άξονας είναι ο αριθμός m των κατηγοριών και ο y -άξονας είναι το αποτέλεσμα (mC'/C), τότε έχουμε την καμπύλη του σχήματος 5.5.1γ(α). Αυτό το σχήμα δείχνει ότι το αποτέλεσμα του Resource Sharing αυξάνει όταν αυξάνονται οι κατηγορίες και ότι το Resource Sharing είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό όταν υπάρχει μικρή κίνηση στις ξεχωριστές κατηγορίες.

Ωστόσο, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.5.1γ(β) και 5.5.1γ(γ) το Resource Sharing δεν είναι πάντα ωφέλιμο. Το σχήμα 5.5.1γ(β) δείχνει το αποτέλεσμα του Resource Sharing σε

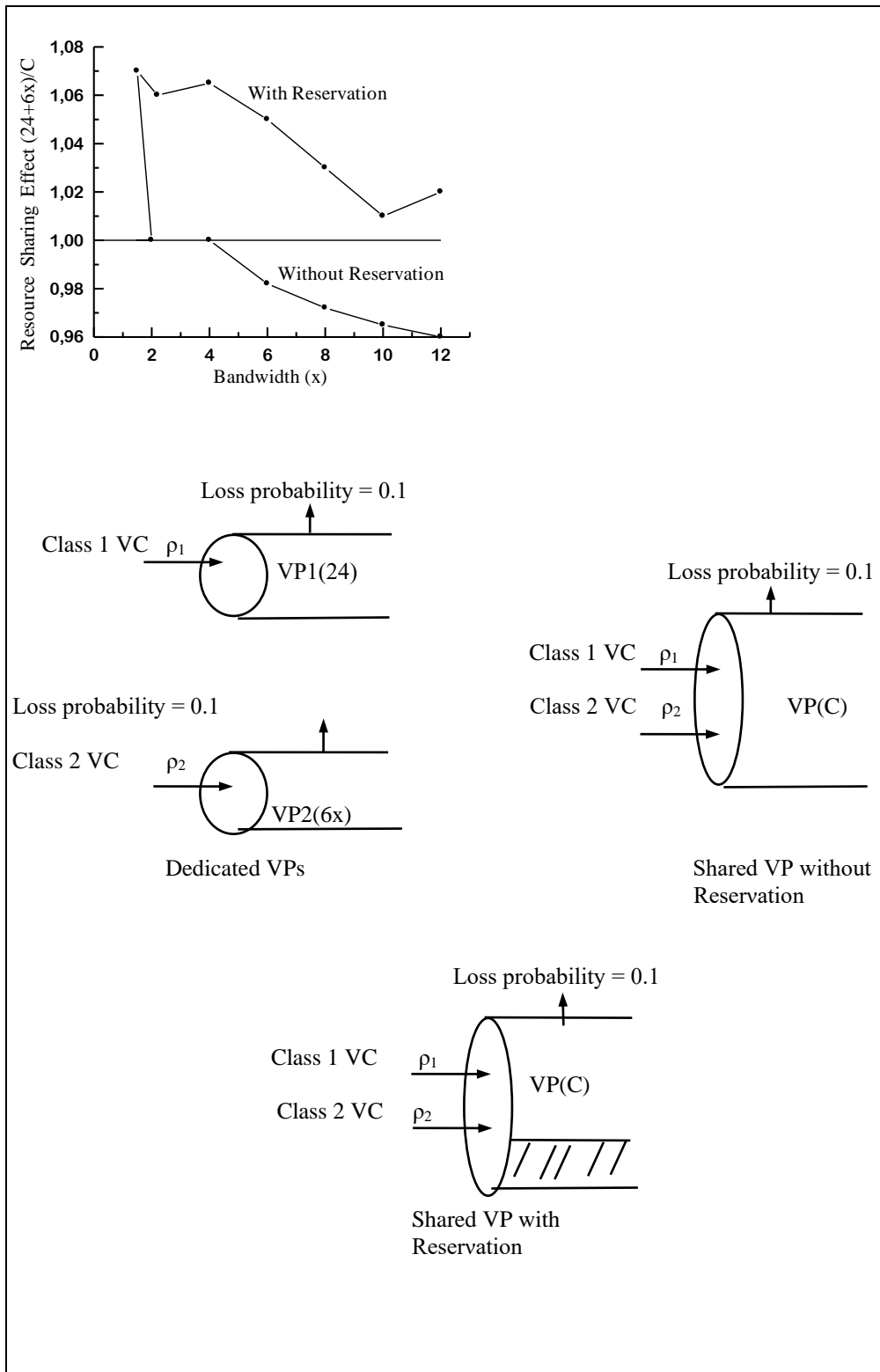
συνάρτηση με την επιθυμητή πιθανότητα απώλειας κλήσης της κατηγορίας 2. Εδώ υποθέτουμε ότι η επιθυμητή πιθανότητα απώλειας κλήσης της κατηγορίας 1 είναι σταθερή και ίση με 0.1, κάθε VC οποιασδήποτε κατηγορίας απαιτεί 1 μονάδα bandwidth, και το bandwidth C' ενός VP με Dedicated Strategy είναι 6 ή 24 μονάδες bandwidth. Με τη Dedicated VP Strategy (δηλ. ένα VP είναι αφιερωμένο σε μία κατηγορία VC), το προσφερόμενο φορτίο σ' ένα VP μπορεί να υπολογιστεί. Θεωρούμε για την κατηγορία 2 ότι το προσφερόμενο φορτίο είναι ρ_2 και η επιθυμητή πιθανότητα απώλειας κλήσης είναι x . Τότε υπολογίζουμε το ρ_2 από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\rho_2^{C'} / C'!}{\sum_{k=0}^{C'} \rho_2^k / k!} = x \quad (5.5.3)$$

Επειδή αλλάζει η επιθυμητή πιθανότητα απώλειας κλήσης της κατηγορίας 2, αλλάζει και το προσφερόμενο φορτίο της. Με την Shared VP Strategy (δηλ. ένα VP μοιράζεται από πολλές κατηγορίες VC), η πιθανότητα απώλειας της κάθε κατηγορίας είναι δυνατόν να υπολογιστεί. Σ' αυτό το παράδειγμα, στο Shared VP οι πιθανότητες απώλειας είναι ίδιες και για τις δύο κατηγορίες, διότι η κατανομή άφιξης των κλήσεων οποιασδήποτε κατηγορίας είναι Poisson κατανομή. Άρα το αναγκαίο bandwidth για το Shared VP πρέπει να ικανοποιεί τη χειρότερη επιθυμητή πιθανότητα απώλειας κλήσης, οποιαδήποτε τιμή έχει αυτή (π.χ έστω ότι η επιθυμητή πιθανότητα απώλειας κλήσης της μιας κατηγορίας είναι 0.01 και της άλλης κατηγορίας είναι 0.1, τότε το Shared VP πρέπει να ικανοποιεί το 0.01). Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι το Shared VP δεν είναι ωφέλιμο όταν η διαφορά μεταξύ των επιθυμητών τιμών είναι μεγάλη. Το φορτίο της κατηγορίας 1 είναι ρ , το οποίο ορίζεται από την (5.5.1). Γι' αυτό το συνολικό προσφερόμενο φορτίο στο Shared VP είναι $\rho + \rho_2$ και η πιθανότητα απώλειας κλήσης για την κάθε κατηγορία δίνεται από τον τύπο Erlang-B. Το αναγκαίο bandwidth C για το Shared VP δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{(\rho + \rho_2)^C / C!}{\sum_{k=0}^C (\rho + \rho_2)^k / k!} = \min(x, 0.1) \quad (5.5.4)$$

Όταν στο x -άξονα είναι η επιθυμητή πιθανότητα απώλειας κλήσης της κατηγορίας 2 και στο y -άξονα είναι το $(2C'/C)$ τότε παίρνουμε την καμπύλη του σχήματος 5.5.1γ(β). Το σχήμα 5.5.1γ(γ) δείχνει το αποτέλεσμα του Resource Sharing στα VPs που έχουν ετερογενή κίνηση. Η επιθυμητή πιθανότητα απώλειας κλήσης για κάθε κατηγορία είναι 0.1.



Σχήμα 5.5.1(γ) Το αποτέλεσμα του Resource Sharing ως προς το απαιτούμενο bandwidth ανά κλήση

Ένα VC κατηγορίας 1 απαιτεί 1 μονάδα bandwidth και όταν το VP είναι αφιερωμένο σε κίνηση κατηγορίας 1 τότε το VP bandwidth είναι 24. Όταν το VP είναι αφιερωμένο σε κίνηση κατηγορίας 2, τότε το VP bandwidth είναι έξι φορές το VC bandwidth κατηγορίας 2. Το φορτίο ρ_i που μπορεί να προσαρμοστεί σ' ένα VP που είναι αφιερωμένο σε μία κατηγορία δίνεται από την (5.5.1), όπου $C'=24$ για την κατηγορία 1 και $C'=6$ για την κατηγορία 2. Όταν στο Shared VP δεν υπάρχει Bandwidth Reservation (δηλ. η κλήση γίνεται αποδεκτή μόνο εάν υπάρχει αρκετό ελεύθερο VP bandwidth για την κλήση), τότε το Shared VP δεν είναι ωφέλιμο. Αυτό συμβαίνει διότι η πιθανότητα απώλειας είναι μεγάλη για το broadband VC. Αυτό μπορεί να επαληθευθεί υπολογίζοντας το αποτέλεσμα που έχει μορφή γινομένου (Product Form Solution), για την πιθανότητα μόνιμου καταστάσεως.

Σ' ένα Shared VP, θέτουμε x_i τον αριθμό των VCs κατηγορίας i και θεωρούμε την διαδικασία (x_1, x_2) . Τότε προκύπτει ότι:

$$\Pr(x_1 = i, x_2 = j) = \frac{\rho_1^i \rho_2^j}{i! j!} \sum_{k,l} \frac{\rho_1^k \rho_2^l}{k! l!} \quad (5.5.5)$$

Γι' ένα VC κατηγορίας 1 η πιθανότητα απώλειας είναι $\sum_{i+jx=C} \Pr(x_1 = i, x_2 = j)$ και γι' ένα

VC κατηγορίας 2 είναι $\sum_{i+jx \geq C-x+1} \Pr(x_1 = i, x_2 = j)$, όπου x είναι το bandwidth ενός VC

κατηγορίας 2 και C είναι το bandwidth ενός Shared VP. Το αναγκαίο bandwidth του Shared VP υπολογίζεται υπό την προϋπόθεση ότι ικανοποιείται η επιθυμητή πιθανότητα απώλειας κλήσης της κατηγορίας 2 (broadband σύνδεση). Γι' αυτό όταν το bandwidth της broadband κλήσης είναι μεγάλο, τότε το Shared VP χειροτερεύει ακόμα περισσότερο.

Μπορούμε να αυξήσουμε την απόδοση με το Bandwidth Reservation, όπου ένα narrowband (στενής ζώνης) VC δε γίνεται αποδεκτό όταν το υπόλοιπο VP bandwidth που απομένει δεν είναι πολύ μεγάλο. (Σ' αυτό το παράδειγμα, ένα VC κατηγορίας 1 γίνεται αποδεκτό εάν και μόνο εάν απομένει αρκετό ελεύθερο bandwidth γι' ένα VC κατηγορίας 2). Όταν η κατάσταση του συστήματος είναι ο αριθμός των VCs κάθε κατηγορίας, τότε το αποτέλεσμα μορφής γινομένου δεν μπορεί να υπολογισθεί για την πιθανότητα μόνιμης κατάστασης, ακόμα και για εκθετική κατανομή του χρόνου διάρκειας των κλήσεων. Γι' αυτό είναι αναγκαίο ο αριθμητικός υπολογισμός της εξίσωσης καταστάσεως (state equation).

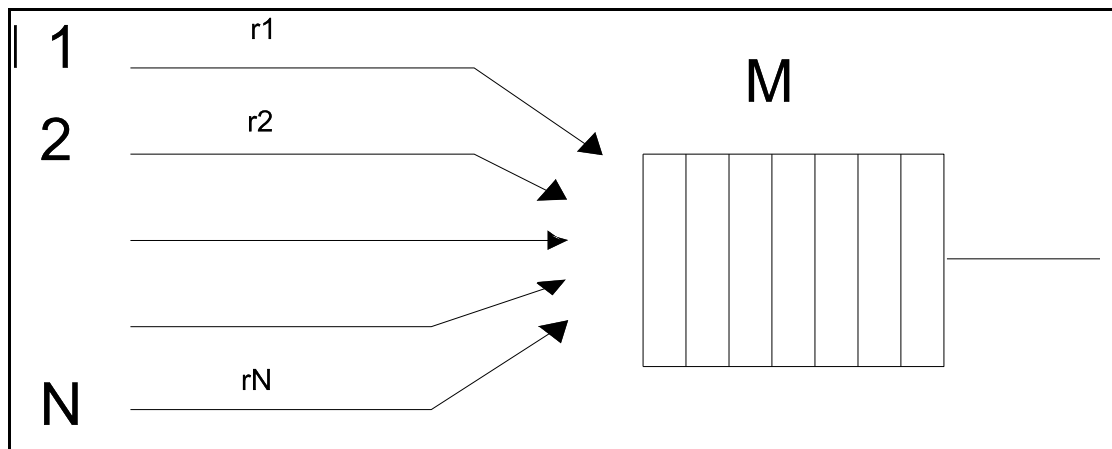
Έστω λ_i ο ρυθμός άφιξης VCs κατηγορίας i , μ_i^{-1} ο μέσος χρόνος διάρκειας των VC συνδέσεων κατηγορίας i , και $\rho(i,j)$ η πιθανότητα $\Pr(x_1=i, x_2=j)$. Υποθέτουμε ότι $\mu_1=\mu_2$ και θέτουμε $\mu=\mu_1=\mu_2$. Τότε η εξίσωση καταστάσεως είναι:

$$\begin{aligned}
 [(\lambda_1 + \lambda_2) \mathbf{1}(i + jx \leq C - x) + (i + j)\mu] \rho(i,j) &= \lambda_1 \mathbf{1}(i - 1 + jx \leq C - x) \rho(i - 1, j) \\
 &+ \lambda_2 \mathbf{1}[i + (j - 1)x \leq C - x] \rho(i, j - 1) \\
 &+ (i + 1)\mu \rho(i + 1, j) \\
 &+ (j + 1)\mu \rho(i, j + 1)
 \end{aligned} \tag{5.5.6}$$

Εάν το x είναι αληθές τότε το $\mathbf{1}(x)=1$ και εάν το x είναι ψευδές τότε $\mathbf{1}(x)=0$. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα εξετάσουμε το αποτέλεσμα του Resource Sharing στο επίπεδο ATM Πακέτου, που αυτό είναι στην ουσία το κέρδος στατιστικής πολύπλεξης.

5.6 Υπολογισμός της Πιθανότητας Απώλειας ATM Πακέτων σε ATM Πολυπλέκτη

Στην παράγραφο αυτή εξετάζουμε πως μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα απώλειας ATM πακέτων (Cell Loss Probability) σε ένα ATM πολυπλέκτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.α.



Σχήμα 5.6α ATM πολυπλέκτης

Σ' αυτό το μοντέλο, οι N ανεξάρτητες κλήσεις μεταδίδουν ATM πακέτα με ρυθμό r_n , για $n=1..K$, όπου K οι διαφορετικοί τύποι πηγών (κάθε τύπος πηγής χαρακτηρίζεται από το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης MAX και το μέσο ρυθμό μετάδοσης AVG). Τα ATM πακέτα που μεταδίδονται από τις N πηγές πολυπλέκονται ασύγχρονα σε μια γραμμή εξόδου με χωρητικότητα C διαμέσου

ενός buffer με χωρητικότητα M . Η συνολική κίνηση R των υπαρχόντων N κλήσεων υπολογίζεται

από τον τύπο:

$$R \equiv \sum_{n=1}^N r_n$$

Θεωρούμε ότι ο μόνος λόγος για την απώλεια ATM πακέτων είναι η υπερφόρτωση της γραμμής εξόδου δηλ. η κίνηση εισόδου R να είναι μεγαλύτερη από τη δυνατότητα μετάδοσης της γραμμής εξόδου C .

Γι' αυτή την περίπτωση, είναι πιθανές οι ακόλουθες καταστάσεις:

- 1) Εάν $R = X < C$ και
 - α) Ο buffer είναι άδειος, τότε παραμένει άδειος.
 - β) Ο buffer δεν είναι άδειος, τότε το περιεχόμενό του ελαττώνεται σε ένα σταθερό ρυθμό $C-X$.
- 2) Εάν $R = X = C$ τότε το περιεχόμενο του buffer δε θα αλλάξει.
- 3) Εάν $R = X > C$ και
 - α) Ο buffer δεν είναι γεμάτος, τότε το περιεχόμενο του buffer θα αυξηθεί σε ένα σταθερό ρυθμό $X-C$.
 - β) Ο buffer είναι γεμάτος, τότε τα ATM πακέτα θα χάνονται σε ένα σταθερό ρυθμό $X-C$.

Με μέγεθος buffer ίσο με m , ο αναμενόμενος ρυθμός απωλειών ATM πακέτων (L) δίνεται τότε από τον τύπο:

$$L = \sum_{X > C} (X - C) Pr(R = X) \{1 - Pr(m > 0 | R = X)\}$$

Ο χώρος του buffer που παραμένει κενός αφότου το R γίνεται μεγαλύτερο από τη χωρητικότητα εξόδου του πολυπλέκτη δημιουργεί μια χρονική υστέρηση (καθυστέρηση) πριν αρχίσει η απώλεια των ATM πακέτων. Όταν ο μήκος των burst (καταιγισμός από συνεχόμενα ATM πακέτα) των πηγών αυξάνει ενώ διατηρείται σταθερός ο μέσος και μέγιστος ρυθμός εκπομπής ATM πακέτων η χρονική αυτή υστέρηση μειώνεται έτσι ώστε να μπορεί να ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\lim_{X \rightarrow \infty} \Pr(m > 0 | R = X) = 0$$

Το OF ορίζεται ως:

$$OF \equiv \sum_{X > C} (X - C) Pr(R = X)$$

Ο αναμενόμενος ρυθμός άφιξης ATM πακέτων δίνεται από το A που ορίζεται σαν:

$$A \equiv E[R]$$

και η πιθανότητα απωλειών ATM πακέτων (P), δίνεται από τη σχέση L/A.

Η virtual cell loss probability (CLP) ορίζεται σαν:

$$PV \equiv \frac{OF}{A}$$

Υποθέτουμε ότι κάθε μια από τις N υπάρχουσες κλήσεις ανήκει σε μια από τις K κατηγορίες κλήσεων και ότι ο αριθμός των κλήσεων της κατηγορίας i (i=1,...,K) (με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης ATM πακέτων MAX_i και μέσο ρυθμό ATM πακέτων AVG_i) είναι N_i. Εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$A = \sum_{n=1}^N E[r_n] = \sum_{i=1}^K N_i \text{AVG}_i$$

και

$$OF = \sum_{n_1 + \dots + n_K \in \Omega} \left\{ \left(\sum_{i=1}^K n_i \text{MAX}_i - C \right) \prod_{j=1}^K \binom{N_j}{n_j} \left(\frac{\text{AVG}_j}{\text{MAX}_j} \right)^{n_j} \left(1 - \frac{\text{AVG}_j}{\text{MAX}_j} \right)^{N_j - n_j} \right\}$$

όπου Ω είναι το σύνολο των ακεραίων παραγόντων (n₁,...,n_K) που ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$0 \leq n_1 \leq N_1, \dots, 0 \leq n_K \leq N_K, \sum_{i=1}^K n_i \text{MAX}_i > C$$

Η PV μπορεί να διατυπωθεί απλά και μόνο από το μέγιστο και μέσο ρυθμό ATM πακέτων.

Παρακάτω δίνεται ο τύπος για τον υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας ATM πακέτων για την περίπτωση ομογενούς κίνησης δηλ. για κίνηση μιας υπηρεσίας:

$$PV = \frac{\sum_{n_I}^{N_I} (n_I \text{MAX} - C) \binom{N_I}{n_I} \left(\frac{\text{AVG}}{\text{MAX}} \right)^{n_I} \left(1 - \frac{\text{AVG}}{\text{MAX}} \right)^{N_I - n_I}}{N_I \text{AVG}}$$

όπου N_I ο αριθμός των πηγών (κατηγορίας 1) που πολυπλέκονται, MAX και AVG ο μέγιστος και μέσος ρυθμός μετάδοσης της πηγής και το n_I είναι τέτοιο ώστε να ισχύουν οι σχέσεις:

$$0 \leq n_I \leq N_I, n_I \text{MAX} \geq C$$

Ακολουθώς παρουσιάζεται το ίδιο θέμα του παρόντος τμήματος με μια διαφορετική λεκτική διατύπωση για καλύτερη κατανόηση.

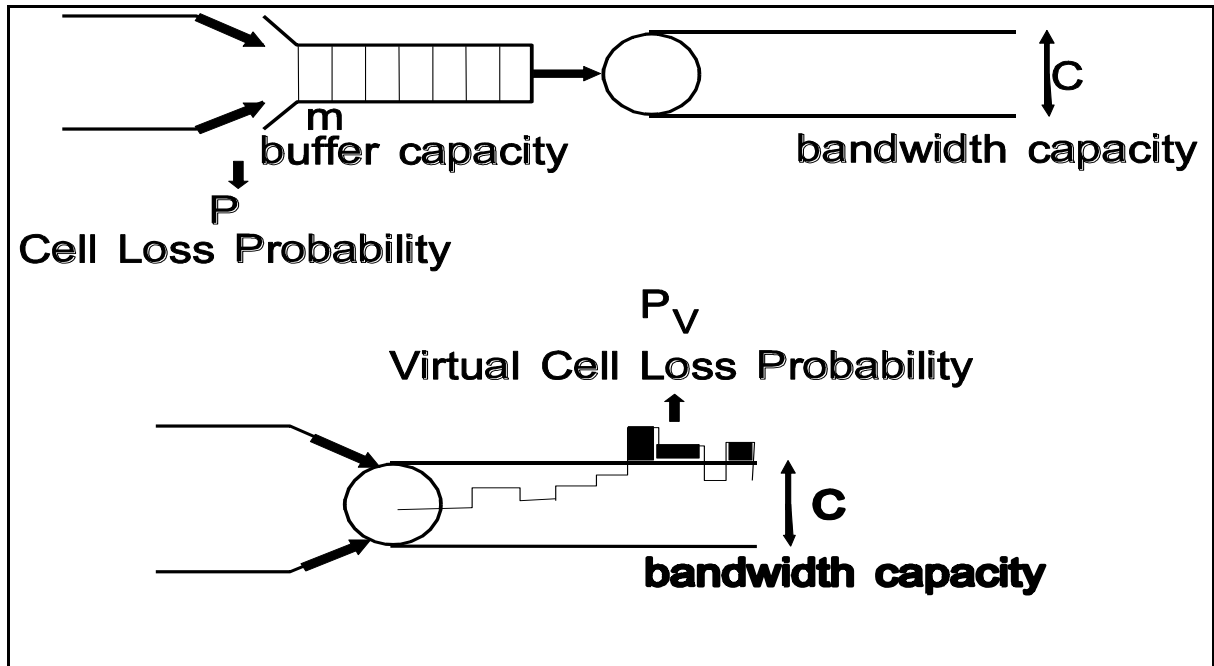
5.7 Μοντέλο Υπολογισμού του Ρυθμού της Απώλειας των ATM Πακέτων

Η ροή των ATM πακέτων σε ένα VC προσεγγίζεται από ένα ON-OFF μοντέλο αποτελούμενο από ενεργείς περιόδους CBR και ανενεργείς περιόδους αν πρόκειται για VBR κίνηση, ενώ αν πρόκειται για CBR κίνηση οι παράμετροι του ON-OFF μοντέλου τροποποιούνται καταλλήλως. Κάθε ριπή (ενεργός περίοδος, burst) αποτελείται από μια ακολουθία πολλών ATM πακέτων. Ο αριθμός αυτών σε μια ακολουθία παριστά το μήκος της ριπής, b . Οι συμβολισμοί "M" και "A" παριστούν το μέγιστο και το μέσο ρυθμό μετάδοσης bits, αντιστοίχως.

Bufferless model ή Virtual CLR

Θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα ή το ρυθμό απώλειας των ATM πακέτων στην περίπτωση όπου η μετάδοση αυτών στη ζεύξη (ή στο VP) γίνεται χωρίς την ύπαρξη buffer. Αυτό όμως είναι εξωπραγματικό, γι' αυτό και λέμε ότι δεν υπολογίζουμε την πιθανότητα P απώλειας ATM πακέτου, αλλά την "Virtual" πιθανότητα απώλειας ATM πακέτου, P_N (Virtual CLR ή Cell Loss Probability). Επομένως, βάσει ενός μοντέλου bufferless όπως λέμε, θα υπολογίσουμε το CLR ως cell-overflow-rate (το ρυθμό των ATM πακέτων υπερροής), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού αριθμού των ATM πακέτων που υπερέουν προς το συνολικό αριθμό των

προσφερομένων ATM πακέτων στη ζεύξη (σχήμα 5.7). Με άλλα λόγια ο Virtual CLR ορίζεται ως το ποσοστό κατά το οποίο η ροή της κινήσεως υπερβαίνει την χωρητικότητα c της ζεύξεως. Αντιθέτως, η πραγματική πιθανότητα P , πρέπει να υπολογισθεί βάσει ενός μοντέλου ουράς αναμονής (queueing model) και είναι συνάρτηση της χωρητικότητας m του buffer, του μήκους b της ριπής καθώς και του μήκους της ανενεργού περιόδου.



Σχήμα 5.7 Η ιδέα της Virtual Cell Loss πιθανότητας

Αν είχαμε μια μόνο κατηγορία VC, δηλαδή το ON-OFF μοντέλο ήταν το ίδιο για όλα τα VC, τότε η P_N υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$P_V = \frac{\sum_{n > CM}^N (nM - C) P_n}{AN}$$

όπου P_n είναι η πιθανότητα n από τα συνολικά N VCs να ευρίσκονται ταυτόχρονα στην κατάσταση ON. Η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$P_n = \binom{N}{n} \left(\frac{\alpha}{\alpha + \beta} \right)^n \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta} \right)^{N-n}, \text{ για } 0 \leq n \leq N$$

$$\text{ή } P_n = \binom{N}{n} \left(\frac{A}{M} \right)^n \left(1 - \frac{A}{M} \right)^{N-n}$$

Στην περίπτωση όπου έχουμε συνολικώς K κατηγορίες VC, δηλαδή K ON-OFF μοντέλα με διαφορετικές παραμέτρους τότε η P_N υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$P_V = \frac{1}{\rho} \sum_{n_1}^{N_1} \dots \sum_{n_K}^{N_K} \left(\sum_{k=1}^K n_k M_k - C \right) \prod_{k=1}^K P_{n_k}, \text{ όπου } \sum_{k=1}^K n_k M_k > C$$

$$\text{και } \rho = \sum_{k=1}^K A_k N_k, \quad P_{n_k} = \binom{N_k}{n_k} \left(\frac{A_k}{M_k} \right)^{n_k} \left(1 - \frac{A_k}{M_k} \right)^{N_k - n_k}$$

όπου M_k είναι ο μέγιστος ρυθμός bit (peak bit rate), A_k είναι ο μέσος ρυθμός bit (average bit rate) σε ένα VC της κατηγορίας k, N_k είναι ο συνολικός αριθμός των VCs της κατηγορίας k, C είναι χωρητικότητα σε bandwidth της ζεύξης ή του VP στο οποίο ανήκουν τα VCs και P_{n_k} είναι η πιθανότητα ότι n_k από τα συνολικώς N_k VCs της κατηγορίας k είναι στην κατάσταση ON. Ο δείκτης k συμβολίζει την κατηγορία k του VC.

Από τις ανωτέρω σχέσεις υπολογίζεται ο Virtual CLR εκ του ασφαλούς (δηλ. $P_N > P$), λόγω της καταργήσεως του buffer. Ωστόσο αν υποθέσουμε ότι το μοντέλο ON-OFF πράγματι ισχύει ο υπολογισμός αυτός του ρυθμού απώλειας των ATM πακέτων είναι πολύ ακριβής. Προκύπτουν όμως πολλές δυσκολίες εφαρμογής των ανωτέρω τύπων όταν ο αριθμός των VCs που πολυπλέκονται στην ζεύξη ή στο VP είναι μεγάλος, ή ο αριθμός K των υπηρεσιών (service-classes) είναι μεγάλος ($K > 2$).