

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Προσομοίωση και Ανάλυση της Απόδοσης του
Συστήματος GPRS**

Αντώνης Θ. Βιδάλης

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ηράκλειο, Οκτώβριος 1998

Προσομοίωση και Ανάλυση της Απόδοσης του Συστήματος GPRS

Αντώνης Θ. Βιδάλης

Μεταπτυχιακή Εργασία

Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

Πανεπιστήμιο Κρήτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος General Packet Data Service (GPRS) και επιχειρεί ποιοτική και ποσοτική ανάλυση της απόδοσής του.

Τα περισσότερα σύγχρονα κυψελοειδή δίκτυα, όπως το GSM, το DCS1800 και το NA-TDMA, παρέχουν υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων τύπου μεταγωγής κυκλωμάτων. Στην περίπτωση αυτή, ένα ποσοστό της χωρητικότητας των καναλιών μένει αχρησιμοποίητο, όταν η κυκλοφορία είναι εκρηκτική. Η χρέωση βασίζεται στο χρόνο σύνδεσης, ακόμα και αν κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια, η σύνδεση είναι ανενεργή.

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, αναπτύσσεται σήμερα από την ETSI το σύστημα GPRS, ως τμήμα της φάσης αναβάθμισης 2+ του Global System for Mobile Communications (GSM). Η προτυποποίηση του συστήματος αναμένεται να ολοκληρωθεί στο τέλος του 1998, ενώ η λειτουργία του προβλέπεται να ξεκινήσει μέσα στο 1999. Σκοπός του GPRS είναι να εξυπηρετήσει αποδοτικά τις εκρηκτικές πηγές κυκλοφορίας δεδομένων και να επιτρέψει στους συνδρομητές του GSM να μοιράζονται τους φυσικούς πόρους του δικτύου σε δυναμική βάση, τόσο για τις υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων όσο και για τις συνήθεις εφαρμογές του GSM.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε την αρχιτεκτονική και τη λειτουργία του GPRS, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο πρωτόκολλο διεπιφάνειας αέρα, και μελετούμε την απόδοσή του. Οι αριθμητικές μετρήσεις της απόδοσης προήλθαν από τον

προσομοιωτή του GPRS που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Ο προσομοιωτής μοντελοποιεί τις λειτουργίες του συστήματος κατά τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ του MS και του BS.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η δομή του προσομοιωτή και τα αριθμητικά αποτελέσματα που ελήφθησαν από τις προσομοιώσεις του συστήματος GPRS για διάφορες τιμές των παραμέτρων του, διάφορα είδη κυκλοφορίας δεδομένων και για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην κυκλοφορία που δημιουργούν οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές του Internet, δηλ. telnet και web browsing.

Επόπτης : Απόστολος Τραγανίτης
 Αναπληρωτής Καθηγητής Επιστήμης Υπολογιστών
 Πανεπιστήμιο Κρήτης

Simulation and Performance Analysis of the new GPRS Protocol

Antonis T. Vidalis

Master Thesis

Computer Science Department
University of Crete

ABSTRACT

This thesis focuses on the simulation of the General Packet Data Service (GPRS) and demonstrates its performance.

Most of the current cellular networks, like GSM, DCS1800 and NA-TDMA, provide only circuit switched data services. With bursty data traffic, there is some unused channel capacity in circuit switched connection. The charging is based on the connection time, even if most of the time the connection had been idle.

In the Global System for Mobile Communications (GSM) Phase 2+ development, one major activity is to specify the GPRS, which will deal with this problem. The standardization is expected to be completed at the end of 1998 and the operation will start in year 1999. The purpose of GPRS is to accommodate efficiently data sources that are bursty in nature. Another important goal of the technology is to make it possible for GSM license holders to share physical resources on a dynamic, flexible basis, between packet data services and other GSM services.

In this thesis, we present the architecture and the function of GPRS, emphasizing on the air-interface protocol, and demonstrate its performance. The performance measures have been obtained from a GPRS simulator created as part of the current project. The simulator models the process of data transfer between the MS and the BS.

The thesis presents the design of the simulator and the results of the simulation experiments. We have examined various parameters of the system, traffic

models for the input load and operating conditions. We have especially emphasized on the type of traffic produced by some of the common Internet applications, like telnet and web browsers.

Supervisor : Apostolos Traganitis
Associate Professor of Computer Science
University of Crete

Ευχαριστίες

Με το πέρας αυτής της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Α. Τραγανίτη για την καθοριστική βοήθειά του, καθ' όλη τη διάρκειά της. Με βοήθησε σημαντικά με ουσιαστικές συμβουλές, παρατηρήσεις και σχόλια σε όλα τα στάδια της εργασίας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής μου, τον κ. Γ. Σταμούλη και τον κ. Δ. Σερπάνο για τις πολύ χρήσιμες υποδείξεις τους.

Ευχαριστώ το Ινστιτούτο Πληροφορικής του Ι.Τ.Ε. για την οικονομική υποστήριξη που μου παρείχε.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου που με βοήθησαν με συμβουλές και παρατηρήσεις στην εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iii
Abstract	v
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Συντομεύσεων	xi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	1
1.2 Σκοπός και περιγραφή της εργασίας	2
2 Το ευρωπαϊκό σύστημα κυψελοειδούς τηλεφωνίας GSM	4
2.1 Εισαγωγή	4
2.2 Γενικές αρχές του συστήματος	4
2.3 Υπάρχουσες υπηρεσίες δεδομένων στο GSM	7
3 General Packet Radio Service	9
3.1 Η αρχιτεκτονική του συστήματος	9
3.2 Η αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων	11
3.3 Πρωτόκολλο διεπιφάνειας αέρα του GPRS	15
3.3.1 Ροή της πληροφορίας	16
3.3.2 Λογικά κανάλια του GPRS	17
3.3.3 Μοντέλο Λειτουργίας	19
3.3.4 Μεταφορά πακέτων με πηγή το κινητό	20
3.3.5 Μεταφορά πακέτων με προορισμό το κινητό	22
3.4 Εφαρμογές του GPRS	24
4 Μοντέλο κυκλοφορίας δεδομένων Internet	26
4.1 Εισαγωγή	26
4.2 Σημαντικότερες εφαρμογές του Internet και χαρακτηριστικά τους	27
4.3 Γεννήτριες κυκλοφορίας telnet και WWW	28
4.4 Περιγραφή και ανάλυση της κυκλοφορίας	30

4.5 Μοντέλο Σιδηροδρομικής Γραμμής (railway model)	33
5 Διαθεσιμότητα καναλιών στο σύστημα GSM	35
5.1 Εισαγωγή	35
5.2 Πόσος ανενεργός χρόνος υπάρχει στο GSM;	35
5.3 Συμπεράσματα	38
6 Προσομοίωση	40
6.1 Μοντελοποίηση	40
6.2 Προσομοίωση της κυκλοφορίας με πηγή το κινητό	41
6.3 Προσομοίωση της κυκλοφορίας με προορισμό το κινητό	44
6.4 Δημιουργία των πακέτων	44
6.5 Χαρακτηριστικά του προσομοιωτή	46
6.5.1 Μοντέλο του φαινομένου σύλληψης (capture effect)	46
6.5.2 Αλγόριθμος υποχώρησης	46
6.5.3 ARQ	47
6.5.4 Κυκλική εξυπηρέτηση πακέτων	47
6.6 Σταθερές	49
6.7 Κριτήρια απόδοσης	49
6.8 Διεπιφάνεια χρήστη	49
7 Αριθμητικά αποτελέσματα	52
7.1 Γενικές μετρήσεις της απόδοσης στην ανάστροφη κατεύθυνση	54
7.2 Ουρά αιτήσεων τυχαίας προσπέλασης (random access request queue) ..	60
7.3 Ανάλυση της καθυστέρησης για εφαρμογές web browsing	62
7.4 Μικτή κυκλοφορία telnet και WWW	64
7.5 Επίδραση του μεγέθους των πλαισίων LLC	71
8 Επεκτάσεις – Συμπεράσματα	73
8.1 Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα	74
8.2 Επεκτάσεις και βελτιώσεις της εργασίας	74
Βιβλιογραφία	75

Κατάλογος Συντομεύσεων

A	A interface, an interface between BSC and MSC
Abis	A-bis interface, an interface between BTS and BSC
ACK	Acknowledgement
AGCH	Access Grant Channel
AMPS	Advanced Mobile Phone System, first generation analog cellular network
ARQ	Automatic Retransmission Request
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AUC	Authentication Center
BCCH	Broadcast Control Channel
BEC	Backward Error Correction
BLER	Block Error Rate
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem, consists of BSC and BTSs
BSSGP	Base Station Subsystem GPRS Protocol
BTI	Block Type Indicator
BTS	Base Transceiver Station, e.g., base station
CCCH	Common Control Channel
CDPD	Cellular Digital Packet Data
CSPDN	Circuit Switched Public Data Network
DCS	Dynamic Channel Stealing
DCS1800	Digital Cellular System, GSM based system on 1800 MHz band
ETSI	European Telecommunications Standardisation Institute
FACCH	Fast Associated Control Channel
FCCH	Frequency Correction Channel
FCFS	First Come, First Served, priority queue
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FTP	File Transfer Protocol
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	General Packet Radio Service

GSM	Global System for Mobile communications, 2nd generation cellular system
GTP	GPRS Tunnel Protocol
HLR	Home Location Register
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO	International Standardisation Organisation
kbps	kilo bits per second
LAPD	Link Access Protocol for D channel
LLC	Logical Link Control
MAC	Media Access Control
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Center
NACK	Negative Acknowledgement
NNTP	Network News Transfer Protocol
NTU	Network Transfer Unit
OMC	Operation Maintenance Center
PACCH	Packet Associated Control Channel
PAD	Packet Assembler and Disassembler
PAGCH	Packet Access Grant Channel
PC	Power Control
PCCCH	Packet Common Control Channel
PCH	Paging Channel
PDCH	Packet Data Channel, PDTCH dedicated to data traffic
PDTCH	Packet Data Transfer Channel
PDU	Protocol Data Unit
PLL	Physical Link Sublayer
PLMN	Public Land Mobile Network, i.e., GSM network
PPCH	Packet Paging Channel
PRACH	Packet Random Access Channel
PSPDN	Packet Switched Public Data Network
PSTN	Public Switched Telephone Network

PTM	Point-to-Multipoint
PTP	Point-to-Point
RACH	Random Access Channel
RARQ	Random Access Request Queue
RFL	RF Sublayer
RLC	Radio Link Control
SACCH	Slow Associated Control Channel
SCH	Synchronization Channel
SDCCH	Stand-alone Dedicated Control Channel
SGSN	Serving GPRS Support Node
SMS	Short Message Service
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
SNDC	Subnetwork Dependent Convergence
SS7	Signalling System no.7
TCH	Traffic Channel
TCH/F9.6	full rate data TCH with user rate of 9.6 kbps
TCH/F4.8	full rate data TCH with user rate of 4.8 kbps
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TFI	Temporary Frame Identity
TLLI	Temporary Logical Link Identity
TS	Time Slot
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service, 3rd generation cellular network
URL	Uniform Resource Locator
USF	Uplink State Flag
VLR	Visitor Location Register
WAN	Wide Area Network
WWW	World Wide Web

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Η εκτεταμένη ανάπτυξη και διάδοση των ασύρματων επικοινωνιών αλλά και η αυξανόμενη ζήτηση φθηνών ασύρματων υπηρεσιών μεταφοράς δεδομένων αποτελούν τις κυριότερες δυνάμεις πίσω από την ιδέα της παροχής υπηρεσιών μετάδοσης πακέτων πάνω από τα κυψελοειδή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Δύο παραδείγματα υλοποίησής της είναι το σύστημα Cellular Digital Packet Data (CDPD), πάνω από το αμερικάνικο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας Advanced Mobile Phone System (AMPS), και το σύστημα General Packet Radio Service (GPRS), πάνω από το δίκτυο Global System for Mobile Communications (GSM).

Το GPRS μοιράζεται την περιοχή συχνοτήτων του GSM με την τηλεφωνία και την κυκλοφορία δεδομένων μεταγωγής κυκλωμάτων. Δανείζεται κανάλια φωνής είτε στατικά, είτε δυναμικά. Στη δεύτερη περίπτωση, ο σταθμός βάσης (BS) παραχωρεί τα ελεύθερα κανάλια φωνής στην υπηρεσία δεδομένων, αλλά εάν διαπιστώσει ότι κάποιο από αυτά απαιτείται για την εξυπηρέτηση τηλεφωνικής κλήσης, μεταφέρει την κυκλοφορία δεδομένων σ' άλλο ελεύθερο κανάλι, χωρίς να τη διακόψει. Το GPRS χρησιμοποιεί πολλές από τις ιδιότητες του φυσικού επιπέδου του συστήματος GSM, όπως τη δομή των πλαισίων TDMA, τις τεχνικές διαμόρφωσης και την εσωτερική δομή των χρονοσχημάτων.

Σκοπός του GPRS είναι να εξυπηρετήσει αποτελεσματικά τις πηγές δεδομένων που παράγουν εκρηκτική κυκλοφορία, επιτυγχάνοντας παράλληλα αποδοτική εκμετάλλευση των πόρων του συστήματος (ραδιο-κανάλια). Πηγή εκρηκτικής κυκλοφορίας δημιουργείται από τις συνηθισμένες εφαρμογές του Internet (telnet, e-mail, FTP, web browsing). Ένας ακόμα στόχος της τεχνολογίας του GPRS είναι να επιτρέψει στους συνδρομητές του GSM να μοιράζονται τους φυσικούς πόρους του δικτύου σε δυναμική βάση, τόσο για τις υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων όσο και για τις συνηθείς εφαρμογές του GSM.

Οι αναμενόμενες εφαρμογές του GPRS θα είναι πολυάριθμες. Οι συνδρομητές του θα μπορούν να συνδέονται στο Internet, απ' όπου και αν βρίσκονται, και να χρησιμοποιούν τις τυπικές εφαρμογές πλοήγησης αποδοτικότερα αλλά και οικονομικότερα, καθώς η χρέωση θα βασίζεται στην ποσότητα των δεδομένων και όχι στο χρόνο σύνδεσης. Ο πομποδέκτης του GPRS είναι δυνατόν να ενσωματωθεί σε ηλεκτρικές συσκευές μετάδοσης μετρήσεων, όπως συναγερμοί και μετρητές ρεύματος, στατικές ή κινητές. Μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της κυκλοφορίας, την επικοινωνία και την καθοδήγηση των οχημάτων.

Η ανάπτυξη του συστήματος GPRS άρχισε το 1994 και η τελική έκδοση του προτύπου αναμένεται στο τέλος του 1998. Η ETSI έχει, μέχρι τώρα, παράγει ένα αριθμό από drafts των προδιαγραφών του GPRS. Η παρούσα εργασία βασίστηκε στη διαθέσιμη βιβλιογραφία και κυρίως στα [CG97] και [BW97] που με τη σειρά τους βασίστηκαν στο «ETSI, “GSM 03.64 Overall Description of the GPRS Radio Interface, Stage 2”, v2.1.1 edition May1997»¹. Καθώς το σύστημα βρίσκεται ακόμα στη φάση του σχεδιασμού, είναι βέβαιο ότι θα υπάρξουν αλλαγές σε σχέση με τις παραπάνω αναφορές. Ωστόσο, το τελικό προϊόν δε θα έχει σημαντικές διαφορές από το σύστημα που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία.

1.2 Σκοπός και περιγραφή της εργασίας

Πρωταρχικός σκοπός της εργασίας είναι να περιγράψει το σύστημα GPRS και ν' αναλύσει την απόδοσή του, μέσα από μετρήσεις του ρυθμού παροχής, της καθυστέρησης των πακέτων και του ποσοστού «μπλοκαρίσματος» (blocking), κάτω από διάφορες συνθήκες. Ακόμα, γίνεται προσπάθεια να υπολογιστεί ο αριθμός των τελικών χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ικανοποιητικά, ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιούν, σε κάθε περίπτωση. Όλες οι μετρήσεις έγιναν με προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος για ποικίλα μοντέλα κυκλοφορίας δεδομένων.

Το κείμενο της εργασίας έχει οργανωθεί ως εξής. Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφεται συνοπτικά το ψηφιακό σύστημα κυψελοειδούς τηλεπικοινωνίας GSM, το οποίο αποτελεί το υπόβαθρο για την υλοποίηση της τεχνολογίας του GPRS.

¹ το οποίο δεν μας ήταν διαθέσιμο.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά το σύστημα GPRS. Περιγράφονται τα βασικά μέρη της αρχιτεκτονικής του και τα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων που χρησιμοποιεί. Από τα τελευταία, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην περιγραφή του πρωτοκόλλου διεπιφάνειας αέρα (Air-Interface Protocol), γιατί από τον τρόπο λειτουργίας του εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, η απόδοση του συστήματος.

Ακολουθεί, στο κεφάλαιο 4, η παρουσίαση των μοντέλων κυκλοφορίας που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του συστήματος. Διευκρινίζονται οι λόγοι που οδήγησαν στη χρήση των συγκεκριμένων μοντέλων καθώς και ο τρόπος συλλογής των στατιστικών στοιχείων για την κατασκευή τους.

Στο κεφάλαιο 5, αποδεικνύεται ότι σ' ένα τυπικό κελί GSM υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός διαθέσιμων καναλιών για την εγκατάσταση ενός συστήματος μετάδοσης δεδομένων, πάνω από το δίκτυο κυψελοειδούς τηλεφωνίας.

Το κεφάλαιο 6 περιγράφει την αρχιτεκτονική του προσομοιωτή και τα χαρακτηριστικά που ενσωματώνει, ενώ, στο κεφάλαιο 7, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των πειραμάτων προσομοίωσης.

Τέλος, το κεφάλαιο 8 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αυτή, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω επεκτάσεις της.

Κεφάλαιο 2

Το ευρωπαϊκό σύστημα κυψελοειδούς τηλεφωνίας GSM

2.1 Εισαγωγή

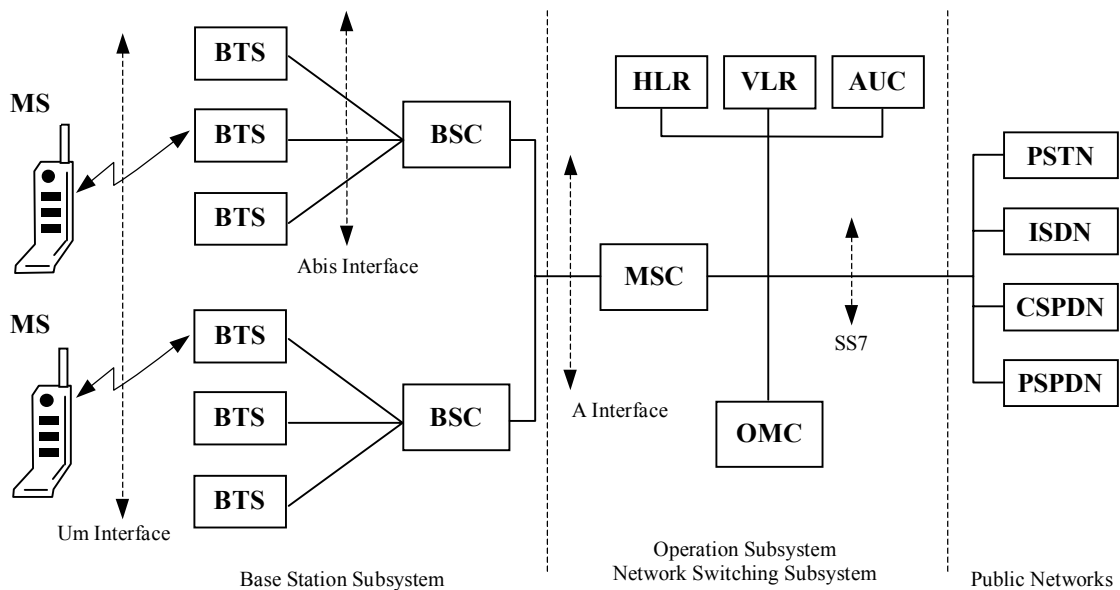
Το GSM (Global System for Mobile Communications) αποτελεί το πρότυπο του πανευρωπαϊκού ψηφιακού κυψελοειδούς συστήματος κινητής τηλεφωνίας που εξέδωσε το ETSI. Είναι το πιο διαδεδομένο σύστημα κινητής τηλεφωνίας στον κόσμο, καθώς, το 1997, αριθμούσε 40 εκατομμύρια συνδρομητές σε περισσότερες από 100 χώρες. Η τεχνολογία του GSM χρησιμοποιείται κυρίως στη ζώνη των 900 MHz, καθώς και στις ζώνες των 1800 και 1900 MHz. Στις δύο τελευταίες, η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία είναι γνωστή σαν DCS1800 και DCS1900, αντίστοιχα.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας του GSM έγινε σε τρεις φάσεις [MP95]. Στην πρώτη φάση (1992) αναπτύχθηκε η απαιτούμενη τεχνολογία για την εισαγωγή των εμπορικών υπηρεσιών του GSM, συμπεριλαμβανομένων των υπηρεσιών τηλεφωνίας και συντόμων μηνυμάτων (SMS). Με το πέρας της δεύτερης φάσης, το 1996, ολοκληρώθηκε η υλοποίηση του GSM, όπως αυτό είχε εξ' αρχής σχεδιαστεί. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν οι βάσεις για τη μελλοντική τεχνολογική του αναβάθμιση. Η ανάπτυξη του GSM βρίσκεται τώρα στη φάση 2+, η οποία περιλαμβάνει έναν αριθμό αναβαθμίσεων, όπως η εισαγωγή βελτιωμένων κωδικοποιητών φωνής και προηγμένων υπηρεσιών μετάδοσης δεδομένων. Δύο από τις νέες υπηρεσίες δεδομένων είναι η High-Speed Circuit-Switched Data Service (HSCSD) και το αντικείμενο αυτής της εργασίας, η General Packet Radio Service (GPRS).

2.2 Γενικές αρχές του συστήματος

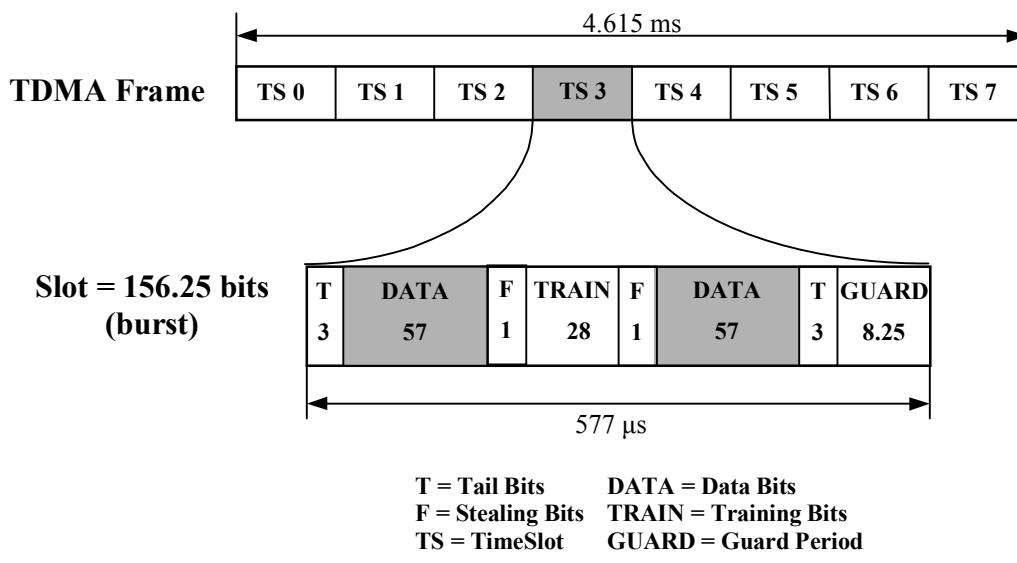
Η αρχιτεκτονική του συστήματος GSM περιλαμβάνει τρεις διεπιφάνειες [Rap96] [RWO95]: τη διεπιφάνεια αέρα (air interface) Um, τη διεπιφάνεια Abis και τη διεπιφάνεια A (Σχήμα 1). Οι υπηρεσίες του GSM διεκπεραιώνονται από τους

κινητούς σταθμούς (mobile stations - MS), το υποσύστημα σταθμών βάσης (base station subsystem - BSS) και το κέντρο μεταγωγής κινητών (mobile switching center - MSC). Το BSS περιλαμβάνει δύο στοιχεία : τον πομποδέκτη βάσης (base transceiver station - BTS), ο οποίος διαχειρίζεται τη ραδιο-διεπιφάνεια προς το MS και τον ελεγκτή βάσης (base station controller - BSC), ο οποίος ελέγχει έναν αριθμό από BTSs. Μέσω του MSC, το σύστημα GSM επικοινωνεί με άλλα δίκτυα όπως το επίγειο τηλεφωνικό δίκτυο (public switched telephone network - PSTN), το ψηφιακό δίκτυο ολοκληρωμένων υπηρεσιών (ISDN), δημόσια δίκτυα διαμεταγωγής πακέτων (packet switched public data networks - PSPDN), π.χ. HellasPac, HellasCom και δημόσια δίκτυα διαμεταγωγής κυκλωμάτων (circuit-switched public data networks - CSPDN). Το σύστημα GSM ορίζει επιπλέον τρεις βάσεις δεδομένων, την οικεία βάση εγγραφών θέσης (home location register - HLR), την επισκεπτόμενη βάση εγγραφών θέσης (visitor location register - VLR) και το κέντρο πιστοποίησης (authentication center - AUC).



Σχήμα 1: Η Αρχιτεκτονική του Συστήματος GSM

Το GSM είναι ένα υβριδικό σύστημα διαμοιρασμού συχνότητας και χρόνου (FD/TDMA) και οργανώνει τις ραδιο-μεταδόσεις, εκχωρώντας φέροντα και χρονοσχισμές (time slots) σε λογικά κανάλια. Η διάρκεια του πλαισίου είναι 4,615 ms και κάθε πλαίσιο χωρίζεται σε οκτώ χρονοσχισμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Η δομή της κανονικής εκπομπής του GSM

Στο σύστημα GSM, υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες λογικών καναλιών, τα κανάλια κυκλοφορίας και τα κανάλια σηματοδότησης. Τα κανάλια σηματοδότησης υποδιαιρούνται σε τρεις ομάδες : *κανάλια εκπομπής (broadcast channels)*, *κοινά κανάλια ελέγχου (common control channels)* και *αφιερωμένα κανάλια ελέγχου (dedicated control channels)* (Πίνακας 1). Ένας σταθμός βάσης χρησιμοποιεί τα κανάλια εκπομπής για να μεταδώσει την ίδια πληροφορία σε όλα τα τερματικά που βρίσκονται στην περιοχή κάλυψής του. Στο πρότυπο του GSM περιγράφονται τρεις τύποι καναλιών εκπομπής : το κανάλι ελέγχου εκπομπής (broadcast control channel - BCCH), το κανάλι διόρθωσης συχνότητας (frequency correction channel - FCCH) και το κανάλι συγχρονισμού (synchronization channel - SCH). Τα κοινά κανάλια ελέγχου μεταφέρουν πληροφορία προς και από συγκεκριμένα τερματικά. Υπάρχουν τρία διαφορετικά κοινά κανάλια ελέγχου : το κανάλι ειδοποίησης (paging channel - PCH) και το κανάλι παραχώρησης προσπέλασης (access grant channel - AGCH), τα οποία μεταφέρουν πληροφορία στην ευθεία κατεύθυνση (forward link BS → MS) και το κανάλι τυχαίας προσπέλασης (random access channel - RACH), το οποίο είναι κανάλι ανάστροφης κατεύθυνσης (reverse link MS → BS). Τα αφιερωμένα κανάλια ελέγχου χρησιμοποιούν φυσικά κανάλια που εκχωρούνται σε συγκεκριμένα τερματικά. Υπάρχουν τρεις τύποι αφιερωμένων καναλιών ελέγχου. Το αυτόνομο αφιερωμένο κανάλι ελέγχου (standalone dedicated control channel - SDCCH)

χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μηνυμάτων σηματοδοσίας μεταξύ των MSs και των BSs κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης κλήσης. Τα αργά και γρήγορα συσχετισμένα κανάλια ελέγχου (slow- και fast-associated control channel - SACCH και FACCH) χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση μηνυμάτων σηματοδοσίας μεταξύ της βάσης και του τερματικού κατά τη διάρκεια μιας κλήσης.

Ομάδα	Όνομα	Λειτουργία
Κανάλια εκπομπής	BCCH FCCH SCH	Έλεγχος Εκπομπής Διόρθωση Συχνότητας Συγχρονισμός
Κοινά κανάλια ελέγχου	PCH AGCH RACH	Ειδοποίηση Παραχώρηση Προσπέλασης Τυχαία Προσπέλαση
Αφιερωμένα κανάλια ελέγχου	SDCCH SACCH FACCH	Έλεγχος κατά την εγκατάσταση κλήσης Αργός έλεγχος κατά τη συνομιλία Γρήγορος έλεγχος κατά τη συνομιλία

Πίνακας 1: Κανάλια σηματοδοσίας του GSM

2.3 Υπάρχουσες υπηρεσίες δεδομένων στο GSM

Στο GSM, τόσο η φωνή όσο και η μετάδοση δεδομένων χρησιμοποιούν μεταγωγή κυκλωμάτων. Ο ρυθμός μετάδοσης, διαμέσου της διεπιφάνειας αέρα, είναι 12 kbps (13 kbps για τη φωνή) (22.8 kbps – FEC). Ο μέγιστος ρυθμός ανά χρήστη που μπορεί να επιτευχθεί, με ή χωρίς ARQ, στο επίπεδο logical link, είναι 9.6 kbps [Ham96].

Το πρότυπο του GSM ορίζει λειτουργίες διασύνδεσης με δίκτυα PSTN, ISDN, μεταγωγής πακέτων και μεταγωγής κυκλωμάτων. Η διασύνδεση με το PSTN είναι εφικτή με τη βοήθεια διαμορφο-αποδιαμορφωτών (modems) τοποθετημένων στο MSC. Επίσης η διασύνδεση με δίκτυα μεταγωγής πακέτων X.25 επιτυγχάνεται με διαμορφο-αποδιαμορφωτές συνδεδεμένους σ' ένα ασύγχρονο συναρμολογητή (assembler) και αποσυναρμολογητή πακέτων (PAD). Επιπλέον των παραπάνω υπηρεσιών, η ISDN πρόσβαση στο GSM γίνεται μια ολοένα και πιο σημαντική υπηρεσία δεδομένων. Το πλεονέκτημα μιας σύνδεσης GSM-ISDN είναι ο σύντομος χρόνος εγκατάστασης κλήσης (call establishment time). Σε μια πλήρως ψηφιακή σύνδεση ISDN, δεν απαιτείται χειραγία από το διαμορφο-αποδιαμορφωτή, γεγονός

που μειώνει σημαντικά το χρόνο εγκατάστασης κλήσης. Συμπεριλαμβανομένου του χρόνου σηματοδοσίας του GSM, η εγκατάσταση κλήσης σε μία σύνδεση GSM-PSTN χρειάζεται περίπου 22 δευτερόλεπτα, ενώ σε μία σύνδεση GSM-ISDN χρειάζεται περίπου 10 δευτερόλεπτα.

Μια τελείως διαφορετική υπηρεσία, από τις υπηρεσίες δεδομένων που παρέχει η πρώτη γενιά κυψελοειδών δικτύων, είναι η υπηρεσία συντόμων μηνυμάτων (SMS) [Nokia96]. Πρόκειται για μια υπηρεσία πακέτων, η οποία παρέχει αποστολή και λήψη μικρών κειμένων, έως και 160 χαρακτήρων κωδικοποιημένων σε 140 bytes. Το μήνυμα μεταδίδεται μεταξύ ενός MS και ενός κέντρου SMS, το οποίο λειτουργεί σαν ένας εξυπηρετητής store-and-forward για το μήνυμα μέχρις ότου μπορέσει να το παραδώσει στον παραλήπτη. Η μετάδοση του μηνύματος, από και προς το κινητό, γίνεται μέσω του γρήγορου συσχετισμένου καναλιού ελέγχου (FACCH), εκτός εάν το κινητό βρίσκεται στη μέση κάποιας κλήσης, οπότε το μήνυμα μεταδίδεται παράλληλα με την κλήση σ' ένα αργό συσχετισμένο κανάλι ελέγχου (SACCH). Εξ' αιτίας των μεγάλων απαιτήσεων σε σηματοδοσία, η μετάδοση ενός SMS απαιτεί αρκετά δευτερόλεπτα.

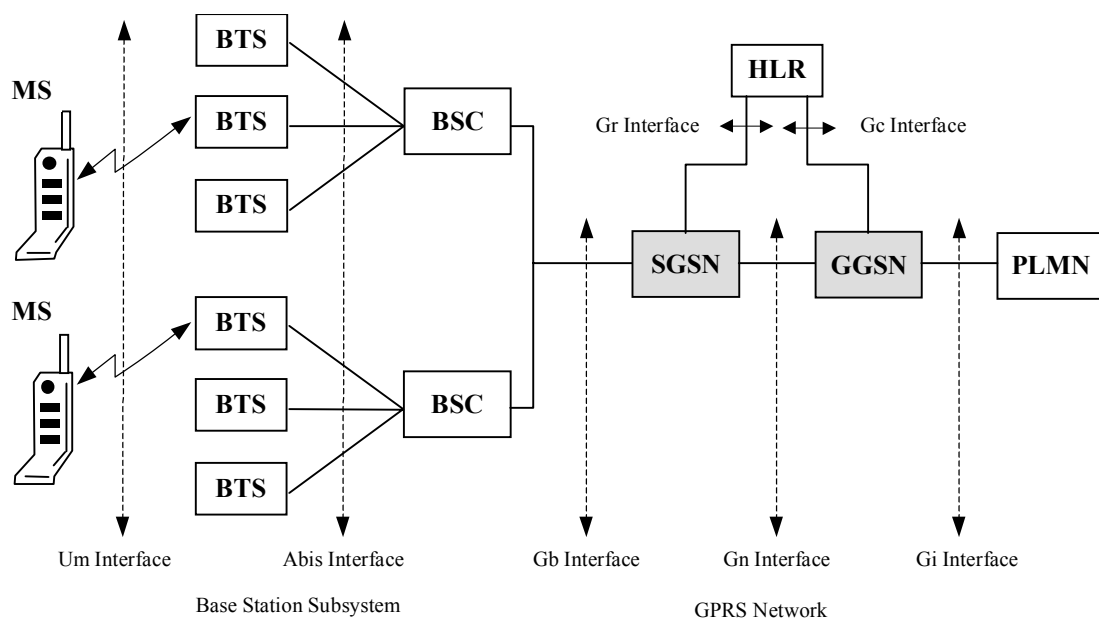
Κεφάλαιο 3

General Packet Radio Service

3.1 Η αρχιτεκτονική του συστήματος

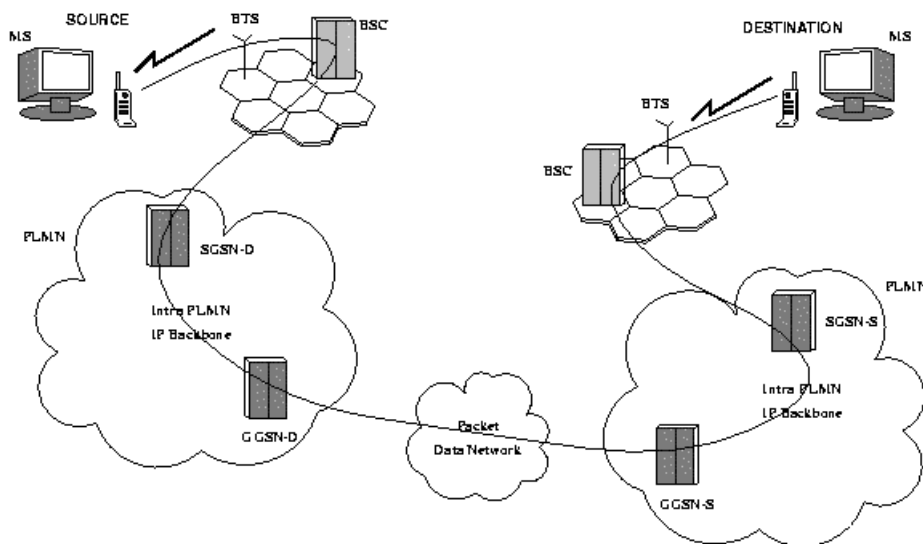
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος GPRS [ETSI3.60] [CG97]. Σε σύγκριση με το GSM, προστέθηκαν δύο νέα στοιχεία (τα σκιασμένα υποσυστήματα στο σχήμα) προκειμένου να επιτευχθεί η απ' άκρον εις άκρον μεταφορά πακέτων. Ακόμα, η HLR εμπλουτίζεται με πληροφορίες για τη δρομολόγηση των GPRS δεδομένων των συνδρομητών. Όσον αφορά τη μεταφορά δεδομένων, παρέχονται δύο υπηρεσίες :

- point-to-point (PTP)
- point-to-multipoint (PTM)



Σχήμα 3: Η Αρχιτεκτονική του Συστήματος GPRS

Για την ανεξάρτητη δρομολόγηση των πακέτων και τη μεταφορά τους μέσα από το επίγειο δημόσιο δίκτυο (public land mobile network - PLMN), είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός νέου λογικού κόμβου δικτύου, ο οποίος καλείται *GPRS support node* (GSN). Η πύλη GSN (gateway GSN - GGSN) δρα ως η λογική διεπιφάνεια προς τα εξωτερικά δίκτυα μεταφοράς πακέτων. Ο εξυπηρετών GSN (serving GSN - SGSN) είναι υπεύθυνος για την παράδοση των πακέτων στα κινητά που βρίσκονται μέσα στην περιοχή εξυπηρέτησής του. Στο εσωτερικό του δικτύου GPRS, οι μονάδες δεδομένων του πρωτοκόλλου (protocol data units - PDUs) πακετάρονται στο GSN πηγής και αποπακετάρονται στο GSN προορισμού. Για τη μεταφορά των PDUs, μεταξύ των GSNs, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο IP. Η διαδικασία αυτή καλείται *διόδευση* (*tunneling*) στο GPRS. Επιπλέον, ο GGSN διατηρεί σχετικές με τη δρομολόγηση πληροφορίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη διόδευση των PDUs προς τον τρέχοντα SGSN. Οι πληροφορίες που απαιτούνται από το SGSN για να εκτελέσει τις λειτουργίες δρομολόγησης και μεταφοράς δεδομένων βρίσκονται αποθηκευμένες στην HLR.



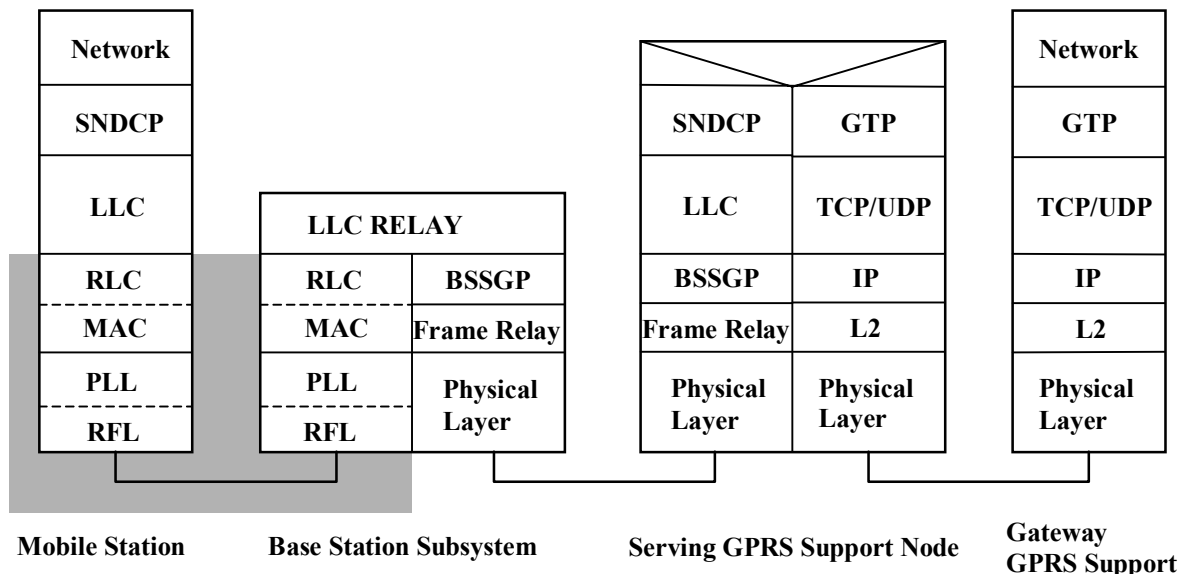
Σχήμα 4: Ένα απλό παράδειγμα δρομολόγησης

Ένα απλό παράδειγμα δρομολόγησης, για την περίπτωση της μετάδοσης δεδομένων από το κινητό, φαίνεται στο Σχήμα 4. Ο SGSN του κινητού πηγής (SGSN-S) ενθλακώνει (encapsulates) τα πακέτα που μεταδίδονται από το MS και τα

δρομολογεί στη κατάλληλη GGSN (GGSN-S). Στη συνέχεια, με βάση τη διεύθυνση προορισμού τους, τα πακέτα δρομολογούνται στη GGSN προορισμού (GGSN-D) μέσω του packet data network. Η GGSN-D ελέγχει τη σχετική με τη διεύθυνση προορισμού πληροφορία δρομολόγησης και καθορίζει τον SGSN-D και τη σχετική πληροφορία διόδου (tunneling information). Κατόπιν, κάθε πακέτο ενσωματώνεται (και πάλι) και προωθείται στον SGSN-D, ο οποίος το παραδίδει στο κινητό προορισμό.

3.2 Η αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων

Το Σχήμα 5 παρουσιάζει τη στοίβα των πρωτοκόλλων, μέχρι το επίπεδο δικτύου. Το πλάνο αυτό έχει προταθεί από το διεθνή οργανισμό προτύπων (ISO/OSI). Πάνω από το επίπεδο δικτύου, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τα ευρέως διαδεδομένα σήμερα πρωτόκολλα (η επιλογή τους είναι έξω από τον ορισμό του GPRS).



Σχήμα 5: Στοίβα πρωτοκόλλων του GPRS

Μεταξύ δύο GSNs, το πρωτόκολλο διόδευσης (GPRS Tunnel Protocol - GTP) διοδεύει τα PDUs μέσω του backbone δικτύου GPRS, προσθέτοντας πληροφορία δρομολόγησης. Κάτω από το GTP, ως πρωτόκολλα επιπέδου δικτύου μπορούν να

χρησιμοποιηθούν το TCP/UDP και το IP. Τέλος, κάτω από το IP, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρωτόκολλα βασισμένα στο Ethernet, το ISDN ή το ATM, ανάλογα με την αρχιτεκτονική του δικτύου.

Μεταξύ του SGSN και του MS, το πρωτόκολλο Subnetwork Dependent Convergence Protocol (SNDCP) αντιστοιχίζει τα χαρακτηριστικά του network layer protocol στο υποκείμενο logical link control (LLC) και παρέχει λειτουργίες όπως πολυπλεξία των μηνυμάτων του δικτυακού επίπεδο σ' ένα virtual link connection, κρυπτογράφηση, κατακερματισμό και συμπίεση.

Η ραδιο-επικοινωνία μεταξύ του MS και του δικτύου GPRS (σκιασμένη περιοχή στο Σχήμα 5) καλύπτει τις λειτουργίες του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου ζεύξης δεδομένων.

Μεταξύ του MS και του BSS, το επίπεδο ζεύξης δεδομένων χωρίζεται σε δύο διαφορετικά υποεπίπεδα: το LLC και το radio link control/medium access control (RLC/MAC). Το LLC λειτουργεί πάνω από το RLC/MAC και παρέχει τη λογική σύνδεση μεταξύ του MS και του SGSN. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου βασίζεται στην link access procedure-D (LAPD) (βλ. GSM 04.22) που χρησιμοποιείται στη σηματοδότηση του GSM και υποστηρίζει μετάδοση PTM.

Το επίπεδο RLC/MAC μεταφέρει πληροφορίες πάνω από το φυσικό επίπεδο του GPRS radio interface. Το RLC/MAC ορίζει τις διαδικασίες που επιτρέπουν σε πολλά MSs να μοιράζονται ένα κοινό μέσο μετάδοσης, το οποίο μπορεί να αποτελείται από πολλά φυσικά κανάλια.

Το επίπεδο RLC είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση των data blocks κατά μήκος του air interface και για την αναστροφή διόρθωση λαθών (backward error correction - BEC) η οποία επιτυγχάνεται με την επιλεκτική επαναμετάδοση των blocks που δεν μπορούν να διορθωθούν (automatic repeat request - ARQ).

Το επίπεδο MAC λειτουργεί μεταξύ του MS και του BTS και χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο slotted ALOHA. Το MAC είναι υπεύθυνο για τη σηματοδότηση της διαδικασίας προσπέλασης του ραδιο-καναλιού, κατευθύνοντας τόσο τις προσπάθειες προσπέλασης από τα MSs όσο και τον έλεγχο της λειτουργίας αυτής από την πλευρά του δικτύου. Ακόμα, επιτελεί τη διευθέτηση της συμφόρησης (contention resolution)

μεταξύ των προσπαθειών προσπέλασης, τη διαιτησία μεταξύ πολλαπλών αιτήσεων από διαφορετικά MSs και την κατανομή του κοινού μέσου στους διάφορους χρήστες.

Το φυσικό επίπεδο χωρίζεται στο physical link sublayer (PLL) και στο physical RF sublayer (RFL).

Το PLL μεταφέρει πληροφορίες πάνω από το φυσικό κανάλι μεταξύ του MS και του δικτύου. Μεταξύ των λειτουργιών του είναι το data unit framing, η κωδικοποίηση των δεδομένων και η ανίχνευση και διόρθωση των λαθών κατά τη μετάδοση στο φυσικό μέσο. Το PLL χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες του RFL.

Ακόμα, το PLL είναι υπεύθυνο για :

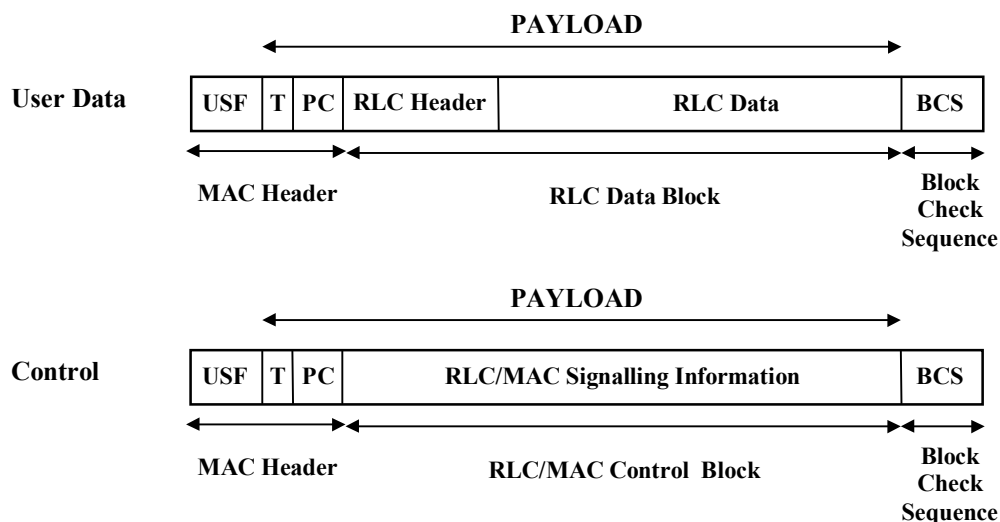
- την κωδικοποίηση forward error correction (FEC), η οποία επιτρέπει την ανίχνευση και διόρθωση των λαθών στις μεταδιδόμενες κωδικές λέξεις.
- την ορθογώνια διαφύλλωση (rectangular interleaving) ενός radio block σε τέσσερις εκπομπές GSM σε συνεχόμενα TDMA frames. (GSM 05.03)
- διαδικασίες ανίχνευσης της συμφόρησης στη φυσική σύνδεση.

Το RFL επιτελεί τη διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των φυσικών κυματομορφών και συμμορφώνεται με το πρότυπο του GSM τόσο στα χαρακτηριστικά των ραδιο-καναλιών όσο και στα χαρακτηριστικά των πομπών και των δεκτών.

Στο δίκτυο, το LLC χωρίζεται μεταξύ του BSS και του SGSN. Η λειτουργία του LLC καλείται LLC relay. Μεταξύ του BSS και του SGSN, το πρωτόκολλο BSS GPRS (BSSGP) μεταδίδει πληροφορίες σχετικά με τη δρομολόγηση και την ποιότητα της υπηρεσίας, λειτουργώντας πάνω από frame relay.

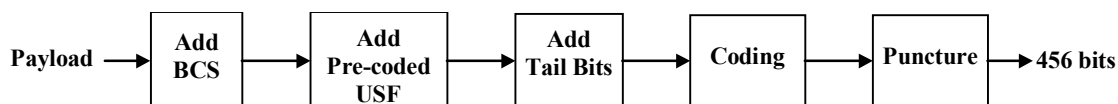
Το Σχήμα 6 παρουσιάζει τη δομή των radio blocks για τα δεδομένα χρήστη και τα μηνύματα ελέγχου. Κάθε radio block αποτελείται από έναν MAC header, ένα RLC data block ή ένα RLC/MAC control block και από μια ακολουθία ελέγχου των blocks (BCS). Το radio block μεταφέρεται πάντοτε από 4 κανονικές ριπές (bursts).

Ο MAC header αποτελείται από το uplink state flag (USF), το block type indicator (BTI) και τα πεδία ελέγχου ισχύος (PC). Το RLC data block αποτελείται από τον RLC header και τα RLC δεδομένα. Το RLC/MAC control block περιέχει πληροφορία σηματοδότησης.



Σχήμα 6: Η δομή του GPRS Radio Block

Η κωδικοποίηση του καναλιού καθορίζεται στο GSM 05.03. Για τα radio blocks που μεταφέρουν RLC data blocks ορίζονται τέσσερα διαφορετικά σχήματα κωδικοποίησης. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η διαδικασία κωδικοποίησης (το payload ορίζεται στο Σχήμα 6). Τέλος στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες των κωδικών.



Σχήμα 7: Η διαδικασία κωδικοποίησης στο GPRS

Σχήμα	Ρυθμός Κωδικ/σης	Payload	BCS	Pre-coded USF	Tail Bits	Coded Bits	Punct. Bits	Ρυθμός Δεδομένων (kb/s)
CS-1	$\frac{1}{2}$	181	40	3	4	456	0	9.05
CS-2	$\approx \frac{2}{3}$	268	16	6	4	588	132	13.4
CS-3	$\approx \frac{3}{4}$	312	16	6	4	676	220	15.6
CS-4	1	428	16	12	0	456	0	21.4

Πίνακας 2: Σχήματα κωδικοποίησης του GPRS

Μεταξύ του MS, του BSS και του SGSN, χρησιμοποιούνται τα ίδια πρωτόκολλα για τη μετάδοση δεδομένων μέχρι και το επίπεδο του πρωτοκόλλου

SNDCP. Στο επίπεδο δικτύου απαιτείται κάποιο ειδικό πρωτόκολλο διαχείρισης της κινητικότητας μεταξύ του MS και του SGSN.

3.3 Πρωτόκολλο διεπιφάνειας αέρα του GPRS

Το πρωτόκολλο διεπιφάνειας αέρα του GPRS αφορά την επικοινωνία μεταξύ του MS και του BSS στα τρία χαμηλότερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων του GPRS (γκρίζα περιοχή στο Σχήμα 5). Τα υποεπίπεδα RLC/MAC επιτρέπουν την πολυπλεξία πολλών χρηστών στα διαμοιραζόμενα κανάλια δεδομένων (packet data channel(s) – PDCH). Για την επίτευξη αξιόπιστων μεταδόσεων μέσω της διεπιφάνειας αέρα, χρησιμοποιείται ένα πρωτόκολλο selective ARQ.

Ένα φυσικό κανάλι αφιερωμένο στην κυκλοφορία πακέτων δεδομένων καλείται *Packet Data Channel* (PDCH). Ένα BS που υποστηρίζει το GPRS εκχωρεί ένα ή περισσότερα διαμοιραζόμενα PDCHs στην κυκλοφορία δεδομένων. Τα κανάλια αυτά λαμβάνονται από το σύνολο των κοινών φυσικών καναλιών που είναι διαθέσιμα στο κελί και μεταφέρουν τηλεφωνικές κλήσεις (TCHs). Η εκχώρηση των TCHs και PDCHs γίνεται δυναμικά ανάλογα με τις αρχές της “Χωρητικότητα κατ’ απαίτηση” (capacity on demand) οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

Αρχή «αφέντη»-«σκλάβου»

Τουλάχιστον ένα PDCH, το οποίο καλείται Packet Common Control Channel (PCCCH), δρα ως «αφέντης» και μεταφέρει τα σήματα ελέγχου για την αρχικοποίηση της μεταφοράς πακέτων καθώς και δεδομένα χρηστών. Τα υπόλοιπα PDCH, δρουν ως σκλάβοι και χρησιμοποιούνται μόνο για τη μεταφορά δεδομένων χρηστών και της αντίστοιχης σηματοδότησης.

Χωρητικότητα κατ’ απαίτηση

Η έννοια της χωρητικότητας κατ’ απαίτηση εισήχθη στο GPRS για την καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Όταν σε ένα κελί υπάρχουν λίγοι (ή κανένας) χρήστες GPRS, δεν χρειάζεται να υπάρχουν κανάλια μόνιμα αφιερωμένα στην κυκλοφορία δεδομένων. Ο διαχειριστής του δικτύου αποφασίζει σχετικά με την αφιέρωση μερικών PDCHs στο GPRS. Η επίβλεψη του φόρτου του δικτύου γίνεται στο επίπεδο MAC, μετρώντας το φόρτο των PDCHs. Έτσι, ο αριθμός των PDCHs σ’ ένα κελί μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί ανάλογα με την ανάγκη. Αχρησιμοποίητα κανάλια φωνής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν PDCHs για να αυξηθεί η συνολική

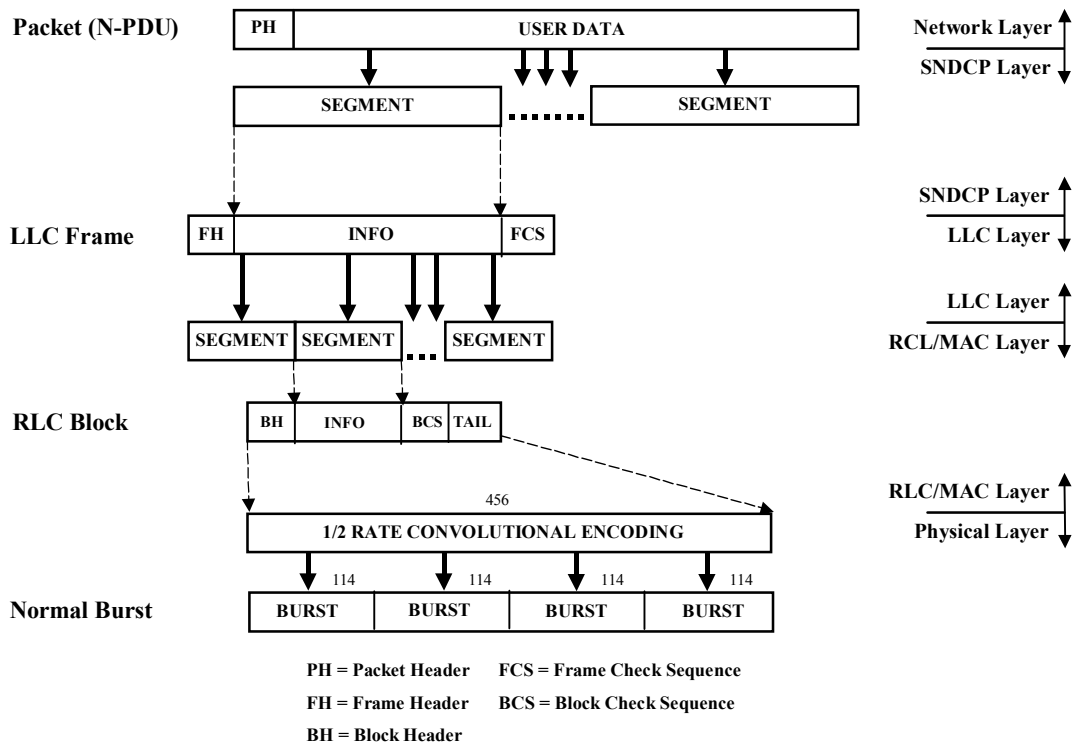
ποιότητα υπηρεσίας του GPRS. Εάν άλλες υπηρεσίες με υψηλότερη προτεραιότητα (π.χ. τηλεφωνική συνομιλία) ζητήσουν πόρους, τα PDCHs αποδεσμεύονται.

Ωστόσο, η ύπαρξη PDCH(s) δε συνεπάγεται την ύπαρξη PCCCH. Όταν δεν υπάρχει PCCCH σ' ένα κελί, όλα τα κινητά που είναι συνδεδεμένα στο GPRS αυτόματα ακούν στο υπάρχον GSM CCCH, όπως κάνουν και στην ανενεργή κατάσταση (idle state). Όταν υπάρχει PCCCH σ' ένα κελί, όλα τα κινητά που είναι συνδεδεμένα στο GPRS ακούν σ' αυτό. Τα PCCCH μπορούν να εκχωρηθούν είτε ως αποτέλεσμα αυξημένης ανάγκης για μεταφορά πακέτων δεδομένων, είτε όταν υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα φυσικά κανάλια σ' ένα κελί. Εάν το δίκτυο αποδεσμεύσει το PDCCH, το κινητό επιστρέφει στο CCCH.

3.3.1 Ροή της πληροφορίας

Τα πακέτα που παραλαμβάνονται από το επίπεδο δικτύου, μεταδίδονται κατά μήκος της διεπιφάνειας του αέρα, μεταξύ του MS και του SGSN χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο LLC. Κατ' αρχήν, το SNDCP μετατρέπει τα πακέτα σε πλαίσια LLC. Στη διαδικασία αυτή είναι δυνατόν να περιλαμβάνεται και η συμπίεση της επικεφαλίδας και των δεδομένων, ο κατακερματισμός και η κωδικοποίηση (encryption). Στην παρούσα εργασία, η μέγιστη ποσότητα δεδομένων χρήστη σ' ένα πλαίσιο LLC είναι περίπου 2Kbytes.

Στη συνέχεια, ένα πλαίσιο LLC κατακερματίζεται σε RLC data blocks, τα οποία μορφοποιούνται στο φυσικό επίπεδο. Κάθε block περιλαμβάνει 4 κανονικές ριπές σε συνεχόμενα πλαίσια TDMA. Η ροή των δεδομένων στο GPRS φαίνεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Ροή της πληροφορίας κατά τη μετάδοση των πακέτων

3.3.2 Λογικά κανάλια του GPRS

Τα λογικά κανάλια του GPRS και οι λειτουργίες τους περιέχονται στον Πίνακα 3. Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή κάθε καναλιού.

Packet Broadcast Control Channel (PBCCH)

Το *Packet Broadcast Control Channel* μεταδίδει πληροφορίες συστήματος σε όλα τα τερματικά που είναι συνδεδεμένα στο GPRS σ' ένα κελί.

Packet Common Control Channels (PCCCH)

Τα MSs χρησιμοποιούν το *Packet Random Access Channel* (PRACH) για ν' αρχικοποιούν τη μεταφορά δεδομένων ή για ν' απαντήσουν σ' ένα μήνυμα ειδοποίησης. Στο κανάλι αυτό, οι εκπομπές των κινητών έχουν μακρύ χρόνο προστασίας (guard time). Μόλις το BSS λάβει μία ριπή προσπέλασης (access burst), καθορίζει μια χρονική πρόοδο (timing advance) σε κάθε τερματικό.

Το *Packet Paging Channel* (PPCH) χρησιμοποιείται για την αναζήτηση ενός MS πριν από την ευθεία μεταφορά πακέτων.

Το *Packet Access Grant Channel* (PAGCH) χρησιμοποιείται στη φάση της αρχικοποίησης μεταφοράς πακέτων για την αποστολή μηνύματος δέσμευσης πόρων σ' ένα MS πριν από την αποστολή πακέτων.

Το *Packet Notification Channel* (PNCH) χρησιμοποιείται για την αποστολή μιας *Point to Multipoint-Multicast* (PTM-M) ειδοποίησης σε μια ομάδα από MSs πριν από μία PTM-M μεταφορά πακέτων. Η ειδοποίηση έχει τη μορφή μιας δέσμευσης πόρων για τη μεταφορά πακέτων.

Packet Data Transfer Channels (PDTCH)

Το *Packet Data Transfer Channel* (PDTCH) είναι ένα κανάλι traffic που δεσμεύεται για μεταφορά δεδομένων. Ένα MS μπορεί να χρησιμοποιεί περισσότερα από ένα PDTCH παράλληλα (multislot operation) για μια μεταφορά πακέτων.

Ομάδα	Όνομα	Κατεύθυνση	Λειτουργία
PBCCH	PBCCH	downlink	Broadcast
PCCCH	PRACH	uplink	Random Access
	PPCH	downlink	Paging
	PAGCH	downlink	Access Grant
	PNCH	downlink	Multicast
PDTCH	PDCH	downlink & uplink	Data
	PACCH	downlink & uplink	Associated Control

Πίνακας 3: Λογικά κανάλια του GPRS

Το *Packet Associated Control Channel* (PACCH) χρησιμοποιείται για τη μετάδοση σημάτων που αφορούν ένα δεδομένο MS, όπως *Acknowledgements* (ACK) και *Power Control information* (PC). Ακόμα, μεταφέρει μηνύματα δέσμευσης και αποδέσμευσης πόρων. Ένα PACCH συνδέεται με ένα ή περισσότερα PDTCHs που είναι ταυτόχρονα εκχωρημένα σ' ένα MS.

3.3.3 Μοντέλο Λειτουργίας

Το πρωτόκολλο επιπέδου RLC/MAC που έχει προταθεί στο GPRS είναι ένα πρωτόκολλο επιλεκτικής επαναμετάδοσης (bitmap based selective ARQ type protocol), στο οποίο ο μηχανισμός δέσμευσης πόρων για την ανάστροφη μετάδοση είναι βασισμένος στην slotted-ALOHA τυχαία προσπέλαση. Ένα (περίπτωση single slot) ή περισσότερα (περίπτωση multislot) PDCH, τα οποία αντιστοιχούν σε ένα TS ενός πλαισίου TDMA, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ένα MS για τη μεταφορά πακέτων δεδομένων. Η δυνατότητα αυτή εξασφαλίζει μεγάλη ευελιξία στους χρήστες του δικτύου.

Η ραδιο-διεπιφάνεια του GPRS αποτελείται από ασύμμετρα και ανεξάρτητα ευθέα και ανάστροφα κανάλια. Σ' ένα συγκεκριμένο TDMA TS, ένα PDCH μπορεί να μεταφέρει δεδομένα από και προς διαφορετικά MS σε κάθε κατεύθυνση.

Ένα πακέτο, που πρόκειται να μεταδοθεί πάνω από τη διεπιφάνεια αέρα, μορφοποιείται σ' ένα ή περισσότερα πλαίσια LLC, τα οποία στη συνέχεια κατακερματίζονται σε RLC data blocks. Το πρωτόκολλο επιλεκτικής επαναμετάδοσης μεταξύ του MS και του BSS εξασφαλίζει την επαναμετάδοση των blocks που παρελήφθησαν λανθασμένα. Μόλις ένα ολόκληρο πλαίσιο μεταφερθεί επιτυχώς κατά μήκος του επιπέδου RLC, προωθείται στο επίπεδο LLC.

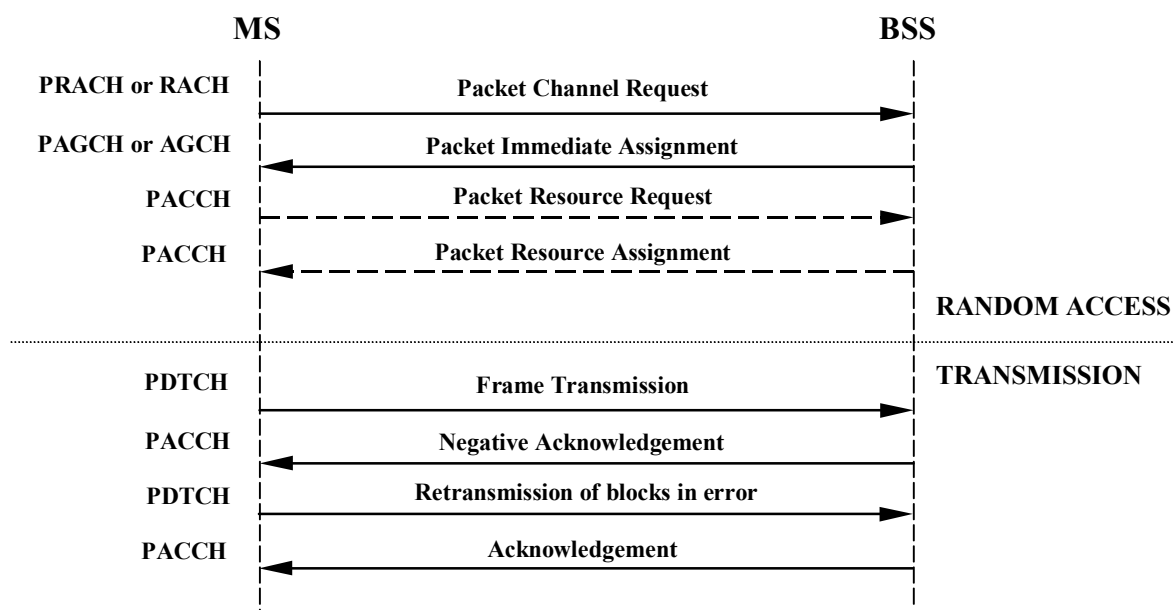
Η μέθοδος υλοποίησης της επιλεκτικής επαναμετάδοσης στο επίπεδο RLC απαιτεί την αρίθμηση των πλαισίων. Όταν ένα πλαίσιο LLC κατακερματίζεται, σε κάθε πλαίσιο RLC εκχωρείται ένας αριθμός που καλείται *Temporary Frame Identity* (TFI). Ο αριθμός αυτός είναι μοναδικός μεταξύ των τρεχουσών ακολουθιών πλαισίων που μεταφέρονται σ' ένα κελί και βασικά αντικαθιστά το συνδυασμό προσδιοριστή κινητού (π.χ. Temporary Logical Link Identity - TLLI) και αύξοντος αριθμού πλαισίου. Ο αριθμός TFI περιλαμβάνεται σε κάθε block που ανήκει σε συγκεκριμένο πλαίσιο, συμπεριλαμβανομένων και των blocks που επανα-μεταδίδονται από το πρωτόκολλο ARQ. Κατ' αυτόν τον τρόπο, blocks που ανήκουν σε πλαίσια από (ή προς) διαφορετικά MSs μπορούν να πολυπλεχθούν με βάση τον TFI.

3.3.4 Μεταφορά πακέτων με πηγή το κινητό

Πολλαπλή προσπέλαση

Ένα κινητό ξεκινάει τη μεταφορά πακέτων κάνοντας μία αίτηση εκχώρησης καναλιού (μήνυμα *Packet Channel Request*) στο PRACH ή στο RACH. Το δίκτυο απαντά στο PAGCH ή στο AGCH αντίστοιχα. Η μέθοδος προσπέλασης ενδέχεται να έχει μία ή δύο φάσεις. Το Σχήμα 9 παρουσιάζει τη διαδικασία ανάστροφης μεταφοράς δεδομένων. Τα διακεκομμένα βέλη παριστάνουν τα πρόσθετα μηνύματα που απαιτούνται κατά την προαιρετική δεύτερη φάση της μεθόδου προσπέλασης.

Όταν η προσπέλαση γίνεται σε μία φάση, το δίκτυο απαντά στο *Packet Channel Request* μ' ένα μήνυμα *Packet Immediate Assignment*, το οποίο δεσμεύει τους κατάλληλους πόρους στα PDCHs για την ανάστροφη μεταφορά ενός αριθμού από blocks.



Σχήμα 9: Επίπεδο MAC: Τυχαία Προσπέλαση και Μετάδοση για την ανάστροφη μεταφορά δεδομένων

Όταν η προσπέλαση περιλαμβάνει δύο φάσεις, το δίκτυο απαντά στο *Packet Channel Request* μ' ένα μήνυμα *Packet Immediate Assignment*, το οποίο δεσμεύει πόρους (χρονοσχισμές) στην ανάστροφη κατεύθυνση για τη μετάδοση του μηνύματος *Packet Resource Request*. Το μήνυμα *Packet Resource Request* μεταφέρει την πλήρη

περιγραφή του απαιτούμενων πόρων για την ανάστροφη μεταφορά. Κατόπιν, το δίκτυο απαντά με το μήνυμα *Packet Resource Assignment*, δεσμεύοντας πόρους για την ανάστροφη μεταφορά.

Εάν δεν ληφθεί απάντηση στο μήνυμα *Packet Channel Request* μέσα σ' ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, το MS ξαναπροσπαθεί ύστερα από τυχαίο χρόνο (backoff time).

Η φύση της κυκλοφορίας πακέτων δεδομένων είναι εκρηκτική. Προς στιγμήν, το BSS μπορεί να λάβει περισσότερα *Packet Channel Requests*, απ' όσα μπορεί να εξυπηρετήσει μέσα σ' ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Εάν ο χρονιστής λήξει, πριν το κινητό λάβει τό μήνυμα *Packet Resource Assignment*, το MS θα ξαναεπιχειρήσει προσπέλαση, παρότι η τελευταία του αίτηση έχει ήδη ληφθεί κανονικά. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σ' ένα νέο κύμα αιτήσεων προσπέλασης. Η προτεινόμενη λύση για την αποφυγή του παραπάνω προβλήματος είναι η γνωστοποίηση στον αποστολέα του *Packet Channel Request*, ότι το μήνυμά του έχει ληφθεί κανονικά και ότι θα λάβει αργότερα το *Packet Resource Assignment*. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα δημιουργεί μια ουρά αναμονής από MSs τα οποία περιμένουν τη σειρά τους για να λάβουν μήνυμα δέσμευσης πόρων. Η ουρά αυτή καλείται *Random Access Request Queue*.

Ανάστροφη μεταφορά δεδομένων

Εφαρμόζοντας μια μέθοδο δέσμευσης πολλαπλών PDCH καναλιών (multi-slot channel) σ' ένα κελί, μπορούμε να επιτύχουμε αποδοτική εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος για τη μεταφορά πακέτων δεδομένων. Blocks από ένα MS μπορούν να σταλθούν ταυτόχρονα σε διαφορετικά PDCHs, μειώνοντας έτσι την καθυστέρηση κατά τη μετάδοση των πακέτων. Σε μία μετάδοση μπορούν να εκχωρηθούν από ένα έως οκτώ TS σε κάθε πλαίσιο TDMA, συναρτήσει ορισμένων παραγόντων, όπως ο αριθμός των διαθέσιμων PDCHs, η δυνατότητα του MS για multi-slot λειτουργία και ο τρέχων φόρτος του συστήματος. Κατά συνέπεια, το διαθέσιμο εύρος ζώνης μπορεί να κυμαίνεται ανάλογα.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η αρχή αφέντη-δούλου που διέπει τα κανάλια απαιτεί μηχανισμούς αποδοτικής χρήσης των ανάστροφων PDCHs. Γι' αυτό, στα PDCHs χρησιμοποιείται το πεδίο των τριών bits Uplink State Flag (USF). Το USF βρίσκεται στην αρχή κάθε block που στέλνεται στην ευθεία κατεύθυνση και δείχνει

στο επόμενο ανάστροφο block. Επιτρέπει την κωδικοποίηση οκτώ διαφορετικών USF καταστάσεων, τα οποία χρησιμοποιούνται στην πολυπλεξία της ανάστροφης κυκλοφορίας. Η εντολή δέσμευσης καναλιών περιλαμβάνει τη λίστα των εκχωρούμενων PDCHs και την αντίστοιχη USF κατάσταση για κάθε κανάλι. Σ' ένα MS, το USF σημαδεύει το τμήμα του καναλιού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετάδοση. Ένα MS παρακολουθεί το USF και ανάλογα με την τιμή του, προσδιορίζει τα PDCHs που έχουν εκχωρηθεί σ' αυτό και ξεκινάει τη μετάδοση. Αυτό επιτρέπει την αποδοτική πολυπλεξία των blocks από έναν αριθμό κινητών σ' ένα μονό PDCH. Ακόμα, η εντολή δέσμευσης καναλιών μπορεί να σταλθεί στο MS ακόμα και πριν απελευθερωθεί ο συνολικός αριθμός των απαιτούμενων PDCHs. Έτσι, το USF εκτός από την επίτευξη δυναμικής δέσμευσης πόρων, επιτρέπει τη διακοπή της μετάδοσης για χάρη ενός εκκρεμούς ή υψηλής προτεραιότητας μηνύματος. Μία USF τιμή χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την κατάσταση του PRACH (USF=FREE). Οι άλλες τιμές χρησιμοποιούνται για να δεσμεύσουν το ανάστροφο κανάλι για διαφορετικά MSs (USF=R1/R2/.../R7).

Αφού μεταδοθούν τα blocks στα δεσμευμένα TSs, το BSS στέλνει στο κανάλι PACCH μια επιβεβαίωση (ACK). Σε περίπτωση αρνητικής επιβεβαίωσης, η οποία περιλαμβάνει ένα bitmap των λανθασμένων blocks, ένα *Packet Resource Assignment* για επαναμετάδοση, πληροφορία χρονικής προόδου και ελέγχου ισχύος, επαναμεταδίδονται μόνο τα blocks που αναφέρθηκαν ως λανθασμένα.

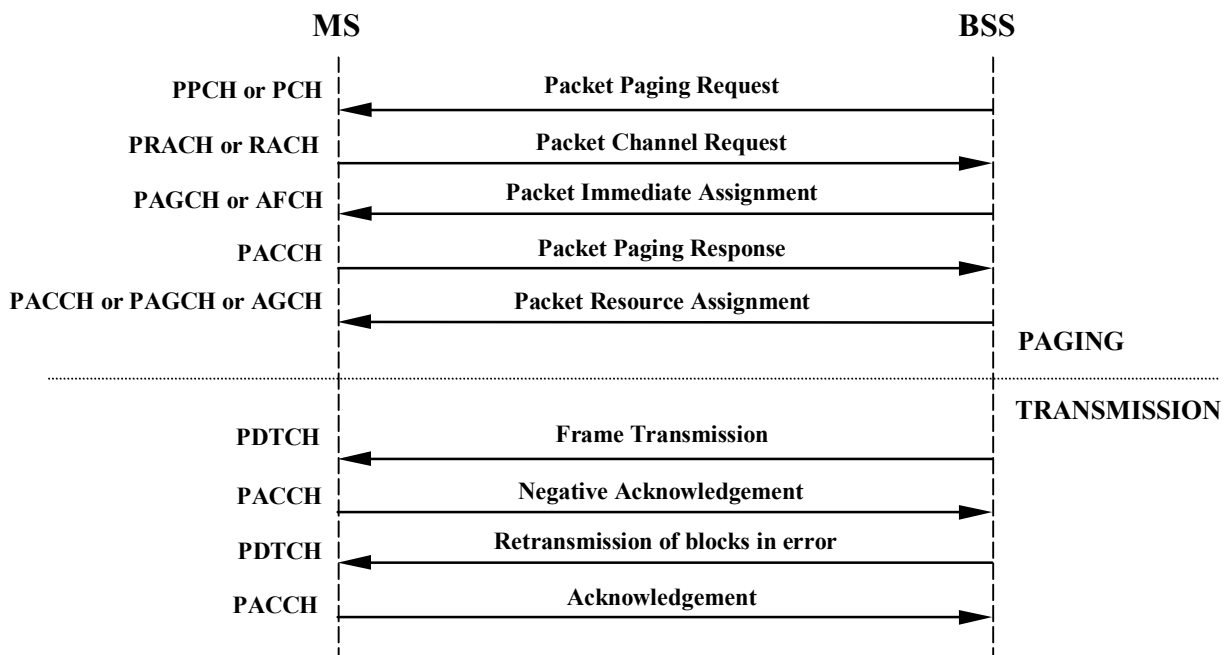
Εάν το MS δεν λάβει μια ACK μέσα σ' ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ξεκινάει μια διαδικασία ανάκαμψης της μεταφοράς του πλαισίου, στέλνοντας ένα νέο μήνυμα *Packet Channel Request* για ένα block. Εάν το BSS απαντήσει μ' ένα *Packet Resource Assignment*, το πρώτο πλαίσιο του τρέχοντος πλαισίου θα σταλθεί στο BTS. Έτσι, το BTS γνωρίζει ότι το τελευταίο ACK που ανήκε στην τρέχουσα μετάδοση πλαισίου δεν παραλήφθηκε σωστά και πρέπει να επαναμεταδοθεί.

3.3.5 Μεταφορά πακέτων με προορισμό το κινητό

Ένα BSS ξεκινάει τη μεταφορά πακέτων, στέλνοντας ένα μήνυμα *Packet Paging Request* στο ευθύ PPCH ή PCH. Το MS απαντά στην ειδοποίηση, ξεκινώντας μια διαδικασία απόκρισης παρόμοια με τη διαδικασία προσπέλασης που περιγράψαμε νωρίτερα. Η διαδικασία ειδοποίησης ακολουθείται από ένα μήνυμα *Packet Resource Assignment* το οποίο περιέχει τη λίστα των PDCHs που μπορούν να χρησιμοποιηθούν

για την ευθεία μεταφορά πλαισίων. Το Σχήμα 10 παρουσιάζει τις διαδικασίες αναζήτησης και μεταφοράς πακέτων.

Εφόσον ένα πεδίο ταυτότητας (π.χ. το TFI), συμπεριλαμβάνεται σε κάθε block, είναι δυνατόν να πολυπλεχθούν blocks από διαφορετικά MSs στο ίδιο ευθύ PDCH. Είναι επίσης δυνατόν να διακοπεί η μετάδοση δεδομένων προς ένα MS, εάν κάποιο πακέτο υψηλότερης προτεραιότητας ή κάποιο εκκρεμές μήνυμα ελέγχου πρέπει να σταλθεί σε άλλα MSs. Ακόμα, εάν περισσότερα από ένα PDCH είναι διαθέσιμα για ευθεία κυκλοφορία, blocks που ανήκουν στο ίδιο πλαίσιο μπορούν να μεταδοθούν παράλληλα σε διαφορετικά PDCHs, με την προϋπόθεση ότι το MS έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί πολλά PDCHs.



Σχήμα 10: Επίπεδο MAC: Τυχαία προσπέλαση και μετάδοση για την ευθεία μεταφορά δεδομένων

Το δίκτυο αποκτά επιβεβαιώσεις για την ευθεία μετάδοση ρωτώντας το MS. Το MS στέλνει το μήνυμα ACK/NACK στο αντίστοιχο block που δεσμεύτηκε κατά τη διαδικασία ερώτησης. Σε περίπτωση αρνητικής επιβεβαίωσης, επαναμεταδίδονται μόνο τα blocks που παρελήφθησαν λανθασμένα.

3.4 Εφαρμογές του GPRS

Σύμφωνα με τις εταιρείες τηλεπικοινωνιών που συμμετέχουν στην ανάπτυξη του GPRS, όπως είναι η Ericsson, η Nokia και η Bosch Telecom, οι αναμενόμενες εφαρμογές του συστήματος θα είναι πολυάριθμες. Μεταξύ αυτών, τα συνηθισμένα εργαλεία επικοινωνίας και πλοήγησης στο Internet, που θα εκτελούνται από φορητούς προσωπικούς υπολογιστές. Μερικά από τα εργαλεία αυτά χρησιμοποιούσαν, έως τώρα, την υπηρεσία μετάδοσης δεδομένων μεταγωγής κυκλωμάτων του GSM, όμως, μέσω του GPRS, η μετάδοση των δεδομένων θα γίνεται πολύ αποτελεσματικότερα. Επίσης, το GPRS αναμένεται να χρησιμοποιηθεί από ειδικές εφαρμογές με σχετικά χαμηλές απαιτήσεις σε ταχύτητα επικοινωνίας, οι οποίες έως τώρα εξυπηρετούνταν από άλλα ασύρματα δίκτυα μεταγωγής πακέτων [Ham96].

Το GPRS αποτελεί ένα ακόμα βήμα προς την υλοποίηση του «κινητού γραφείου» (mobile PC office), το οποίο θα επιτρέψει στο χρήστη να εργάζεται, όπου κι αν βρίσκεται, σαν να ήταν στο γραφείο του. Οι κυριότερες εφαρμογές για το GPRS περιλαμβάνουν αποστολή και παραλαβή του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, μεταφορά αρχείων και πλοήγηση στο Internet με το WWW. Το πλεονέκτημα με το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο είναι ότι η σύνδεση μπορεί να διατηρείται συνέχεια ανοικτή, αφού η χρέωση θα βασίζεται στην ποσότητα των δεδομένων που μεταδίδονται. Το εισερχόμενο μήνυμα θα εμφανίζεται στην οθόνη του τερματικού σε πραγματικό χρόνο. Όσον αφορά τη μεταφορά αρχείων, τα μικρά αρχεία θα μπορούν να μεταδοθούν ταχύτατα, αφού δεν θ' απαιτείται η χρονοβόρα διαδικασία εγκατάστασης σύνδεσης. Τέλος, με το GPRS, η πλοήγηση στο WWW θα γίνει όχι μόνο πιο αποδοτική αλλά και πολύ πιο οικονομική, γιατί ο χρήστης ξοδεύει το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου διαβάζοντας την πληροφορία που προσπέλασε και η χρέωση, όπως είπαμε, δεν θα βασίζεται στη διάρκεια της χρήσης αλλά στην ποσότητα των δεδομένων.

Το GPRS ανοίγει επίσης την αγορά για ειδικές εφαρμογές που μεταδίδουν μικρές ποσότητες πληροφορίας, σε αραιά διαστήματα. Ο πομποδέκτης του GPRS μπορεί να ενσωματωθεί σε ηλεκτρικές συσκευές, οι οποίες πρέπει περιοδικά να παρέχουν στατιστικά στοιχεία σ' ένα κεντρικό υπολογιστή, όπως συναγερμοί, συστήματα ελέγχου εργοστασίων, καταμετρητές κατανάλωσης ρεύματος, νερού

κ.λ.π. Καθώς το GPRS προσφέρει ασύρματη υπηρεσία, η συσκευή μπορεί να είναι είτε στατική είτε κινητή.

Μία ακόμα ενδιαφέρουσα εφαρμογή του GPRS είναι ο έλεγχος της κυκλοφορίας. Ήδη, βρίσκεται στο στάδιο του σχεδιασμού, ένα ευρωπαϊκό σύστημα ελέγχου των σιδηροδρόμων βασισμένο στο GPRS [Ham96]. Κλείνοντας, το GPRS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνία και καθοδήγηση, από ταξί ή άλλα ειδικά οχήματα (ασθενοφόρα, πυροσβεστικά, κ.α).

Κεφάλαιο 4

Μοντέλο κυκλοφορίας δεδομένων Internet

4.1 Εισαγωγή

Κατά την προσομοίωση ενός δικτύου υπολογιστών, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της κυκλοφορίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Η συνηθισμένη τακτική που ακολουθείται κατά την προσομοίωση δικτύων TCP/IP ευρείας περιοχής είναι η μοντελοποίηση της άφιξης των πακέτων είτε (στην απλουστευμένη περίπτωση) σαν διαδικασία Poisson, είτε σαν αυτοπαρεμφερές (self-similar) μοντέλο [PF94][FM94], είτε σαν κάποια άλλη στοχαστική διαδικασία. Η χρήση τέτοιων μοντέλων κυκλοφορίας είναι δικαιολογημένη όταν πρέπει να δείξουμε, για παράδειγμα, ότι ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης σε μια πύλη (gateway) ανταποκρίνεται καλά στη χειρότερη περίπτωση ή όταν δεν γνωρίζουμε τίποτα για την πραγματική κυκλοφορία που περνάει μέσα από ένα δίκτυο. Στην περίπτωσή μας όμως, πιστεύουμε, ότι η χρήση τέτοιων μοντέλων δεν θα αποκάλυπτε την πραγματική συμπεριφορά του δικτύου GPRS.

Στο δίκτυο GPRS, ένας αριθμός από συνδρομητές χρησιμοποιεί τα ασύρματα κανάλια για ν' αποκτήσει πρόσβαση σε ένα δημόσιο δίκτυο δεδομένων όπως είναι το Internet. Πρόσβαση στο Internet σημαίνει χρήση των συνηθισμένων εφαρμογών του Internet όπως προγράμματα πλοήγησης στον κυβερνοχώρο μέσω του Παγκοσμίου Ιστού (web browsers), μεταφοράς αρχείων (FTP), ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail) και απομακρυσμένης σύνδεσης (rlogin, telnet). Είναι προφανές, ότι το δίκτυο GPRS έχει και μια πληθώρα άλλων χρήσεων, ωστόσο πιστεύουμε, ότι η πρόσβαση των συνδρομητών στο Internet θα είναι η πιο συνηθισμένη χρήση του. Κατά συνέπεια, «γνωρίζουμε» με αρκετά μεγάλη ακρίβεια το είδος των εφαρμογών που θα τρέχουν πάνω από το δίκτυο άρα και τη φύση της κυκλοφορίας που οι εφαρμογές αυτές θα δημιουργούν.

Έτσι, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα, ότι το μοντέλο κυκλοφορίας κατά την προσομοίωση του δικτύου GPRS θα πρέπει να αποτελείται από μεμονωμένους

χρήστες του Internet. Η προσέγγιση αυτή είναι μια καινοτομία της παρούσας εργασίας και, μέχρι σήμερα, απ' όσο γνωρίζουμε, δεν έχει ξαναεφαρμοστεί στη μελέτη του δικτύου GPRS. Για την υλοποίηση αυτής της προσέγγισης χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη *tcplib*, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία ρεαλιστικής κυκλοφορίας ενός δικτύου TCP/IP [DJ91].

4.2 Σημαντικότερες εφαρμογές του Internet και χαρακτηριστικά τους

Οι συνήθεις εφαρμογές του Internet μπορούν να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες: τις διαλογικές εφαρμογές και τις εφαρμογές μεταφοράς σημαντικής ποσότητας δεδομένων (bulk data transfer). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι εφαρμογές telnet και rlogin, ενώ στη δεύτερη ανήκουν το FTP, το web browsing και το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο.

Οι δύο κατηγορίες διαφέρουν σημαντικά ως προς τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας δεδομένων που δημιουργούν. Στο [DJCME91] γίνεται μια σημαντική μελέτη του μοντέλου κυκλοφορίας των παραπάνω εφαρμογών και, παρ' ότι είναι αρκετά ξεπερασμένη, περιγράφει σωστά τα βασικά σημεία του μοντέλου. Η μελέτη διεξήχθη το 1991, δηλαδή πριν από την ανάπτυξη του WWW, και περιλάμβανε τριήμερη καταγραφή της κυκλοφορίας Internet στα UC Berkeley, University of Southern California και Bell Communications Research. Αποτέλεσμα της μελέτης είναι ότι, από ένα σύνολο 35 διαφορετικών προγραμμάτων, τα FTP, SMTP, NNTP, telnet και rlogin είναι υπεύθυνα για το 96% των δεδομένων. Από τις εφαρμογές αυτές, το telnet και το rlogin έχουν σχεδόν τα ίδια χαρακτηριστικά. Είναι προφανές, ότι, σήμερα, ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της κυκλοφορίας οφείλεται στο web surfing. Στο [TMW97], το ποσοστό του web traffic υπολογίζεται στο 60-75%, του FTP traffic στο 2-8% και του NNTP traffic στο 0.1-2.5% επί του συνολικού ποσού των δεδομένων που διακινούνται σε ένα WAN. Το ποσοστό του web traffic παρουσιάζει συνεχή αύξηση, λόγω της όλο και μεγαλύτερης διάδοσης του Παγκόσμιου Ιστού. Παράλληλα όμως νέες εφαρμογές UDP, όπως το real audio player προστίθενται στην κυκλοφορία του Internet και διεκδικούν μερίδιο του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Από το μοντέλο της κυκλοφορίας που εφαρμόσαμε στη μελέτη του GPRS, αποφασίσαμε ν' αποκλείσουμε τις UDP εφαρμογές, όπως το real audio, πρώτον διότι δεν θ' αποτελούν τυπικές GPRS εφαρμογές και δεύτερον γιατί είναι πιο κατάλληλες

για την επικοινωνία μεταγωγής κυκλωμάτων μέσω GSM παρά την επικοινωνία μεταγωγής πακέτων του GPRS. Επίσης, η κυκλοφορία FTP θεωρήθηκε σαν ειδική περίπτωση της κυκλοφορίας web browsing αφού και στις δύο περιπτώσεις πρόκειται για μετακίνηση αρχείων. Εξάλλου, σε πολλές περιπτώσεις, οι web browsers χρησιμοποιούνται και για FTP. Τέλος, παρ' ότι οι ρουτίνες παραγωγής της ήταν διαθέσιμες, δεν συμπεριλάβαμε εφαρμογές που δημιουργούν NNTP traffic, διότι το μερίδιο της επί της συνολικής κυκλοφορίας είναι πολύ μικρό.

4.3 Γεννήτριες κυκλοφορίας telnet και WWW

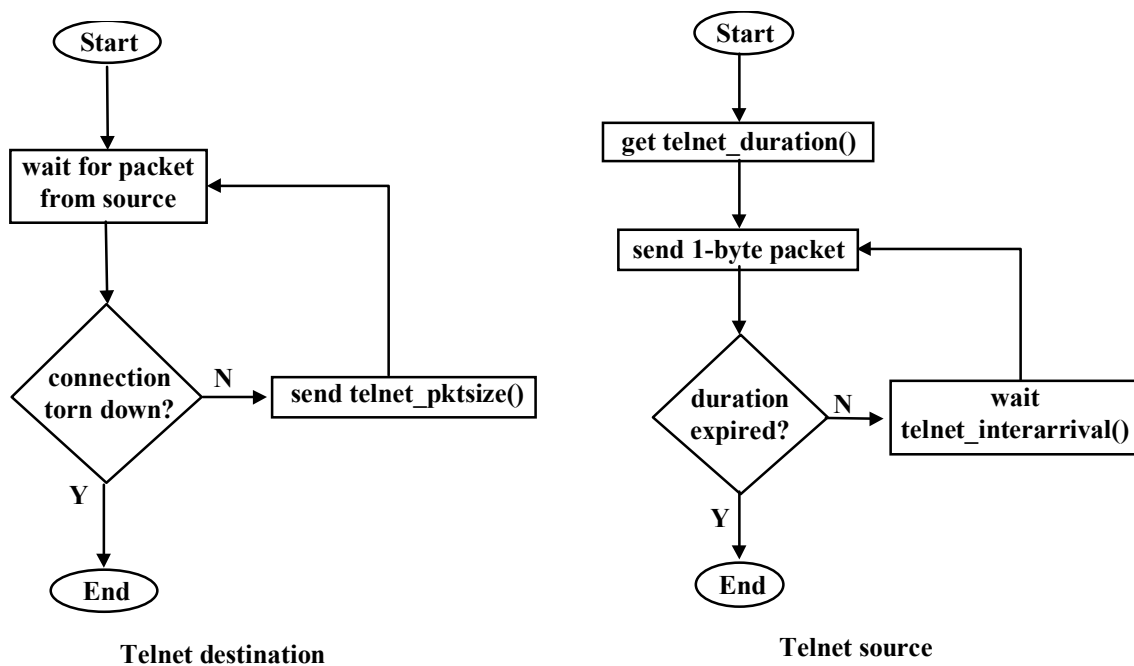
Για την παραγωγή κυκλοφορίας telnet, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη *tcplib*, ο κώδικας της οποίας είναι διαθέσιμος. Η βιβλιοθήκη παρέχει ακόμα γεννήτριες κυκλοφορίας NNTP, SMTP και FTP, αλλά καθώς έχει γραφτεί πριν από το 1992, δεν παρέχει γεννήτριες κυκλοφορίας WWW. Για το σκοπό αυτό, ο κώδικας της γεννήτριας κυκλοφορίας FTP τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να παράγει κυκλοφορία WWW, τόσο από πελάτες όσο και από εξυπηρετητές. Ως είσοδος στη γεννήτρια, χρησιμοποιήθηκαν τα στατιστικά που εξήχθησαν από τα access log files τόσο του τοπικού web server του Τμήματος Επιστήμης Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Κρήτης (www.csd.ucl.ac.uk) όσο και του κεντρικού web server του FORTHNET στην Αθήνα (www.forthnet.gr), στατιστικά που πιστεύουμε ότι αντιπροσωπεύουν ρεαλιστικά τους τυπικούς χρήστες του web. Στην επόμενη παράγραφο θ' αναλυθούν τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας WWW, όπως αυτή αναπαράγεται από τη γεννήτριά μας.

Για την παραγωγή τεχνητής κυκλοφορίας κατασκευάστηκαν επιμέρους μοντέλα πηγής για κάθε μία από τις δημοφιλείς εφαρμογές (telnet, web browsing). Το μοντέλο πηγής υλοποιήθηκε σε βιβλιοθήκη συναρτήσεων, οι οποίες μπορούν να κληθούν από το πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύου. Για περισσότερες λεπτομέρειες, αναφορικά με τον τρόπο κατασκευής των μοντέλων πηγής, παραπέμπουμε τον αναγνώστη στο [DJCME91]. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τις ρουτίνες της τροποποιημένης βιβλιοθήκης *tcplib* που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της κυκλοφορίας Internet στο δίκτυο GPRS.

Application Type	Routine Name
Interactive	float telnet_duration() float telnet_interarrival() int telnet_pktsize()
Bulk Transfer	int web_npages() int web_pagesize() int web_clicksize() int web_clickinterarrival()

Πίνακας 4: Ρουτίνες κατανομής της tcplib

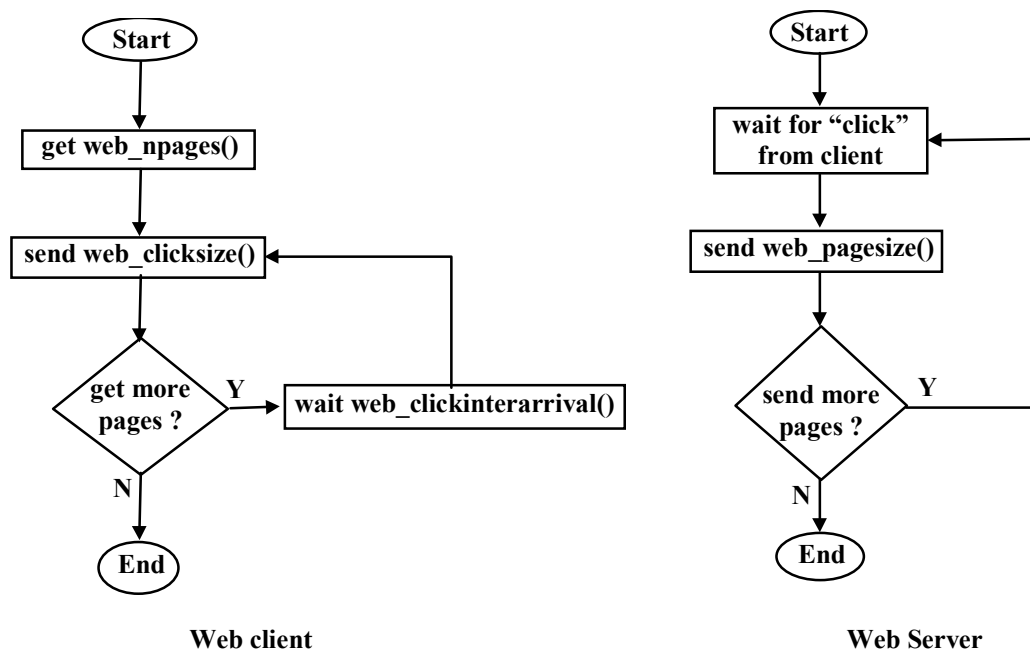
Τα Σχήματα 11 και 12 περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο οι ρουτίνες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν τεχνητή κυκλοφορία telnet και WWW. Για να προσομοιάσουμε ένα "διάλογο" telnet, πρέπει να δημιουργήσουμε την πηγή και τον προορισμό του. Η πηγή στέλνει πακέτα μεγέθους ενός bytes κάθε $telnet_interarrival()$ msec για $telnet_duration()$ διάρκεια συνομιλίας. Ο προορισμός περιμένει τα πακέτα από την πηγή και μετά στέλνει απαντητικά πακέτα, το μέγεθος των οποίων δίνεται από την $telnet_pktsize()$.



Σχήμα 11: Διάγραμμα ροής για τη δημιουργία telnet και rlogin διαλόγων.

Για να προσομοιάσουμε μία σύνοδο web browsing, πρέπει επίσης να δημιουργήσουμε τον πελάτη και τον εξυπηρετητή. Ο πελάτης "κατεβάζει"

web_npages() σελίδες σε κάθε σύνοδο. Κάθε φορά που θέλει να μετακινηθεί σε μία νέα WWW σελίδα ("κλικάρει"), στέλνει στον εξυπηρετητή ένα πακέτο μεγέθους web_clicksize(), το οποίο περιέχει το όνομα του URL. Αφού η σελίδα "κατεβεί", τη διαβάζει για χρόνο web_clickinterarrival και μετά ζητά την επόμενη. Ο εξυπηρετητής, από την άλλη, μόλις λάβει το πακέτο με το URL, στέλνει τη σελίδα που ζητήθηκε μεγέθους web_pagesize() και περιμένει για την επόμενη αίτηση. Όταν οι απαιτούμενες σελίδες φτάσουν στον πελάτη, η σύνοδος τερματίζεται.

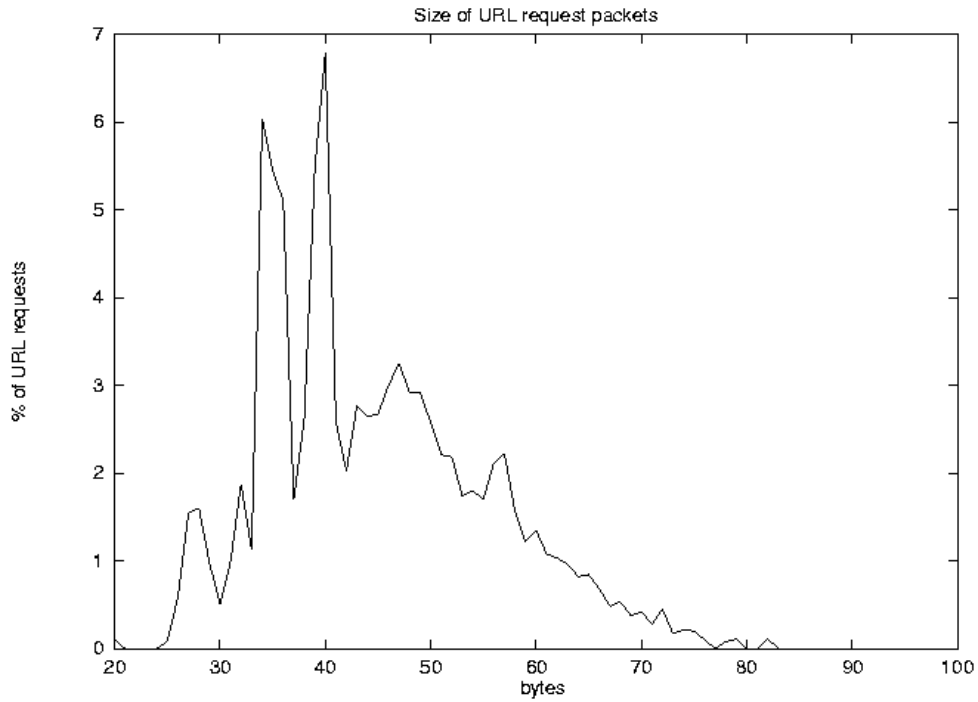


Σχήμα 12: Διάγραμμα ροής για τη δημιουργία WEB BROWSING διαλόγων.

4.4 Περιγραφή και ανάλυση της κυκλοφορίας

Οι κατανομές των ρουτινών της βιβλιοθήκης φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Οι γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν δημιουργήθηκαν από την καταγραφή τουλάχιστον δέκα χιλιάδων δειγμάτων από κάθε ρουτίνα.

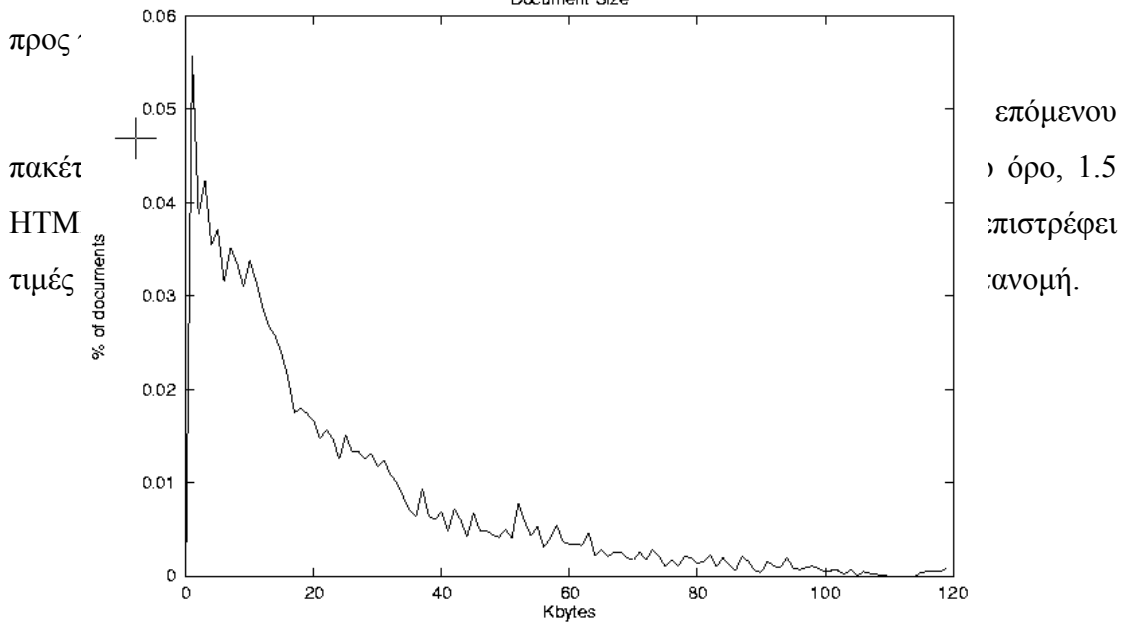
Όσον αφορά τις συναρτήσεις που παράγουν τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας WWW, από το Σχήμα 13 διαπιστώνεται ότι, σε πολύ μεγάλο βαθμό, τα πακέτα που περιέχουν αιτήσεις για κάποιο νέο URL, δηλαδή τα πακέτα με πηγή το τερματικό, έχουν μέγεθος μεταξύ 25-70 bytes.



Σχήμα 13: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μεγέθους των πακέτων που περιέχουν αιτήσεις για URL.

Τα παραπάνω στατιστικά προήλθαν από το web server του FORTHNET και δεν εξαρτώνται τόσο από την κυκλοφορία ή τα περιεχόμενα του εξυπηρετητή, όσο από τις συνήθειες των χρηστών, οι οποίες είναι, σε γενικές γραμμές, ίδιες σ' όλο το Internet.

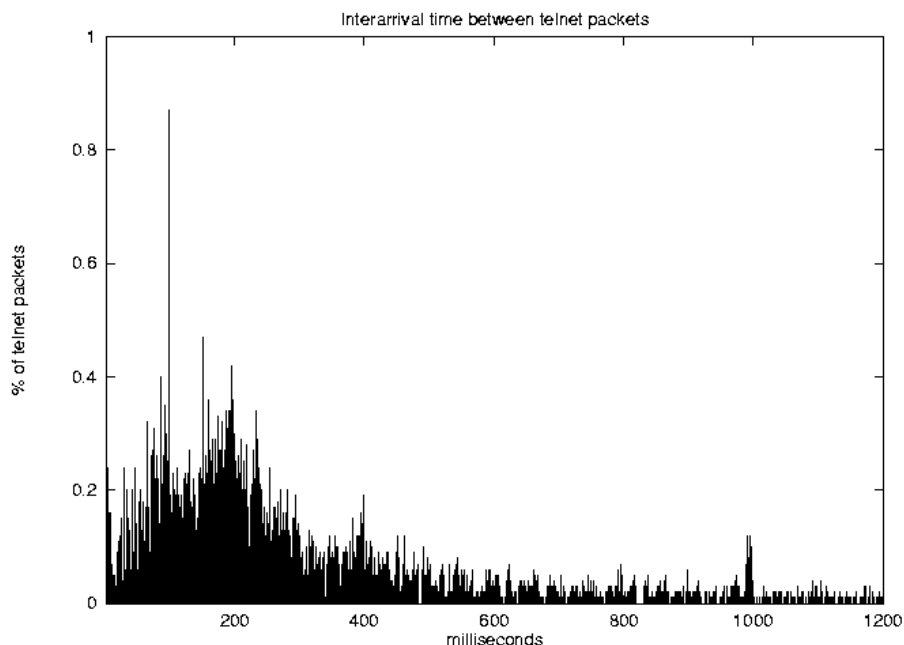
Αντίθετα, τα στατιστικά για το Σχήμα 14 προήλθαν από το [ABVP98]. Πρόκειται για μετρήσεις που έγιναν για λογαριασμό της Motorola Inc. Παρατηρούμε ότι η πλειοψηφία των σελίδων του web έχει μέγεθος μέχρι 40 Kbytes. Η συνάρτηση web_pagesize() επιστρέφει τιμές σύμφωνα με την κατανομή που φαίνεται στο Σχήμα 14 και



14 κο
προς
πακέτι
HTML
τιμές

επόμενου
όρο, 1.5
πιστρέφει
κατανομή.

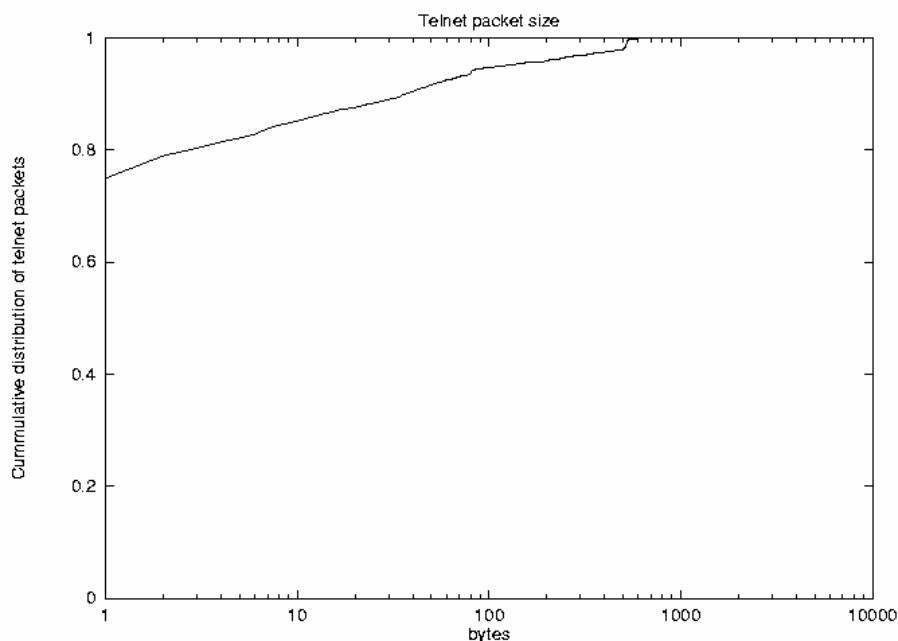
Σχήμα 14: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μεγέθους των σελίδων που προσπελαύνονται στο web.



Σχήμα 15: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μεταξύ της δημιουργίας δύο διαδοχικών πακέτων του telnet στο τερματικό του συνδρομητή.

Τέλος, όσον αφορά τις συναρτήσεις που παράγουν τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας telnet, από το Σχήμα 15 παρατηρούμε ότι τα πακέτα του telnet δημιουργούνται στο τερματικό σε διαστήματα 50-250 milliseconds. Από το Σχήμα 16 βλέπουμε ότι το μέγεθος των πακέτων που φτάνουν στο τερματικό είναι σε ποσοστό 75% μόνο ένα byte, γιατί τα ψηφία που γράφει ο συνδρομητής στο πληκτρολόγιο του τερματικού του κατοπτρίζονται από τον παραλήπτη στην οθόνη του τερματικού².

² Σε συνδυασμό με τις επικεφαλίδες που προσθέτουν σε κάθε πακέτο τα πρωτόκολλα TCP (20 bytes) και IP (20 bytes), το μέγεθος των πακέτων γίνεται 41 bytes. Πρόκειται δηλαδή για σπατάλη εύρους ζώνης.



Σχήμα 16: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής του μεγέθους των πακέτων του telnet που στέλνονται στο τερματικό.

4.5 Μοντέλο Σιδηροδρομικής Γραμμής (railway model)

Εκτός από την κυκλοφορία δεδομένων, η οποία παράγεται από τις ρουτίνες που περιγράψαμε στις προηγούμενες παραγράφους, κατά τη μελέτη του προσομοιωτή, εφαρμόσαμε επίσης κυκλοφορία που ακολουθεί το μοντέλο της σιδηροδρομικής γραμμής (railway model³), όπως αυτή περιγράφεται στο [CG97]. Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί σε παρόμοιες αναλύσεις του πρωτοκόλλου GPRS που έχουν δημοσιευθεί. Έτσι, η εφαρμογή του στην παρούσα εργασία μάς επιτρέπει να κάνουμε χρήσιμες συγκρίσεις μεταξύ της παρούσας και των άλλων υλοποιήσεων, ιδιαίτερα με τ' αποτελέσματα της εργασίας που έγινε στο [CG97].

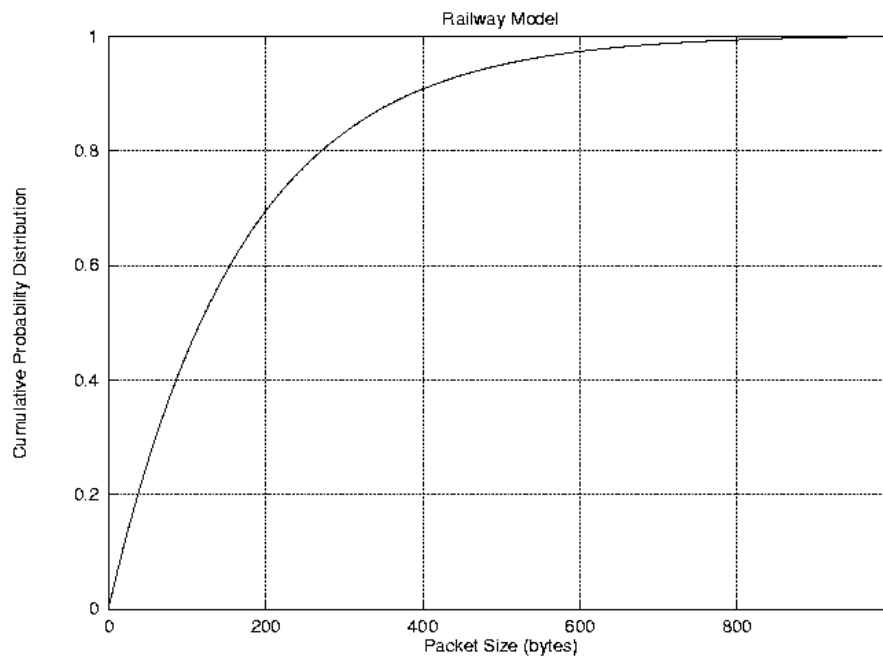
Στο μοντέλο σιδηροδρομικής γραμμής, οι αφίξεις των πακέτων ακολουθούν την κατανομή Poisson. Το μέσο μήκος των πακέτων είναι 170 bytes, το μέγιστο μήκος είναι 1000 bytes και η συνάρτηση κατανομής⁴ είναι

$$f(x) = \frac{1}{170} \exp\left(-\frac{x}{170}\right),$$

³ Truncated exponential packet length distribution.

⁴ Υποθέτουμε ότι $f(x) \approx 0$, για $x \geq 1000$

όπου $0 \leq x \leq 1000$.



Σχήμα 17: Μοντέλο Σιδηροδρομικής Γραμμής

Κεφάλαιο 5

Διαθεσιμότητα καναλιών στο σύστημα GSM

5.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το σύστημα GPRS αποτελεί επέκταση του GSM για την επίτευξη μετάδοσης δεδομένων. Το GPRS δανείζεται ανενεργά κανάλια φωνής (idle traffic channels) από το σύνολο των καναλιών που έχουν αποδοθεί σ' ένα κελί του GSM και τα χρησιμοποιεί για τη μετάδοση πακέτων πληροφορίας μεταξύ τερματικών και βάσης. Είναι όμως τα ανενεργά κανάλια αρκετά; Όπως θα δούμε, ναι, γιατί στα δίκτυα τηλεφωνίας GSM, οι παροχείς υπηρεσιών επιθυμούν να διατηρήσουν την πιθανότητα μπλοκαρίσματος των τηλεφωνικών κλήσεων σε χαμηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα, ο βαθμός εκμετάλλευσης (utilization) των καναλιών να είναι γενικά χαμηλός. Η απόδειξη βασίζεται στην *trunking theory*⁵.

Στο κεφάλαιο αυτό θα υπολογίσουμε τον αριθμό των ανενεργών καναλιών του GSM που είναι δυνατόν να διατεθούν σε άλλα παρασιτικά δίκτυα όπως είναι το GPRS. Επίσης θα δείξουμε ότι ακόμα και κατά τη διάρκεια υψηλού φόρτου κλήσεων, η διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου GSM είναι αρκετά μεγάλη. Τέλος, θα διαπιστώσουμε ότι τα χρονικά διαστήματα που τα κανάλια GSM μένουν αδρανή είναι ικανοποιητικής διάρκειας ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων, όπως το GPRS.

5.2 Πόσος ανενεργός χρόνος υπάρχει στο GSM;

Στα κυψελοειδή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το κάθε κελί εξοπλίζεται συνήθως με αρκετά φυσικά κανάλια, έτσι ώστε η πιθανότητα όλα τα κανάλια να είναι κατειλημμένα, όταν ένας συνδρομητής επιχειρεί μία κλήση, να είναι μικρότερη από ένα όριο (threshold-blocking probability) p_{block} . Η τιμή του ορίου αυτού κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1% - 3% [Bud97].

Υποθέτουμε ότι τόσο στις νέες κλήσεις, όσο και στις κλήσεις που φτάνουν σε ένα κελί εξαιτίας *handover* δίνεται η ίδια μεταχείριση και ότι δεν υπάρχουν κανάλια GSM δεσμευμένα για την εξυπηρέτηση των κλήσεων από *handover*. Υποθέτουμε, ακόμα, ότι οι νέες κλήσεις και οι κλήσεις από *handover* δημιουργούνται σ' ένα κελί σύμφωνα με την κατανομή *Poisson* με ρυθμό λ . Οι κλήσεις, που βρίσκουν όλα τα κανάλια σ' ένα κελί κατειλημμένα, χάνονται. Υποθέτουμε ότι ο χρόνος που ένα κανάλι GSM απασχολείται από μία τηλεφωνική κλήση (καλείται GSM channel-holding time), ακολουθεί τη γενική κατανομή με μέση τιμή \bar{T} . Ο όρος $\alpha = \lambda \bar{T}$ δηλώνει τον προσφερόμενο φόρτο κλήσεων σ' ένα κελί GSM σε Erlangs⁶. Ο τύπος Erlang B [GW96], $B(c, \alpha)$ δίνει την πιθανότητα μπλοκαρίσματος μόνιμης κατάστασης μίας κλήσης GSM που δημιουργείται σ' ένα κελί εφοδιασμένο με c κανάλια GSM και προσφερόμενο φόρτο κλήσεων α Erlangs.

$$B(c, \alpha) = \frac{\frac{\alpha^c}{c!}}{\sum_{j=0}^c \frac{\alpha^j}{j!}} \quad (1)$$

Έστω ότι το $\alpha_{max}(c)$ δηλώνει το μέγιστο φόρτο κλήσεων που μπορεί να υποστηρίξει ένα κελί εφοδιασμένο με c κανάλια GSM, ενώ παράλληλα ικανοποιεί την απαίτηση για μέγιστη ανεκτή πιθανότητα μπλοκαρίσματος p_{block} . Τότε, θα ισχύει

$$B[c, \alpha_{max}(c)] = p_{block} \quad (2)$$

Υποθέτουμε ότι οι κλήσεις κατανέμονται στα κανάλια GSM με τέτοιο τρόπο, ώστε, κατά μέσο όρο, κάθε κανάλι να λαμβάνει το ίδιο ποσοστό του φόρτου κλήσεων. Έστω $\rho(c, \alpha)$, το ποσοστό του χρόνου που κάθε κανάλι GSM στο κελί είναι κατειλημμένο από μία κλήση.

$$\rho(c, \alpha) = \frac{\alpha[1 - B(c, \alpha)]}{c} \quad (3)$$

Έστω $\bar{I}(c, \alpha)$, ο μέσος χρόνος που κάθε κανάλι GSM στο κελί είναι ανενεργό

$$\frac{\bar{T}}{\bar{I}(c, \alpha) + \bar{T}} = \rho(c, \alpha) \quad (4)$$

⁵ Θα μπορούσε να μεταφραστεί ως «θεωρία συγκεντρώσεως κλήσεων».

⁶ Ο όρος α περιλαμβάνει και το φόρτο που δημιουργούν οι κλήσεις που μπλοκαρίστηκαν και ξαναπροσπαθούν.

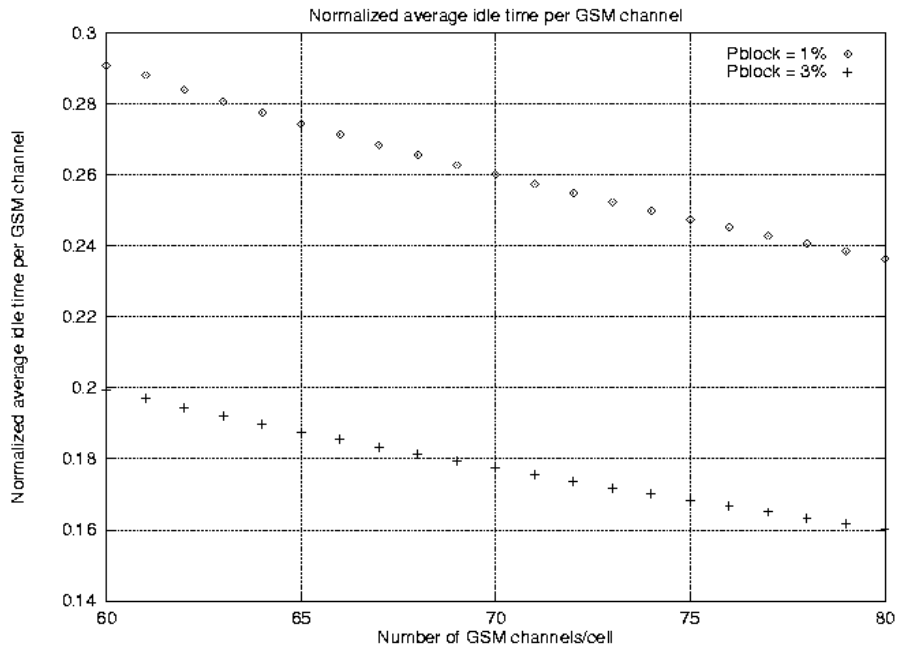
και άρα

$$\bar{I}(c, \alpha) = \frac{1 - \rho(c, \alpha)}{\rho(c, \alpha)} \bar{T} \quad (5)$$

Άλλη μία ποσότητα που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι ο μέσος αριθμός καναλιών που δεν είναι απασχολημένα σε κάποια κλήση στο κελί

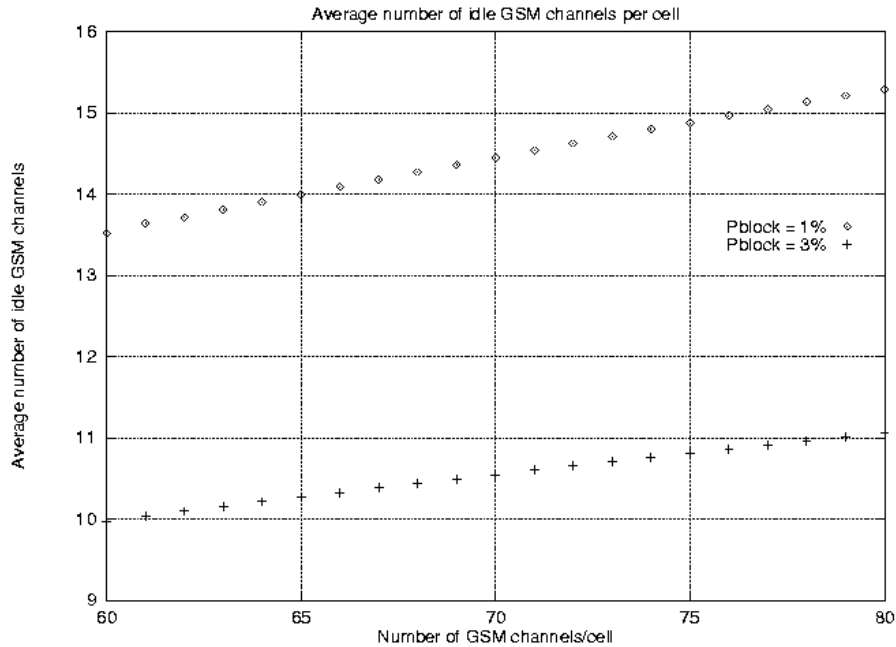
$$\bar{n}_{idle}(c, \alpha) = c - \alpha[1 - B(c, \alpha)] \quad (6)$$

Το Σχήμα 18 δείχνει το διάγραμμα του κανονικοποιημένου ($\bar{T} = 1$) μέσου ανενεργού χρόνου ανά κανάλι GSM $\bar{I}(c, \alpha_{max}(c))$ συναρτήσεως του αριθμού των καναλιών σ' ένα κελί για διάφορες πιθανότητες μπλοκαρίσματος.



Σχήμα 18: Μέσος ανενεργός χρόνος ανά κανάλι GSM.

Το Σχήμα 19 δείχνει το διάγραμμα του μέσου αριθμού ανενεργών καναλιών $\bar{n}_{idle}(c,\alpha)$ σε συνάρτηση του συνολικού αριθμού καναλιών σ' ένα κελί για διάφορες πιθανότητες μπλοκαρίσματος κλήσεων.



Σχήμα 19: Μέσος αριθμός ανενεργών καναλιών ανά κελί GSM.

Μία τιμή μεταξύ 70-80 είναι συνηθισμένη όσον αφορά τον αριθμό των καναλιών με τα οποία είναι εξοπλισμένο ένα τυπικό GSM BS. Επίσης μία τυπική τιμή για το μέσο χρόνο απασχόλησης του καναλιού, υπολογίζοντας τόσο τις κλήσεις που απαντώνται, όσο και τις κλήσεις που είναι αποτέλεσμα handover, είναι της τάξης των 90 δευτερολέπτων [Bud97]. Με βάση την τιμή αυτή, από το Σχήμα 18 διαπιστώνουμε ότι ένα κανάλι GSM σ' ένα κελί εξοπλισμένο με 80 κανάλια και πιθανότητα μπλοκαρίσματος 3%, όταν είναι ανενεργό, παραμένει ανενεργό για περίπου 24 sec (0.16 GSM channel-holding times). Από το Σχήμα 19 βλέπουμε ότι κατά μέσο όρο 11 κανάλια σ' ένα κελί είναι ανενεργά (13.75%).

5.3 Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρούμε ότι ένα σημαντικό ποσοστό των διαθέσιμων πόρων σ' ένα κελί μένει ανενεργό για ικανά χρονικά διαστήματα. Με τη χρήση, μάλιστα, “εξυπνότερων” αλγορίθμων επιλογής καναλιών, όπως

“δρομολόγηση στο λιγότερο ανενεργό κανάλι”, ούτως ώστε ο φόρτος κλήσεων να μην ισοκατανέμεται σε όλα τα κανάλια, τα ανενεργά χρονικά διαστήματα των καναλιών μπορούν να επιμηκυνθούν περισσότερο. Είναι προφανές, ότι ένα σύστημα μετάδοσης δεδομένων θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει τα αδρανή χρονικά διαστήματα για την αποστολή σημαντικών ποσοτήτων πληροφορίας, πριν το κανάλι χρησιμοποιηθεί και πάλι για την εξυπηρέτηση μιας νέας τηλεφωνικής κλήσης. Τέτοιου είδους παρατηρήσεις αποτέλεσαν κινητήριες δυνάμεις για την εισαγωγή του συστήματος GPRS.

Φυσικά, εξαιτίας της στοχαστικής φύσης, τόσο των αφίξεων, όσο και της διάρκειας των κλήσεων του GSM, η διαθέσιμη χωρητικότητα του GSM ποικίλει. Θα υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες, δεν θα υφίσταται επαρκής αριθμός καναλιών για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του GPRS. Κατά τη διάρκεια αυτών των χρονικών διαστημάτων, ο ανταγωνισμός στη δέσμευση πόρων, μεταξύ GSM και GPRS, θα επηρεάζει την απόδοση του συστήματος GPRS (καθώς οι τηλεφωνικές κλήσεις, λογικά, θα έχουν προτεραιότητα έναντι των πακέτων δεδομένων).

Κεφάλαιο 6

Προσομοίωση

Σε προηγούμενο κεφάλαιο περιγράψαμε το σύστημα GPRS. Το σύστημα επιτυγχάνει αποδοτική εκμετάλλευση των διαθέσιμων καναλιών για κυκλοφορία πακέτων δεδομένων, όμως, λόγω της πολυπλοκότητάς του, η μαθηματική ανάλυση του πρωτοκόλλου διεπιφάνειας αέρα (Air-interface protocol) καθίσταται σχεδόν αδύνατη. Είναι, λοιπόν, προτιμότερο, για ένα μηχανικό, να διαθέτει έναν προσομοιωτή, μέσω του οποίου θα μπορεί να διερευνά τις ποικίλες παραμέτρους του πρωτοκόλλου με μικρότερη προγραμματιστική προσπάθεια. Στο κεφάλαιο αυτό, θα περιγράψουμε τη δομή του προσομοιωτή GPRS που αναπτύξαμε.

Ο προσομοιωτής μοντελοποιεί τις λειτουργίες του πρωτοκόλλου στο εσωτερικό ενός κελιού που υποστηρίζει τις υπηρεσίες του GPRS. Σκοπός του είναι η καταγραφή της απόδοσης του πρωτοκόλλου ραδιο-ζεύξης του GPRS. Ο προσομοιωτής μπορεί να μετρήσει το ρυθμό παροχής (throughput), την καθυστέρηση, την πιθανότητα μπλοκαρίσματος, το βαθμό εκμετάλλευσης των καναλιών (channel utilization) και τον αριθμό των συγκρούσεων στο κανάλι τυχαίας προσπέλασης, ανάλογα με τις εκάστοτε παραμέτρους του πρωτοκόλλου και τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας. Ο προσομοιωτής ενσωματώνει διάφορες τεχνολογίες των ασύρματων δικτύων, όπως διαφύλλωση, ευθεία διόρθωση λαθών (FEC), αλγόριθμο ανταγωνισμού και υποχώρησης (contention and backoff algorithm) και πρωτόκολλο επιλεκτικής επαναμετάδοσης (selective ARQ protocol). Ακόμα, μοντελοποιεί την επίδραση των λαθών κατά τη μετάδοση, του φαινομένου σύλληψης (capture effect) και της καθυστέρησης κατά την επεξεργασία (processing delay).

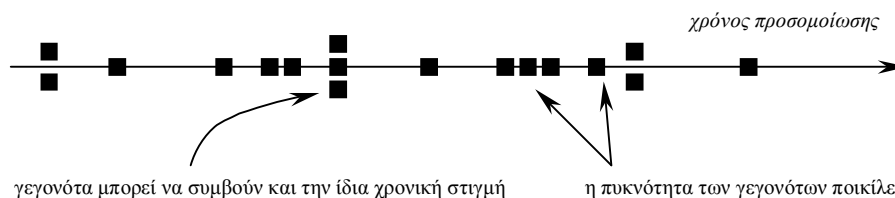
Ο προσομοιωτής υλοποιήθηκε σε γλώσσα C. Δηλαδή, δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο από τα εμπορικά περιβάλλοντα ανάπτυξης προσομοιωτών, σε αντίθεση με άλλες παρόμοιες εργασίες, σχετικές με το GPRS. Πρώτον, κανένα τέτοιο περιβάλλον δεν μας ήταν διαθέσιμο και δεύτερον, η εξ' ολοκλήρου υλοποίηση του προσομοιωτή

με τη γλώσσα C μας παρείχε μεγάλη ευελιξία και καλύτερο έλεγχο των παραμέτρων του συστήματος.

6.1 Μοντελοποίηση

Η προσομοίωση του συστήματος GPRS ακολουθεί τη μέθοδο μοντελοποίησης διακριτών γεγονότων (discrete event modeling). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης, η πρόοδος του μοντέλου αναλύεται σε διακριτά σημεία, τα οποία ονομάζονται *γεγονότα*, στα οποία λαμβάνουν χώρα οι αλλαγές στο σύστημα. Κάθε φορά που ένα νέο γεγονός συμβαίνει, λέμε ότι *εκτελείται* από τον προσομοιωτή. Ο χρόνος της προσομοίωσης αυξάνει μονότονα, καθώς νέα γεγονότα εκτελούνται.

Μία προσομοίωση που εκτελείται μπορεί να θεωρηθεί τόσο γεννήτρια όσο και καταναλωτής γεγονότων. Νέα γεγονότα παράγονται από τον προσομοιωτή όταν χρονοδρομολογείται μια μελλοντική δραστηριότητα, π.χ. η άφιξη ενός πακέτου δημιουργεί το γεγονός της αποστολής θετικής ή αρνητικής επιβεβαίωσης από τον παραλήπτη του. Τα γεγονότα καταναλώνονται καθώς ο χρόνος προχωρεί και τα προσπερνάει. Το Σχήμα 20 δίνει ένα παράδειγμα κατανομής γεγονότων στο χρόνο.



Σχήμα 20: Διακριτά γεγονότα κατά μήκος του χρόνου προσομοίωσης - ο άξονας του χρόνου είναι διακριτός

6.2 Προσομοίωση της κυκλοφορία με πηγή το κινητό

Η έναρξη της κυκλοφορίας δεδομένων από το MS προς το BS παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με την αντίστροφη κυκλοφορία, καθώς απαιτείται τυχαία προσπέλαση στο PRACH. Η διαδικασία μετάδοσης δεδομένων χωρίζεται σε τρεις φάσεις:

- Φάση Ανταγωνισμού: το κινητό που θέλει να ξεκινήσει τη μετάδοση δεδομένων επιχειρεί τυχαία προσπέλαση στο PRACH, στέλνοντας μια αίτηση δέσμευσης πόρων, με τη χρήση ριπής προσπέλασης (access burst). Για τη διευθέτηση των συγκρούσεων μεταξύ των κινητών κατά τη φάση αυτή, χρησιμοποιείται η τεχνική τυχαίας προσπέλασης slotted ALOHA.
- Φάση Κοινοποίησης: το BS στέλνει μια κοινοποίηση προς τα MSs, υποδεικνύοντας το κινητό στο οποίο παραχωρείται πρόσβαση και τα κανάλια (χρονοσχισμές) που του εκχωρούνται για τη μετάδοση των δεδομένων.
- Φάση Μεταφοράς: το MS μεταδίδει τα πακέτα στα προκαθορισμένα κανάλια χρησιμοποιώντας κανονικές ριπές (normal bursts).

Για την υλοποίηση της διαδικασίας μετάδοσης δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν δύο λίστες FCFS. Η πρώτη αποθηκεύει τα πακέτα που δημιουργούνται στα κινητά για μετάδοση, ταξινομημένα κατά το χρόνο άφιξής τους. Κάθε πακέτο είναι μια δομή δεδομένων στην οποία καταγράφονται τα χαρακτηριστικά του (χρόνος άφιξης, μέγεθος και πηγή δεδομένων από την οποία προέρχεται). Στη δεύτερη λίστα μετακινούνται τα πακέτα που έχουν επιχειρήσει τυχαία προσπέλαση στο PRACH, αλλά δεν έχουν αποκτήσει ακόμα παραχώρηση πρόσβασης στο σύστημα (δεν έχουν λάβει access grant), δηλαδή τα πακέτα που έχουν επιτύχει κατά την πρώτη φάση της διαδικασίας. Η δεύτερη λίστα προσομοιώνει την *Random Access Request Queue* (RARQ).

Η συνολική διαδικασία μετάδοσης πακέτων από τα κινητά έχει ως εξής: Ο χρόνος αυξάνει μονότονα με την αύξηση ενός μετρητή χρονοσχιμών. Για κάθε χρονοσχιμή που περνάει, ελέγχεται η πρώτη ουρά για τυχόν άφιξη πακέτου από κάποια πηγή. Εάν ο μετρητής είναι ίσος με τη χρονοσχιμή άφιξης του πακέτου, το τελευταίο επιχειρεί τυχαία προσπέλαση. Κατά τη διαδικασία της προσπέλασης, δύο τινά μπορεί να συμβούν. Εάν μόνο ένα πακέτο επιχειρεί προσπέλαση, τότε η αίτηση παραλαμβάνεται κανονικά από το BS. Εάν περισσότερα από ένα πακέτα επιχειρούν προσπέλαση ταυτόχρονα, τότε συμβαίνει σύγκρουση στο PRACH και η αίτηση ενός από αυτά αποκωδικοποιείται σωστά με κάποια πιθανότητα, που μειώνεται με τον αριθμό των αιτήσεων. Το πακέτο που πέτυχε στην προσπέλαση του καναλιού μετακινείται στη RARQ, όπου θα περιμένει κοινοποίηση των δεσμευμένων καναλιών, ενώ τα υπόλοιπα πακέτα υποχωρούν, δηλαδή ξαναμπαίνουν στην ουρά

γεγονότων (πρώτη ουρά) με αυξημένο χρόνο άφιξης. Μόλις οι απαιτούμενοι πόροι γίνουν διαθέσιμοι, στο πακέτο που προηγείται στη RARQ αποστέλλεται η λίστα με τους πόρους που του εκχωρούνται (φάση κοινοποίησης). Μόλις παραλάβει τη λίστα, το κινητό ξεκινάει τη μετάδοση του πακέτου. Όταν παραληφθεί ολόκληρο το πακέτο, το BS ελέγχει εάν υπάρχουν λάθη κατά τη μετάδοση και ζητάει την επαναμετάδοση των λανθασμένων blocks.

Η τοποθέτηση των αιτήσεων σε ουρά γίνεται για να μειωθεί η κυκλοφορία στο κανάλι τυχαίας προσπέλασης. Η τυχαία προσπέλαση γίνεται σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στον παρακάτω *ψευδοκώδικα*.

εάν (υπάρχει πακέτο που περιμένει για αίτηση προσπέλασης)

{

εάν (τα πακέτα είναι περισσότερα από ένα)

αποφάσισε εάν κάποιο πακέτο επιτυγχάνει προσπέλαση;

αλλιώς

η αίτηση θα παραληφθεί σωστά;

εάν (δε συμβαίνει σύγκρουση στο κανάλι τυχ. προσπέλασης)

{

βγάλε από την πρώτη ουρά το πακέτο;

τοποθέτησέ το στη RARQ;

}

αλλιώς εάν (καμία αίτηση δεν παραλήφθηκε σωστά)

{

βγάλε από την πρώτη ουρά κάθε πακέτο που έκανε αίτηση;

υπολόγισε το χρόνο υποχώρησης, ανάλογα με το πλήθος των πακέτων που συγκρούστηκαν;

ξανατοποθέτησέ τα στη σωστή θέση της πρώτης ουράς με το νέο χρόνο άφιξης;

}

αλλιώς

{

βγάλε από την πρώτη ουρά κάθε πακέτο που έκανε αίτηση, εκτός από αυτό που πέτυχε;

υπολόγισε το χρόνο υποχώρησης, ανάλογα με το πλήθος των πακέτων που συγκρούστηκαν;

ξανατοποθέτησέ τα στη σωστή θέση της πρώτης ουράς με το νέο χρόνο άφιξης;

τοποθέτησε το πακέτο που πέτυχε στη RARQ;

}

}

Random Access Request Queue

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, για την αποφυγή της συμφόρησης του καναλιού τυχαίας προσπέλασης, λόγω των επανειλημμένων αιτήσεων προσπέλασης από MSs, τα οποία δεν έχουν λάβει μήνυμα δέσμευσης πόρων, χρησιμοποιείται μία Random Access Request Queue (RARQ). Ωστόσο, για να επιτευχθεί μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων στην ανάστροφη κατεύθυνση, τα πακέτα που περιμένουν στη RARQ για πολύ ώρα χωρίς να εξυπηρετηθούν, επιστρέφουν στην πρώτη ουρά και επιχειρούν νέα αίτηση τυχαίας προσπέλασης. Ο μέγιστος χρόνος παραμονής στη RARQ (MAX_WAIT_TIME) αποτελεί παράμετρο του συστήματος και η βέλτιστη τιμή του εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας των πακέτων. Από το χρόνο αυτό, εξαρτάται το ποσοστό των αιτήσεων προσπέλασης που απορρίπτονται. Ο ψευδοκώδικας που ακολουθεί περιγράφει τη διαδικασία απόρριψης των αιτήσεων.

εάν (υπάρχει αίτηση στη RARQ)

```
{
    όσο (η επόμενη αίτηση στη RARQ περιμένει περισσότερο από MAX_WAIT_TIME)
    {
        βγάλε από τη RARQ την αίτηση;
        τοποθέτησε την αίτηση στη σωστή θέση στην πρώτη ουρά με χρόνο άφιξης
        το επόμενο πλαίσιο;
        προχώρησε στην επόμενη αίτηση της RARQ;
    }
}
```

6.3 Προσομοίωση της κυκλοφορίας με προορισμό το κινητό

Η κυκλοφορία δεδομένων από το BS προς το MS είναι αρκετά απλούστερη διότι διευθετείται από το ίδιο το BS και δεν απαιτείται τυχαία προσπέλαση. Για την υλοποίησή της χρησιμοποιείται μια ουρά προτεραιότητας, στην οποία τοποθετούνται τα πακέτα που περιμένουν να μεταδοθούν μόλις υπάρξουν οι διαθέσιμοι πόροι. Το BS δρομολογεί τα πακέτα σύμφωνα με τον επιλεγμένο αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης. Οι παραλήπτες περιμένουν την άφιξη ολόκληρου του πακέτου και στη συνέχεια αφού το ελέγξουν για πιθανά λάθη, στέλνουν θετική ή αρνητική επιβεβαίωση στο BS για την επαναμετάδοση των λανθασμένων blocks.

6.4 Δημιουργία των πακέτων

Τα χαρακτηριστικά των μοντέλων κυκλοφορίας που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της επίδοσης του συστήματος GPRS περιγράφηκαν αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για τις δύο συνηθισμένες εφαρμογές του Internet που μελετήθηκαν, ο χρόνος άφιξης και το μέγεθος των πακέτων ακολουθούν τις κατανομές του αντίστοιχου μοντέλου. Ωστόσο, επειδή η κυκλοφορία είναι αμφίδρομη, η δημιουργία των πακέτων δε γίνεται με τον ίδιο τρόπο και για τις δύο εφαρμογές.

Στην περίπτωση της κυκλοφορίας WWW, ο πελάτης (δηλαδή το κινητό) παράγει πακέτα τα οποία περιέχουν το URL της επιθυμητής σελίδας. Τα πακέτα αυτά έχουν μικρό μέγεθος (μέχρι 100 bytes) και μικρό ρυθμό παραγωγής, αφού ο χρήστης περιμένει όχι μόνο για να έρθει ένα ποσοστό της σελίδας αλλά και για να τη διαβάσει, πριν ζητήσει την επόμενη. Ο εξυπηρετητής (δηλαδή το BSS) περιμένει την άφιξη του πακέτου με το URL από το χρήστη και στη συνέχεια ξεκινάει την αποστολή της σελίδας (Σχήμα 12). Έτσι, γίνεται φανερό, ότι ο χρόνος δημιουργίας του πακέτου στο ένα άκρο της επικοινωνίας εξαρτάται άμεσα από το χρόνο δημιουργίας του προηγούμενου πακέτου στο άλλο άκρο. Γι' αυτό, κατά την προσομοίωση της κυκλοφορίας WWW, τα πακέτα δημιουργούνται on-line, δηλαδή η άφιξη του ενός προκαλεί την παραγωγή του επομένου.

Στην περίπτωση της κυκλοφορίας telnet, ο πελάτης παράγει μικρά πακέτα (των 41 bytes) με μεγάλο ρυθμό. Τα πακέτα αυτά, μόλις φτάσουν στον προορισμό τους, στέλνονται πάλι πίσω, για να εμφανιστούν στην οθόνη του πελάτη. Είναι φανερό, ότι η κυκλοφορία και προς τις δύο κατευθύνσεις είναι περίπου ίδια. Η μόνη διαφορά είναι τα επιπλέον πακέτα που στέλνονται από τον εξυπηρετητή και περιέχουν το αποτέλεσμα της εντολής που έδωσε ο πελάτης (Σχήμα 11). Λόγω του ιδιαίτερα μεγάλου αριθμού τους, κατά την προσομοίωση κυκλοφορίας telnet, τα πακέτα δημιουργούνται εξ' αρχής και τοποθετούνται στην πρώτη ουρά, ταξινομημένα κατά το χρόνο άφιξης.

Τέλος, επειδή η κυκλοφορία τύπου σιδηροδρομικής γραμμής έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την κυκλοφορία telnet, η δημιουργία πακέτων γίνεται με τον ίδιο τρόπο.

6.5 Χαρακτηριστικά του προσομοιωτή

Στη δομή του προσομοιωτή ενσωματώθηκαν τα παρακάτω χαρακτηριστικά, όπως περιγράφονται στα [CG97] και [BW97]. Υποθέτουμε, ότι το σύστημα GPRS που μελετάμε χρησιμοποιεί από 1 έως 8 χρονοσχισμές για κάθε φέρον.

6.5.1 Μοντέλο του φαινομένου σύλληψης (capture effect)

Για την προσομοίωση του επιπέδου MAC, χρησιμοποιείται το μοντέλο σύλληψης του [CG97].

Εάν n είναι ο αριθμός των ριπών προσπέλασης που στέλνονται ταυτόχρονα στην ίδια χρονοσχισμή σ' ένα φυσικό κανάλι, τότε για

- $n = 1$: η ριπή προσπέλασης λαμβάνεται σωστά με πιθανότητα $p = 1.0$,
- $n = 2$: μία από τις ριπές προσπέλασης λαμβάνεται σωστά με πιθανότητα $p = 0.67$, οι υπόλοιπες ριπές απορρίπτονται,
- $n = 3$: μία από τις ριπές προσπέλασης λαμβάνεται σωστά με πιθανότητα $p = 0.48$, οι υπόλοιπες ριπές απορρίπτονται,
- $n = 4$: μία από τις ριπές προσπέλασης λαμβάνεται σωστά με πιθανότητα $p = 0.40$, οι υπόλοιπες ριπές απορρίπτονται,
- $n = 5$: μία από τις ριπές προσπέλασης λαμβάνεται σωστά με πιθανότητα $p = 0.35$, οι υπόλοιπες ριπές απορρίπτονται,
- $n > 5$: καμία ριπή προσπέλασης δεν λαμβάνεται σωστά.

6.5.2 Αλγόριθμος υποχώρησης

Ο αλγόριθμος υποχώρησης είναι παρόμοιος με τον αλγόριθμο που υιοθετείται στο IEEE 802.3 standard για τα τοπικά δίκτυα. Μετά από n αποτυχημένες προσπάθειες προσπέλασης, το κινητό υπολογίζει το χρόνο υποχώρησης διαλέγοντας μια τυχαία τιμή μεταξύ 0 και $2^{n+1}-1$ πολλαπλασιάζοντάς την επί 18.5 ms (διάρκεια ενός block) [DBA98]. Στα πειράματά μας, δεν θέσαμε μέγιστο φράγμα στον αριθμό των προσπαθειών n .

6.5.3 ARQ

Το πρωτόκολλο επιλεκτικής επαναμετάδοσης μεταξύ του MS και του BS παρέχει επαναμεταδόσεις των blocks που παρελήφθησαν με λάθη. Όταν ο παραλήπτης του πακέτου διαπιστώσει ότι συνέβησαν λάθη κατά τη μετάδοση, στέλνει ένα NACK στην πηγή, το οποίο περιέχει μια λίστα με τα blocks που πρέπει να επαναμεταδοθούν.

6.5.4 Κυκλική εξυπηρέτηση πακέτων

Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης των δεδομένων στην ευθεία κατεύθυνση είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την απόδοση του συστήματος και ιδιαίτερα για την καθυστέρηση που αντιμετωπίζουν οι εφαρμογές. Ανεξάρτητα από το μέγεθος των πακέτων επιπέδου δικτύου που φθάνουν στο BSS για μετάδοση προς τα κινητά, το BSS πρέπει να ορίζει σειρά εξυπηρέτησης με «έξυπνο» τρόπο, έτσι ώστε και τα μικρά πακέτα των διαλογικών εφαρμογών να εξυπηρετούνται σύντομα, αλλά και τα μεγαλύτερα πακέτα των εφαρμογών μεταφοράς σημαντικής ποσότητας δεδομένων (bulk data transfer) να μην καθυστερούν υπερβολικά.

Για την επίλυση του προβλήματος εξυπηρέτησης πακέτων και δεδομένου ότι τα πακέτα επιπέδου δικτύου κατακερματίζονται σε LLC πλαίσια σταθερού μεγέθους, επιλέξαμε μία παραλλαγή του αλγόριθμου χρονοδρομολόγησης Κυκλικής Εξυπηρέτησης (*Round-Robin*). Στο επίπεδο LLC, τα πλαίσια πολυπλέκονται, έτσι ώστε όλα τα πακέτα να μεταδίδονται κυκλικά.

Ο ψευδοκώδικας που ακολουθεί περιγράφει τη διαδικασία εισαγωγής πλαισίου στην ουρά προτεραιότητας για να χρονοδρομολογηθεί στην ευθεία κατεύθυνση⁷.

διαδικασία βάλε στην ουρά χρονοδρομολόγησης (νέο πλαίσιο)

{

εάν (η ουρά είναι άδεια)

βάλε το πλαίσιο στην ουρά;

αλλιώς εάν (η ουρά έχει μόνο ένα στοιχείο)

βάλε το πλαίσιο στη δεύτερη θέση;

αλλιώς // η ουρά έχει περισσότερα από ένα στοιχεία

 {

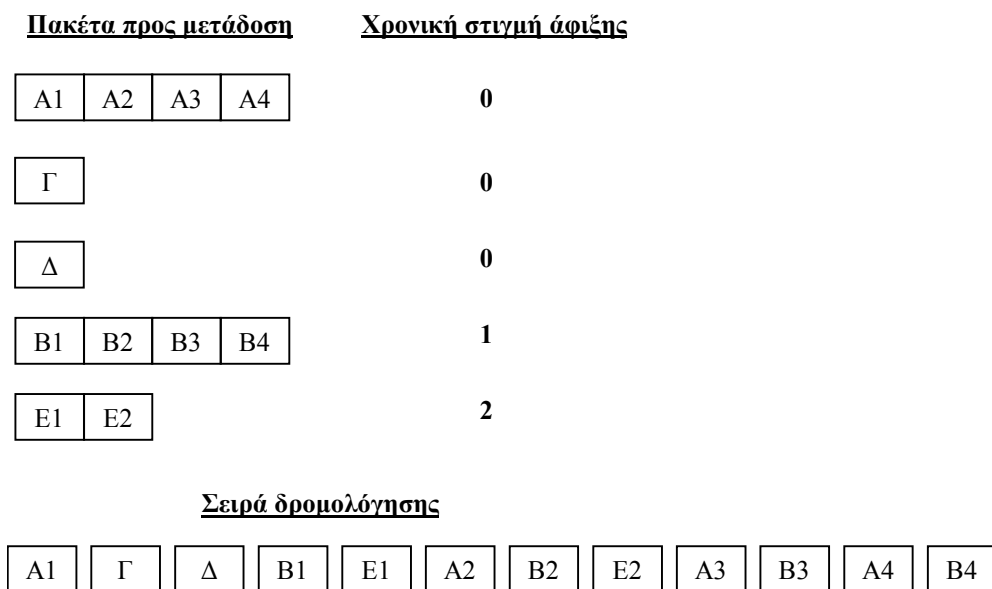
⁷ Ο αλγόριθμος που περιγράφουμε δεν εξαλείφει το πρόβλημα της στέρησης, το οποίο μπορεί να εμφανιστεί σε ακραίες περιπτώσεις πολύ μεγάλου αριθμού αφίξεων μικρών πακέτων.

```

    Ξεκίνα από το δεύτερο στοιχείο της ουράς;
    όσο ((δεν έφτασες στο τέλος της ουράς) και
        (δεν έβαλες το πλαίσιο στην ουρά))
    {
        εάν (((το τρέχον πλαίσιο ανήκει στο ίδιο πακέτο με το προηγούμενο
            πλαίσιο) ή
            ((το τρέχον πλαίσιο έχει χρόνο άφιξης μικρότερο από το
            προηγούμενο πλαίσιο) και (το πλαίσιο που θέλουμε να
            βάλουμε στην ουρά δεν ανήκει στο πακέτο του προηγούμενου
            πλαισίου)))
            βάλε το πλαίσιο πριν από το τρέχον;
        προχώρησε στο επόμενο στοιχείο της ουράς;
    }
    εάν (δεν μπηκε ακόμα το πλαίσιο)
        βάλε το πλαίσιο στο τέλος της ουράς;
}
}
}

```

Το Σχήμα 21 δίνει ένα παράδειγμα εφαρμογής του αλγόριθμου για τη χρονοδρομολόγηση 5 πακέτων. Υποθέτουμε ότι ο ρυθμός άφιξης της πληροφορίας εισόδου δεν ξεπερνά το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος, γιατί τότε θα εμφανιζόταν το φαινόμενο της στέρησης (starvation).



Σχήμα 21: Παράδειγμα εφαρμογής του αλγόριθμου χρονοδρομολόγησης πακέτων στην ευθεία κατεύθυνση

6.6 Σταθερές

- Ο χρόνος μεταξύ της παραλαβής του τελευταίου block δεδομένων και της μετάδοσης μιας επιβεβαίωσης. Προεπιλεγμένη τιμή: 1 πλαίσιο TDMA.
- Μέγιστος χρόνος αναμονής για δέσμευση καναλιών στην πλευρά του MS (MAX_WAIT_TIME). Προεπιλεγμένη τιμή: 0.5 δευτερόλεπτα

6.7 Κριτήρια απόδοσης

- **Καθυστέρηση Μεταφοράς Πακέτου:** ο χρόνος μεταξύ της δημιουργίας ενός πακέτου στην πηγή και της ολοκληρωμένης αποστολής του στον προορισμό.
- **Ρυθμός Παροχής (Throughput):** το ποσό των δεδομένων χρήστη που φθάνουν χωρίς λάθη στον προορισμό τους, στη μονάδα του χρόνου.
- **Ποσοστό Μπλοκαρίσματος:** το ποσοστό των προσπαθειών τυχαίας προσπέλασης που αποτυγχάνουν λόγω σύγκρουσης στο PRACH.

Τα παραπάνω κριτήρια χρησιμεύουν στην εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος όσον αφορά τις ακόλουθες παραμέτρους:

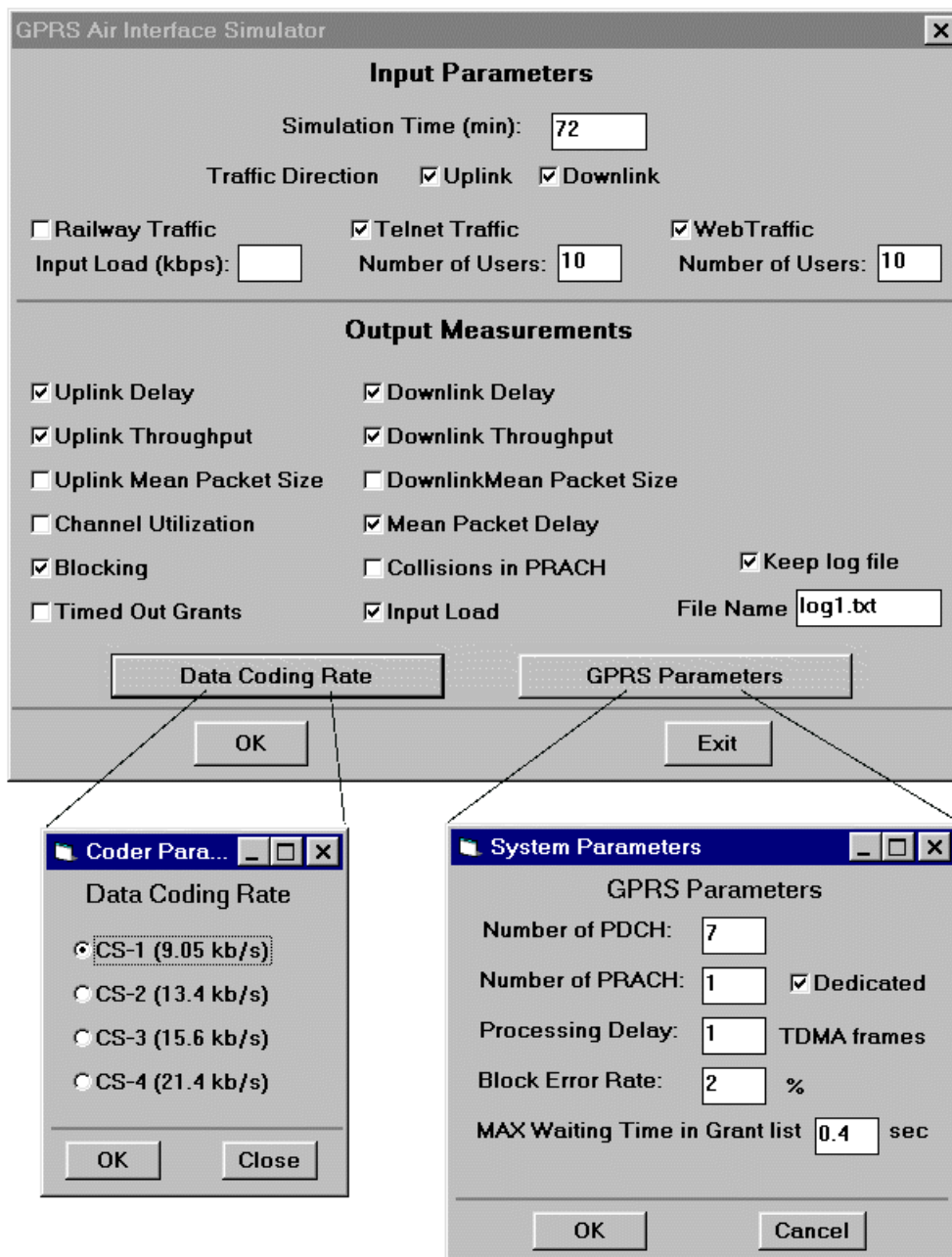
- **Αριθμός Τελικών Χρηστών:** ο αριθμός των τελικών εφαρμογών web browsing ή telnet που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα, με ικανοποιητική απόδοση για τους χρήστες.
- **Φόρτος Εισόδου (Input Load):** προσδιορίζει την ποσότητα της πληροφορίας που δημιουργείται από τις τελικές εφαρμογές κάθε δευτερόλεπτο και εισάγεται στο δίκτυο. Δεν περιλαμβάνει τη σηματοδότηση ελέγχου και τις επαναμεταδόσεις.

6.8 Διεπιφάνεια χρήστη

Η παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας εισόδου, του συστήματος αλλά και της καταγραφής των μετρήσεων είναι απαραίτητη για να επιτευχθεί η μέγιστη ευελιξία του προσομοιωτή. Εξαιτίας του πλήθους των παραμέτρων του προγράμματος που απαιτείται να καθοριστούν πριν από την εκτέλεση ενός πειράματος προσομοίωσης, η χρησιμοποίηση μιας γραφικής διεπιφάνειας χρήστη είναι επιβεβλημένη. Στο Σχήμα 22 φαίνεται το πρωτότυπο της γραφικής διεπιφάνειας χρήστη του προσομοιωτή.

Όπως βλέπουμε, το κύριο παράθυρο επιλογών της διεπιφάνειας χρήστη χωρίζεται σε δύο τμήματα. Στο πάνω τμήμα, ο χρήστης καθορίζει τις βασικές παραμέτρους του πειράματος προσομοίωσης, δηλαδή το είδος της κυκλοφορίας εισόδου και τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στο κάτω τμήμα, ο χρήστης επιλέγει τα στατιστικά που επιθυμεί να καταγραφούν από τον προσομοιωτή. Στο τμήμα αυτό, υπάρχουν ακόμα δύο κουμπιά που εμφανίζουν δύο άλλους υποκαταλόγους επιλογών, οι οποίοι φαίνονται στο κάτω μέρος του Σχήματος 22.

Στον πρώτο υποκατάλογο (κάτω αριστερά), ο χρήστης μπορεί να καθορίσει το ρυθμό κωδικοποίησης των δεδομένων, επιλέγοντας ανάμεσα στις τέσσερις κατηγορίες που ορίζονται στο πρότυπο του GPRS. Στο δεύτερο υποκατάλογο (κάτω δεξιά), ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει τις παραμέτρους του συστήματος, όπως, π.χ. τον αριθμό των καναλιών PDCH και το ποσοστό των λαθών κατά τη μετάδοση.



Σχήμα 22: Διεπιφάνεια Χρήστη

Κεφάλαιο 7

Αριθμητικά αποτελέσματα

Σ' αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που ελήφθησαν από τις προσομοιώσεις του συστήματος GPRS και εξετάζεται η απόδοση του πρωτοκόλλου για διάφορες τιμές των παραμέτρων του, διάφορα είδη κυκλοφορίας δεδομένων και για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Η αξιολόγηση της απόδοσης του GPRS γίνεται με την καταγραφή και ανάλυση των ακολούθων δεικτών:

- **Καθυστέρηση Μεταφοράς Πακέτου**
- **Ρυθμός Παροχής**
- **Ποσοστό Μπλοκαρίσματος**

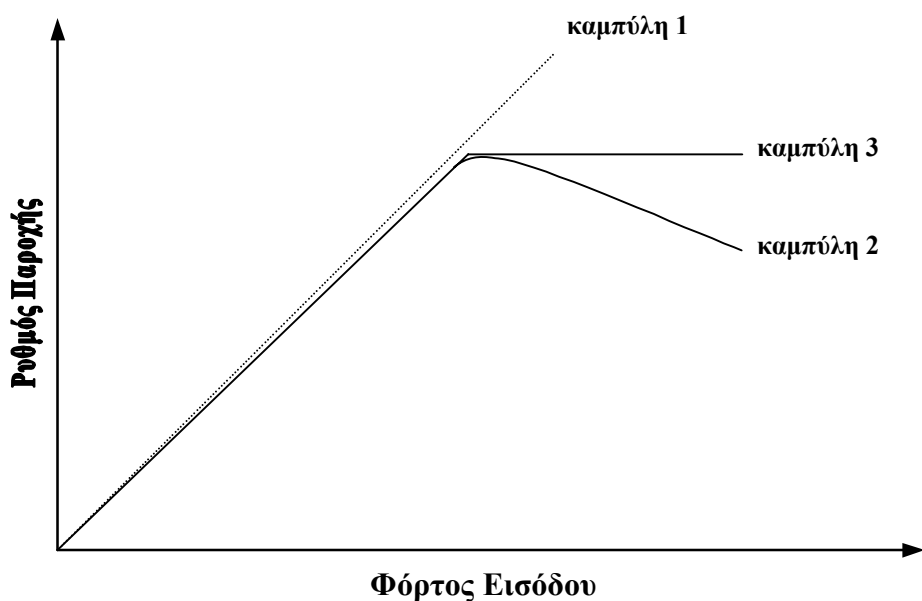
Κάθε ένας από τους παραπάνω δείκτες εξετάζεται σε συνάρτηση του **Αριθμού Τελικών Χρηστών**, οι οποίοι παράγουν κάποιο **Φόρτο Εισόδου** (σε bps), ούτως ώστε να διαπιστωθεί το μέγιστο πλήθος των συνδρομητών που μπορεί να εξυπηρετηθεί ταυτόχρονα από το εξεταζόμενο σύστημα.

Το Σχήμα 23 δείχνει ότι σ' ένα σύστημα πολλαπλής προσπέλασης (multi-access system), το διάγραμμα του ρυθμού παροχής σε συνάρτηση με το φόρτο εισόδου έχει τρεις πιθανές μορφές [CG97].

Όταν ένα σύστημα πολλαπλής προσπέλασης έχει άπειρη χωρητικότητα, ο ρυθμός παροχής ισούται πάντα με το φόρτο εισόδου (καμπύλη 1). Σ' ένα σύστημα που ακολουθεί το μοντέλο slotted ALOHA, στο οποίο τα πακέτα είναι μικρού μεγέθους, το διάγραμμα του ρυθμού παροχής είναι παρόμοιο με την καμπύλη 2. Στη περίπτωση αυτή, όσο το σύστημα είναι ευσταθές (stable) (πριν φτάσει στο μέγιστο ρυθμό παροχής), ο ρυθμός παροχής ισούται με το φόρτο εισόδου. Όταν το σύστημα υπερφορτωθεί, σημαντικός αριθμός πακέτων συγκρούονται κατά τη διαδικασία τυχαίας προσπέλασης και συνωστίζονται. Όσο ο φόρτος αυξάνει, όλο και περισσότερα πακέτα συγκρούονται και λιγότερα καταφέρνουν ν' αποκτήσουν

πρόσβαση. Κατά συνέπεια, ο ρυθμός παροχής του συστήματος μειώνεται καθώς ο φόρτος αυξάνει.

Το σύστημα GPRS έχει τα γενικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος slotted ALOHA, ωστόσο διαφέρει σε αρκετά σημεία. Κατ' αρχήν, το μέγεθος των πακέτων της κυκλοφορίας εισόδου ποικίλει, από πολύ μικρά πακέτα (κυκλοφορία telnet) έως μεγάλα πακέτα (κυκλοφορία WWW). Στη δεύτερη περίπτωση, το ποσοστό των συγκρούσεων στο PRACH είναι χαμηλό. Αντίθετα, στη πρώτη περίπτωση, είναι απαραίτητη η εισαγωγή μηχανισμού που θα κρατάει τις αιτήσεις τυχαίας προσπέλασης σε ουρά και μηχανισμού σύλληψης πακέτων, ούτως ώστε να μην περιορίζεται ο ρυθμός παροχής του συστήματος από τις συγκρούσεις κατά τη διαδικασία τυχαίας προσπέλασης.



Σχήμα 23: Ο ρυθμός παροχής συναρτήσει του φόρτου εισόδου σ' ένα σύστημα πολλαπλής προσπέλασης

Ένα δεύτερο σημείο διαφοροποίησης είναι ότι, για υψηλό φόρτο εισόδου, επειδή η κυκλοφορία θα είναι μικτή (πακέτα όλων των μεγεθών) και σε συνδυασμό με το μηχανισμό δέσμευσης καναλιών και την ύπαρξη μεγάλων πακέτων, τα κανάλια θα αξιοποιούνται πλήρως. Γι' αυτό, ο ρυθμός παροχής του συστήματος GPRS αναμένεται ν' ακολουθεί την καμπύλη 3. Όταν το σύστημα είναι ευσταθές,

συμπεριφέρεται σαν σύστημα slotted ALOHA. Όταν το σύστημα υπερφορτώνεται, ο ρυθμός παροχής συγκλίνει στη μέγιστη τιμή.

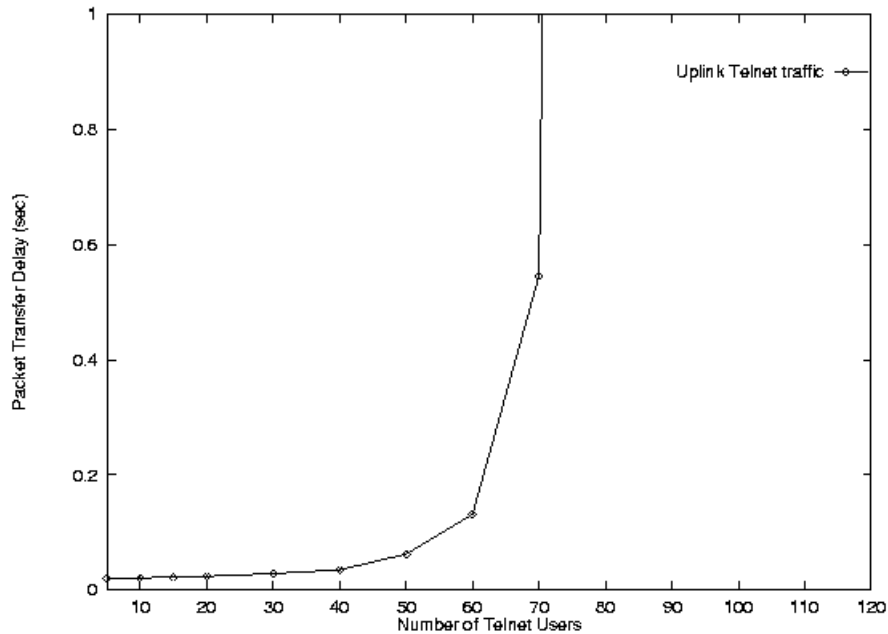
7.1 Γενικές μετρήσεις της απόδοσης στην ανάστροφη κατεύθυνση

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται οι μετρήσεις της απόδοσης του συστήματος για την κυκλοφορία δεδομένων στην ανάστροφη κατεύθυνση, οι οποίες έγιναν για την τυπική διαμόρφωσή του, όπως αυτή καθορίζεται στα [GPRS1] και [GPRS2] και δίνεται στο [JG97]. Οι τιμές των παραμέτρων του πρωτοκόλλου δίνονται στον Πίνακα 5. Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους χρησιμοποιούν τις τιμές του Πίνακα 5, εκτός εάν αναφέρεται διαφορετικά. Σε πολλές περιπτώσεις, μελετάμε τη συμπεριφορά του συστήματος αλλάζοντας μία παράμετρο και κρατώντας τις υπόλοιπες σταθερές, όπως δίνονται στον Πίνακα 5.

Παράμετρος	Προεπιλεγμένη τιμή
Διάρκεια Προσομοίωσης	90-180 λεπτά
Ρυθμός κωδικοποίησης FEC	1/2
Αριθμός PDCH (Packet Data Channel)	7
Αριθμός PRACH (Packet Random Access Channel)	1
BLER (Block Error Rate)	1%
Μέγιστος χρόνος αναμονής για λήψη Access Grant	0.5 δευτερόλεπτα
Καθυστέρηση κατά την αποστολή ACK ή NACK	1 TDMA frame

Πίνακας 5: Τιμές των παραμέτρων του συστήματος κατά την προσομοίωση

Το Σχήμα 24 δίνει την καθυστέρηση των πακέτων telnet στην ανάστροφη κατεύθυνση συναρτήσει του αριθμού των εφαρμογών που επικοινωνούν μέσω του συστήματος GPRS. Αν υποθέσουμε ότι μια καθυστέρηση μέχρι 200 ms είναι ανεκτή για ένα χρήστη του telnet, παρατηρούμε ότι 7 PDCH μπορούν να εξυπηρετήσουν περί τους 60 χρήστες ταυτόχρονα. Είναι προφανές ότι εάν επρόκειτο για δίκτυο μεταγωγής κυκλωμάτων, οι ίδιοι χρήστες θα απαιτούσαν 60 φυσικά κανάλια GSM για την εξυπηρέτησή τους. Άρα, το GPRS εκμεταλλεύεται πολύ πιο αποδοτικά τους πόρους του δικτύου.



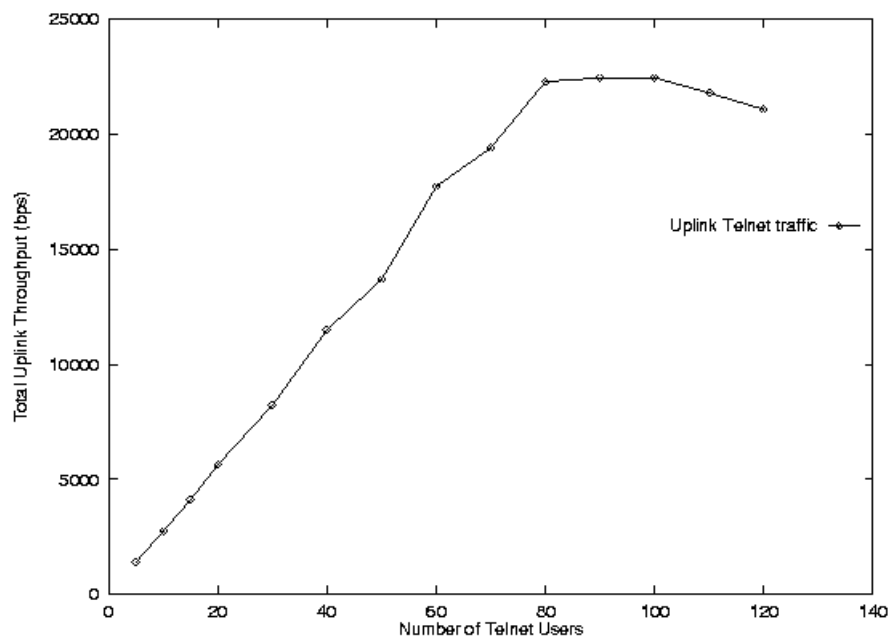
Σχήμα 24: Καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων στην ανάστροφη κατεύθυνση συναρτήσει του αριθμού των χρηστών

Το Σχήμα 25 δείχνει το ρυθμό παροχής του συστήματος συναρτήσει του αριθμού των χρηστών στην ανάστροφη κατεύθυνση. Σημειώνουμε ότι μια εφαρμογή telnet παράγει δεδομένα με ρυθμό 400 bps περίπου. Σ' αυτά συμπεριλαμβάνονται οι επικεφαλίδες των πρωτοκόλλων επιπέδου ανώτερου του MAC. Παρατηρούμε ότι για την ανάστροφη κυκλοφορία telnet, στην οποία τα πακέτα έχουν μέγεθος λίγα bytes, το διάγραμμα του ρυθμού παροχής μοιάζει με αυτό ενός συστήματος slotted ALOHA, αν και η αρνητική κλίση είναι μικρή (καμπύλη 2 του Σχήματος 22). Ακόμα παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή του ρυθμού παροχής είναι 22 kbps, δηλαδή περίπου 35% του διαθέσιμου εύρους ζώνης⁸. Άρα η εκμετάλλευση των διαθέσιμων καναλιών του συστήματος είναι ιδιαίτερα χαμηλή.

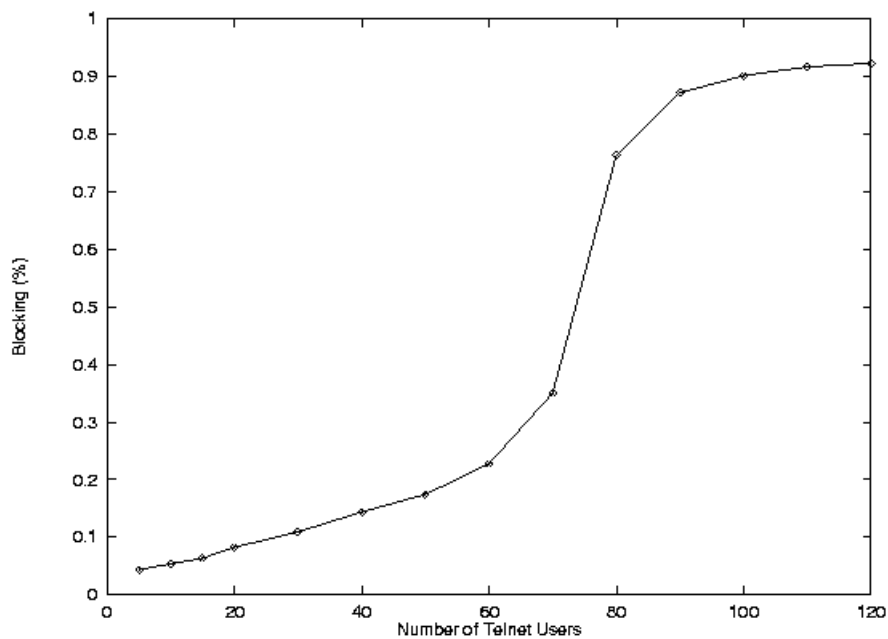
Το Σχήμα 26 δείχνει την πιθανότητα μπλοκαρίσματος των αιτήσεων προσπέλασης των πακέτων στο PRACH συναρτήσει του αριθμού των χρηστών. Παρατηρούμε ότι, μέχρι τους 60 χρήστες telnet, η πιθανότητα μπλοκαρίσματος αυξάνεται γραμμικά και με μικρότερο ρυθμό από το ρυθμό αύξησης του αριθμού των χρηστών. Αυτό οφείλεται στο αφιερωμένο κανάλι τυχαίας προσπέλασης, στο

⁸ Με 7 PDCH και 1 αφιερωμένο PRACH, το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι περίπου 63 kbps.

φαινόμενο σύλληψης και στο μηχανισμό τοποθέτησης σε ουρά των αιτήσεων τυχαίας προσπέλασης που φτάνουν στο BS.



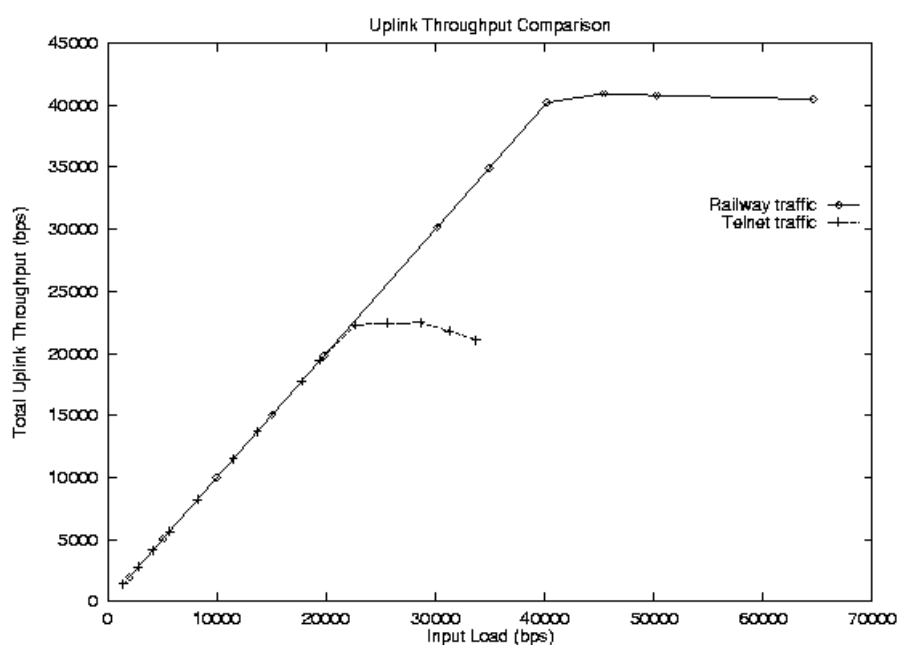
Σχήμα 25: Ρυθμός παροχής του συστήματος συναρτήσει του αριθμού των χρηστών



Σχήμα 26: Ποσοστό μπλοκαρίσματος των αιτήσεων τυχαίας προσπέλασης συναρτήσει του αριθμού των χρηστών

Για περισσότερους από 60 χρήστες, όμως, οι συγκρούσεις στο κανάλι τυχαίας προσπέλασης είναι πάρα πολλές και η πιθανότητα μπλοκαρίσματος αυξάνεται εκθετικά, πλησιάζοντας το 90%. Γι' αυτό και στο Σχήμα 24, παρατηρούμε ότι η καθυστέρηση «εκρήγνεται» για περισσότερους από 60 χρήστες.

Για να έχουμε μια πιο σαφή εικόνα της απόδοσης του συστήματος συναρτήσει του φόρτου εισόδου, στα επόμενα διαγράμματα, συγκρίνουμε το ρυθμό παροχής και την καθυστέρηση των πακέτων για κυκλοφορία telnet και για κυκλοφορία railway. Το μοντέλο κυκλοφορίας railway χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιβλιογραφία για την προσομοίωση κυκλοφορίας μεταγωγής πακέτων.



Σχήμα 27: Ρυθμός παροχής συναρτήσει του φόρτου εισόδου για την ανάστροφη κατεύθυνση: σύγκριση των μοντέλων κυκλοφορίας

Το Σχήμα 27 δείχνει το συγκριτικό ρυθμό παροχής που επιτυγχάνεται στο σύστημα για τα δύο είδη κυκλοφορίας. Παρατηρούμε, ότι ο μέγιστος ρυθμός παροχής που επιτυγχάνεται είναι περίπου 43 kbps. Όπως και για την κυκλοφορία telnet, έτσι και για την κυκλοφορία railway, ο ρυθμός παροχής αυξάνεται γραμμικά με το φόρτο εισόδου. Όταν ο φόρτος εισόδου ξεπεράσει τα 44 kbps (περίπου 5.5 kbps ανά

PDTCH⁹), ο ρυθμός παροχής φτάνει στη μέγιστη τιμή του και διατηρείται σ' αυτή για περαιτέρω αυξήσεις του φόρτου. Αντίθετα, στην κυκλοφορία telnet, ο ρυθμός παροχής αρχίζει να μειώνεται αφού αγγίξει τη μέγιστη τιμή του. Η μέγιστη τιμή του ρυθμού παροχής για την κυκλοφορία railway, αντιστοιχεί σε ποσοστό 68% του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Δηλαδή, τα κανάλια του συστήματος αξιοποιούνται περίπου κατά τα 2/3.

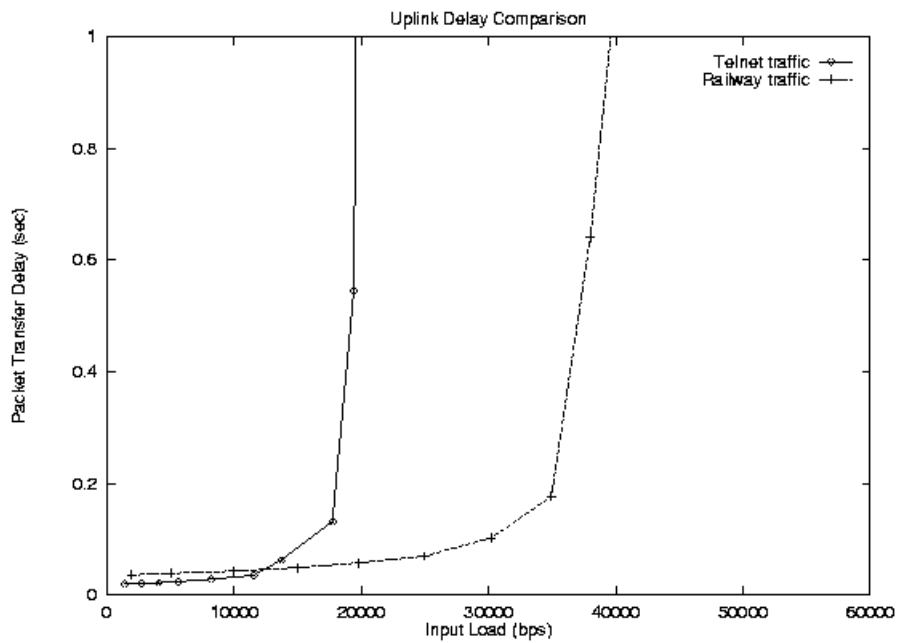
Ακόμα παρατηρούμε ότι για κυκλοφορία railway, το σύστημα έχει καλύτερη απόδοση κατά 100% περίπου. Οι λόγοι της διαφοροποιημένης συμπεριφοράς του συστήματος κατά την εισαγωγή κυκλοφορίας railway είναι δύο. Πρώτον, ο ρυθμός άφιξης των πακέτων είναι χαμηλότερος σε σχέση με την κυκλοφορία telnet άρα και οι συγκρούσεις στο PRACH είναι λιγότερες. Κατά συνέπεια, μεγαλύτερο ποσοστό πακέτων επιτυγχάνει να προσπελάσει το σύστημα και να μεταδοθεί και ο ρυθμός παροχής παρουσιάζεται αυξημένος. Δεύτερον, το μέσο μέγεθος των πακέτων είναι μεγαλύτερο και η κυκλοφορία μοιάζει περισσότερο με μικτή κυκλοφορία telnet και WWW. Έτσι, όταν ένα πακέτο επιτύχει να προσπελάσει το σύστημα, χρησιμοποιεί τα κανάλια για περισσότερο χρόνο. Κατά συνέπεια, ο ρυθμός παροχής ακολουθεί την καμπύλη 3 του Σχήματος 23, όπως ήταν αναμενόμενο.

Το Σχήμα 28 συγκρίνει τις καθυστερήσεις που αντιμετωπίζουν τα πακέτα για τα δύο είδη κυκλοφορίας. Όπως ήταν αναμενόμενο, για χαμηλό φόρτο εισόδου, η καθυστέρηση των πακέτων telnet είναι μικρότερη από τα πακέτα railway, λόγω του μικρότερου μεγέθους των πρώτων. Παρατηρούμε, όμως, ότι η καθυστέρηση telnet εκτινάσσεται γρηγορότερα από την καθυστέρηση railway, εξαιτίας της αύξησης των συγκρούσεων στο PRACH. Επειδή η κυκλοφορία railway δεν αντιστοιχεί σε κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή, δεν μπορούμε να υποθέσουμε ποιες τιμές της καθυστέρησης των πακέτων είναι ανεκτές στους χρήστες. Σίγουρα όμως, για φόρτο εισόδου μεγαλύτερο από 4 kbps ανά PDTCH, η καθυστέρηση αυξάνεται εκθετικά γρήγορα σε μη ανεκτά επίπεδα.

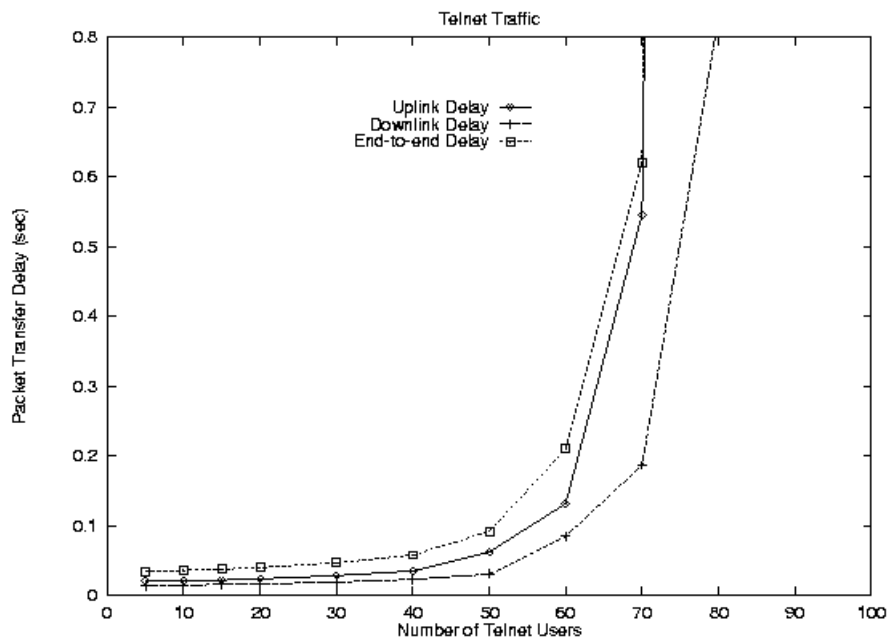
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα των Σχημάτων 27 και 28, που αφορούν την κυκλοφορία railway, συμπίπτουν με τα αποτελέσματα που αναφέρονται στο [CG97]. Τα τελευταία προέκυψαν από τον προσομοιωτή του GPRS που αναπτύχθηκε στο WINLAB, με τη βοήθεια του

⁹ Με 8 κανάλια αφιερωμένα στο σύστημα GPRS, ο φόρτος σε κάθε ένα είναι $44/8 = 5.5$ kbps

εργαλείου OPNET. Στην εργασία αυτή, έχει μελετηθεί η κυκλοφορία μόνο στην ανάστροφη κατεύθυνση.



Σχήμα 28: Καθυστέρηση των πακέτων συναρτήσει του φόρτου εισόδου για την ανάστροφη κατεύθυνση: σύγκριση των δύο μοντέλων κυκλοφορίας



Σχήμα 29: Καθυστέρηση πακέτων συναρτήσει του αριθμού των χρηστών για την ευθεία, την ανάστροφη και την απ' άκρη σ' άκρη μεταφορά πακέτων

Όσον αφορά την απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση που αντιμετωπίζει ο χρήστης telnet από το δίκτυο, από το Σχήμα 29 διαπιστώνουμε ότι μέχρι και για 60 χρήστες διατηρείται σε ανεκτά επίπεδα. Η καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων στην ανάστροφη κατεύθυνση είναι λίγο μεγαλύτερη από την καθυστέρηση στην ευθεία κατεύθυνση, εξαιτίας της διαδικασίας τυχαίας προσπέλασης. Επίσης, η δεύτερη εκτινάσσεται λιγότερο γρήγορα και, για περισσότερους από 80 χρήστες, λαμβάνει τιμές 1-2 δευτερόλεπτα.

Συνοψίζοντας, παρατηρούμε ότι ο ρυθμός παροχής του συστήματος στην ανάστροφη κατεύθυνση εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες ανταγωνισμού που δημιουργούνται στο κανάλι τυχαίας προσπέλασης. Ακόμα και όταν το PRACH είναι αφιερωμένο στη διαδικασία τυχαίας προσπέλασης, η χωρητικότητά του αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για το μέγιστο ρυθμό παροχής του συστήματος. Όταν η κυκλοφορία αποτελείται από πολλά και μικρά πακέτα δεδομένων, όπως είναι στην περίπτωση του telnet, η συχνότητα μπλοκαρίσματος αυξάνει και ο ρυθμός παροχής γρήγορα αρχίζει να μειώνεται. Στις επόμενες παραγράφους, θα μελετήσουμε αναλυτικότερα την απόδοση του συστήματος για διάφορους αλγόριθμους τυχαίας προσπέλασης στο PRACH.

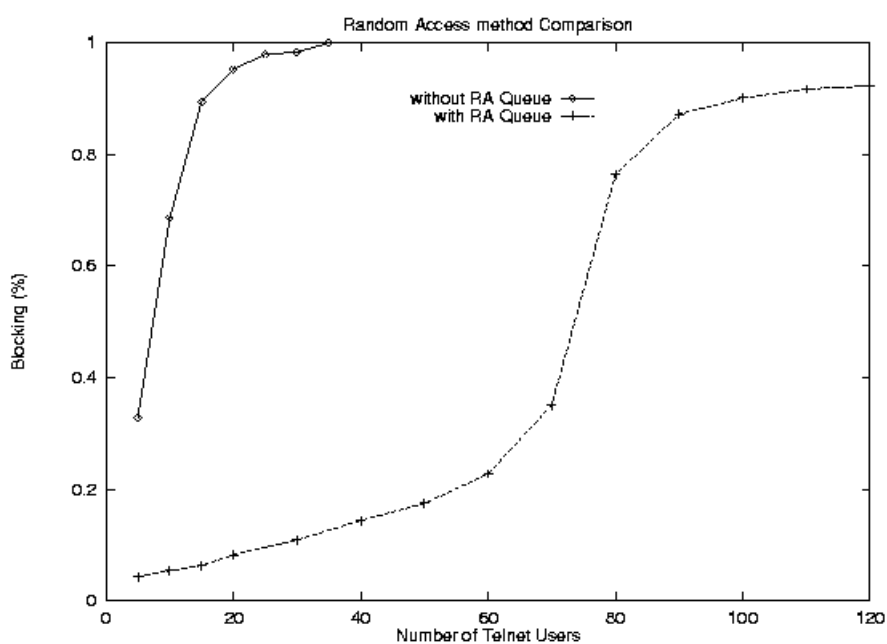
7.2 Ουρά αιτήσεων τυχαίας προσπέλασης (*random access request queue*)

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 4, η κυκλοφορία δεδομένων που δημιουργείται από τις εφαρμογές απομακρυσμένης σύνδεσης (telnet, rlogin) έχει το χαρακτηριστικό ότι αποτελείται από πακέτα πολύ μικρού μεγέθους, τα οποία παράγονται με σχετικά υψηλό ρυθμό (βλ. παράγραφο 4.4). Η ταυτόχρονη άφιξη των αιτήσεων προσπέλασης όλων αυτών των πακέτων, στο PRACH, αυξάνει σημαντικά τον αριθμό των συγκρούσεων, με αποτέλεσμα να πέφτει η απόδοση του συστήματος. Έτσι, η χωρητικότητα του PRACH αποδεικνύεται περιοριστικός παράγοντας για την απόδοση του GPRS κατά την εξυπηρέτηση εφαρμογών telnet και μάλιστα σε πολύ σημαντικό βαθμό, όπως θα δείξουμε στη συνέχεια.

Στην παράγραφο αυτή, συγκρίνουμε δύο δυνατές διαμορφώσεις ενός συστήματος GPRS, στο οποίο έχουν παραχωρηθεί 8 φυσικά κανάλια (χρονοσχισμές) για τη μετάδοση δεδομένων. Στην πρώτη περίπτωση, το ένα από τα κανάλια

λειτουργεί τόσο σαν PRACH όσο και σαν PDCH. Πρόκειται για την τυπική διαμόρφωση του GPRS. Τα πακέτα παρακολουθούν το PRACH και όταν διαπιστώσουν ότι είναι ελεύθερο, προσπαθούν να το προσπελάσουν. Στη δεύτερη περίπτωση, το ένα από τα κανάλια χρησιμοποιείται αποκλειστικά σαν PRACH, ενώ η μετάδοση των πακέτων γίνεται από τα υπόλοιπα 7 κανάλια. Επιπλέον, για τη βελτίωση της απόδοσης του PRACH, λειτουργεί μια *Packet Random Request Queue*, στην οποία τοποθετούνται οι αιτήσεις που έχουν φτάσει σωστά στο BS, αλλά δεν έχουν λάβει ακόμα απάντηση για δέσμευση πόρων. Λεπτομερής περιγραφή της λειτουργίας της ουράς γίνεται στην παράγραφο 6.2.

Στο Σχήμα 30 παρουσιάζεται η σύγκριση των δύο διαμορφώσεων ως προς την πιθανότητα μπλοκαρίσματος στο PRACH, ανάλογα με τον αριθμό των εφαρμογών telnet. Υποθέτουμε ότι η ουρά έχει άπειρη χωρητικότητα.



Σχήμα 30: Random Access Request Queue: Σύγκριση ως προς την πιθανότητα μπλοκαρίσματος

Όπως είναι προφανές, η λειτουργία της RARQ βελτιώνει εντυπωσιακά την απόδοση του συστήματος. Παρ' ότι αφαιρεί ένα κανάλι από τα διαθέσιμα PDCH, επιτρέπει σε περισσότερες από 60 εφαρμογές να τρέξουν ταυτόχρονα χωρίς

σημαντικά προβλήματα. Αντίθετα, χωρίς την RARQ, η χωρητικότητα του PRACH περιορίζει τον αριθμό των εφαρμογών στο 1/10 περίπου.

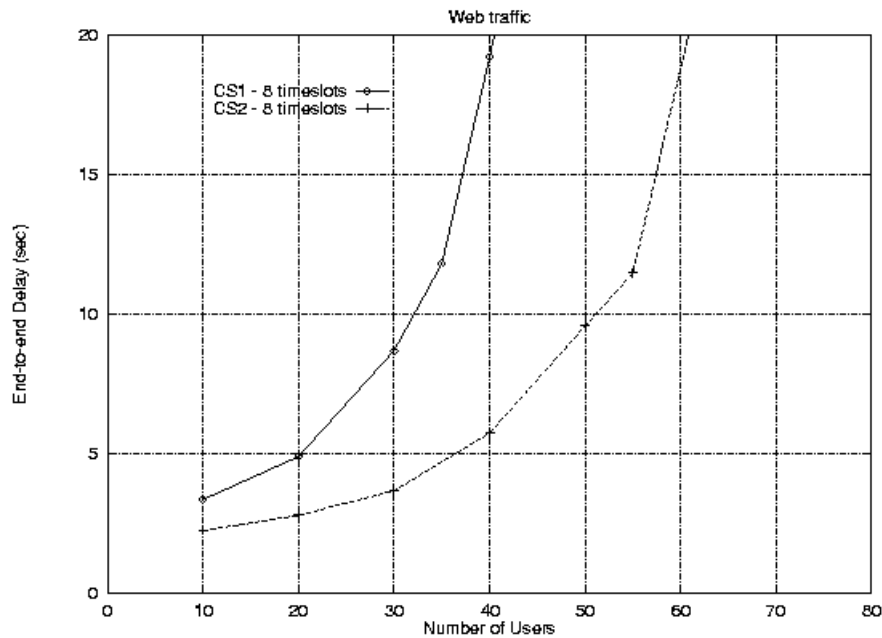
7.3 Ανάλυση της καθυστέρησης για εφαρμογές *web browsing*

Η κυκλοφορία που παράγεται από τις εφαρμογές πλοήγησης στον παγκόσμιο ιστό έχει το χαρακτηριστικό της μεγάλης ασυμμετρίας. Υποθέτοντας ότι τα τερματικά GPRS χρησιμοποιούνται μόνο σαν web clients, ο όγκος των δεδομένων που μεταφέρονται στην κατεύθυνση BS → MS είναι κατά δεκάδες και εκατοντάδες φορές μεγαλύτερος από τον όγκο των δεδομένων που μεταφέρονται στην αντίστροφη κατεύθυνση. Στην κατεύθυνση MS → BS στέλνονται πακέτα που περιέχουν διευθύνσεις τύπου URL, ενώ στην κατεύθυνση BS → MS στέλνονται οι σελίδες που αντιστοιχούν στα παραπάνω URLs. Επιπλέον, στην κυκλοφορία WWW, ο ρυθμός αφίξεως των πακέτων, που επιχειρούν τυχαία προσπέλαση, είναι χαμηλός, καθώς επηρεάζεται άμεσα από το χρόνο μεταφοράς των σελίδων στην ευθεία κατεύθυνση. Έτσι, η πιθανότητα μπλοκαρίσματος είναι πολύ μικρή και το κανάλι τυχαίας προσπέλασης δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την επίδοση του συστήματος. Επίσης, ο ρυθμός παροχής στην αντίστροφη κατεύθυνση παραμένει χαμηλός σε σχέση με την ευθεία κατεύθυνση. Έτσι, μοναδικός περιοριστικός παράγοντας, για κυκλοφορία δεδομένων αμιγώς παραγόμενη από web browsers, είναι το εύρος ζώνης της ευθείας σύνδεσης.

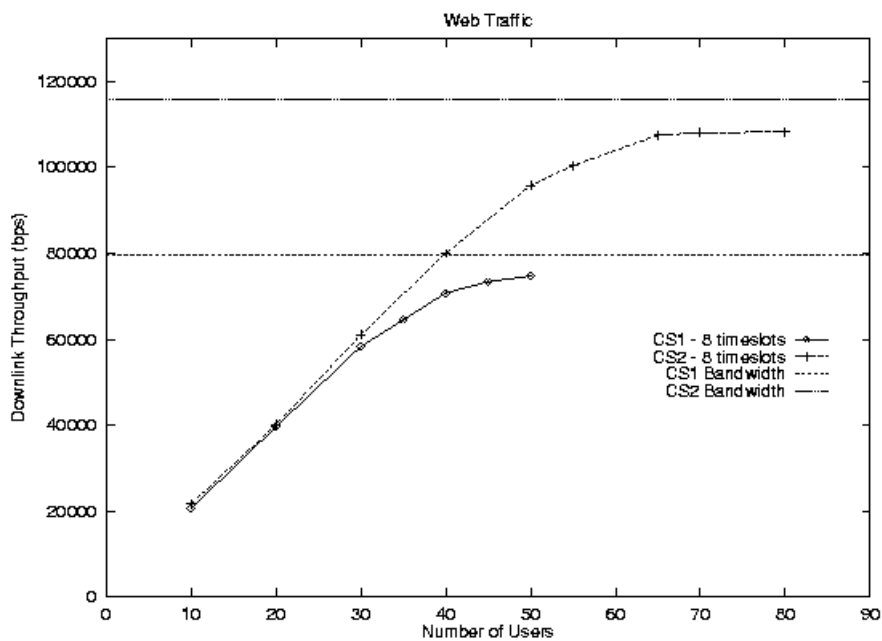
Για να αξιολογήσουμε την απόδοση του συστήματος χρησιμοποιούμε ως δείκτη την καθυστέρηση από άκρη σ' άκρη, δηλαδή το άθροισμα του χρόνου που κάνει η αίτηση της σελίδας να φτάσει στο BS, του χρόνου αναμονής στην ουρά μέχρι να αρχίσει η μετάδοσή και του χρόνου μετάδοσης της σελίδας. Ας υποθέσουμε ότι μια μέση καθυστέρηση της τάξης των 10 δευτερολέπτων είναι λογική για μια εφαρμογή web browsing. Τόση είναι η αναμενόμενη καθυστέρηση όταν δύο συνδέσεις μεταγωγής κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται γι' αυτήν την εφαρμογή [ABVP98].

Στο Σχήμα 31 φαίνεται η μέση καθυστέρηση που αντιμετωπίζει ένας χρήστης κατά το «κατέβασμα» μιας σελίδας, συναρτήσει του αριθμού των χρηστών σε ένα BS με 8 φυσικά κανάλια αφιερωμένα στο GPRS. Όπως διαπιστώνεται, ένα φέρον αφιερωμένο στο GPRS μπορεί να υποστηρίξει μέχρι και 30 web browsers όταν ο

ρυθμός κωδικοποίησης είναι CS1 (9.05 kbps ανά TCH). Όπως φαίνεται ακόμα από το Σχήμα 31, ένα φέρον GPRS μπορεί να υποστηρίξει μέχρι και 50 web browsers όταν ο ρυθμός κωδικοποίησης είναι CS2 (13.4 kbps ανά TCH).



Σχήμα 31: Από άκρη σ' άκρη καθυστέρηση συναρτήσεως του αριθμού των χρηστών για τις κωδικοποιήσεις CS1 και CS2 σε BS με 8 PDCHs.



Σχήμα 32: Ρυθμός παροχής στην ευθεία κατεύθυνση συναρτήσεως του αριθμού των χρηστών για τις κωδικοποιήσεις CS1 και CS2 με 8 PDCHs.

Στο Σχήμα 32 φαίνεται ο ρυθμός παροχής του συστήματος στην ευθεία κατεύθυνση για την κυκλοφορία web και η σύγκρισή του με το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου. Παρατηρούμε, ότι η εκμετάλλευση των πόρων φτάνει σε υψηλά ποσοστά (75 kbps – 93% του διαθέσιμου εύρους ζώνης).

7.4 Μικτή κυκλοφορία telnet και WWW

Είναι προφανές ότι η κυκλοφορία δεδομένων στο GPRS δεν θα προέρχεται από μία μόνο εφαρμογή καθώς οι δυνατές χρήσεις του συστήματος είναι πάρα πολλές. Για το λόγο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των πειραμάτων προσομοίωσης που έγιναν για μικτή κυκλοφορία. Η κυκλοφορία στα πειράματα αυτά δημιουργήθηκε από χρήστες telnet και web. Επειδή, στην παρούσα εργασία, σκοπός μας είναι να υπολογίσουμε τον αριθμό των πραγματικών χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα, στο φόρτο εισόδου δε συμπεριελήφθη κυκλοφορία που ακολουθεί το μοντέλο railway, γιατί σ' αυτή δεν είναι γνωστό πόσο φόρτο παράγει ο κάθε χρήστης.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν με τον προσομοιωτή για τη μικτή κυκλοφορία εισόδου. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην καθυστέρηση που αντιμετωπίζουν οι χρήστες κάθε εφαρμογής ανάλογα με το φόρτο του συστήματος και τον αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης πακέτων. Η καθυστέρηση στα πακέτα μιας εφαρμογής επηρεάζεται τόσο από τον συνολικό αριθμό των χρηστών όσο και από τη σύνθεση της μικτής κυκλοφορίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι εύκολο να γίνει πρόβλεψη για το ποσοστό των χρηστών του GPRS που θα χρησιμοποιεί κάθε μία από τις δύο εφαρμογές. Γι' αυτό η απόδοση του συστήματος εξετάστηκε για διάφορα ποσοστά χρηστών.

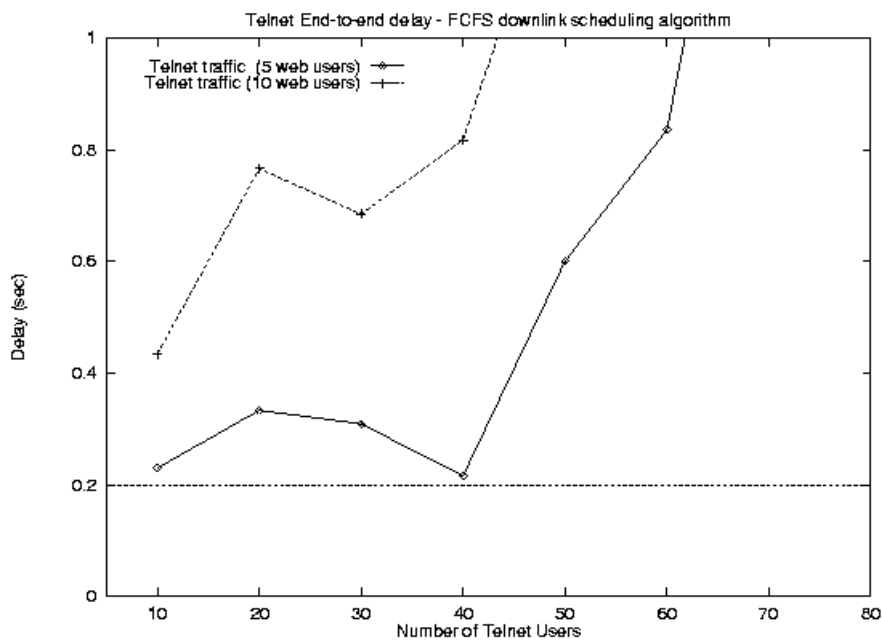
Στις μετρήσεις που ακολουθούν εξετάστηκε η απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση. Υποθέτουμε ότι χρησιμοποιούνται 7 PDCHs και 1 αφιερωμένο PRACH, λειτουργεί η RARQ, λάθη κατά την μετάδοση γίνονται και στις δύο κατευθύνσεις της κυκλοφορίας και η κωδικοποίηση είναι $\frac{1}{2}$.

Οι δύο κυκλοφορίες που πολυπλέκονται για τη δημιουργία της μικτής κυκλοφορίας έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η κυκλοφορία telnet αποτελείται από πολλά μικρά πακέτα και προς τις δύο κατευθύνσεις, ενώ η κυκλοφορία web από

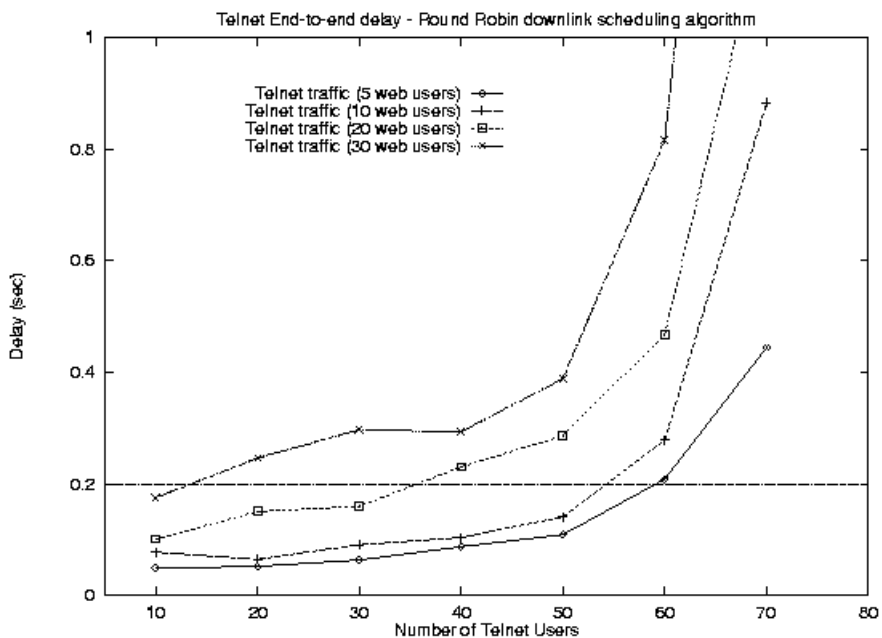
μεγάλα πακέτα στην ευθεία και μικρά πακέτα στην ανάστροφη κατεύθυνση. Όσον αφορά την ανάστροφη κατεύθυνση, η κυκλοφορία web δεν περιορίζεται από τη χωρητικότητα του PRACH, όμως η ύπαρξη της κυκλοφορίας telnet είναι δυνατόν να προκαλέσει συμφόρηση στο κανάλι τυχαίας προσπέλασης.

Όσον αφορά την ευθεία κατεύθυνση, τα πακέτα που περιμένουν να μεταδοθούν έχουν διαφορές στο μέγεθος, τον ρυθμό αφίξεως και ανήκουν σε εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις. Η εφαρμογή telnet είναι διαλογική, κατά συνέπεια, τα πακέτα της πρέπει να εξυπηρετούνται κατά προτεραιότητα. Εάν η εξυπηρέτηση των πακέτων γίνεται κατά σειρά αφίξεως, όταν αρχίσει να μεταδίδεται μία σελίδα HTML, τα πακέτα telnet που ακολουθούν θα συναντούν μεγάλη καθυστέρηση. Έτσι, η εξυπηρέτηση FCFS δεν είναι καθόλου αποδοτική γιατί δεν λαμβάνει υπόψη την προτεραιότητα των πακέτων. Από την άλλη, η προτεραιότητα των μικρών πακέτων δεν πρέπει να είναι απόλυτη, γιατί εξαιτίας του μεγάλου ρυθμού άφιξης τους, είναι δυνατόν να εμφανιστεί το φαινόμενο της «στέρησης» στα μεγάλα πακέτα (δηλαδή να μην εξυπηρετούνται ποτέ). Απ' όλα αυτά γίνεται φανερό, ότι απαιτείται ένας «έξυπνος» αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης πακέτων στην ευθεία κατεύθυνση. Στα πειράματα προσομοίωσης που έγιναν στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μία παραλλαγή του αλγόριθμου κυκλικής εξυπηρέτησης, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 6.5.4. Ο αλγόριθμος αυτός δεν είναι ίσως βέλτιστος για το είδος της κυκλοφορίας εισόδου, επιτυγχάνει όμως σημαντική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος σε σχέση με τον αλγόριθμο FCFS, όπως φαίνεται στα σχήματα που ακολουθούν.

Στα Σχήματα 33 και 34 φαίνεται η απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση που αντιμετωπίζουν οι χρήστες telnet ανάλογα με τον αριθμό τους και για διάφορες τιμές του πλήθους των χρηστών web. Στο Σχήμα 33, ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης είναι FCFS, ενώ στο Σχήμα 34 κυκλικής εξυπηρέτησης. Παρατηρούμε ότι, στο Σχήμα 34, η βελτίωση στην κυκλοφορία telnet είναι εντυπωσιακή. Παρατηρούμε ακόμα, ότι η καθυστέρηση αυξάνει ελαφρώς ανάλογα με το πλήθος των χρηστών web. Όταν υπάρχουν 10 χρήστες web στο σύστημα, τότε μέχρι και 50 χρήστες telnet μπορούν να εξυπηρετηθούν ικανοποιητικά. Όταν οι χρήστες web γίνουν 20, οι εξυπηρετούμενοι χρήστες telnet μειώνονται στους 30.

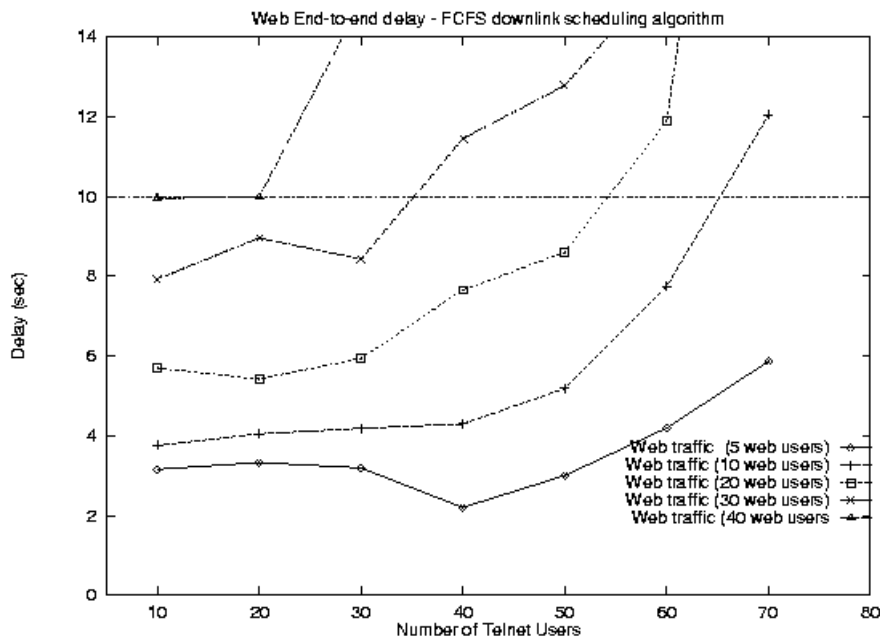


Σχήμα 33: Απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση των πακέτων telnet ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών web και για αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης FCFS. Υποθέτουμε ότι μια καθυστέρηση της τάξης των 200 ms είναι ανεκτή.

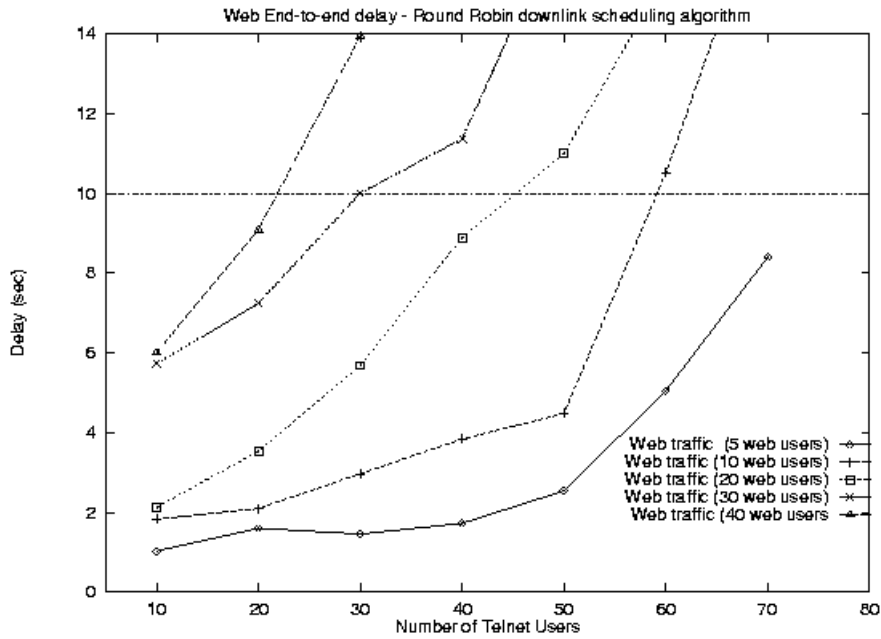


Σχήμα 34: Απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση των πακέτων telnet ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών web και για αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης Round Robin.

Με όμοιο τρόπο, στα Σχήματα 35 και 36 φαίνεται η απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση που αντιμετωπίζουν οι χρήστες web ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών telnet και για διάφορες τιμές του πλήθους των χρηστών web. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρατήρηση ότι ο αλγόριθμος κυκλικής εξυπηρέτησης μειώνει την καθυστέρηση των σελίδων HTML για χαμηλές τιμές του αριθμού των χρηστών telnet. Ωστόσο, για πολλούς χρήστες telnet, η καθυστέρηση των σελίδων αυξάνεται γρηγορότερα σε μή ανεκτά επίπεδα. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο πλήθος των μικρών πακέτων, τα οποία εξυπηρετούνται κατά προτεραιότητα, με αποτέλεσμα οι μεγάλες σελίδες να καθυστερούν.

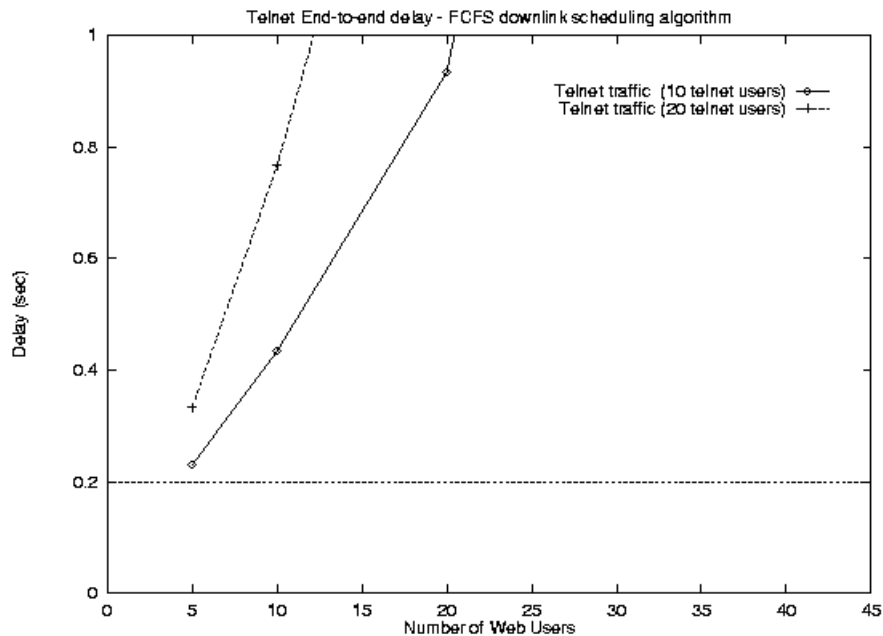


Σχήμα 35: Απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση των σελίδων web ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών web και για αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης FCFS



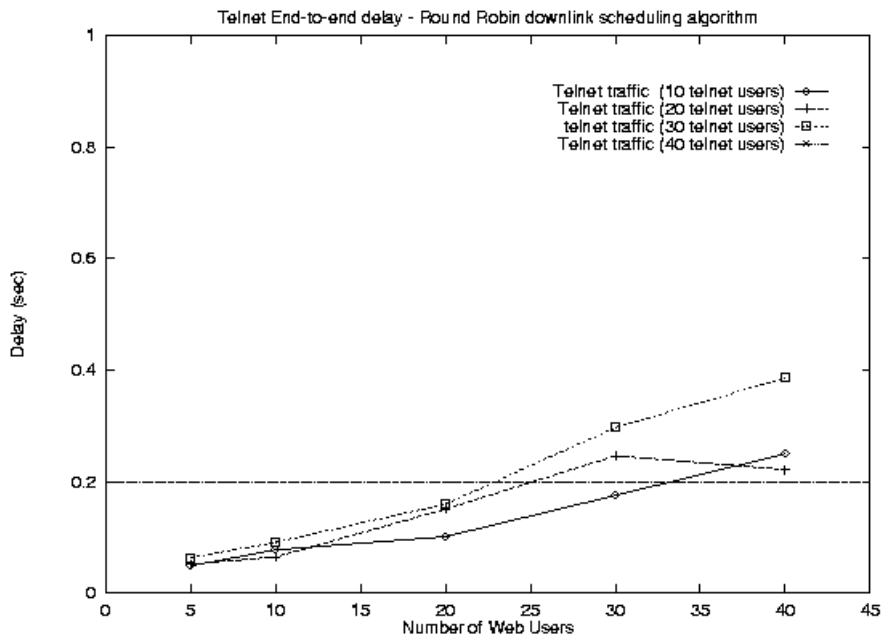
Σχήμα 36: Απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση των σελίδων web ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών web και για αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης Round Robin

Στα επόμενα Σχήματα 37 έως 40, τα διαγράμματα απεικονίζουν την καθυστέρηση συναρτήσει του αριθμού των χρηστών telnet.



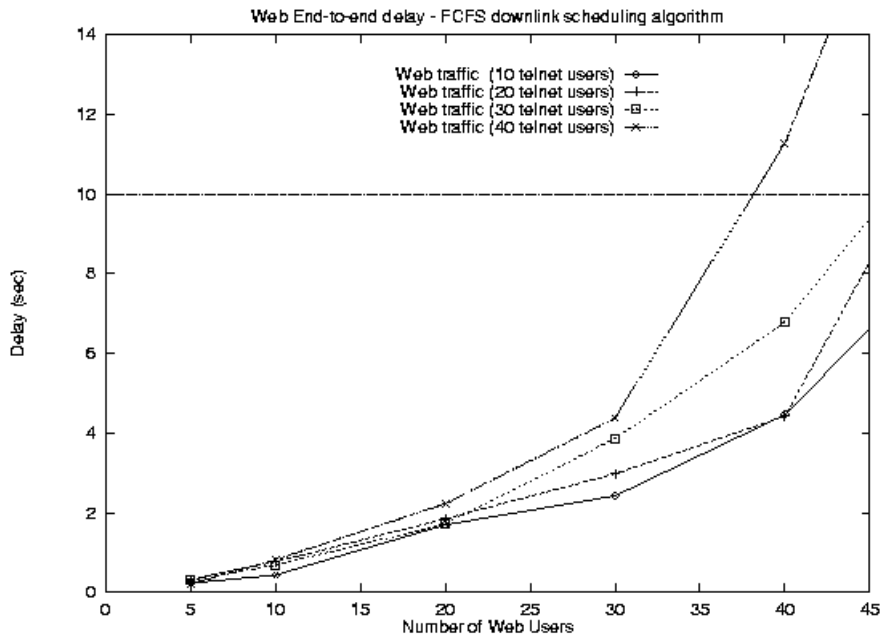
Σχήμα 37: Απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση των πακέτων telnet ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών telnet και για αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης FCFS.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 37 και 38, παρατηρούμε, ότι, με τον αλγόριθμο κυκλικής εξυπηρέτησης, η κυκλοφορία telnet γίνεται πολύ πιο ανθεκτική στην αύξηση του χρηστών web. Διατηρείται σε ανεκτά επίπεδα ακόμα και για 30 χρήστες web.

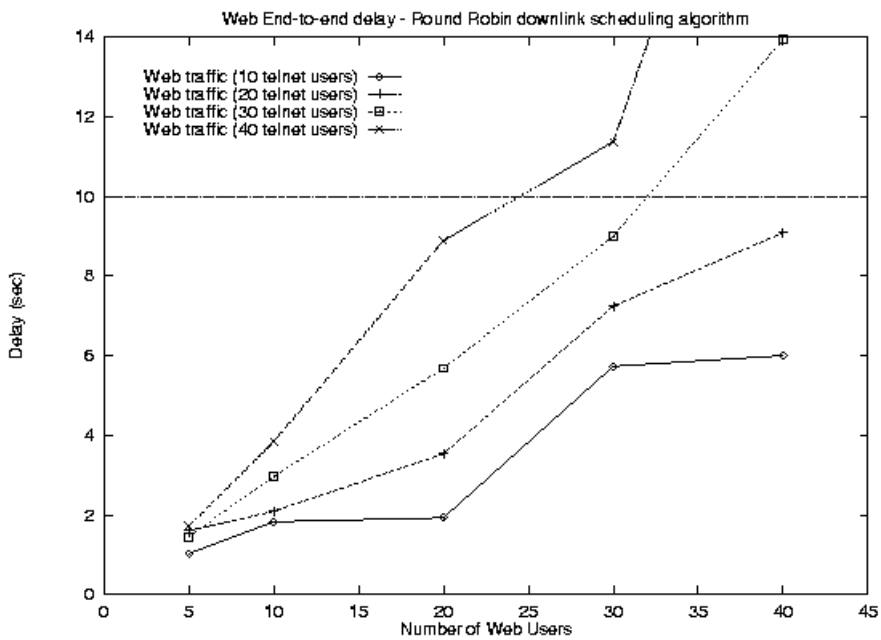


Σχήμα 38: Απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση των πακέτων telnet ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών telnet και για αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης Round Robin.

Τέλος, στα Σχήματα 39 και 40 φαίνεται η καθυστέρηση των σελίδων HTML συναρτήσει του αριθμού των χρηστών web, για διάφορες τιμές του πλήθους των χρηστών telnet. Ο αλγόριθμος κυκλικής εξυπηρέτησης αυξάνει την καθυστέρηση των σελίδων και την κάνει ευαίσθητη στην αύξηση του αριθμού των χρηστών telnet.



Σχήμα 39: Απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση των σελίδων web ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών telnet και για αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης FCFS

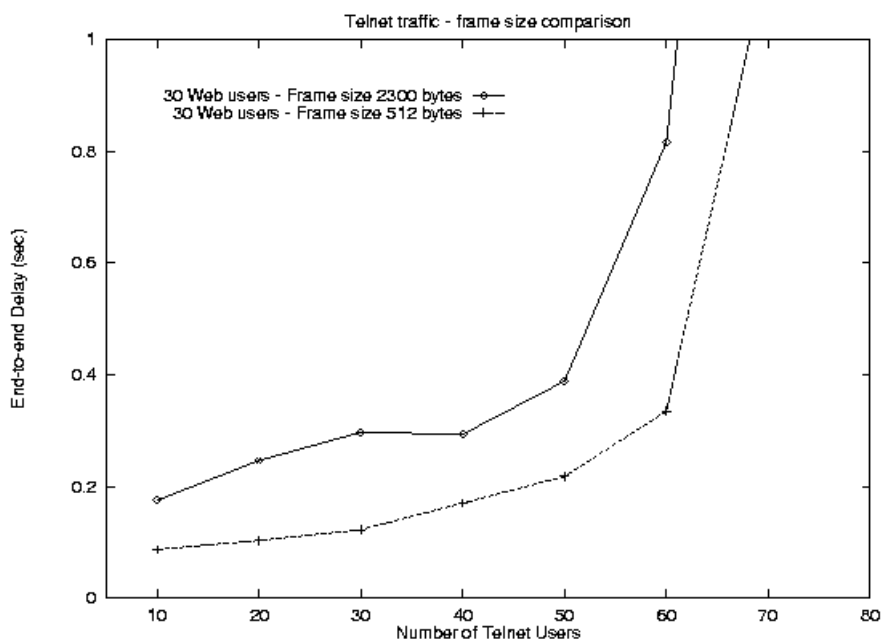


Σχήμα 40: Απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση των σελίδων web ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών telnet και για αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης Round Robin

7.5 Επίδραση του μεγέθους των πλαισίων LLC

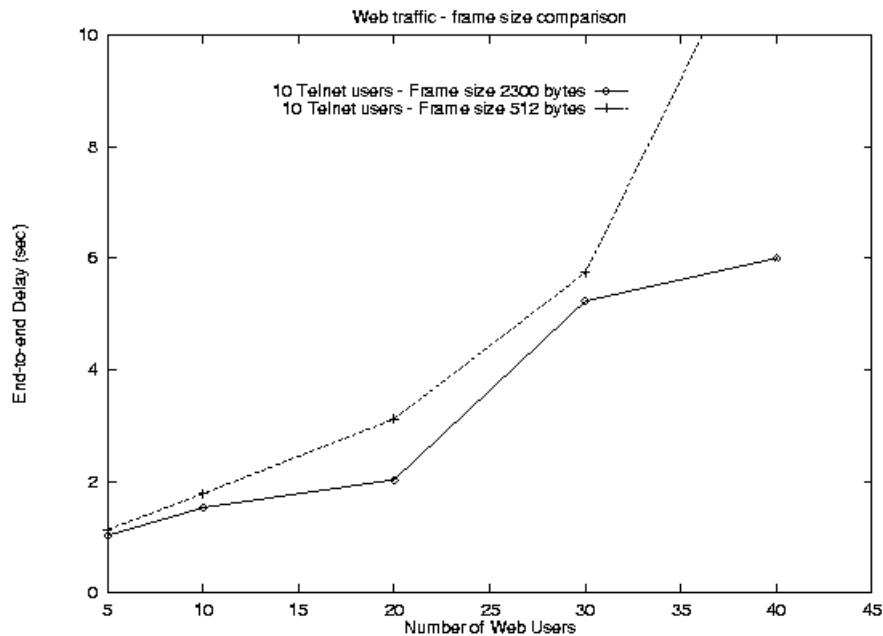
Με τη βοήθεια του προσομοιωτή είμαστε σε θέση να παρατηρούμε και να αναλύουμε την επίδραση, στην απόδοση του συστήματος, που παρουσιάζουν ορισμένες από τις σταθερές του και ενδεχομένως, να υπολογίζουμε τη βέλτιστη τιμή τους. Στην παράγραφο αυτή, δίνουμε ένα παράδειγμα ανάλυσης μιας τέτοιας σταθεράς. Πρόκειται για το μέγεθος του πλαισίου LLC, δηλαδή το πλήθος των blocks ενός μεγάλου πακέτου που μεταδίδονται συνεχόμενα από τον αλγόριθμο κυκλικής εξυπηρέτησης, πριν χρονοδρομολογηθεί το επόμενο πακέτο.

Από τις μετρήσεις της προηγούμενης παραγράφου έγινε φανερό, ότι ο αλγόριθμος κυκλικής εξυπηρέτησης βελτιώνει το σύστημα. Το Σχήμα 41 δείχνει την απ' άκρη σ' άκρη καθυστέρηση των πακέτων telnet, όταν υπάρχουν στο σύστημα 30 χρήστες web, για δύο τιμές του πλαισίου LLC. Όπως ήταν αναμενόμενο, για μικρότερες τιμές του μεγέθους του πλαισίου, η καθυστέρηση μειώνεται, διότι τα μικρά πακέτων του telnet, παίρνουν σειρά για μετάδοση σε πιο σύντομο διάστημα.



Σχήμα 41: Καθυστέρηση των πακέτων telnet όταν υπάρχουν 30 χρήστες web, για δύο τιμές του μεγέθους του LLC frame

Αντίθετα, από το Σχήμα 42 παρατηρούμε ότι η επίδραση του μεγέθους του LLC frame είναι μικρότερη στην κυκλοφορία web. Για μεγαλύτερες τιμές, η καθυστέρηση είναι λίγο μικρότερη, διότι οι σελίδες HTML «χωράνε» σε λιγότερα πλαίσια.



Σχήμα 42: Καθυστέρηση των σελίδων HTML, όταν υπάρχουν 10 χρήστες telnet, για δύο τιμές του μεγέθους του LLC frame

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να μελετήσουμε την επίδραση οποιασδήποτε μεταβλητής ή παραμέτρου του συστήματος και να αποφασίσουμε ποιές είναι οι καλύτερες τιμές τους ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του δικτύου (πλήθος χρηστών, είδος κυκλοφορίας, κ.λ.π).

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα – Μελλοντικές κατευθύνσεις

8.1 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάσαμε τις βασικές αρχές του συστήματος GPRS και αξιολογήσαμε την απόδοση του πρωτοκόλλου διεπιφάνειας αέρα, βασιζόμενοι στις μετρήσεις που έγιναν με προσομοίωση των λειτουργιών του. Το GPRS θ' αναβαθμίσει τα κυψελοειδή δίκτυα GSM με τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων τύπου μεταγωγής πακέτων. Θα χρησιμοποιεί τα φυσικά κανάλια του GSM, είτε δυναμικά (επιλέγοντας από τα ανενεργά κανάλια), είτε στατικά (ένας αριθμός καναλιών θα εκχωρείται στη μεταφορά δεδομένων).

Στην εργασία αυτή δείξαμε, κατ' αρχήν, ότι σ' ένα τυπικό GSM BS, ένα σημαντικό ποσοστό των διαθέσιμων καναλιών μένει αχρησιμοποίητο για ικανά χρονικά διαστήματα. Συνεπώς, η εγκατάσταση ενός συστήματος μεταφοράς δεδομένων, όπως το GPRS, είναι δυνατή.

Παρουσιάσαμε, ακόμα, τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις του συστήματος για διάφορες τιμές των παραμέτρων του και διαφορετικά είδη κυκλοφορίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην κυκλοφορία που δημιουργούν δύο από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές του Internet, το telnet και το web browsing. Δείξαμε ότι, εξαιτίας της εκρηκτικής φύσης της κυκλοφορίας του Internet, η μετάδοση δεδομένων τύπου μεταγωγής πακέτων εκμεταλλεύεται καλύτερα τα διαθέσιμα κανάλια του δικτύου και αυξάνει σημαντικά τον αριθμό των τελικών χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα, σε σχέση με τη μετάδοση δεδομένων μεταγωγής κυκλωμάτων.

Επίσης, δείξαμε, ότι είναι απαραίτητη η ύπαρξη αφιερωμένου καναλιού PRACH για την αποφυγή της συμφόρησης στο κανάλι τυχαίας προσπέλασης. Η ύπαρξη ουράς αιτήσεων τυχαίας προσπέλασης βελτιώνει πολύ σημαντικά την απόδοση του συστήματος για την κυκλοφορία telnet. Γενικά, παρατηρήσαμε ότι το πρωτόκολλο GPRS που μελετήθηκε δεν είναι αποδοτικό κατά τη μετάδοση μικρών ποσοτήτων πληροφορίας. Ένα μεγάλο μέρος των διαθέσιμων πόρων ξοδεύεται σε

σηματοδοσία όταν η κυκλοφορία επικρατείται από μικρά πακέτα. Σήμερα, γίνεται προσπάθεια από την ETSI να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα.

8.2 Βελτιώσεις του προσομοιωτή και μελλοντικές κατευθύνσεις της έρευνας

Η εργασία αυτή μπορεί να επεκταθεί σε μεγάλο βαθμό τόσο στην αναβάθμιση του προσομοιωτή όσο και στην περαιτέρω ανάλυση του συστήματος GPRS. Ο προσομοιωτής έχει περιθώρια βελτίωσης στην ευελιξία, την ταχύτητα και τη διεπιφάνεια χρήστη. Η προσομοίωση της διαδικασίας τυχαίας προσπέλασης δεν έχει γίνει ακριβώς όπως περιγράφουν οι προδιαγραφές του GPRS, αλλά με απλουστευμένο τρόπο. Η RARQ μπορεί να λειτουργήσει και σε μη αφιερωμένο PRACH, αν οι χρονοσχισμές οργανωθούν χρονικά έτσι ώστε τα τερματικά να γνωρίζουν πότε πρέπει να επιχειρήσουν προσπέλαση και πότε να στείλουν δεδομένα. Τέλος, καθώς η προτυποποίηση του GPRS βρίσκεται σε εξέλιξη, τυχόν αλλαγές μέχρι την τελική έκδοση μπορούν να ενσωματωθούν στον προσομοιωτή.

Όσον αφορά την ανάλυση της επίδοσης του συστήματος μέσα από τα πειράματα προσομοίωσης, οι επεκτάσεις που μπορούν να γίνουν είναι πολλές. Νέα, περισσότερο επιτυχημένα μοντέλα κυκλοφορίας μπορούν να εξετασθούν, ιδιαίτερα μετά την έναρξη της λειτουργίας του συστήματος, όταν η κυκλοφορία εισόδου προσδιοριστεί ακριβέστερα. Επίσης μπορεί να αναλυθεί η επίδραση των υπολοίπων παραμέτρων του συστήματος, όπως, για παράδειγμα, ο αριθμός των PDCHs, ο ρυθμός και η κατανομή των λαθών κατά τη μετάδοση, η καθυστέρηση κατά την ανταλλαγή μηνυμάτων κ.α. Άλλοι αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης των πλαισίων στην ευθεία κατεύθυνση μπορούν να προσομοιωθούν ώστε να επιλεγεί ο καλύτερος. Επίσης, χρήσιμο θα ήταν να μελετηθούν εναλλακτικές αρχιτεκτονικές για το σύστημα όπως, για παράδειγμα, η μετάδοση και της φωνής σε πακέτα, έτσι ώστε να εκμεταλλευτούμε τα διαστήματα σιγής κατά τη συνομιλία δύο συνδρομητών.

Βιβλιογραφία

- [ABVP98] Y. Argyropoulos, A. Bigloo, J. Van Peurseem, “GPRS Delay and Capacity Analysis for Web Browsing Application”, International Conference on Telecommunications, Chalkidiki, Greece, June 1998.
- [Bud97] K. Budka, “Cellular Digital Packet Data: Channel Availability”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol 46, no 1, pp 31-40, February 1997.
- [CBC95] C. Cunha, A. Bestavros, M. Crovella, “Characteristics of WWW Client-based Traces”, BU-CS-95-010, July 1995.
- [CG97] J. Cai, D. Goodman, “General Packet Radio Service in GSM”, *IEEE Communications Magazine*, vol 35, no 10, pp 122-131, October 1997.
- [CW96] S. S. Chakraborty, S. Wager, “The Inhibit Sense Multiple Access with Polling (ISMA/P): A MAC-RLP combined Procedure for Packet Mode Data Over Non-Interleaved Channel for GSM-GPRS Services”, IEEE Vehicular Technology Conference, April 29 - May 2, 1996, Atlanta, USA.
- [DBA98] C.F. Diez, A.E. Brand, A.H. Aghvami, “Prioritised Random Access for GPRS with Pseudo Bayesian Broadcast Control, Exponential Backoff and Stack Based Schemes”, International Conference on Telecommunications, Chalkidiki, Greece, June 1998.
- [DJ91] P. Danzig, S. Jamin, “tcplib: A Library of TCP Internetwork Traffic Characteristics”, Computer Science Dep., University of Southern California, USC-CS-91-495¹⁰.
- [DJCME91] P. Danzig, S. Jamin, R. Caceres, D Mitzel, D. Estrin, “An Empirical Workload Model for Driving Wide-Area TCP/IP Network Simulations”, 1991.

¹⁰ Η βιβλιοθήκη είναι διαθέσιμη με ανώνυμο FTP από το *jerico.usc.edu* (128.125.51.6) στον υποκατάλογο *~FTP/pub/jamin/tcplib*.

- [ETSI3.60] ETSI, “*GSM 03.60 General Packet Radio Service: Service Description, Stage 2*”, version 5.2.0 edition, December 1997.
- [FM94] V.S. Frost, B. Melamed, “Traffic Modeling for Telecommunications Networks”, *IEEE Communications Magazine*, pp 70-81, March 1994.
- [GPRS1]¹¹ GPRS Ad-Hoc ETSI/STC SMG2. “Evaluation Criteria for the GPRS Radio Channel”. Technical report, ETSI, Feb 1996.
- [GPRS2] GPRS Ad-Hoc ETSI/STC SMG2. “Simulation of Multislot MAC Layer Operation GPRS (2)”. Technical report, ETSI, Feb 1996.
- [GW96] V. Garg, J. Wilkes, “*Wireless and Personal Communications Systems*”, Prentice Hall, 1st edition, 1996.
- [Ham96] J. Hamalainen, “Design of GSM High Speed Data Services”, phd thesis, Nokia Mobile Phones Ltd, Tampere, Finland, August, 1996.
- [HHHJ94] Z.C. Honkasalo, H. Honkasalo, J. Hämäläinen, H. Jokinen, “GSM/DCS Air Interface Enhancements for High Speed Data Applications”, Third Annual International Conference on Universal Personal Communications, pp. 480-484, San Diego, September 27 - October 1, 1994.
- [HJHF95] J. Hämäläinen, H. Jokinen, Z.C. Honkasalo, R. Fehlmann, “Multi-slot Packet Radio Air Interface to TDMA systems – Variable Rate Reservation Access (VRMA)”, The sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, vol 1, pp. 366-371, September 27-29, 1995.
- [LTWW94] W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger, and D. Wilson, “On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 2, no 1, pp. 1-15, February 1994.
- [LT97] L. Reiner, D. Turina, “Link Layer Analysis of the General Packet Radio Service for GSM”, 1997 IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications”, 12-16 October 1997, San Diego.

¹¹ Η αναφορά αυτή δεν μας ήταν διαθέσιμη. Εδώ παρατίθεται για λόγους πληρότητας.

- [MP95] M. Mouly, M. Pautet, “Current Evolution of the GSM Systems”, *IEEE Personal Communications*, vol. 2, no. 5, pp. 9-19, October 1995.
- [Nokia96] “Short Message Service of GSM Networks”, Nokia WWW page, August 1996.¹²
- [PF94] V. Paxson, S. Floyd, “Wide-area traffic: The failure of poisson modeling”, *Proceedings of SIGCOMM '94*, 1994.
- [Rap96] Theodore S. Rappaport, “*Wireless Communications: principles and practice*”, Prentice Hall, 1st edition, 1996.
- [RWO95] S. Redl, M. Weber, M. Oliphant, “*An Introduction to GSM*”, Artech House, 1st edition, 1995.
- [WHHJ95] L. Wang, Z. C. Honkasalo, J. Hämäläinen H. Jokinen, “A Physical Layer Proposal for Multi-slot Packet Radio Services in the Existing TDMA Cellular Systems”, The sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, vol. 2, pp. 876-886, September 27-29, 1995.

¹² Διαθέσιμο on-line: <http://www.forum.nokia.com/nf/magazine/papers/gsmsms.html>