



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΝΑΥΠΑΚΤΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

" Μαθηματική μοντελοποίηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης
σε ένα κύτταρο GSM με την χρήση statistical counters
τεχνολογίας Ericsson "

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΠΑΝΑΓΑΚΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΛΟΥΒΡΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΝΑΥΠΑΚΤΟΣ 2011

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Ναύπακτος, .../.../2011

ΕΠΙΤΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Λούβρος Σπύρος
2.
3.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σαν στόχο την μαθηματική μοντελοποίηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε ένα κύτταρο GSM με την χρήση statistical counters τεχνολογίας Ericsson.

Μελετάτε το δίκτυο GSM και αναλύονται τα επιμέρους στοιχεία του δικτύου. Έπειτα γίνεται μια εισαγωγή στα κυψελωτά συστήματα κινητής τηλεφωνία. Συγκεκριμένα, αναλύεται η κυψελωτή ιδέα, η οποία ουσιαστικά έθεσε τις βάσεις για την μεγάλη εμπορική επιτυχία που γνωρίζει στις μέρες μας η κινητή τηλεφωνία. Στη συνέχεια εξετάζονται οι εφαρμογές της θεωρίας ουρών στην ανάλυση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, με ιδιαίτερη έμφαση στο δίκτυο GSM. Η συγκεκριμένη εργασία αποτελείται από τρία κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο αποκλειστικά στο παγκόσμιο σύστημα κινητής τηλεφωνίας G.S.M. Ως γνωστόν, το G.S.M είναι το πιο διαδεδομένο σύστημα κινητών επικοινωνιών και ως εκ τούτου μία εργασία που αναφέρεται σε συστήματα κινητής τηλεφωνίας έχει ως σημείο αναφοράς το G.S.M.

Το δεύτερο κεφάλαιο έχει τίτλο “εισαγωγή στα κυψελωτά συστήματα κινητής τηλεφωνίας” και αποτελεί ουσιαστικά μια εισαγωγή στις βασικές αρχές της κινητής κυψελωτής τηλεφωνίας. Η εισαγωγή αυτή είναι απαραίτητη προκειμένου να γίνει ομαλά η μετάβαση σε σύνθετες έννοιες που διέπουν την λειτουργία των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελείται από τις εφαρμογές της θεωρίας ουρών στην ανάλυση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, με ιδιαίτερη έμφαση στο δίκτυο GSM, η σχεδίαση του οποίου είναι αναγκαίο να γίνεται με τρόπο ώστε να επιτρέπεται η σωστή και βέλτιστη διαχείριση των πόρων του συστήματος και ταυτόχρονα η υψηλού επιπέδου παροχή υπηρεσιών για τους συνδρομητές. Τελειώνοντας παρουσιάζονται και αναλύονται μαθηματικοί τύποι σε συνδυασμό με μετρητές Ericsson βάσει μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σταθμό κινητής τηλεφωνίας της εταιρίας Cosmote.

Abstract

This project aims at the mathematical modeling of traffic flows in a GSM cell using statistical counters Ericsson technology.

Studying the GSM network and the elements of the network will be analyzed . Then becoming an introduction to cellular mobile phones. Specifically, the cellular concept will be analyzed, which essentially laid the foundations for a great commercial success known nowadays the mobile telephony. After consider the applications of queuing theory to the analysis of telecommunications traffic, with particular emphasis on GSM network. This work consists of three chapters.

The first chapter is devoted exclusively to the global system for mobile GSM. As you know, GSM is the most prevalent mobile communications system and therefore a work that refers to mobile telephone systems is a benchmark GSM.

The second chapter is entitled "Introduction to cellular mobile telephone systems" and is basically an introduction to the basic principles of mobile cellular telephony. The introduction is necessary in order to smooth the transition to advanced concepts governing the operation of mobile telephony systems.

The third chapter consists of the applications of queuing theory to the analysis of telecommunications traffic, specifically on GSM network, the design of which is necessary in a manner to allow proper and optimal management of system resources while the high level delivery of services for subscribers. Finally, formulas in conjunction with Ericsson counters are presented and analyzed based on measurements made at mobile station company of Cosmote.

Ευχαριστίες

Τελειώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στα άτομα που με την πολύτιμη βοήθειά τους έκαναν δυνατή την εκπόνησή της.

Κατ' αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Σπύρο Λούβρο για την επίβλεψη της εργασίας, τις πολύτιμες συμβουλές του και την συμπαράστασή του ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία αλλά και για τη δυνατότητα που μου παρείχε ν' ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους του ΝΜC της Cosmote για την πολύτιμη βοήθεια τους καθώς επίσης τους φίλους μου για την συμπαράστασή τους. Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου που χωρίς την ψυχική και υλική βοήθειά τους και την αμέριστη συμπαράστασή τους δεν θα ήταν δυνατό να ολοκληρώσω τις προπτυχιακές μου σπουδές.

Στους γονείς μου...

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΟΝΙΩΝ (G.S.M.)

1.1 Εισαγωγή.....	11
1.2 Δομή των Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας.....	12
1.3 Αρχιτεκτονική του Δικτύου GSM.....	16
1.3.1 Υποσύστημα Σταθμού Βάσης (BSS) – Ραδιοδίκτυο.....	19
1.3.1.1 Σταθμός Βάσης (BTS).....	21
1.3.1.2 Ελεγκτής Σταθμών Βάσης (BSC).....	22
1.3.1.3 Κινητός Σταθμός (MS).....	22
1.3.2 Υποσύστημα Δικτύου και Μεταγωγής (NSS).....	23
1.3.2.1 Επιλογικό Μεταγωγικό Κέντρο (MSC).....	25
1.3.2.2 Οικεία Βάση Δεδομένων (HLR).....	28
1.3.2.3 Βάση Δεδομένων Επισκεπτών (VLR).....	29
1.3.3 Υποσύστημα Λειτουργίας και Υποστήριξης (OMS).....	30
1.3.3.1 Κέντρο Εποπτείας και Συντήρησης (OMC).....	31
1.3.3.2 Κέντρο Πιστοποίησης (AuC).....	32
1.3.3.3 Κέντρο Πιστοποίησης Εξοπλισμού (EIR).....	33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή.....	34
2.2 Η Εξέλιξη των Κινητών Κυψελωτών Συστημάτων.....	35
2.3 Ανάλυση της Κυψελωτής Δομής.....	37
2.4 Χωρητικότητα και Ομο-Καναλική Παρεμβολή στα Κυψελωτά Συστήματα.....	39
2.5 Στρατηγικές Εκχώρησης Καναλιών.....	41
2.6 Μεταγωγή των Κλήσεων.....	42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΘΕΩΡΙΑ ΟΥΡΩΝ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή.....	46
3.2 Βασικά Μοντέλα Θεωρίας Ουρών	47
3.2.1 Υπολογισμός Επικοινωνιακού Φορτίου	48
3.2.2 Μέθοδοι Επικοινωνιακής Διάταξης	49
3.2.3 Αλυσίδες Markov Συνεχούς Χρόνου	49
3.2.4 Στοχαστική Διαδικασία Γενέσεως – Θανάτου	50
3.2.5 Στατιστική Κατανομή Ενδιάμεσων Χρόνων	53
3.2.6 Τηλεπικοινωνιακό Μοντέλο Κίνησης Erlang-B	56
3.3 Μαθηματικός Φορμαλισμός Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης.....	59
3.3.1 Παράδειγμα Υπολογισμού Χρόνου Εξυπηρέτησης Μιας Κλήσης	59
3.3.2 Ιδιότητα Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης Α Δειγματοληπτικού Ελέγχου	60
3.3.2.1 Απόδειξη Ιδιότητας 1	60
3.3.2.2 Παράδειγμα Απόδειξης Ιδιότητας 1	63
3.3.2.3 Υπολογισμός Ιδιότητας Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης με Χρήση Ericsson Counters	64
3.3.2.4 Υπολογισμός Μέσου Χρόνου Κράτησης Καναλιού με Χρήση Ericsson Counters	65
3.3.2.5 Υπολογισμός Αριθμού Αφικνούμενων Κλήσεων με Χρήση Ericsson Counters	67
3.3.2.6 Υπολογισμός Μέσου Ρυθμού Αφικνούμενων Κλήσεων με Χρήση Ericsson Counters	67
3.3.3 Δεύτερος Εναλλακτικός Τρόπος Υπολογισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης Α.....	68
3.3.3.1 Ιδιότητα 2 Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης Α	68
3.3.3.2 Απόδειξη Ιδιότητας 2	68
3.3.3.3 Επαλήθευση Υπολογισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης βάσει Ιδιότητας 2.....	70
3.3.4 Τρίτος Εναλλακτικός Τρόπος Υπολογισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης.....	70
3.3.4.1 Ιδιότητα 3 Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης Α	70
3.3.4.2 Απόδειξη Ιδιότητας 3	70
3.3.4.3 Επαλήθευση Υπολογισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης βάσει Ιδιότητας 3.....	71
3.4 Επιβεβαίωση Θεωρητικών Υπολογισμών με Στατική Ανάλυση Δεδομένων	72
3.4.1 Μαθηματικός Υπολογισμός Μέσου Χρόνου Κράτησης της Κλήσης	74

3.4.2 Μαθηματικός Υπολογισμός Μέσου Ρυθμού Αφικνούμενων Κλήσεων	75
3.4.3 Μαθηματικός Υπολογισμός Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης βάσει Ιδιότητας 2	76
3.4.4 Υπολογισμός μέσου αριθμού κατειλημμένων καναλιών βάσει Ιδιότητας 3	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

4.1 Επίλογος	80
--------------------	----

Αναφορές	81
----------------	----

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1.1: Δομή γενικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας.....	13
Σχήμα 1.2: Δομή δικτύου GSM.....	18
Σχήμα 1.3: Οργάνωση – Δομικά στοιχεία του BSS	20
Σχήμα 1.4 Δομή ραδιοδικτύου στο GSM.....	21
Σχήμα 1.5 Δομή του NSS GSM δικτύου.....	24
Σχήμα 1.6 Ιεραρχική διασύνδεση των δομικών στοιχείων του NSS.....	25
Σχήμα 1.7: Διασύνδεση του GMSC με άλλο δίκτυο μέσω γραμμών PCM	26
Σχήμα 1.8: Δίκτυο PLMN με τρία GMSC και πέντε MSC	26
Σχήμα 1.9: Η θέση της HLR μέσα στο NSS	29
Σχήμα 1.10: Δομή του OMS σε δίκτυο GSM	31
Σχήμα 2.1: Κυψελωτή ιδέα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων	38
Σχήμα 2.2: Το μέγεθος του κυψελωτού συγκροτήματος καθορίζει την απόσταση μεταξύ συγκαναλικών κυψελών	40
Σχήμα 2.3 : Κυψελωτή διάσπαση.....	40
Σχήμα 2.4: (α)Ανεπιτυχής μεταγωγή (β)επιτυχής μεταγωγή (γ)μεταγωγή μεταξύ δυο γειτονικών κυψελών	43
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα καταστάσεων για μία διαδικασία γενέσεως-θανάτου	51
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα καταστάσεων - Τεχνική Erlang-B.....	57
Σχήμα 3.3 Παρατηρούμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε ένα σύστημα	61
Σχήμα 3.4: Τηλεπικοινωνιακό σύστημα με πέντε timeslots.....	63

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Erlang-B	58
Πίνακας 2: Μετρήσεις counters	73
Πίνακας 3: Αποτελέσματα υπολογισμού μέσου χρόνου κράτησης της κλήσης	75
Πίνακας 4: Αποτελέσματα υπολογισμού μέσου ρυθμού αφικνούμενων κλήσεων στο κύτταρο	76
Πίνακας 5 : Αποτελέσματα υπολογισμού τηλεπικοινωνιακής κίνησης.	78
Πίνακας 6 :Αποτελέσματα υπολογισμού μέσου αριθμού κατειλημμένων καναλιών	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ (G.S.M.)

Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο στο πανευρωπαϊκό πρότυπο κινητών επικοινωνιών GSM. Το GSM είναι το πιο γνωστό ψηφιακό σύστημα κινητών επικοινωνιών στον κόσμο σήμερα, το οποίο, σύμφωνα με έρευνα που έγινε τον Απριλίου του 2008, χρησιμοποιείται από 3 δισεκατομμύρια περίπου συνδρομητές σε περισσότερες από 218 χώρες. Στις ενότητες που ακολουθούν, δίνετε μια σύντομη εισαγωγή στη δομή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς και στη συνέχεια περιγράφεται λεπτομερώς η αρχιτεκτονική του GSM.

1.1 Εισαγωγή

Στις αρχές της δεκαετίας του '80, στην Ευρώπη λειτουργούσαν ταυτόχρονα αρκετά αναλογικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας, τα οποία εν πολλοίς βασίζονταν σε παρόμοια πρότυπα (π.χ. NMT 450), αλλά έτρεχαν σε διαφορετικές φέρουσες συχνότητες. Για να αποφευχθεί αυτή η έλλειψη συμβατότητας στα δεύτερης γενιάς πλήρως ψηφιοποιημένα συστήματα, συστάθηκε μία ειδική επιστημονική ομάδα αρμόδια για θέματα κινητών επικοινωνιών της Ευρωπαϊκής ένωσης, γνωστή με την ονομασία Groupe Special Mobile. Αυτό το σύστημα γρήγορα ονομάστηκε Global System for Mobile Communications (GSM), με την διαδικασία προτυποποίησής του να αποτελεί ευθύνη της ETSI. Στο γενικότερο πλαίσιο της εξέλιξης των συστημάτων κινητών επικοινωνιών, η πλήρης αναπτυξιακή διαδικασία του GSM αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης του 3GPP και έθεσε τις βάσεις για την έλευση των συστημάτων 3G.

Ο πρωταρχικός σκοπός του GSM ήταν να παρέχει ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας το οποίο θα επέτρεπε στους χρήστες του να περιάγονται σε όλη την Ευρώπη ενώ ταυτόχρονα θα είχαν πρόσβαση σε υπηρεσίες φωνής συμβατές με το ISDN και άλλα PSTN συστήματα.

Το GSM είναι ένα τυπικό σύστημα δεύτερης γενιάς που αντικαθιστά τα αναλογικά συστήματα, αλλά δεν παρέχει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων παγκοσμίως, όπως συμβαίνει με τα συστήματα τρίτης γενιάς, όπως είναι για παράδειγμα το UMTS. Το GSM αρχικά αναπτύχθηκε στην Ευρώπη χρησιμοποιώντας τη ζώνη των 900 MHz και ονομάστηκε GSM 900 για να ξεχωρίζει από τις μετέπειτα εκδόσεις του. Αυτές οι εκδόσεις περιλαμβάνουν το GSM στα 1800 MHz, επίσης γνωστό ως DCS (Digital Cellular System) 1800 και το GSM που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στις ΗΠΑ στα 1900 MHz, γνωστό ως PCS (Personal Communications Service) 1900.

Επίσης, ένα σύστημα GSM το οποίο έχει εισαχθεί σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες για την υλοποίηση των σιδηροδρομικών επικοινωνιών είναι το GSM – Rail (GSM – R, 2002). Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί διαφορετικές συχνότητες και προσφέρει αρκετές επιπλέον υπηρεσίες οι οποίες δεν είναι διαθέσιμες στο δημόσιο GSM δίκτυο.

Γενικά, το GSM ικανοποιεί τις εξής απαιτήσεις:

- Καλή ποιότητα φωνής
- Χαμηλό κόστος εξοπλισμού και υπηρεσιών
- Υποστήριξη περιαγωγής (roaming)
- Υποστήριξη νέων υπηρεσιών και ευκολιών
- Αποδοτική χρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος
- Συμβατότητα με το ISDN

Τέλος, πρέπει να καταστεί σαφές από την αρχή του κεφαλαίου αυτού ότι το GSM έχει σχεδιαστεί κυρίως για υπηρεσίες φωνής και αυτό, ακόμα και σήμερα, αντιπροσωπεύει την κύρια χρήση του GSM συστήματος. Ωστόσο, όπως έχει αρχίσει ήδη να γίνεται φανερό στις μέρες μας, η ζυγαριά για τις μελλοντικές εφαρμογές των κινητών επικοινωνιών κλίνει περισσότερο προς τις υπηρεσίες δεδομένων, αποτελώντας έτσι περιοριστικό παράγοντα στην περαιτέρω ανάπτυξη του GSM.

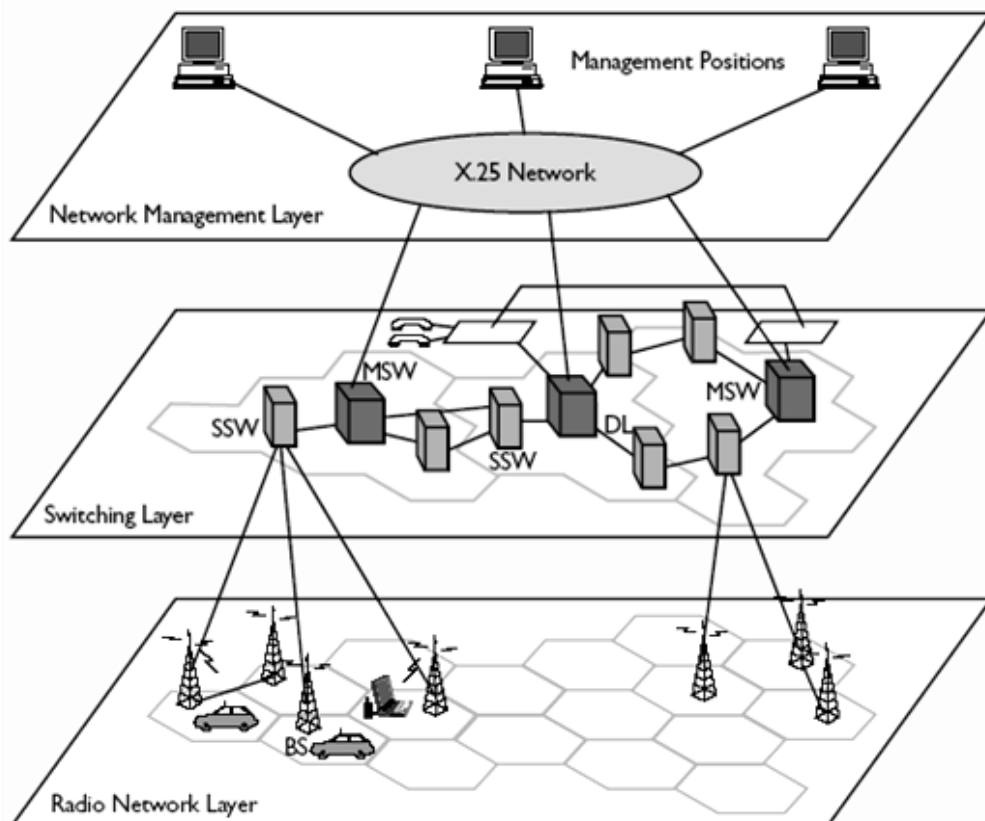
1.2 Δομή των Δικτύων Κινητής

Η κινητή τηλεφωνία είναι η εξέλιξη του σταθερού δικτύου τηλεφωνίας. Η βασική διαφορά είναι ότι ο συνδρομητής στην κινητή τηλεφωνία δεν βρίσκεται σε κάποια συγκεκριμένη θέση, αλλά κινείται συνεχώς στο χώρο. Αυτή η φαινομενικά μικρή διαφορά στην κατάσταση του συνδρομητή εισάγει ριζικές αλλαγές στην σχεδίαση του δικτύου, καθώς και στην συμπεριφορά του. Όπως θα δούμε και στην συνέχεια, η εισαγωγή εντελώς καινούργιων εννοιών και δομικών στοιχείων είναι υποχρεωτική.

Το πρόβλημα που προκύπτει κατά την σχεδίαση του δικτύου είναι πως μπορούμε να εντοπίσουμε τον κινητό συνδρομητή. Σε ένα σταθερό δίκτυο τηλεφωνίας όλες οι κλήσεις προς ένα συνδρομητή οδηγούνται στο ίδιο κάθε φορά κύκλωμα προς το σταθερό τηλέφωνο. Από αυτή την σκοπιά και η κλήση ενός κινητού συνδρομητή προς ένα συνδρομητή σταθερής τηλεφωνίας ελάχιστα διαφέρει από την αντίστοιχη κλήση μεταξύ συνδρομητών του σταθερού δικτύου (οι μικροδιαφορές εντοπίζονται στο ξεκίνημα της κλήσης από τον κινητό συνδρομητή). Όταν όμως η κλήση καταλήγει στον κινητό συνδρομητή, τότε το δίκτυο είναι υποχρεωμένο να γνωρίζει την θέση του ώστε να προωθήσει την κλήση προς αυτόν. Για αυτόν τον λόγο χρειαζόμαστε ένα αριθμό από βάσεις δεδομένων (databases) οι οποίες να κρατούν

στοιχεία και δεδομένα του κάθε συνδρομητή του, καθώς και όλων των συνδρομητών άλλων δικτύων που περιάγονται στο δίκτυο αυτό.

Η δομή ενός γενικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας έχει την μορφή του Σχήματος 1.1. Όπως και στο σταθερό δίκτυο τηλεφωνίας χρειαζόμαστε ένα επιλογικό διακοπτικό κέντρο για να δέχεται την κλήση και να την προωθεί στην κατάλληλη οδευση (route) προς τον συνδρομητή. Αυτό το διακοπτικό κέντρο ονομάζεται MSC (**M**obile **S**witching **C**enter).



Σχήμα 1.1: Δομή γενικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας

Οι κυρίες λειτουργίες του MSC είναι:

- **Έλεγχος κλήσης:** Βρίσκει την ταυτότητα του συνδρομητή, δρομολογεί την κλήση και τερματίζει την κλήση με το πέρας της συνομιλίας.
- **Χρέωση:** Μαζεύει όλη την πληροφορία σχετικά με την χρέωση μίας κλήσης, όπως τους αριθμούς του καλούντος και του καλούμενου, τον χρόνο και είδος ομιλίας και την μεταφορά του αρχείου χρέωσης στο κέντρο χρέωσης (Billing Center).

- **Έλεγχο κίνησης:** Κρατάει πληροφορία σχετικά με την θέση του συνδρομητή
- **Δεδομένα συνδρομητή:** Τα μόνιμα δεδομένα του συνδρομητή στην HLR και τα προσωρινά στην VLR .
- **Έλεγχο σηματοδότησης:** Διασύνδεση με το BSS και το σταθερό δίκτυο τηλεφωνίας PSTN
- **Εύρεση συνδρομητή:** Αναφέρεται στην εύρεση του συνδρομητή κατά την διάρκεια της διεκπεραίωσης μίας κλήσης.

Το MSC είναι κυριολεκτικά το κέντρο επικοινωνίας του δικτύου κινητής τηλεφωνίας με τον έξω κόσμο. Όλα τα δίκτυα τηλεφωνίας και τα δίκτυα δεδομένων (PSTN, PLMN, ISDN, B-ISDN) για να εισέλθουν στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας επικοινωνούν πρώτα με το MSC.

Ωστόσο, για να μπορέσει το MSC να προωθήσει την κλήση προς τον συνδρομητή, θα πρέπει το δίκτυο να έχει συνεχώς πληροφορία για τα στοιχεία και την θέση του συνδρομητή. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων HLR (**H**ome **L**ocation **R**egister). Σε αυτή την βάση δεδομένων καταγράφονται πληροφορίες που αφορούν αποκλειστικά τον συνδρομητή, τις υπηρεσίες στις οποίες είναι εγγεγραμμένος, την περιοχή που βρίσκεται (VLR address) και άλλες πληροφορίες που σχετίζονται με την κλήση. Κάθε φορά που ο συνδρομητής μετακινείται μέσα στο δίκτυο σε διαφορετικό MSC/VLR, το κινητό στέλνει πληροφορία στο δίκτυο για την νέα του θέση χωρίς ο συνδρομητής να καταλάβει τίποτα. Με αυτό τον τρόπο το δίκτυο γνωρίζει ανά πάσα στιγμή την θέση του συνδρομητή για να του δώσει την κλήση. Πρέπει να αναφερθεί ότι σε αυτή την βάση δεδομένων εγγράφονται μόνιμα όλοι οι συνδρομητές του δικτύου. Δηλαδή η HLR είναι το σημείο αναφοράς του δικτύου όπου μπορούμε ανά πάσα στιγμή να αναζητήσουμε πληροφορίες που αφορούν την ταυτότητα ενός συνδρομητή. Ένας συνδρομητής σβήνεται από την HLR **μόνο** αν σταματήσει την συνδρομή του.

Μία άλλη βάση δεδομένων είναι η VLR (**V**isitor **L**ocation **R**egister). Αυτή η βάση δεδομένων είναι αναπόσπαστο μέρος του MSC και περιέχει επίσης στοιχεία συνδρομητών. Η διαφορά με την HLR είναι ότι η VLR έχει πληροφορίες για τους συνδρομητές που είναι επισκέπτες στην περιοχή κάλυψης του συγκεκριμένου MSC/VLR. Αυτή η πληροφορία είναι χρήσιμη κατά την διάρκεια μιας κλήσης όπου πρέπει να εντοπίσουμε την θέση του συνδρομητή στο δίκτυο. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η εγγραφή των συνδρομητών στην VLR είναι προσωρινή, με την έννοια ότι όταν ο συνδρομητής φύγει από την περιοχή κάλυψης του MSC/VLR, η εγγραφή σβήνεται και ο συνδρομητής εγγράφεται στην VLR της περιοχής κάλυψης του

καινούργιου MSC/VLR. Επομένως, οι εγγραφές σε αυτή τη βάση δεδομένων είναι δυναμικές, πράγμα που σημαίνει ότι καθ' όλη τη διάρκεια της ύπαρξης του συνδρομητή στο δίκτυο κάποια πεδία αλλάζουν δυναμικά. Η δυναμική αυτή ενημέρωση των πεδίων διενεργείται με λειτουργίες δικτύου οι οποίες αφορούν το NSS μέρος. Οι διαδικασίες αυτές βρίσκονται στο γενικότερο σύνολο λειτουργιών που αποκαλείται **Mobility Management (M.M)**. Τέτοιες λειτουργίες είναι: ενημέρωση περιοχής εντοπισμού (Location Area Update), μεταγωγή κλήσεων (Handover inter MSC), πιστοποίηση (Authentication), IMSI Attach, paging, κτλ.

Ο συνδρομητής πρέπει να διασφαλίζεται από θέματα ασφαλείας. Επίσης πρέπει το δίκτυο να έχει την δυνατότητα πιστοποίησης ανά πάσα στιγμή της ταυτότητας του συνδρομητή. Αυτή την εργασία διεκπεραιώνει μία άλλη βάση δεδομένων, η AUC (**Authentication Centre**). Αυτή η βάση δεδομένων χρησιμοποιεί αλγορίθμους για την πιστοποίηση της ταυτότητας ενός συνδρομητή καθώς και ένα είδος κρυπτογράφησης (ciphering) για την εξασφάλιση του απορρήτου της ομιλίας του συνδρομητή.

Για την προστασία της συσκευής του συνδρομητή από κλοπή, υπάρχει άλλη μία βάση δεδομένων, η EIR (**Equipment Identification Register**) όπου καταγράφεται ο κωδικός του τηλεφώνου που χρησιμοποιεί ο συνδρομητής. Σε περίπτωση αναφοράς κλοπής τηλεφώνου υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής του τηλεφώνου σε μια λίστα όπου δεν μπορούν να γίνουν κλήσεις, οπότε και η συσκευή είναι ουσιαστικά άχρηστη.

Το επόμενο ουσιαστικό δομικό στοιχείο ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας είναι ο ελεγκτής σταθμού βάσης ή αλλιώς BSC (**Base Station Controller**). Το BSC είναι ουσιαστικά ένα επιλογικό διακοπτικό κέντρο με λιγότερες αρμοδιότητες από το MSC, το οποίο έχει μία εξειδικευμένη λειτουργία δηλαδή τον έλεγχο του ασυρμάτου μέρους του δικτύου της κινητής τηλεφωνίας. Οι κυρίες λειτουργίες του BSC είναι οι ακόλουθες:

- **Έλεγχος του ραδιοδικτύου:** Δίνει τις σωστές παραμέτρους στα υπόλοιπα μέρη του ραδιοδικτύου φροντίζοντας για την σωστή λειτουργία τους.
- **Σύνδεση του κινητού με το MSC:** Φροντίζει την σωστή διασύνδεση του κινητού με το MSC ελέγχοντας όλα τα πρωτόκολλα επικοινωνίας.
- **Έλεγχος του σταθμού βάσης:** Ελέγχει τους σταθμούς βάσης BTS και συλλέγει όλα τα Alarms.
- **Έλεγχος του διακωδικοποιητή:** Ελέγχει τον διακωδικοποιητή Transcoder-TS και συλλέγει Alarms.

- **Συγχρονισμός:** Χρησιμοποιεί ιεραρχικό συγχρονισμό, δηλαδή το MSC συγχρονίζει το BSC και αυτό με την σειρά του συγχρονίζει τα BTS.
- **Σηματοδοσία:** Ασχολείται με την σηματοδοσία SS#7 που έρχεται από το MSC και με την σηματοδοσία που πηγαίνει προς τα BTS.
- **Έλεγχο κίνησης:** Συλλέγει στατιστικά στοιχεία που αφορούν την κίνηση στους σταθμούς βάσης και την επάρκεια σε χωρητικότητα των πομποδεκτών.

Το επόμενο δομικό στοιχείο του δικτύου είναι ο σταθμός βάσης ή αλλιώς BTS από τα αρχικά των λέξεων **Base Transceiver Station**. Ο σταθμός βάσης είναι η διασύνδεση του κινητού με το υπόλοιπο δίκτυο. Ο σταθμός βάσης αποτελείται από έναν ελεγκτή και από πομποδέκτες. Οι ραδιοπαράμετροι που έχει ο σταθμός βάσης έχουν σχέση με τα Handovers, με το Paging, με την ισχύ εκπομπής και με την ταυτότητά του.

Τέλος, έχουμε το κινητό το οποίο είναι η φυσική σύνδεση του συνδρομητή με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Το κινητό τηλέφωνο περιέχει μια βάση δεδομένων η οποία ονομάζεται SIM card από τα αρχικά των λέξεων **Subscriber Identity Module**. Αυτή η βάση δεδομένων είναι φορητή, δηλαδή μπορεί να εισαχθεί σε οποιοδήποτε τηλέφωνο και να μιλήσει ο συνδρομητής. Στο δίκτυο της κινητής τηλεφωνίας αυτή η προσωπική βάση δεδομένων πιστοποιεί τον συνδρομητή. Περιέχει τον αριθμό του συνδρομητή IMSI, το κωδικό εισαγωγής στο δίκτυο PIN, μία λίστα των υπηρεσιών στις οποίες έχει εγγραφεί ο συνδρομητής, τα διαθέσιμα δίκτυα πρόσβασης καθώς και κωδικούς ταυτοποίησης Ki και απόκρυψης δεδομένων, ciphering, του συνδρομητή. Στο σημείο απόκρυψης δεδομένων και ταυτοποίησης συνεργάζεται στενά με την AUC όπως θα δούμε στην συνέχεια.

1.3 Αρχιτεκτονική του Δικτύου GSM

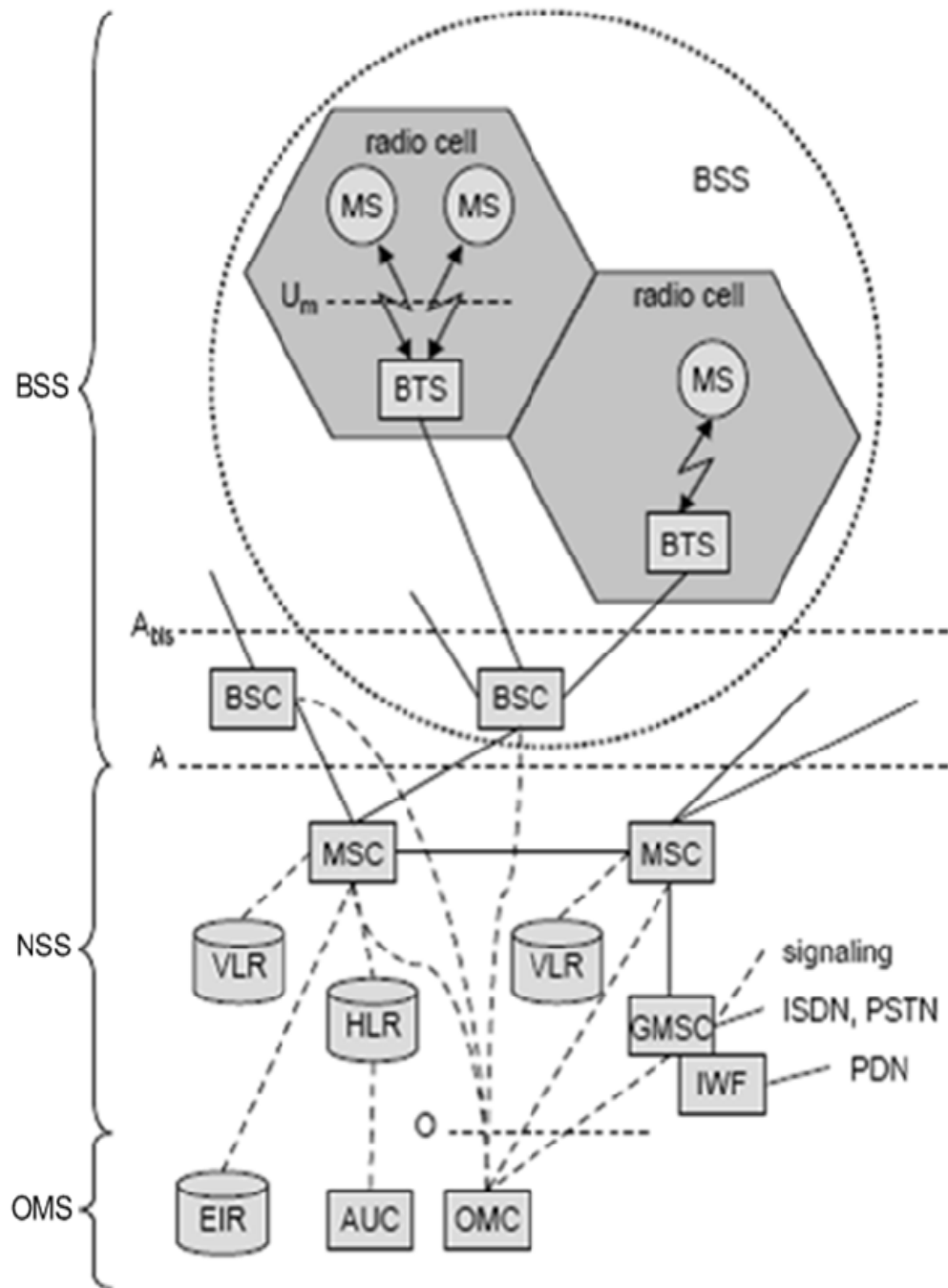
Το GSM, όπως όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, είναι ιεραρχικά δομημένο με σύνθετη αρχιτεκτονική συστήματος, αποτελούμενο από υποσυστήματα, δομικά στοιχεία και διεπαφές.

Η δομή του GSM αποτελείται από τρία κύρια, διασυνδεδεμένα υποσυστήματα, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους αλλά και με τους χρήστες κινητών σταθμών μέσω συγκεκριμένων διεπαφών δικτύου.

Τα υποσυστήματα που συνθέτουν το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας GSM είναι:

1. το Υποσύστημα Σταθμού Βάσης (*Base Station Subsystem – BSS*)
2. το Υποσύστημα Δικτύου και Μεταγωγής (*Network & Switching Subsystem – NSS*)
3. το Υποσύστημα Λειτουργίας και Υποστήριξης (*Operation & Maintenance Subsystem – OMS*).

Ο Κινητός Σταθμός (*Mobile Station – MS*) αποτελεί και αυτός επίσης ένα υποσύστημα του δικτύου GSM, ωστόσο για λόγους διευκόλυνσης στη σχεδίαση της αρχιτεκτονικής του δικτύου, λαμβάνεται ως τμήμα του BSS. Ο εξοπλισμός και οι υπηρεσίες στο GSM είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να υποστηρίζουν ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω κύρια υποσυστήματα. Στο Σχήμα 1.2 εικονίζεται η λειτουργική δομή ενός συστήματος GSM.



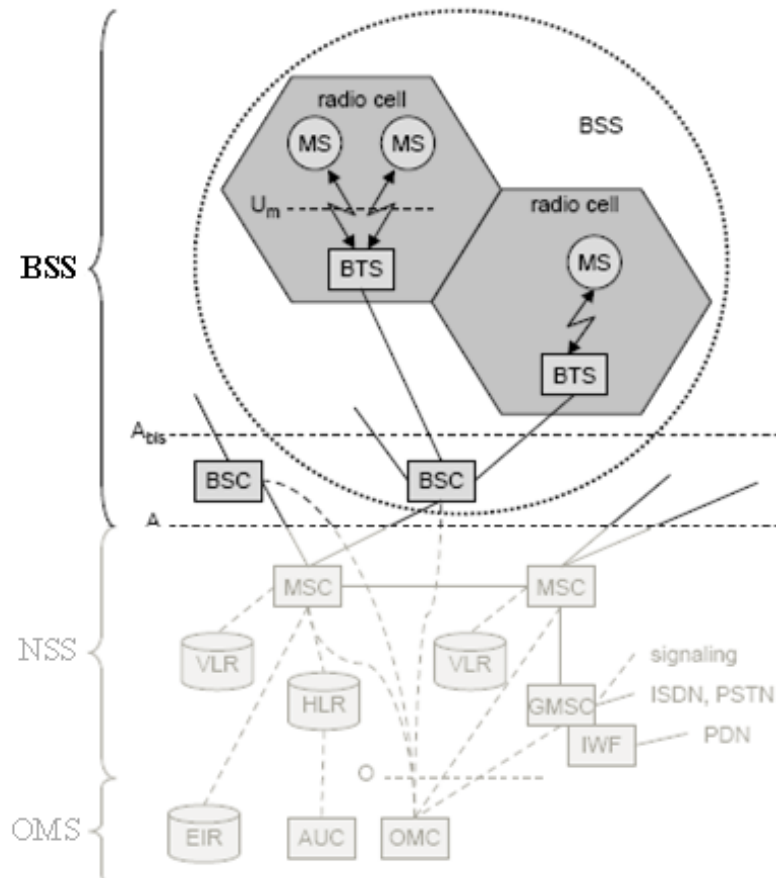
Σχήμα 1.2: Δομή δικτύου GSM

1.3.1 Υποσύστημα Σταθμού Βάσης (BSS) – Ραδιοδίκτυο

Το BSS καθορίζει τις διαδρομές ραδιομετάδοσης ανάμεσα στους κινητούς σταθμούς και το μεταγωγικό κέντρο MSC. Επίσης το BSS διαχειρίζεται τα πρωτόκολλα επικοινωνίας ανάμεσα στον κινητό σταθμό και τον σταθμό βάσης. Επομένως, το BSS αποτελεί το φυσικό μέσο σύνδεσης του κινητού σταθμού με τα υπόλοιπα υποσυστήματα του δικτύου και το οποίο εκτελεί όλες τις απαραίτητες λειτουργίες για να διατηρηθούν οι ραδιοσυνδέσεις με τον κινητό σταθμό - επεξεργασία σήματος, κωδικοποίηση-αποκωδικοποίηση των δεδομένων κίνησης και σηματοδότησης, προσαρμογή του ρυθμού δεδομένων στο/από το ασύρματο τμήμα του δικτύου, κλπ.

Κάθε BSS απαρτίζεται από τον ελεγκτή σταθμών βάσης BSC (**B**ase **S**tation **C**ontroller), τους σταθμούς βάσης πομποδεκτών (**B**ase **S**tation **T**ransceivers), τους κινητούς σταθμούς και τις παραμέτρους του ραδιοδικτύου στον αέρα.

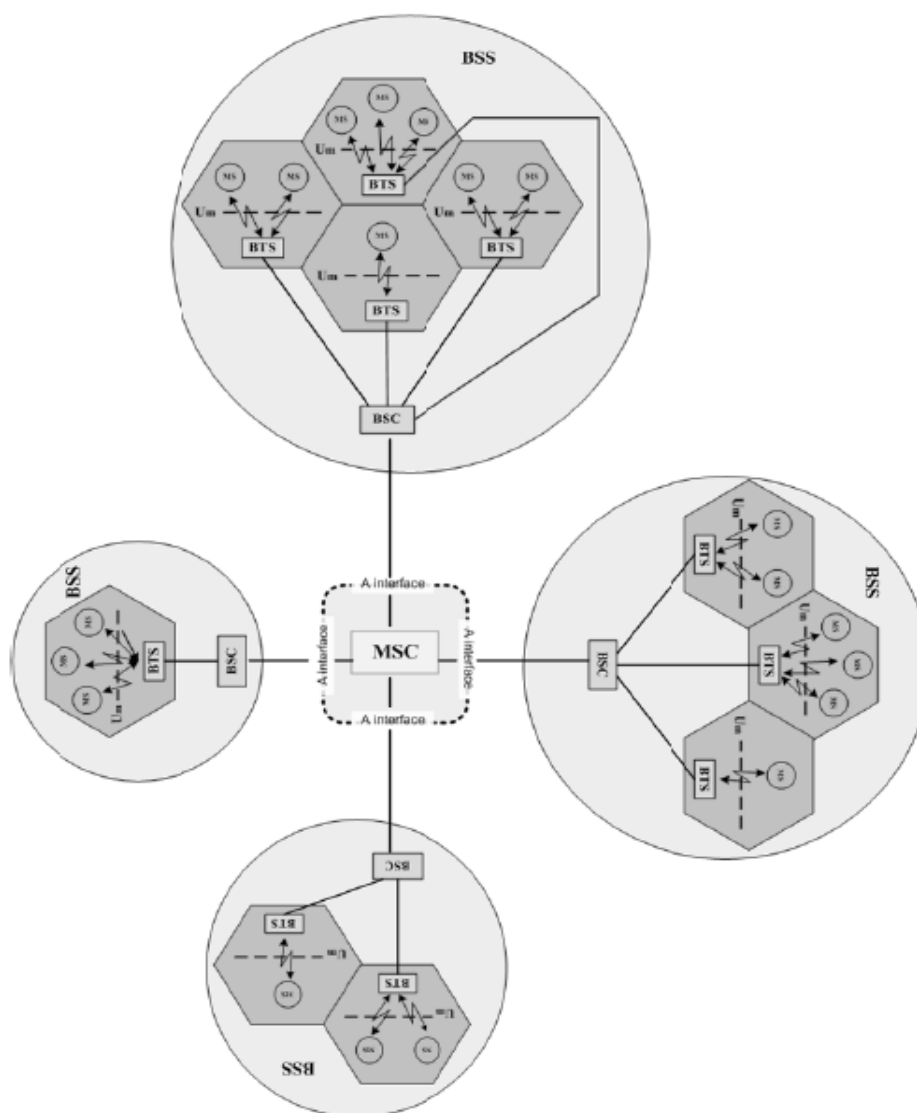
Το ακόλουθο σχήμα δείχνει τα δομικά στοιχεία του BSS. Μία κυψέλη GSM εκτείνεται γύρω από την περιοχή ραδιοκάλυψης του σταθμού βάσης BTS. Ο BTS παρέχει τα ραδιοκανάλια για σηματοδότηση και κίνηση δεδομένων χρήστη σε αυτή την κυψέλη. Επομένως, ο BTS αποτελεί το τμήμα του δικτύου GSM που σχετίζεται με την διεπαφή αέρα Um. Πέρα από το υψίσυχο τμήμα (εξοπλισμός πομπού και δέκτη), ο BTS διαθέτει επίσης κάποια ελάχιστα δομικά στοιχεία για την επεξεργασία των σημάτων και των πρωτοκόλλων.



Σχήμα 1.3: Οργάνωση – Δομικά στοιχεία του BSS

Ένα δίκτυο GSM δύναται να διαθέτει περισσότερα από ένα BSS, διαμορφώνοντας έτσι το ασύρματο τμήμα του δικτύου ή *ραδιοδίκτυο (Radio Subsystem – RSS)*. Το RSS αποτελείται από πολλά BSC, καθένα από τα οποία ελέγχει αρκετές εκατοντάδες σταθμών βάσης, και τα οποία συνδέονται σε ένα μοναδικό MSC.

Για να διατηρηθούν οι σταθμοί βάσης μικροί σε μέγεθος, ο ουσιαστικός έλεγχος και οι οντότητες των πρωτοκόλλων ευφυίας είναι τοποθετημένες στον ελεγκτή σταθμών βάσης BSC. Για παράδειγμα, το πρωτόκολλο μεταγωγής κλήσεων εκτελείται στον BSC. Ο BTS και ο BSC σχηματίζουν μαζί το BSS. Σε κάθε BTS εκχωρείται ένα σύνολο από τα διαθέσιμα ραδιοκανάλια.



Σχήμα 1.4: Δομή ραδιοδικτύου στο GSM

1.3.1.1 Σταθμός Βάσης (BTS)

Ο BTS περιλαμβάνει όλο τον ράδιο-εξοπλισμό, τις κεραίες, οι οποίες συνήθως είναι προσαρτημένες πάνω σε έναν ιστό, τα συστήματα επεξεργασίας σήματος και τους απαραίτητους ενισχυτές για την εκπομπή των ράδιο-σημάτων. Ένας BTS μπορεί να υποστηρίξει λειτουργικά μία ή περισσότερες, εφόσον χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραίες, ραδιοκυψέλες και συνδέεται, αφενός με τον κινητό σταθμό μέσω της διεπαφής αέρα (Air-Interface ή Um) και αφετέρου με τον BSC δια της διεπαφής Abis.

Η διεπαφή Um περιέχει όλους τους απαραίτητους μηχανισμούς για την ασύρματη μετάδοση (FDMA, TDMA πλαίσια, φυσικά κανάλια και ριπές πληροφορίας) ενώ η Abis διεπαφή απαρτίζεται από συνδέσεις των 16 ή 64 kbps. Η διεπαφή Abis μεταφέρει δεδομένα κίνησης και συντήρησης. ενώ από την αρμόδια επιτροπή σύστασης του GSM έχει καταστεί πρότυπο για όλους τους κατασκευαστές εξοπλισμού δικτύου GSM. Στην πράξη, το Abis παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από κατασκευαστή σε κατασκευαστή αποτελώντας έτσι μοχλό πίεσης για τους φορείς υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας να χρησιμοποιούν τον ίδιο κατασκευαστή για εξοπλισμό BTS και BSC. Η εμβέλεια, η λειτουργική δηλαδή περιοχή μιας GSM ραδιοκυψέλης, κυμαίνεται από 1000 m έως 35 Km ανάλογα με το περιβάλλον της ραδιομετάδοσης αλλά επίσης και από την προσδοκώμενη κίνηση.

Κάποια από τα BTS ενδεχομένως να είναι εγκατεστημένα μέσα στο BSC, το οποίο είναι υπεύθυνο για την ορθή λειτουργία τους, τα περισσότερα όμως είναι τοποθετημένα μακριά από το BSC. Στη δεύτερη περίπτωση, το φυσικό στρώμα σύνδεσης υλοποιείται με μικροκυματική ζεύξη ή μισθωμένες γραμμές αποκλειστικής χρήσης (dedicated leased lines).

1.3.1.2 Ελεγκτής Σταθμών Βάσης (BSC)

Το BSC είναι υπεύθυνο για τη σωστή λειτουργία του ραδιοδικτύου. Συγκεκριμένα, ο ρόλος του BSC είναι να διαχειρίζεται τα BTS και να τα διασυνδέει με το MSC. Διατηρεί τις ραδιοσυχρότητες, χειρίζεται τις αιτήσεις για μεταπομπή κλήσεων (handovers – HO) από ένα BTS σε ένα άλλο μέσα στο ίδιο BSS, διεκπεραιώνει υπηρεσίες τηλεειδοποίησης από ή προς τον κινητό σταθμό, ελέγχει την στάθμη ισχύος των ραδιοσημάτων (power control) κ.α.. Το BSC πολυπλέκει τα ραδιοκανάλια πάνω στις συνδέσεις του σταθερού δικτύου στη διεπαφή A.

1.3.1.3 Κινητός Σταθμός (MS)

Ο κινητός σταθμός (MS) αποτελεί το φυσικό μέσο σύνδεσης του συνδρομητή με το δίκτυο. Ο κινητός σταθμός αποτελείται από τον εξοπλισμό (υλικό και λογισμικό) ο οποίος είναι ανεξάρτητος από τον χρήστη, καθώς και τη μονάδα πιστοποίησης συνδρομητή SIM (Subscriber Identity Module).

Ένας κινητός σταθμός αναγνωρίζεται σε διεθνές επίπεδο μέσω ενός διεθνούς αριθμού πιστοποίησης κινητού εξοπλισμού IMEI (International Mobile Equipment Identity). Ο συνδρομητής δικτύου GSM προσωποποιεί τη συσκευή με την εισαγωγή της κάρτας SIM, για παράδειγμα η χρέωση υπηρεσιών και η πιστοποίηση στηρίζονται στη SIM

και όχι στη συσκευή. Οι μηχανισμοί που σχετίζονται με τη συσκευή, όπως η προστασία της συσκευής από κλοπή, χρησιμοποιούν τον αριθμό IMEI. Χωρίς την κάρτα SIM, μόνο κλήσεις εκτάκτου ανάγκης είναι εφικτές. Η SIM, στην πράξη, είναι μία βάση δεδομένων η οποία φυλάσσει δεδομένα που αφορούν τον συνδρομητή, περιέχει αριθμούς πιστοποίησης και πίνακες, όπως είναι ο τύπος της κάρτας (card type), ο σειριακός αριθμός (serial number), η λίστα υπηρεσιών στις οποίες είναι εγγεγραμμένος ο συνδρομητής, ο προσωπικός αριθμός πιστοποίησης PIN (**P**ersonal **I**dentify **N**umber), το κλειδί ξεμπλοκαρίσματος PUK (**P**ersonal **U**nblocking **K**ey), το κλειδί πιστοποίησης Ki (**I**dentify **K**ey) και η διεθνής ταυτότητα κινητού συνδρομητή IMSI (**I**nternational **M**obile **S**ubscriber **I**dentify).

Ο κινητός σταθμός αποθηκεύει δυναμικά δεδομένα για όσο χρόνο είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο GSM, όπως είναι το κλειδί κρυπτογράφησης ή «απόκρυψης» (ciphering key) και η πληροφορία που σχετίζεται με τη θέση του κινητού σταθμού στο δίκτυο. Η πληροφορία αυτή συντίθεται από τον προσωρινό αριθμό πιστοποίησης κινητού συνδρομητή TMSI (**T**emporary **M**obile **S**ubscriber **I**dentify) και τον αριθμό αναγνώρισης θέσης εντοπισμού LAI (**L**ocation **A**rea **I**dentify).

Τυπικοί GSM 900 κινητοί σταθμοί παρουσιάζουν ισχύ εκπομπής μέχρι 2W ενώ στο GSM 1800 η ανώτατη εκπεμπόμενη ισχύς είναι το 1W, λόγω του μικρότερου μεγέθους των ραδιοκυψελών.

Ο κινητός σταθμός, εκτός από την τηλεφωνική διασύνδεση που προσφέρει, παρέχει στους χρήστες και άλλου είδους υπηρεσίες, πχ. προγραμματιζόμενες λειτουργίες, οπτική απεικόνιση δεδομένων και ακουστικές υπηρεσίες. Επιπρόσθετες διασυνδέσεις περιλαμβάνουν διεπαφές με H/Y (computer modems), IrDA ή Bluetooth. Σύγχρονοι κινητοί σταθμοί περιλαμβάνουν πολλές λειτουργίες που σχετίζονται με τον κατασκευαστή (κάμερα, ανιχνευτής αποτυπωμάτων, ημερολόγια, ηλεκτρονικά βιβλία διευθύνσεων, δυνατότητα email, προγράμματα περιήγησης στο internet, παιχνίδια, κ.α.).

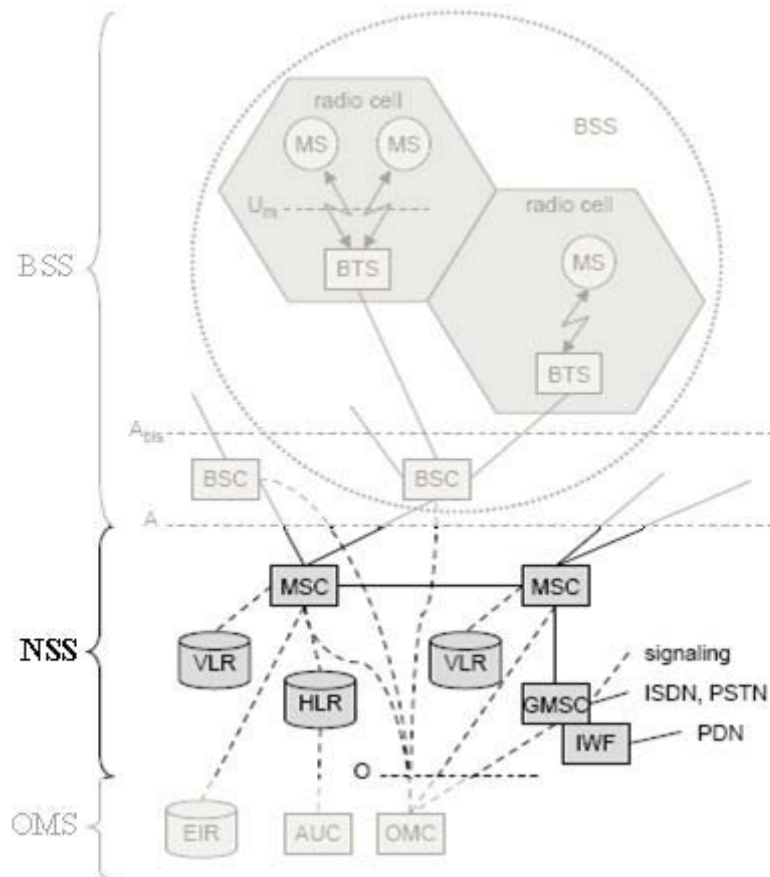
1.3.2 Υποσύστημα Δικτύου και Μεταγωγής (NSS)

Το NSS αποτελεί την «καρδιά» του συστήματος GSM. Ο ρόλος του είναι να διαχειρίζεται τις διακοπτικές λειτουργίες του συστήματος και να επιτρέπει στα MSC να επικοινωνούν με άλλα δίκτυα, όπως το PSTN και το ISDN.

Συγκεκριμένα, το NSS διασυνδέει το ασύρματο δίκτυο με τα σταθερά δημόσια δίκτυα, διεκπεραιώνει την μεταγωγή ανάμεσα σε διαφορετικά BSS, περιλαμβάνει λειτουργίες εντοπισμού θέσης των συνδρομητών διεθνώς και υποστηρίζει τις

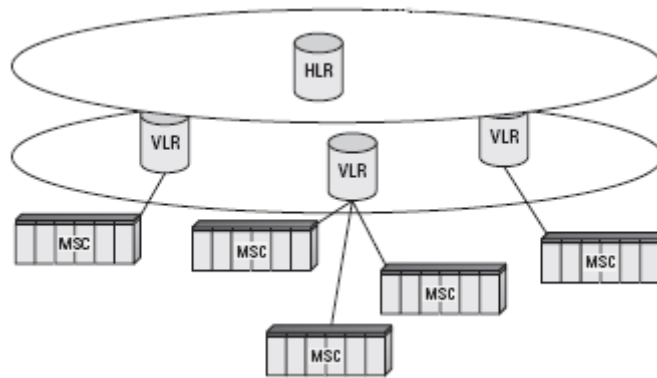
διαδικασίες χρέωσης, τιμολόγησης και περιαγωγής (roaming) μεταξύ διαφορετικών παρόχων στην ίδια ή σε διαφορετικές χώρες.

Το NSS αποτελείται από τα κέντρα μεταγωγής MSC και τις βάσεις δεδομένων HLR και VLR, οι οποίες αποθηκεύουν τα δεδομένα που απαιτούνται για τη δρομολόγηση των κλήσεων και την παροχή υπηρεσιών



Σχήμα 1.5: Δομή του NSS GSM δικτύου

Η ιεραρχική διασύνδεση των δομικών στοιχείων (HLR, VLR, MSC) του υποσυστήματος NSS αποτυπώνεται στο ακόλουθο Σχήμα.



Σχήμα 1.6 Ιεραρχική διασύνδεση των δομικών στοιχείων του NSS

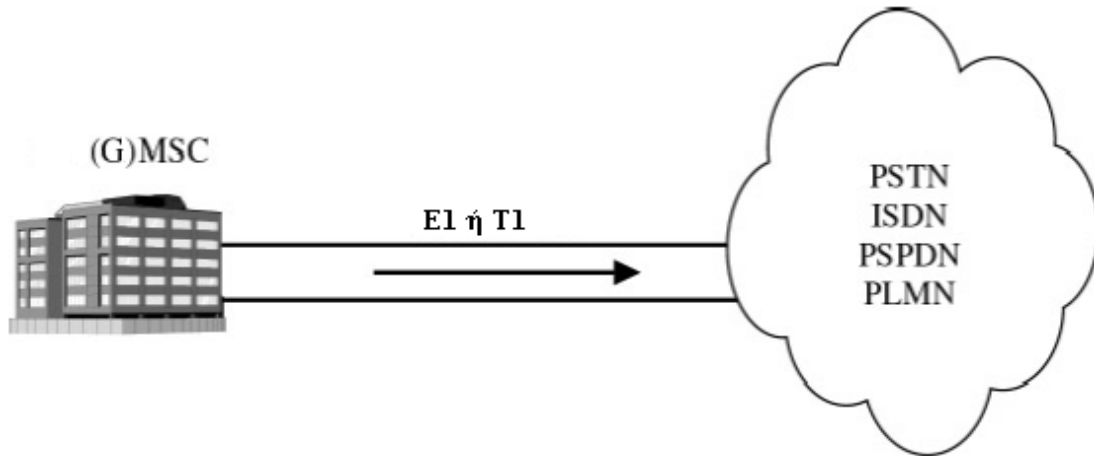
1.3.2.1 Επιλογικό Μεταγωγικό Κέντρο (MSC)

Το MSC αποτελεί την κεντρική μονάδα του NSS. Ο ρόλος του είναι να ελέγχει την τηλεπικοινωνιακή κίνηση και να αποκαθιστά τις συνδέσεις μεταξύ των BSC καθώς και να αλληλεπιδρά με άλλα MSC. Από τεχνική σκοπιά, το MSC είναι ένα υψηλής απόδοσης ψηφιακό ISDN μεταγωγικό κέντρο με τη διαφορά ότι το MSC λαμβάνει υπόψη την εκχώρηση και διαχείριση των ραδιοπόρων καθώς και την κινητικότητα των συνδρομητών. Για το λόγο αυτό, το MSC διαθέτει επιπρόσθετες λειτουργίες που αφορούν την καταγραφή της θέσης των συνδρομητών και την μεταγωγή της σύνδεσης, στην περίπτωση που ο συνδρομητής μεταβαίνει από BSS σε BSS.

Ένα MSC χειρίζεται όλη τη σηματοδοσία που χρειάζεται για την αποκατάσταση, διατήρηση και τερματισμό της σύνδεσης και εναλλαγής των συνδέσεων σε άλλα MSC. Για αυτόν τον σκοπό, χρησιμοποιείται το σύστημα σηματοδοσία No 7 (SS#7) το οποίο καλύπτει όλες τις πλευρές ελέγχου σηματοδοσίας στα ψηφιακά δίκτυα (αξιόπιστη δρομολόγηση και παροχή μηνυμάτων ελέγχου, αποκατάσταση – εποπτεία κλήσεων, κλπ.). Χαρακτηριστικό του SS#7 είναι η μεταβλητότητα των αριθμών κλήσης, οι χωρίς χρέωση τηλεφωνικές κλήσεις, η προώθηση κλήσεων και η τριμερή κλήση. Το MSC υλοποιεί επίσης όλες τις λειτουργίες που απαιτούνται για συμπληρωματικές υπηρεσίες όπως προώθηση κλήσεων, πολυμερής κλήση, ακύρωση χρέωσης, κλπ.

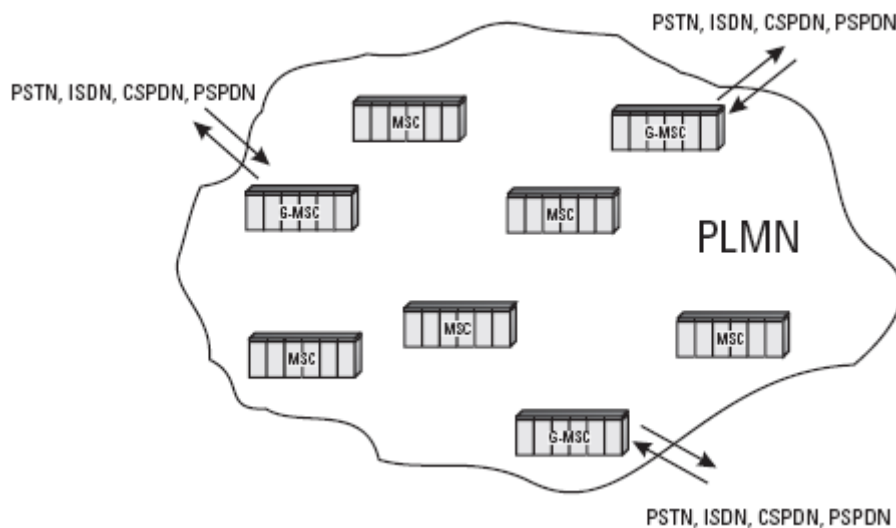
Ένα MSC το οποίο παρέχει την δυνατότητα διασύνδεσης με άλλα σταθερά δίκτυα (π.χ. ISDN, PSTN) αποτελεί τον διάλογο επικοινωνίας μεταξύ δύο δικτύων και καλείται GMSC (Gateway Mobile Switching Center) (σχήμα 1.7). Συγκεκριμένα, το GMSC ανταλλάσσει δεδομένα φωνής και σηματοδοσίας μεταξύ σταθερού, δημόσιου δικτύου και δικτύου κινητών επικοινωνιών. Εάν ένα σταθερό δίκτυο δεν είναι δυνατόν να προωθήσει μια εισερχόμενη κλήση στο τοπικό MSC (π.χ. λόγω αδυναμίας να αντλήσει πληροφορία από την HLR), δρομολογεί την κλήση στο

επόμενο GMSC. Αυτό με τη σειρά του αναζητά την πληροφορία δρομολόγησης από την HLR και δρομολογεί την σύνδεση στο τοπικό MSC στην περιοχή του οποίου βρίσκεται ο κινητός σταθμός.



Σχήμα 1.7: Διασύνδεση του GMSC με άλλο δίκτυο μέσω γραμμών PCM

Ένα Δημόσιο Τοπικό Δίκτυο (**P**ublic **L**and **M**obile **N**etwork – **PLMN**) συνήθως διαθέτει ένα μόνο GMSC και περισσότερα από ένα MSC, καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για ένα τμήμα της περιοχής υπηρεσιών. Γενικά, οι πάροχοι υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών επιδιώκουν κάθε MSC σε ένα δίκτυο PLMN να έχει την δυνατότητα να λειτουργεί και ως GMSC. Στο ακόλουθο σχήμα εικονίζεται ένα PLMN δίκτυο, το οποίο συγκροτείται από τρία GMSC και πέντε MSC.



Σχήμα 1.8: Δίκτυο PLMN με τρία GMSC και πέντε MSC

Οι συνδέσεις με άλλα δίκτυα κινητών επικοινωνιών ή διεθνή δίκτυα δρομολογούνται μέσω του κέντρου διεθνούς μεταγωγής (International Switching Center) της αντίστοιχης χώρας. Χρησιμοποιώντας επιπρόσθετες λειτουργίες διασύνδεσης IWF (InterWorking Functions), το MSC καθιστά εφικτή τη σύνδεση ενός PLMN με το δημόσιο δίκτυο δεδομένων (Public Data Network – PDN), όπως είναι π.χ. το X.25. Αυτή η λειτουργική διασύνδεση, IWF, εκτελεί ένα σύνολο από ενέργειες που εξαρτώνται από την υπηρεσία και το αντίστοιχο σταθερό δίκτυο. Η IWF χρειάζεται για να χαρτογραφήσει τα πρωτόκολλα του PLMN πάνω σε εκείνα των αντίστοιχων σταθερών δικτύων. Σε περιπτώσεις συμβατής υλοποίησης υπηρεσιών και στα δύο δίκτυα, η IWF δεν εκτελεί καμία λειτουργία.

Κλείνοντας την παράγραφο αυτή, μπορούμε να πούμε ότι το MSC παρέχει όλη την λειτουργικότητα που απαιτείται για τον χειρισμό του κινητού συνδρομητή, όπως καταχώρηση, πιστοποίηση αυθεντικότητας, ενημέρωση θέσης, μεταγωγές και δρομολόγηση κλήσεων σε περιάγοντες συνδρομητές.

Οι κύριες λειτουργίες του MSC συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Τηλεειδοποίηση
- Εξασφάλιση της «φυσικής» συνέχειας των συνδέσεων για όλους τους ΚΣ στην περιοχή λειτουργίας του
- Δυναμική εκχώρηση πόρων
- Εγγραφή θέσης εντοπισμού
- Λειτουργίες διασύνδεσης
- Διαχείριση των μεταγωγών κλήσεων
- Χρέωση
- Επαναεκχώρηση των συχνοτήτων στους σταθμούς βάσης
- Κρυπτογράφηση
- Ανταλλαγή σηματοδοσίας
- Συγχρονισμός των BSS
- Πύλη διασύνδεσης με άλλα δίκτυα

1.3.2.2 Οικεία Βάση Δεδομένων (HLR)

Η HLR είναι η κεντρική και ταυτόχρονα η πιο σημαντική βάση δεδομένων στο GSM καθώς αποθηκεύει όλη την πληροφορία που σχετίζεται με τον συνδρομητή. Η πληροφορία αυτή διακρίνεται σε στατική και δυναμική.

Η στατική πληροφορία περιλαμβάνει δεδομένα εγγραφής του συνδρομητή στο δίκτυο όπως π.χ. τον αριθμό ISDN κινητού συνδρομητή (MSISDN), τις υπηρεσίες στις οποίες είναι εγγεγραμμένος ο συνδρομητής (π.χ. προώθηση κλήσεως, περιορισμοί στην περιαγωγή, GPRS) και τη διεθνή ταυτότητα κινητού συνδρομητή (IMSI). Η δυναμική πληροφορία είναι απαραίτητη λόγω της κινητικότητας του συνδρομητή και σχετίζεται με την τρέχουσα θέση του κινητού σταθμού (Location Area Identity – LAI), τον αριθμό περιαγωγής του κινητού σταθμού (Mobile Subscriber Roaming Number – MSRN) καθώς και με την βάση επισκεπτών VLR του εξυπηρετούντος MSC.

Όλα αυτά τα στοιχεία για κάθε συνδρομητή βρίσκονται αποθηκευμένα στη HLR που διαθέτει κάθε δίκτυο, η οποία επίσης υποστηρίζει τις διαδικασίες χρέωσης και τιμολόγησης. Οι HLR μπορούν να διαχειριστούν δεδομένα για αρκετά εκατομμύρια πελατών και περιέχουν υψηλής ειδικευσης βάσεις δεδομένων οι οποίες είναι κατασκευασμένες για να υλοποιούν συγκεκριμένες, πραγματικού – χρόνου λειτουργίες, απαντώντας στις αιτήσεις για σύνδεση μέσα σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα.

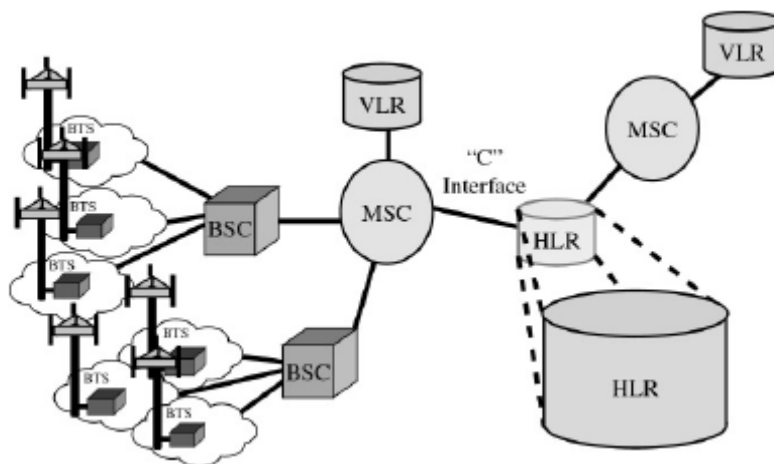
Γενικά, ισχύει ότι όσο πιο γρήγορη είναι η απόκριση από την βάση δεδομένων, τόσο πιο γρήγορα πραγματοποιείται η αποκατάσταση της σύνδεσης.

Μόλις ένας κινητός σταθμός αφήσει την τρέχουσα θέση του, το πεδίο στην HLR που συγκρατεί την πληροφορία για την γεωγραφική θέση του συνδρομητή ενημερώνεται για την αλλαγή. Η ενημέρωση αυτή είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό της θέσης ενός κινητού συνδρομητή στο διεθνές δίκτυο GSM. Γενικά, υπάρχει μία μόνο HLR σε κάθε PLMN. Η οργάνωση αυτή εξαρτάται από τον αριθμό των συνδρομητών, την ικανότητα επεξεργασίας και αποθήκευσης που έχουν οι μεταγωγοί και τη δομή του δικτύου.

Πέρα από τις στατικές εγγραφές, όπως είναι οι συνδρομητικές υπηρεσίες, τα αποθηκευμένα δεδομένα περιέχουν επίσης ένα σύνδεσμο που καταδεικνύει την τρέχουσα θέση του κινητού σταθμού. Η HLR δεν ασκεί ελεγκτικό ρόλο στο MSC, αλλά λειτουργεί περισσότερο ως κεντρικός καταχωρητής. Λόγω της ιδιαίτερης σημασίας που παρουσιάζει η HLR καθώς και η ευαισθησία της στα αποθηκευμένα δεδομένα, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη και να αντιμετωπίζεται κάθε

παράγοντας που θα μπορούσε να διακόψει την εύρυθμη λειτουργία της HLR ή ακόμη και να προκαλέσει απώλεια των συνδρομητικών δεδομένων.

Το ακόλουθο σχήμα αποτυπώνει την δεσπόζουσα θέση που κατέχει η HLR μέσα στο NSS.



Σχήμα 1.9: Η θέση της HLR μέσα στο NSS

1.3.2.3 Βάση Δεδομένων Επισκεπτών (VLR)

Η VLR είναι ένας δυναμικός καταχωρητής που αποθηκεύει όλη την απαραίτητη πληροφορία που σχετίζεται με τους κινητούς σταθμούς, οι οποίοι βρίσκονται στην περιοχή υπηρεσιών του εξυπηρετούντος MSC (πχ. IMSI, MSISDN, HLR address). Η πληροφορία αυτή, η οποία προέρχεται και αποτελεί τμήμα της πληροφορίας που είναι αποθηκευμένη στην HLR, είναι αναγκαία για τον έλεγχο της κλήσης (Call Control – CC) και την παροχή συνδρομητικών υπηρεσιών για κάθε κινητό σταθμό που βρίσκεται στην περιοχή ευθύνης της VLR.

Κάθε VLR είναι υπεύθυνη για την γεωγραφική περιοχή υπηρεσιών ενός ή περισσότερων MSC. Οι κινητοί σταθμοί περιάγονται ελεύθερα και επομένως, ανάλογα με την τρέχουσα θέση τους, εγγράφονται σε μία από τις VLR του οικείου δικτύου ή σε κάποια VLR του επισκεπτόμενου δικτύου (εφόσον υπάρχει συμφωνία περιαγωγής μεταξύ των δύο παρόχων δικτύων κινητής τηλεφωνίας). Για το λόγο αυτό, όταν ένας κινητός σταθμός εισέρχεται σε νέα θέση εντοπισμού, ξεκινά η διαδικασία εγγραφής του στην αντίστοιχη VLR.

Το MSC, στην περιοχή ευθύνης του οποίου περιάγεται ο κινητός σταθμός, στέλνει στη VLR στοιχεία για την ταυτοποίηση και την τρέχουσα θέση του κινητού σταθμού, η οποία εν συνεχεία εγγράφει αυτά τα στοιχεία στους καταχωρητές της. Εάν είναι η

πρώτη φορά που ο κινητός σταθμός εγγράφεται στη συγκεκριμένη VLR, τα στοιχεία αυτά στέλνονται αμέσως στην HLR η οποία ενημερώνεται την τρέχουσα θέση του κινητού σταθμού. Αυτή η διαδικασία καθιστά δυνατή τη δρομολόγηση των εισερχόμενων κλήσεων προς τον κινητό σταθμό. Για λόγους απλοποίησης της απαιτούμενης σηματοδοσίας, οι περισσότεροι κατασκευαστές μεταγωγικού εξοπλισμού υλοποιούν μία VLR μαζί με ένα MSC. Έτσι, η ελεγχόμενη από το MSC γεωγραφική περιοχή συμπίπτει με εκείνη για την οποία υπεύθυνη είναι η VLR.

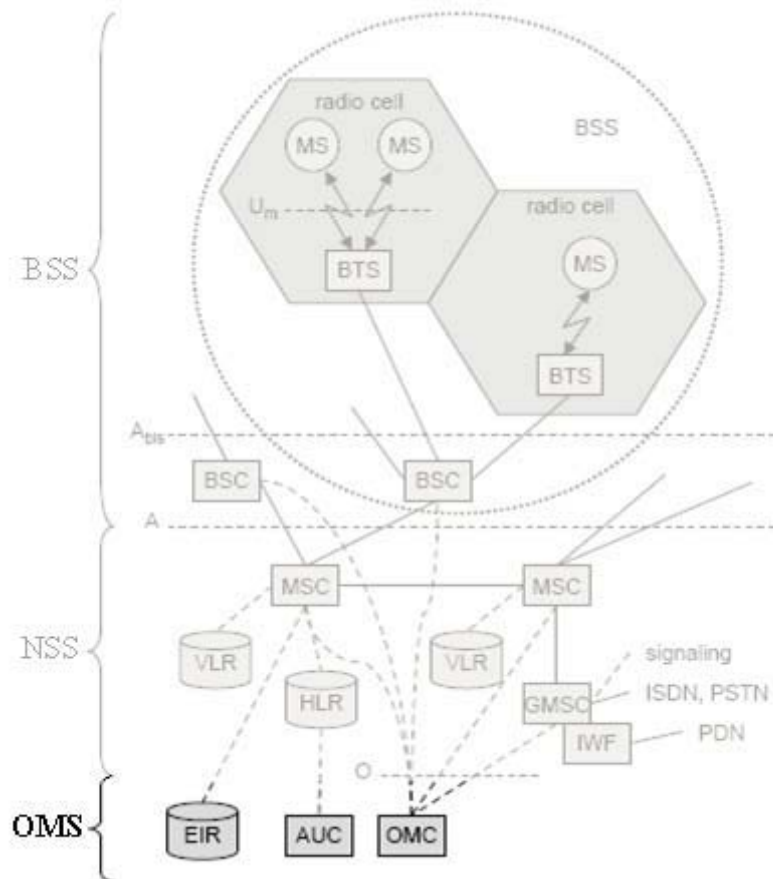
1.3.3 Υποσύστημα Λειτουργίας και Υποστήριξης (OMS)

Το υποσύστημα λειτουργίας και υποστήριξης του GSM, παρέχει τις απαραίτητες λειτουργίες για τον χειρισμό και συντήρηση του δικτύου. Μερικές από αυτές τις λειτουργίες είναι:

- Διαχείριση και εμπορική λειτουργία (χειρισμός) (συνδρομητές, end terminals, χρέωση, στατιστική)
- Διαχείριση ασφαλείας
- Διαμόρφωση δικτύου, χειρισμός, απόδοση διαχείρισης
- Εργασίες συντήρησης

Το OMS σχηματίζεται από δικά του δομικά στοιχεία αλλά έχει πρόσβαση και σε άλλες οντότητες μέσω του συστήματος σηματοδοσίας Νο 7 (SS#7). Τα δομικά στοιχεία που συγκροτούν το OMS είναι τα κάτωθι:

- Κέντρο Εποπτείας και Συντήρησης (Operation and Maintenance Center – OMC)
- Κέντρο Πιστοποίησης (Authentication Center – AuC)
- Κέντρο Πιστοποίησης Εξοπλισμού (Equipment Identity Register – EIR)



Σχήμα1.10: Δομή του OMS σε δίκτυο GSM

1.3.3.1 Κέντρο Εποπτείας και Συντήρησης (OMC)

Το OMC επιβλέπει και ελέγχει όλες τις άλλες οντότητες του δικτύου μέσω της διεπαφής O (SS7 και X.25).

Οι τυπικές λειτουργίες διαχείρισης του OMC είναι:

- Παρακολούθηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης
- Αναφορά λειτουργικής κατάστασης από τις οντότητες του δικτύου
- Διαχείριση συνδρομητών και ασφάλειας και
- Διαδικασίες τιμολόγησης (billing).

Οι συναρτήσεις χειρισμού και υποστήριξης στα OMC χρησιμοποιούν την έννοια του δικτύου τηλεπικοινωνιακής διαχείρισης (Telecommunication Management Network – TMN), όπως ακριβώς προτυποποιείται από το ITU – T (Telecommunication Management Network – TMN), σύμφωνα με το οποίο η διαχείριση συγκεντρώνεται σε ένα ή περισσότερα κέντρα διαχείρισης δικτύου (Network Management Centers – NMC).

1.3.3.2 Κέντρο Πιστοποίησης (AuC)

Η διεπαφή αέρα και οι κινητοί σταθμοί είναι ευάλωτοι από πλευράς ασφάλειας στη μετάδοση πληροφοριών. Για τον λόγο αυτό, ένα ξεχωριστό κέντρο πιστοποίησης έχει οριστεί για να διασφαλίσει την ταυτότητα του συνδρομητή, να αποτρέψει την παράνομη εισχώρηση τρίτων στο σύστημα και γενικά να εγγυηθεί το απόρρητο της επικοινωνίας.

Συγκεκριμένα, αρμοδιότητα του κέντρου πιστοποίησης είναι παράγει με αλγοριθμικές διαδικασίες τους εξής τρεις κωδικούς και κλειδες αναγνώρισης:

- Ένας τυχαίος αριθμός (Random Number – RAND)
- Μία ενυπόγραφη απόκριση (Signed Response – SRES). Η απάντηση αυτή συγκρίνεται, από τη βάση επίσκεψης που διενεργεί την πιστοποίηση, με εκείνη που παράγεται με συμμετοχή της έξυπνης κάρτας στον κινητό σταθμό
- Ένα ειδικό κλειδί κρυπτογράφησης (Ciphering Key – Kc) το οποίο μαζί με τον αλγόριθμο A5 χρησιμεύει στην κρυπτογράφηση/αποκρυπτογράφηση της ομιλίας, των δεδομένων και της σηματοδότησης επί της ραδιοηλεκτρικής οδού.

Στην παραγωγή των αλγορίθμων συμμετέχει και ο κινητός σταθμός με αποστολή στοιχείων όταν του ζητούνται. Μία τουλάχιστον νέα τριάδα πρέπει να είναι διαθέσιμη κάθε στιγμή ανά συνδρομητή μέσα στην HLR, για να χρησιμοποιηθεί μόλις ένα κέντρο ή μια βάση επίσκεψης τη ζητήσει.

Το κέντρο αυτό περιέχει επίσης τους αλγόριθμους πιστοποίησης αυθεντικότητας όπως επίσης τα κλειδιά για την κρυπτογράφηση (κρυφό κλειδί Ki το οποίο δεν μεταδίδεται ποτέ στον αέρα και είναι γνωστό μόνο στην HLR και την SIM) και παράγει τις τιμές που απαιτούνται για την αυθεντικότητα του συνδρομητή στην HLR. Το AuC συνήθως, στην πράξη, τοποθετείται σε ένα ειδικά φυλασσόμενο χώρο μέσα στη HLR.

1.3.3.3 Κέντρο Πιστοποίησης Εξοπλισμού (EIR)

Η βασική λειτουργία του EIR είναι η εποπτεία των κινητών σταθμών και η φραγή όσων δεν έχουν το δικαίωμα να εξυπηρετούνται. Τα περιεχόμενα του κέντρου αυτού (λευκές, γκρι και μαύρες λίστες) μπορούν να μεταβάλλονται μέσω εντολών από το κέντρο εποπτείας και συντήρησης.

Οι κινητοί σταθμοί που βρίσκονται στις λευκές λίστες είναι αποδεκτοί από το σύστημα και ελεύθεροι να επικοινωνήσουν. Οι ευρισκόμενοι σε γκρι λίστα παρακολουθούνται και σε μαύρη είναι φραγμένοι. Σε γκρι λίστα καταχωρείται ένας κινητός σταθμός όταν π.χ. παρακολουθείται η δραστηριότητα του ή ελέγχεται προς ανίχνευση πιθανής βλάβης. Ο EIR διατηρεί τη μαύρη λίστα για τις κλεμμένες ή κλειδωμένες συσκευές. Θεωρητικά, ένας κινητός σταθμός καθίσταται άχρηστος για όσο χρονικό διάστημα ο ιδιοκτήτης του έχει αναφέρει την κλοπή. Δυστυχώς όμως, οι μαύρες λίστες διαφορετικών πάροχων κινητών υπηρεσιών δεν είναι, συνήθως, συγχρονισμένες μεταξύ τους και επομένως η παράνομη χρήση της συσκευής στο δίκτυο άλλου πάροχου είναι δυνατή.

Μόλις το κέντρο πιστοποίησης εξοπλισμού λάβει αίτημα από το MSC για ένα κινητό σταθμό, τότε ψάχνει να τον βρει στις τρεις λίστες. Στη συνέχεια στέλνει μία απάντηση για αυτόν σε ποια λίστα ανήκει ή αν είναι άγνωστος, οπότε το MSC προχωρεί στις κατάλληλες ενέργειες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί μια εισαγωγή στα κυψελωτά συστήματα κινητής τηλεφωνία. Συγκεκριμένα, αναλύεται η κυψελωτή ιδέα, η οποία ουσιαστικά έθεσε τις βάσεις για την μεγάλη εμπορική επιτυχία που γνωρίζει στις μέρες μας η κινητή τηλεφωνία. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι στρατηγικές εκχώρησης καναλιών και μεταγωγής κλήσεων που εξασφαλίζουν την «φυσική» συνέχεια των συνδέσεων και διευρύνουν την λειτουργικότητα του συστήματος. Εν συνεχεία, περιγράφεται σε γενικές γραμμές η θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που «κρύβεται» πίσω από κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα.

2.1 Εισαγωγή

Τα ασύρματα και κινητά συστήματα επικοινωνιών αποτελούν μία ενιαία οντότητα στα σημερινά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Παρά το σχετικό κόστος των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, η δυνατότητα που δίνεται στους χρήστες – συνδρομητές να είναι αποδεδειγμένοι από ένα σταθερό τηλεπικοινωνιακό καλώδιο και ένα έχουν μία περισσότερο προσωπική διεύθυνση, έχει οδηγήσει στη ραγδαία αύξηση της δημοτικότητας αυτών των συστημάτων.

Μία πληθώρα από υπάρχουσες τεχνολογίες βρίσκεται σήμερα κάτω από την «ομπρέλα » των κινητών επικοινωνιών. Αυτές περιλαμβάνουν αναλογικά και ψηφιακά κυψελωτά συστήματα, δορυφορικά συστήματα, ασύρματη τηλεφωνία, συστήματα τηλεειδοποίησης και ασύρματα τοπικά δίκτυα.

Από την αρχή της τρέχουσας δεκαετίας ο στόχος που είχε τεθεί στον τομέα των κινητών επικοινωνιών ήταν η άρση των τεχνικών περιορισμών των προαναφερθέντων τεχνολογιών και ο συγκερασμός των πλεονεκτημάτων τους με στόχο την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, εκτός την « παραδοσιακή » μετάδοση φωνής και δεδομένων. Τα συστήματα που προέκυψαν κάτω από αυτό το πρίσμα και έγιναν γνωστά ως συστήματα Τρίτης Γενιάς (3G), έκαναν πραγματικότητα ανάπτυξη ενός καθολικού συστήματος προσωπικών επικοινωνιών, ενώ το πρότυπο που επικράτησε παγκοσμίως για την περιγραφή τους είναι το UMTS. Από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών.

2.2 Η Εξέλιξη των Κινητών Κυψελωτών

Η μέχρι σήμερα εξέλιξη των κυψελωτών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας έγινε σταδιακά σε τρεις γενιές. Οι υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας πρώτης γενιάς (1st Generation – 1G) εισήχθησαν για πρώτη φορά με την έλευση των αναλογικών κυψελωτών συστημάτων στις αρχές της δεκαετίας του '80. Τα συστήματα αυτά βασίστηκαν σε αναλογικές τεχνολογίες μετάδοσης και επεξεργασίας και λειτούργησαν με βάση την τεχνική FDMA, στην οποία όλα τα κανάλια φωνής χωρίζονται από διαφορετικούς φορείς συχνότητας με ένα σχετικά μικρό εύρος ζώνης (συνήθως περίπου 30 – 50 KHz). Κάθε τέτοιο σύστημα κάλυπτε γεωγραφικά μία μόνο χώρα ή μια σχετικά μεγάλη αστική περιοχή και η χωρητικότητά του ήταν μικρή εξαιτίας της χαμηλής αποδοτικότητας των τεχνικών που καθόριζαν την κατανομή του ραδιοφάσματος. Τα συστήματα αυτά υποστήριζαν μόνο την υπηρεσία μετάδοσης φωνής. Η τεχνολογία αυτή, αν και παρωχημένη, χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα σε πολλά μέρη του κόσμου.

Η ολοένα και αυξανόμενη απαίτηση για καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας και περισσότερες υπηρεσίες δημιούργησε τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς (2G), τα οποία είναι ψηφιακής τεχνολογίας και παρέχουν αναβαθμισμένες υπηρεσίες κινητών επικοινωνιών. Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών είναι η ιεραρχική δομή τους, η αποδοτική διαχείριση του ραδιοφάσματος των συχνοτήτων, η δυνατότητα εξυπηρέτησης μεγάλου αριθμού χρηστών και το πρότυπο επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων (frequency re – use pattern). Έτσι μπορούν να παρέχουν βελτιωμένη ποιότητα φωνής και μεγάλη κάλυψη συνδρομητών. Τα συστήματα 2^{ης} γενιάς έχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης και έχουν τυποποιηθεί για να παρέχουν υπηρεσίες μετάδοσης φωνής αλλά και χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Τα συστήματα αυτά διατηρούν την τεχνική μεταγωγής κυκλώματος (circuit switching) των αναλογικών συστημάτων, η οποία δεν είναι αποτελεσματική για την μετάδοση δεδομένων. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, για την επικοινωνία των συνδρομητών καθορίζεται ένας συγκεκριμένος ραδιοδίαυλος, ο οποίος παραμένει στην αποκλειστική διάθεσή τους για όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας. Έτσι, γίνεται αποδοτική η μετάδοση φωνής, που είναι ο πρωταρχικός σκοπός των συστημάτων κινητών επικοινωνιών, καθώς εισάγονται πολύ μικρές καθυστερήσεις.

Τα τέσσερα πιο διαδεδομένα πρότυπα ψηφιακής κινητής τηλεφωνίας 2^{ης} γενιάς σε όλο τον κόσμο είναι τα εξής: GSM , TDMA (IS – 136), CDMA (cdmaOne ή IS – 95 – B) και PDC. Όλα τα παραπάνω υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 9.6 Kbps.

Οι απαιτήσεις όμως για μεγαλύτερες ταχύτητες στη μετάδοση δεδομένων ολοένα και πολλαπλασιάζονται. Επιπλέον, δημιουργούνται νέες υπηρεσίες, όπως για παράδειγμα το ασύρματο ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e – mail), η περιήγηση στο διαδίκτυο, καθώς

και εφαρμογές ροής πολυμέσων, όπως η τηλεδιάσκεψη, το ηλεκτρονικό εμπόριο και τα πολυμέσα, οι οποίες απαιτούν νέα και πιο γρήγορα συστήματα, ώστε να μπορέσουν να υλοποιηθούν στην πράξη. Για τον λόγο αυτό, τυποποιήθηκαν και αναπτύχθηκαν τα συστήματα τρίτης γενιάς (3G), τα οποία ήδη αποτελούν πραγματικότητα και αναμφίβολα ένα αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας. Τα συστήματα αυτά βασίζονται αποκλειστικά σε μικρο – κυψελωτή (micro – cellular) και πικο – κυψελωτή (pico – cellular) δομή, ενώ οι τελικές συχνότητες λειτουργίας τους ανήκουν στη φασματική περιοχή των 50 – 60 GHz, προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενοι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων οι οποίοι αναμένεται να είναι της τάξης των 155 Mbps.

Διάφορα πρότυπα έχουν αναπτυχθεί για να υποστηρίξουν τα συστήματα 3ης γενιάς. Μερικά από αυτά είναι το CDMA – 2000, το οποίο αποτελεί εξέλιξη του CDMA One της 2ης γενιάς ενώ η μετάβασή του στην 3η γενιά έγινε σταδιακά σε δύο φάσεις καθεμιά εκ των οποίων περιγράφεται από τα πρότυπα 1X και 3X αντίστοιχα, το πρότυπο TD – CDMA που χρησιμοποιεί συνδυασμό των μεθόδων πολλαπλής πρόσβασης TDMA και CDMA και το πρότυπο UWC – 136 το οποίο είναι ένα από τα λίγα που χρησιμοποιεί αποκλειστικά την μέθοδο TDMA χωρίς καθόλου στοιχεία από την CDMA. Ωστόσο, το πρότυπο εκείνο που έχει επικρατήσει σε όλο τον κόσμο και χαρακτηρίζει την 3η γενιά τηλεπικοινωνιακών συστημάτων είναι το UMTS (Universal Mobile Telephone System – UMTS). Το UMTS βασίζεται στην τεχνολογία Ευρεία Ζώνη Πολλαπλή Πρόσβαση με Επιμερισμό Κώδικα WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access – WCDMA). Η W-CDMA έχει σχεδιαστεί για να υλοποιεί υπηρεσίες υψηλής μετάδοσης δεδομένων (σε περιβάλλον γραφείου ο ρυθμός μετάδοσης φτάνει τα 2Mbps ενώ σε κινητό περιβάλλον τα 384 Kbps) χρησιμοποιώντας το διαδίκτυο ενώ υποστηρίζει επικοινωνίες είτε με την τεχνική μεταγωγής πακέτου είτε με μεταγωγή κυκλώματος. Διαχειρίζεται δυναμικά – αποτελεσματικά το ραδιοφάσμα με αποτέλεσμα να παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα και κάλυψη σε σχέση με προηγούμενες τεχνολογίες, ενώ χρησιμοποιεί το σύστημα σηματοδότησης No 7 (Signaling System # 7 – SS#7). Τέλος, είναι επίσης συμβατή με τις τεχνολογίες 2ης γενιάς.

Στην ενότητα που ακολουθεί γίνεται μια ανάλυση της κυψελωτής δομής δεδομένου ότι είναι αναγκαία προϋπόθεση για την κατανόηση των σημερινών και των μελλοντικών συστημάτων κινητών επικοινωνιών

2.3 Ανάλυση της Κυψελωτής Δομής

Οι αρχικές υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας λειτουργούσαν με ένα κεντρικό σταθμό βάσης ο οποίος εξυπηρετούσε μία μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία αυτή παρείχε πολύ καλή κάλυψη, ένα σημαντικό μειονέκτημα των συμβατικών αυτών συστημάτων ήταν ότι όλοι οι σταθμοί βάσης διαχειρίζονταν τις ίδιες συχνότητες. και επομένως η μεταξύ τους απόσταση έπρεπε να είναι αρκετά μεγάλη για να αποφεύγονται προβλήματα παρεμβολών. Ως εκ τούτου, ελάχιστοι ραδιοδιαύλοι ήταν διαθέσιμοι και άρα ελάχιστοι κινητοί συνδρομητές μπορούσαν να υποστηριχτούν από το σύστημα διατηρώντας ταυτόχρονα έναν ικανοποιητικό βαθμό υπηρεσιών.

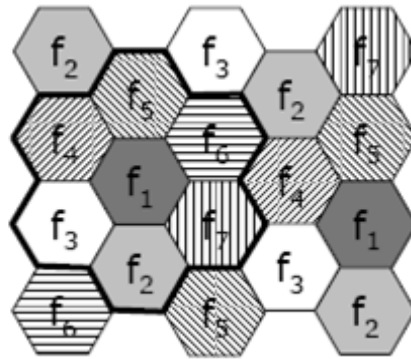
Με την έλευση των Κυψελωτών Συστημάτων Κινητής Τηλεφωνίας στις αρχές της δεκαετίας του '80, οι κινητοί συνδρομητές είχαν πρόσβαση σε ένα σύνολο από επικοινωνιακές υπηρεσίες εντός των γεωγραφικών ορίων της λειτουργικής τηλεπικοινωνιακής περιοχής. Αυτό έγινε πραγματικότητα με τον επιμερισμό της περιοχής υπηρεσιών των συστημάτων αυτών σε μικρότερες γεωγραφικές περιοχές, τις κυψέλες (cells), κάθε μία εκ των οποίων καλύπτεται ηλεκτρομαγνητικά από ένα μόνο σταθμό βάσης. Σε κάθε τέτοιο σταθμό βάσης εκχωρείται ένας ορισμένος αριθμός από το σύνολο των συχνοτήτων που διαθέτει ολόκληρο το σύστημα. Το πλεονέκτημα της κυψελωτής δομής είναι ότι οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε μία κυψέλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε άλλη αρκεί να ισχύει ο παρακάτω περιορισμός:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (2.1)$$

όπου D είναι η απόσταση των κέντρων δύο διαδοχικών συγκαταληκτών κυψελών (δηλαδή κυψελών που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες), R είναι η ακτίνα της κυψέλης ενώ N είναι το σύνολο των γειτονικών κυψελών που χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες και καλείται μέγεθος κυψελωτού συγκροτήματος (cluster size). Η σχέση αυτή προκύπτει από την απαίτηση της ικανοποιητικής απόστασης μεταξύ ίδιων καναλιών, προκειμένου να αποφεύγεται η ομο - καναλική παρεμβολή (co - channelinterference).

Καθώς αυξάνει η ζήτηση για επικοινωνιακές υπηρεσίες και επομένως περισσότερα κανάλια χρειάζονται σε μία συγκεκριμένη αγορά, ο αριθμός των σταθμών βάσης μπορεί να αυξάνει επίσης, παράλληλα με μία αντίστοιχη μείωση της ισχύος εκπομπής για να αποφευχθεί επιπρόσθετη παρεμβολή, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό επιπλέον χωρητικότητα στο σύστημα χωρίς περαιτέρω αύξηση του ραδιοφάσματος. Αυτή η

βασική αρχή αποτελεί τον θεμέλιο λίθο όλων των σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων, καθώς δίνει τη δυνατότητα σε ένα σταθερό αριθμό από κανάλια να εξυπηρετεί έναν αυθαίρετα μεγάλο αριθμό από συνδρομητές επαναχρησιμοποιώντας τα κανάλια στην περιοχή υπηρεσιών.



Σχήμα 2.1: Κυψελωτή ιδέα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων

Το σχήμα 2.1 απεικονίζει την κυψελωτή ιδέα της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, όπου οι κυψέλες με την ίδια σκιαγράφηση χρησιμοποιούν την ίδια ομάδα καναλιών. Στο ίδιο σχήμα το έντονο περίγραμμα οριοθετεί το κυψελωτό συγκρότημα αποτελούμενο από επτά κυψέλες (7 cell cluster). Στο κυψελωτό συγκρότημα διανέμονται όλες οι συχνότητες που διαθέτει το σύστημα. Η κατανομή των συχνοτήτων μέσα στο κυψελωτό συγκρότημα γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε κυψέλη να χρησιμοποιεί μία ομάδα καναλιών τα οποία είναι εντελώς διαφορετικά από τα κανάλια που χρησιμοποιούν οι γειτονικές της κυψέλες, ενώ οι σταθμοί βάσης είναι υπεύθυνοι για να παρέχουν την απαιτούμενη ραδιοκάλυψη μέσα στα γεωγραφικά όρια κάθε κυψέλης.

Το εξαγωνικό σχήμα των κυψελών είναι ιδεαλιστικό και δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα. Στην ουσία πρόκειται για μία καθολικά αποδεκτή, απλουστευτική προσέγγιση της ραδιοκάλυψης για κάθε σταθμό βάσης που μας επιτρέπει μια εύκολη ανάλυση του κυψελωτού συστήματος. Στην πραγματικότητα το γεωγραφικό ίχνος των κυψελών είναι άμορφο και καθορίζεται από μετρήσεις H/M πεδίου και μοντέλα πρόβλεψης της απώλειας διάδοσης.

2.4 Χωρητικότητα και Ομο-Καναλική Παρεμβολή στα Συστήματα

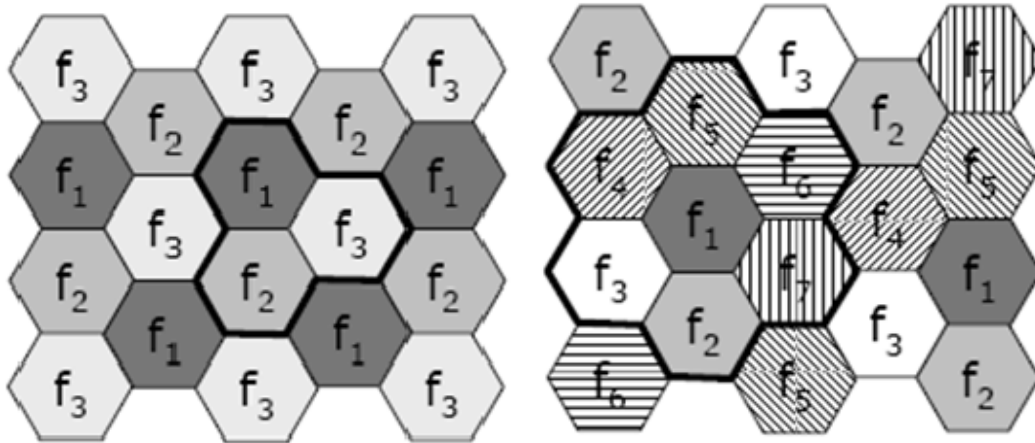
Ας θεωρήσουμε ένα κυψελωτό συγκρότημα μεγέθους N το οποίο διαθέτει έναν συνολικό αριθμό από S αμφίδρομα κανάλια για παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Εάν σε κάθε κυψέλη εκχωρείται μία ομάδα από k κανάλια ($k < S$), τότε ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων ραδιοκαναλιών εκφράζεται ως εξής:

$$S = k \cdot N \quad (2.2)$$

Εάν το κυψελωτό συγκρότημα επαναλαμβάνεται M φορές μέσα στο σύστημα, τότε ο συνολικός αριθμός των αμφίδρομων καναλιών C , μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέτρο της χωρητικότητας του συστήματος και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

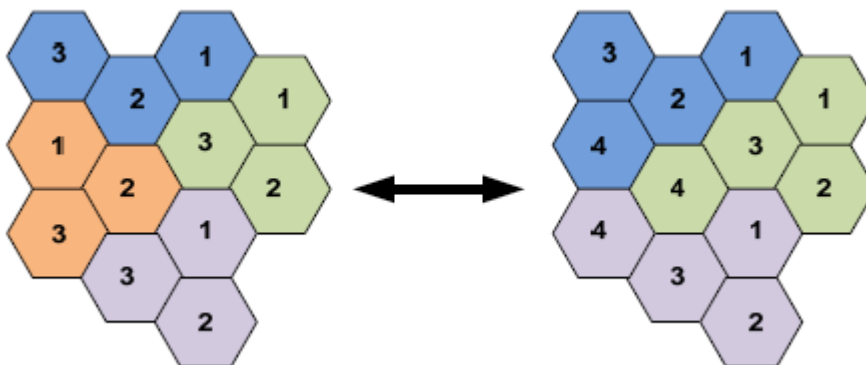
$$C = M \cdot k \cdot N = M \cdot S \quad (2.3)$$

Από την (2.3) είναι φανερό ότι η χωρητικότητα ενός κυψελωτού συστήματος είναι ευθέως ανάλογη του αριθμού επανάληψης του κυψελωτού συγκροτήματος μέσα στο σύστημα. Εάν συρρικνωθεί το μέγεθος του κυψελωτού συγκροτήματος N , ενώ το μέγεθος των κυψελών παραμένει σταθερό, περισσότερα κυψελωτά συγκροτήματα απαιτούνται για την κάλυψη μιας δεδομένης γεωγραφικής περιοχής και επομένως περισσότερη χωρητικότητα επιτυγχάνεται για το σύστημα. Από την (2.1) προκύπτει ότι για ένα μεγάλο μέγεθος κυψελωτού συγκροτήματος, ο λόγος ανάμεσα στην απόσταση μεταξύ των συγκαναλικών κυψελών και της ακτίνας της κυψέλης είναι μεγάλος, ενώ αντίθετα για μικρή τιμή του N οι συγκαναλικές κυψέλες είναι τοποθετημένες πιο κοντά η μία στην άλλη (Σχήμα 2.2). Η τιμή του N είναι συνάρτηση της παρεμβολής που μπορεί να ανεχτεί ένας κινητός σταθμός ή σταθμός βάσης ενώ διατηρεί ταυτόχρονα ένα ικανοποιητικό επίπεδο υπηρεσιών. Από την πλευρά των σχεδιαστών κυψελωτών συστημάτων κινητών επικοινωνιών, η τιμή του N πρέπει να είναι η μικρότερη δυνατή για την επίτευξη της μέγιστης χωρητικότητας σε μία συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης.



Σχήμα 2.2: Το μέγεθος του κυψελωτού συγκροτήματος καθορίζει την απόσταση μεταξύ συγκαναλικών κυψελών

Η ομο-καναλική παρεμβολή, σε αντίθεση με τον θόρυβο ο οποίος μπορεί να ξεπεραστεί αυξάνοντας τον λόγο σήματος προς θόρυβο (*SNR*), δεν αντιμετωπίζεται αυξάνοντας απλά την στάθμη ισχύος της φέρουσας συχνότητας εκπομπής. Μόνο μέσα από κατάλληλο χωρικό διαχωρισμό είναι δυνατόν να πετύχουμε επαρκή Η/Μ «απομόνωση» των συγκαναλικών κυψελών. Μία άλλη θεμελιώδης έννοια των κυψελωτών συστημάτων είναι η κυψελωτή διάσπαση. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση του προβλήματος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, σε ώρες αιχμής η λειτουργία του συστήματος καθίσταται πολλές φορές προβληματική. Στην περίπτωση αυτή, οι καταχωρημένες συχνότητες σε μία κυψέλη δεν επαρκούν για την εξυπηρέτηση των χρηστών. Τότε υφίσταται στο σύστημα κυψελωτή διάσπαση με τέτοιο τρόπο, ώστε ο νέος σχηματισμός κυψελών να επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων συχνοτήτων. Το σχήμα 2.3 παρουσιάζει ένα παράδειγμα κυψελωτής διάσπασης από τάξη συγκροτήματος κυψελών 3 σε τάξη 4 και αντίστροφα. Έτσι, με τις τεχνικές της επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων και της κυψελωτής διάσπασης, το σύστημα είναι ικανό να αντεπεξέλθει σε συνθήκες υψηλής τηλεπικοινωνιακής κίνησης και να εξυπηρετήσει το μεγάλο αριθμό συνδρομητών με τις περιορισμένες διαθέσιμες συχνότητες.



Σχήμα 2.3 :Κυψελωτή διάσπαση
[40]

2.5 Στρατηγικές Εκχώρησης Καναλιών

Για την αποτελεσματική αξιοποίηση του ραδιοφάσματος, έχουν προταθεί διάφορες στρατηγικές εκχώρησης καναλιών οι οποίες ικανοποιούν την απαίτηση για αυξημένη χωρητικότητα και ελάχιστη παρεμβολή. Οι στρατηγικές αυτές ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, τις *σταθερές* και τις *δυναμικές*, και η επιλογή τους είναι καθοριστικής σημασίας για την απόδοση του συστήματος.

Στην περίπτωση της στρατηγικής με σταθερή εκχώρηση καναλιών (Fixed Channel Assignment – FCA), σε κάθε κυψέλη διατίθεται ένα προκαθορισμένο σύνολο από κανάλια για μετάδοση φωνής. Κάθε προσπάθεια για κλήση μέσα στην κυψέλη εξυπηρετείται από τα κανάλια που παραμένουν διαθέσιμα στη συγκεκριμένη κυψέλη. Εάν όμως ένας κινητός σταθμός κάνει μία αίτηση για κλήση σε ένα σταθμό βάσης ο οποίος έχει ήδη εκχωρήσει όλα τα κανάλια που έχει στη διάθεση του, τότε η κλήση θα απορριφθεί και ο συνδρομητής δεν θα εξυπηρετηθεί. Η FCA μπορεί να χειριστεί τις χωρικές διακυμάνσεις που παρουσιάζει ο όγκος του τηλεπικοινωνιακού φορτίου διαθέτοντας περισσότερα κανάλια στις περισσότερο « απασχολημένες » κυψέλες, όμως δεν είναι καθόλου αποτελεσματική στην αντιστάθμιση των βραχυχρόνιων διακυμάνσεων στο τηλεπικοινωνιακό φορτίο. Μία περισσότερο ευέλικτη στρατηγική είναι η δυναμική εκχώρηση καναλιών (Dynamic Channel Assignment – DCA).

Η DCA δεν θέτει περιορισμούς για το ποια κανάλια θα χρησιμοποιούνται από κάθε κυψέλη. Σε κάθε κυψέλη μπορεί να εκχωρηθεί οποιοδήποτε κανάλι με την προϋπόθεση ότι δεν παραβιάζονται οι περιορισμοί στην επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας.

Συγκεκριμένα, κάθε φορά που γίνεται αίτηση για κλήση, ο σταθμός βάσης που καλύπτει την περιοχή υπηρεσιών της κυψέλης ζητάει ένα κανάλι από το MSC. Εν συνεχεία, το MSC παραχωρεί ένα κανάλι στην κυψέλη από την οποία προήλθε η αίτηση σύμφωνα με έναν αλγόριθμο ο οποίος λαμβάνει υπόψη την πιθανότητα μελλοντικής απόρριψης μέσα στην κυψέλη, την συχνότητα χρήσης του υποψήφιου καναλιού, την απόσταση επαναχρησιμοποίησης του καναλιού και άλλες λειτουργικές παραμέτρους. Το εκτιμώμενο κέρδος σε σχέση με την FCA κυμαίνεται από 10% - 20% στα τυπικά λειτουργικά σημεία (Grade of Service – GoS)

Η DCA μειώνει την πιθανότητα απόρριψης, η οποία αυξάνει την χωρητικότητα της από κοινής χρήσης των πόρων του συστήματος (trunking capacity) αφού όλα τα διαθέσιμα κανάλια σε μια αγορά είναι προσπελάσιμα από όλες τις κυψέλες. Η DCA απαιτεί από το MSC να συλλέγει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για το διάστημα που είναι κατειλημμένο το κανάλι, για την κατανομή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και τις ενδείξεις στάθμης των σημάτων από όλα τα κανάλια σε συνεχή βάση. Αυτό έχει

το κόστος ότι αυξάνει την αποθήκευση και τον υπολογιστικό φόρτο στο σύστημα αλλά παρέχει το πλεονέκτημα της αποτελεσματικής αξιοποίησης του ραδιοφάσματος και μειωμένη πιθανότητα απόρριψης μιας κλήσης. Η ευελιξία που προσφέρει ο μηχανισμός της DCA μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω με τη χρήση μετρήσεων πραγματικού χρόνου των επιπέδων παρεμβολής, για να ληφθεί η απόφαση εάν μπορεί να εκχωρηθεί ένα κανάλι ή όχι. Αυτό είναι περισσότερο γενικό από την χρήση των περιορισμών επαναχρησιμοποίησης, οι οποίοι υπολογίζονται κάτω από δυσμενείς υποθέσεις. Αυτή η τεχνική θα καλείται δυναμική εκχώρηση πόρων (**Dynamic Resource Assignment – DRA**) για να την ξεχωρίζουμε από την DCA. Ανάμεσα στις δύο ακραίες περιπτώσεις των FCA και DCA βρίσκονται διάφορες άλλες στρατηγικές που είναι απλούστερες από την DCA αλλά περισσότερο ευέλικτες από την FCA. Αυτές περιλαμβάνουν υβριδικά σχήματα, κατευθυνόμενη επανάκληση και κατευθυνόμενη μεταγωγή.

2.6 Μεταγωγή των Κλήσεων

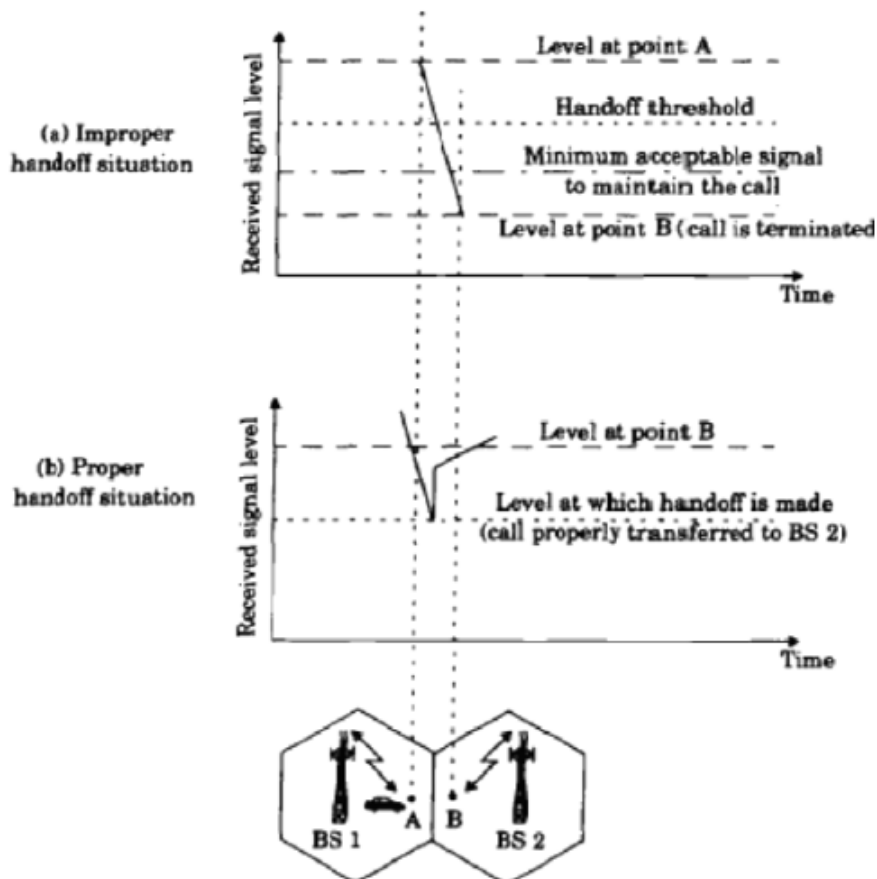
Όταν ένας κινητός σταθμός απομακρύνεται από τα όρια μιας κυψέλης ενώ η συνδιάλεξη είναι σε εξέλιξη, το MSC αυτομάτως εκχωρεί στην κλήση ένα νέο κανάλι το οποίο ανήκει στον νέο σταθμό βάσης, στην περιοχή ευθύνης του οποίου βρίσκεται τώρα ο κινητός σταθμός. Η διαδικασία αυτή καλείται **μεταγωγή (handoff** στα κυψελωτά συστήματα 1ης γενιάς και **handover** για τα συστήματα 2ης γενιάς) και περιλαμβάνει σε πρώτο στάδιο τον εντοπισμό του νέου σταθμού βάσης και στη συνέχεια την απαίτηση από αυτόν για παραχώρηση καναλιών για μεταφορά ομιλίας και σηματοδότησης. Η μεταγωγή είναι μία πολύ σημαντική διαδικασία σε όλα τα κυψελωτά ραδιοσυστήματα διότι εξασφαλίζει τη φυσική συνέχεια της κλήσης. Πολλές στρατηγικές μεταγωγής δίνουν προτεραιότητα στις αιτήσεις για μεταγωγή σε σχέση με άλλες λειτουργικές διαδικασίες όπως είναι για παράδειγμα οι αιτήσεις για αποκατάσταση ή τερματισμό επικοινωνίας.

Η μεταγωγή πρέπει να εκτελείται με επιτυχία, να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο συχνή και να μην γίνεται αντιληπτή στους χρήστες. Για τον λόγο αυτό, οι σχεδιαστές συστημάτων έχουν καθορίσει ένα βέλτιστο επίπεδο σήματος *PR,handoff* το οποίο όταν ξεπεραστεί, εκκινεί την διαδικασία της μεταγωγής. Η εκλογή του *PR,handoff* δεν είναι αυθαίρετη αλλά γίνεται με σημείο αναφοράς το ελάχιστο επιτρεπτό επίπεδο σήματος *PR,minimum usable* το οποίο εξασφαλίζει αποδεκτή ποιότητα επικοινωνίας. Προφανώς, εάν η στάθμη του σήματος λάβει τιμές χαμηλότερες από το *PR,handoff* η επικοινωνία θα τερματιστεί και επομένως για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο αυτό, το *PR,handoff* πρέπει να είναι ελαφρώς ισχυρότερο από το *PR,minimum usable*.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, ορίζεται το περιθώριο $\Delta = PR_{handoff} - PR_{minimum\ usable}$, το οποίο δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ μεγάλο ούτε πολύ μικρό.

Εάν το Δ είναι μεγάλο, τότε άσκοπες μεταγωγές λαμβάνουν χώρα με αποτέλεσμα να επιφορτίζεται περαιτέρω η λειτουργία του MSC, ενώ εάν το Δ είναι μικρό, πιθανόν ο χρόνος να μην επαρκεί για την ολοκλήρωση της μεταγωγής και η κλήση να τερματιστεί λόγω χαμηλής στάθμης ισχύος. Επίσης, απόρριψη κλήσης μπορεί να συμβεί σε περιπτώσεις όπου υπάρχει υπερβολική καθυστέρηση, όπως συμβαίνει για παράδειγμα σε συνθήκες μεγάλου φόρτου τηλεπικοινωνιακής κίνησης όπου το MSC επιβαρύνεται με μεγάλο υπολογιστικό φόρτο αλλά και στην περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμα κανάλια στους γειτονικούς σταθμούς οπότε το MSC περιμένει μέχρι να αποδεσμευτεί κάποιο κανάλι.

Στο σχήμα 2.4(α) η μεταγωγή δεν γίνεται και η στάθμη του σήματος πέφτει κάτω από το ελάχιστο επιτρεπτό όριο με αποτέλεσμα η κλήση να τερματίζεται αιφνίδια. Στην περίπτωση του σχήματος 2.4(β), η μεταγωγή ολοκληρώνεται με επιτυχία.



Σχήμα 2.4:(α)Ανεπιτυχής μεταγωγή (β)επιτυχής μεταγωγή (γ)μεταγωγή μεταξύ δυο γειτονικών κυψελών

Το Σχήμα 2.4(γ) αναπαριστά την διαδικασία της μεταγωγής στην περίπτωση που ο κινητός σταθμός κινείται στα γεωγραφικά σύνορα δύο γειτονικών κυψελών.

Πολλές φορές, για λόγους που μπορούν να οφείλονται στο περιβάλλον ραδιοδιάδοσης(π.χ. διάλεια λόγω πολυδυσσης), η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος παρουσιάζει στιγμιαία, απότομα «βυθίσματα», με αποτέλεσμα το MSC να εκκινεί την διαδικασία της μεταγωγής χωρίς όμως να υπάρχει λόγος αφού ο κινητός σταθμός δεν απομακρύνεται από την περιοχή υπηρεσιών του σταθμού βάσης. Για τον λόγο αυτό, ο σταθμός βάσης επιβλέπει το επίπεδο ισχύος του σήματος για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα πριν την διαδικασία της μεταγωγής.

Το χρονικό διάστημα στο οποίο μία κλήση εξυπηρετείται από τον ίδιο σταθμό βάσης χωρίς να λάβει χώρα καμία μεταγωγή ονομάζεται χρόνος παραμονής (dwell time). Ο χρόνος αυτός επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η διάδοση, η παρεμβολή, η απόσταση ανάμεσα στον σταθμό βάσης και τον συνδρομητή και άλλα χρονικά μεταβαλλόμενα φαινόμενα. Έχει προκύψει από μετρήσεις ότι ο χρόνος παραμονής είναι πεπερασμένος και τυχαίος ακόμα και για έναν στατικό συνδρομητή αφού η φυσική κίνηση στον περιβάλλοντα χώρο γύρω από τον σταθμό βάσης και τον κινητό σταθμό επιδρούν καθοριστικά στη στάθμη ισχύος του σήματος.

Στην περίπτωση που ο συνδρομητής κινείται, ο χρόνος παραμονής εξαρτάται από την ταχύτητα του χρήστη και τον τύπο της ραδιοκάλυψης. Για παράδειγμα, εάν ο κινητός σταθμός κινείται με σταθερή ταχύτητα για αρκετό χρονικό διάστημα (π.χ. σε εθνικές οδούς), τότε ο χρόνος παραμονής είναι τυχαία μεταβλητή με κατανομή που εμφανίζει υψηλή συγκέντρωση γύρω από την μέση τιμή του. Για χρήστες που κινούνται σε αστικά κέντρα με υψηλό βαθμό δομικού συνωστισμού, οι χρόνοι παραμονής παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από την μέση τιμή τους και είναι περισσότερο βραχείς από ότι η γεωμετρία της κυψέλης επιβάλλει. Γενικά, στον σχεδιασμό των αλγορίθμων μεταγωγής χρησιμοποιούνται τα στατιστικά στοιχεία που έχουν προκύψει από την μελέτη των χρόνων παραμονής.

Στα αναλογικά κυψελωτά συστήματα πρώτης γενιάς, οι μετρήσεις της στάθμης ισχύος του σήματος γίνονται από τους σταθμούς βάσης και επιβλέπονται από το MSC. Κάθε σταθμός βάσης παρακολουθεί την ισχύ όλων των καναλιών ανερχόμενης ζεύξης (uplink) έτσι ώστε να προσδιορίσει την σχετική απόσταση κάθε κινητού σταθμού ως προς τον ιστό που είναι τοποθετημένες οι κεραιές του σταθμού βάσης. Επίσης, παράλληλα με τους δείκτες της στάθμης ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων, RSSI, (**R**eceived **S**ignal **S**trength **I**ndicators) για τις κλήσεις που είναι σε εξέλιξη, σε κάθε σταθμό βάσης υπάρχει ένας εντοπιστής – δέκτης ο οποίος παρακολουθεί την ισχύ των κινητών σταθμών που βρίσκονται σε γειτονικές κυψέλες. Με βάση όλες τις τιμές των RSSI από κάθε σταθμό βάσης, το MSC αποφασίζει εάν θα εκτελεστεί μεταγωγή ή όχι.

Στα συστήματα δεύτερης γενιάς που χρησιμοποιούν τεχνολογία TDMA, στις αποφάσεις για μεταγωγή συνδράμουν σε μεγάλο βαθμό οι κινητοί σταθμοί (Mobile Assisted Handover – MAHO). Στην περίπτωση αυτή, οι κινητοί σταθμοί λαμβάνουν μετρήσεις από όλους τους περιβάλλοντες σταθμούς βάσης και αναφέρουν συνεχώς τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις στον σταθμό βάσης στην περιοχή υπηρεσιών του οποίου βρίσκονται. Μία μεταγωγή εκκινείται όταν η ισχύς που λαμβάνεται από τον σταθμό βάσης μιας γειτονικής κυψέλης αρχίζει να υπερβαίνει την ισχύ που λαμβάνεται από τον τρέχοντα σταθμό βάσης κατά ένα δεδομένο επίπεδο ή συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι MAHO ταιριάζουν περισσότερο σε μικρο – κυψελωτά περιβάλλοντα όπου οι μεταγωγές είναι συχνότερες και επομένως πρέπει να γίνονται με ταχύτερο ρυθμό.

Κατά τη διάρκεια μιας κλήσης, εάν ένας κινητός σταθμός κινείται από ένα κυψελωτό σύστημα σε ένα άλλο κυψελωτό σύστημα, το οποίο ελέγχεται από ένα διαφορετικό MSC, τότε μια δια – συστηματική μεταγωγή καθίσταται επιτακτική. Ένα MSC καταφεύγει σε μία δια – συστηματική μεταγωγή όταν το σήμα του κινητού σταθμού γίνεται ασθενές σε μία δεδομένη κυψέλη και το MSC δεν μπορεί να εντοπίσει άλλη κυψέλη μέσα στο σύστημα στην οποία να μεταφέρει την υπό εξέλιξη κλήση. Διαφορετικά συστήματα ακολουθούν διαφορετικές μεθόδους και πολιτική για την διαχείριση των αιτήσεων για μεταγωγή. Κάποια συστήματα χειρίζονται τις αιτήσεις για μεταγωγή όπως ακριβώς τις χειρίζονται τα συστήματα από τα οποία προέρχονται οι κλήσεις. Σε τέτοια συστήματα, η πιθανότητα μία αίτηση για μεταγωγή να μην εξυπηρετηθεί από ένα νέο σταθμό είναι ίση με την πιθανότητα απόρριψης μιας εισερχόμενης κλήσης. Παρόλα αυτά, από την πλευρά του χρήστη, το ενδεχόμενο να τερματιστεί απότομα μια κλήση, ενώ η συνδιάλεξη βρίσκεται σε εξέλιξη, είναι περισσότερο εκνευριστικό από το να απορρίπτεται περιστασιακά σε κάθε νέα προσπάθεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΘΕΩΡΙΑ ΟΥΡΩΝ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Στην καθημερινότητα του κάθε ενός από μας είναι ανάγκη να περιμένουμε στην “ουρά”, δηλαδή σε μια σειρά ένας πίσω από τον άλλο, όπως συμβαίνει για παράδειγμα πηγαίνοντας στην τράπεζα για μια συναλλαγή ή όταν περιμένουμε στο ταμείο ενός πολυσύχναστου καταστήματος. Ένα απλό αλλά πολύ σημαντικό ερώτημα σε τέτοιες καταστάσεις είναι το χρονικό διάστημα που θα χρειαστεί να περιμένει κανείς σε μια ουρά. Η μαθηματική μοντελοποίηση, ανάλυση και μελέτη της αναμονής στην ουρά ονομάζεται *θεωρία ουρών* και ξεκίνησε ως κλάδος της Επιχειρησιακής Έρευνας, αφού τα αποτελέσματά της αρχικά αποτέλεσαν κλειδί στη λήψη επιχειρηματικών αποφάσεων. Με τη σύζευξη της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών, αποτέλεσμα της οποίας είναι τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, πολλαπλές εφαρμογές όμως της θεωρίας ουρών προκύπτουν, εκτός των άλλων και στις τηλεπικοινωνίες, όπου μπορούμε να έχουμε την αναμονή αποφάσεων ενός επεξεργαστή (λειτουργικά συστήματα), την αναμονή μετάδοσης πακέτων δεδομένων σε δίκτυα H/Y ή και στην εκτέλεση handovers και κλήσεων σε δίκτυα τηλεφωνίας όπως το GSM.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε τις εφαρμογές της θεωρίας ουρών στην ανάλυση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, με ιδιαίτερη έμφαση στο δίκτυο GSM, η σχεδίαση του οποίου είναι αναγκαίο να γίνεται με τρόπο ώστε να επιτρέπεται η σωστή και βέλτιστη διαχείριση των πόρων του συστήματος και ταυτόχρονα η υψηλού επιπέδου παροχή υπηρεσιών για τους συνδρομητές.

Η θεωρία ουρών, σε συνδυασμό με την προσομοίωση, παίζουν σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της απόδοσης των συστημάτων της Κινητής Τηλεφωνίας και ιδιαιτέρως στην εκτίμηση της χωρητικότητας του δικτύου, ώστε να αποφεύγονται περιπτώσεις συμφόρησης (congestion). Η εκτίμηση της χωρητικότητας επιτυγχάνεται με τον ορισμό και τη χρήση αντιστοίχων μέτρων απόδοσης. Ως μέτρα απόδοσης τέτοιων συστημάτων ορίζουμε τα εξής:

- **Πιθανότητα μπλοκαρίσματος νέων κλήσεων:** Είναι η πιθανότητα ότι μια νέα κλήση τελικά δεν εξυπηρετείται λόγω μη διαθέσιμων ράδιο-διαύλων.
- **Πιθανότητα αποτυχημένης μεταγωγής:** Είναι η πιθανότητα ότι μια δεδομένη αίτηση μεταγωγής μιας κλήσης προς ένα νέο κύτταρο δεν εξυπηρετείται.
- **Εξυπηρέτηση κλήσεων μεταγωγής:** Είναι ο αναμενόμενος χρόνος παραμονής μιας αίτησης για μεταγωγή στην ουρά αναμονής.

- **Αναμενόμενο μήκος της ουράς αναμονής:** Είναι ο μέσος αριθμός κλήσεων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν.
- **Ο λόγος της εξυπηρετούμενης επικοινωνιακής κίνησης προς τη συνολική προσφερόμενη επικοινωνιακή κίνηση:** Εκφράζει το ποσοστό της ολικής επικοινωνιακής κίνησης που τελικά εξυπηρετείται από το σύστημα.
- **Βαθμός εξυπηρέτησης:** Ο βαθμός εξυπηρέτησης (**Quality of Service - QoS** ή **Grade of Service - GoS**) είναι μία ποσότητα που εκφράζει την ποιότητα της παρεχόμενης εξυπηρέτησης. Υπολογίζεται δε, λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα μπλοκαρίσματος των νέων κλήσεων και **Πιθανότητα εξαναγκασμένου τερματισμού:** Είναι η πιθανότητα μια κλήση που γίνεται δεκτή στο σύστημα, να αποτύχει σε κάποια από τις επακόλουθες μεταγωγές και να εξαναγκαστεί σε τερματισμό.
- **Πιθανότητα μη ολοκληρωμένης κλήσης:** Είναι η πιθανότητα μια νέα προσπάθεια κλήσης να μην ολοκληρωθεί, είτε λόγω μπλοκαρίσματος της, είτε λόγω αποτυχημένης μεταγωγής της.
- **Καθυστέρηση στην** την πιθανότητα αποτυχημένης μεταγωγής ή την πιθανότητα μπλοκαρίσματος των νέων κλήσεων μαζί με την πιθανότητα εξαναγκασμένου τερματισμού.

Με χρήση των μοντέλων ουρών αναμονής τα παραπάνω μέτρα αξιολόγησης είναι δυνατόν να υπολογιστούν για ένα μεγάλο εύρος συνθηκών και πλήθος παραμέτρων και, επομένως, είμαστε σε θέση ώστε:

1. Να αξιολογήσουμε προτεινόμενα σχέδια για την παροχή μιας ή περισσότερων υπηρεσιών.
2. Να συγκρίνουμε διαφορετικούς σχεδιασμούς συστημάτων, π.χ. με χρήση ουρών αναμονής ή όχι, για όλους, ή ορισμένες κατηγορίες χρηστών, με καταχωρήσεις ράδιο-διαύλων βασισμένες σε σταθερές ή δυναμικές διαδικασίες κ.τ.λ.
3. Να συγκρίνουμε διαφορετικούς κανονισμούς πειθαρχίας στις ουρές αναμονής με σκοπό την επιλογή του βέλτιστου.
4. Να συγκρίνουμε τις αποδόσεις των συστημάτων για διαφορετικές κατηγορίες πελατών, εφ' όσον αυτές υπάρχουν.

3.2 Βασικά Μοντέλα Θεωρίας Ουρών

Πριν περάσουμε στη μελέτη των χρήσιμων, για την κατανόηση της παρούσας τεχνικής, μοντέλων όπως αναπτύχθηκαν για τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, παραθέτουμε ορισμένες θεμελιώδεις έννοιες σχετικά με τα βασικά μοντέλα της θεωρίας ουρών που εφαρμόζονται στις τηλεπικοινωνίες.

3.2.1 Υπολογισμός Επικοινωνιακού Φόρτου

Τα ψηφιακά κέντρα πρέπει να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις και τις ανάγκες των ψηφιακών δικτύων GSM και αυτό απαιτεί τον υπολογισμό του ρυθμού (της συχνότητας) με τον οποίο η φορητή συσκευή χρησιμοποιεί το σύστημα. Η συχνότητα αυτή εκφράζεται κυρίως σε Erlangs ή σπανιότερα (στις Η.Π.Α.) σε **Hundred Call Seconds-HCS**. Ένα Erlang αντιπροσωπεύει ένα κύκλωμα το οποίο απασχολείται για μία ώρα, ενώ ένα HCS αντιπροσωπεύει ένα κύκλωμα το οποίο απασχολείται για 100 δευτερόλεπτα και ισχύει ότι

$$1 \text{ Erlang} = 36 \text{ HCS} . \quad (3.1)$$

Η χρήση του συστήματος από τη φορητή συσκευή καθορίζεται από τους εξής παράγοντες:

- το μέσο αριθμό των κλήσεων που πραγματοποιεί η φορητή συσκευή στη διάρκεια μιας ημέρας,
- τη μέση χρονική διάρκεια μιας κλήσης,
- τον αριθμό των κλήσεων της φορητής συσκευής σε ώρα αιχμής.

Για παράδειγμα, εάν ο μέσος αριθμός των κλήσεων της φορητής συσκευής είναι έξι κλήσεις την ημέρα, η μέση χρονική διάρκεια κάθε κλήσης είναι 120 δευτερόλεπτα και το 1/8 των κλήσεων πραγματοποιούνται στην ώρα αιχμής, τότε το επικοινωνιακό φορτίο το οποίο δημιουργεί ο κινητός συνδρομητής είναι:

$$6 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{120}{3.600} = 0,025 \text{ Erlang} = 0,96 \text{ HCS} \approx 1 \text{ HCS}.$$

Το φορτίο αυτό αντιπροσωπεύει το επί της εκατό του χρόνου, όπου η φορητή συσκευή χρησιμοποιεί το σύστημα σε ώρα αιχμής. Για τον υπολογισμό του ολικού φορτίου ενός κυττάρου το μέσο φορτίο των φορητή συσκευή πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των φορητών συσκευών που θα εξυπηρετεί το κύτταρο.

3.2.2 Μέθοδοι Επικοινωνιακής Διάταξης

Οι γνωστές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνιακή διάταξη των κυτταρικών συστημάτων είναι οι ακόλουθες:

- **Μέθοδος Erlang - B:** οι καλούντες σταματούν την προσπάθεια για επικοινωνία όταν λάβουν ένα ειδικό σήμα που τους πληροφορεί ότι τα κυκλώματα είναι απασχολημένα.
- **Μέθοδος Erlang - C:** οι καλούντες είναι δυνατόν να περιμένουν απεριόριστο χρόνο προκειμένου να λάβουν ένα σήμα για να σταματήσουν την προσπάθειά τους για επικοινωνία.

3.2.3 Αλυσίδες Markov Συνεχούς Χρόνου

Αρχικά, η διαδικασία εισόδου στο σύστημα αναμονής χαρακτηρίζεται, είτε από την κατανομή του αριθμού των αφικνούμενων πελατών $N(t)$ στο χρονικό διάστημα $(0, t)$, είτε από την κατανομή των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών αφίξεων. Έτσι, μια διαδικασία Markov μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

1. Η είσοδος του συστήματος αναμονής βρίσκεται σε μία από τις n δυνατές καταστάσεις $1, 2, \dots, n$. Το σύστημα αναμονής αλλάζει κατάσταση μια φορά σε κάθε διάστημα άφιξης νέου πελάτη, δηλαδή νέας κλήσης, περνώντας ας πούμε από την κατάσταση i στην οποιαδήποτε κατάσταση j . Η πιθανότητα αυτής της μετάπτωσης είναι p_{ij} , και εξαρτάται μόνο από την αρχική κατάσταση i και την τελική κατάσταση j , είναι όμως ανεξάρτητη από τις καταστάσεις σε οποιαδήποτε προηγούμενο διάστημα άφιξης νέας κλήσης. Οι πιθανότητες μετάπτωσης ορίζονται ως p_{ij} , όπου βάσει της συνθήκης κανονικοποίησης της πιθανότητας ισχύει ότι

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n).$$

2. Καθώς το σύστημα αναμονής αλλάζει καταστάσεις, από i σε j , η τελική κατάσταση εξαρτάται μόνον από την αρχική κατάσταση i και από τη μετάπτωση $i \rightarrow j$.
3. Έστω ότι s_1, s_2, \dots, s_M είναι οι καταστάσεις μετάπτωσης του συστήματος αναμονής και X_1, X_2, \dots, X_n μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών, όπου X_n παριστάνει τη n -στη κατάσταση του συστήματος αναμονής. Τότε η πιθανότητα να βρίσκεται το σύστημα στη n -στή κατάσταση (s_q), θα εξαρτηθεί από τις προηγούμενες καταστάσεις X_1, X_2, \dots, X_{n-1} του συστήματος αναμονής, δηλαδή, η s_q πραγματοποιήθηκε με υπό συνθήκη πιθανότητα

$$P(X_\nu = s_q / X_1, X_2, \dots, X_{\nu-1}).$$

4. Η επίδραση των $X_1, X_2, \dots, X_{\nu-1}$ στη ν -στή κατάσταση αναμονής X_ν περιορίζεται μόνον από την κατάσταση του συστήματος αναμονής στην αρχή του ν -στού διαστήματος. Δηλαδή:

$$P(X_\nu = s_q / X_1, X_2, \dots, X_{\nu-1}) = P(X_\nu = s_q / S_\nu), \quad (3.2)$$

όπου S_ν είναι μια διακριτή τυχαία μεταβλητή που παριστάνει την κατάσταση του συστήματος στην αρχή του ν -στού διαστήματος.

5. Αν η πιθανότητα να βρίσκεται το σύστημα αναμονής στην κατάσταση j κατά την αρχή του ν -στού διαστήματος είναι $P_j(\nu)$, τότε μπορούμε να παραστήσουμε τις μεταπτώσεις του συστήματος με

$$P_j(\nu+1) = \sum_{i=1}^n P_i(\nu) p_{ij} \quad (3.3)$$

3.2.4 Στοχαστική Διαδικασία Γενέσεως - Θανάτου

Στοχαστική διαδικασία γενέσεως-θανάτου είναι μία υπό-περίπτωση μιας διαδικασίας Markov όπου οι μεταβάσεις από την κατάσταση E_ν επιτρέπεται μόνο από τις γειτονικές καταστάσεις $E_{\nu-1}$, $E_{\nu+1}$. Η μετάβαση από την κατάσταση E_ν στην $E_{\nu+1}$ χαρακτηρίζεται ως *γέννηση*, ενώ η μετάβαση από την E_ν κατάσταση $E_{\nu-1}$ χαρακτηρίζεται ως *θάνατος*.

Ορίζουμε το ρυθμό γέννησης, ως λ_ν , ο οποίος και περιγράφει το ρυθμό με τον οποίο συμβαίνουν οι γεννήσεις, όταν το μέγεθος του πληθυσμού είναι ν . Ομοίως, ορίζουμε το ρυθμό μ_ν , ο οποίος περιγράφει το ρυθμό με τον οποίο συμβαίνουν οι θάνατοι όταν το μέγεθος του πληθυσμού είναι ν .

Πιο συγκεκριμένα, τα στοιχεία που χρειάζονται για μία διαδικασία γενέσεως-θανάτου, προϋποθέτουν οι γεννήσεις και οι θάνατοι να είναι στοχαστικώς ανεξάρτητα. Επιπλέον, αν ο αριθμός των αφικνούμενων κλήσεων είναι $N(t)$ τότε θα πρέπει να ισχύουν οι εξής συνθήκες:

- i. Η $N(t)$ είναι μια ανέλιξη με ανεξάρτητες προσαυξήσεις, δηλαδή για κάθε $\nu = 2, 3, \dots$ και οποιεσδήποτε τιμές t_0, t_1, \dots, t_ν της παραμέτρου t με $t_0 < t_1 < \dots < t_\nu$, οι τυχαίες προσαυξήσεις $N(t_1) - N(t_0), N(t_2) - N(t_1), \dots, N(t_\nu) - N(t_{\nu-1})$ είναι στοχαστικά ανεξάρτητες. Με άλλα λόγια:

Οι αφίξεις σε διακριτά μεταξύ τους διαστήματα είναι ανεξάρτητες.

- ii. Για κάθε ζεύγος χρόνων t_1, t_2 με $t_1 < t_2$, η κατανομή της προσαυξήσεως $N(t_2) - N(t_1)$ εξαρτάται **μόνο από την διαφορά $t_2 - t_1$** . Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα να λάβουν χώρα ορισμένες αφίξεις σε κάποιο χρονικό διάστημα είναι η ίδια για όλα τα διαστήματα της αυτής διάρκειας. Έτσι, για όλα τα $t \geq 0, \tau > 0$ μπορούμε να θέσουμε:

$$\Pr\{N(t+\tau) - N(t) = \nu\} = a_\nu(\tau), \quad \nu = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.4)$$

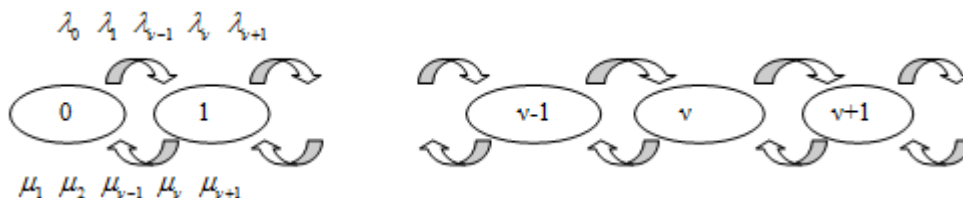
- iii. Σε ένα αρκούντως μικρό χρονικό διάστημα μόνον μία άφιξη μπορεί να συμβεί, δηλαδή **ποτέ δε θα λάβουμε υπ' όψη δύο ταυτόχρονες αφίξεις**. Η έννοια του ταυτοχρόνου δεν υφίσταται. Ειδικότερα, υποθέτουμε ότι ισχύει:

$$a_1(\Delta t) = \lambda \Delta t + o(\Delta t) \quad (3.5)$$

$$1 - a_0(\Delta t) - a_1(\Delta t) = o(\Delta t). \quad (3.6)$$

Δηλαδή, η πιθανότητα άφιξης μιας ακριβώς (νέας) κλήσεις σε ένα μικρό χρονικό διάστημα Δt είναι $\lambda \Delta t + o(\Delta t)$, ενώ η πιθανότητα άφιξης περισσότερων της μιας κλήσης στο ίδιο χρονικό διάστημα είναι της τάξης του Δt . Οι σχέσεις (3.5)-(3.7) αποτελούν τις μαθηματικές εκφράσεις της στατικής διαδικασίας Markov.

Για τις διαδικασίες γενέσεως-θανάτου, συχνά δημιουργείται το διάγραμμα (ή γράφημα) καταστάσεων-μεταβάσεων που περιγράφει το ρυθμό μετάβασης από μία κατάσταση στην άλλη και για όλες τις καταστάσεις του συστήματος.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα καταστάσεων για μία διαδικασία γενέσεως-θανάτου

Έστω $P_\nu(t) = P\{N(t_0 = \nu)\}$ και $P_\nu = \lim_{t \rightarrow \infty} P_\nu(t)$.

Αν χρησιμοποιήσουμε τη λεγόμενη αρχή της ισορροπίας (equilibrium principle):

“ρυθμός εισόδου στην κατάσταση E_ν = ρυθμός εξόδου από την κατάσταση E_ν ”

τότε μπορούμε να γράψουμε τις εξισώσεις ισορροπίας απ’ ευθείας από το διάγραμμα.

Επομένως:

$$\lambda_0 P_0 = \mu_1 P_1, \quad (3.7)$$

$$(\lambda_\nu + \mu_\nu) P_\nu = \lambda_{\nu-1} P_{\nu-1} + \mu_{\nu+1} P_{\nu+1}, \quad \forall \nu = 1, 2, \dots \quad (3.8)$$

Η επίλυση αυτών των εξισώσεων παρέχει τις πιθανότητες σταθερής κατάστασης και γίνεται ως ακολούθως:

$$P_1 = \frac{\lambda_0}{\mu_1} P_0. \quad (3.9)$$

Για $\nu = 1$ έχουμε

$$\begin{aligned} (\lambda_1 + \mu_1) P_1 &= \lambda_0 P_0 + \mu_2 P_2 \Leftrightarrow \\ \mu_2 P_2 &= (\lambda_1 + \mu_1) P_1 - \lambda_0 P_0 \Leftrightarrow \\ \mu_2 P_2 &= (\lambda_1 + \mu_1) \frac{\lambda_0}{\mu_1} P_0 - \lambda_0 P_0 \Leftrightarrow \\ P_2 &= \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\mu_1 \mu_2} P_0. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Εργαζόμενοι ομοίως, καταλήγουμε στη σχέση:

$$P_\nu = \left(\prod_{i=1}^{\nu} \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i} \right) P_0, \quad \forall \nu = 0, 1, 2, \dots \quad (3.11)$$

Με τη μέθοδο της επαγωγής βρίσκουμε ότι η τελευταία σχέση αποτελεί τη λύση της γενικής διαδικασίας γενέσεως-θανάτου, στην περίπτωση της σταθερής κατάστασης. Έτσι, εκφράζουμε όλες τις πιθανότητες ισορροπίας P_ν ως προς την άγνωστη P_0 .

$$P_\nu = \left(\prod_{i=0}^{\nu-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}} \right) P_0, \quad \forall \nu = 0, 1, 2, \dots \quad (3.12)$$

Ενώ η P_0 προκύπτει από τη συνθήκη: $\sum_{\nu=0}^{\infty} P_\nu = 1$,

οπότε έχουμε:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{\nu=1}^{\infty} \prod_{i=0}^{\nu-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}}} \quad (3.13)$$

3.2.5 Στατιστική Κατανομή Ενδιάμεσων Χρόνων

Μέχρι στιγμής μελετάμε τα συστήματα αναμονής, έχουμε ορίσει ποσότητες όπως οι ρυθμοί γένεσης και θανάτου και έχουμε εξαγάγει μαθηματικούς τύπους, οι οποίοι μας βοηθούν να προβλέψουμε τη συμπεριφορά συστημάτων. Εντούτοις δεν έχουμε διευκρινίσει ποιες είναι οι τιμές των ρυθμών γένεσης και θανάτου. Μία απλή ιδέα θα ήταν να υποστηρίξουμε ότι εν γένει δεν μπορούμε να γνωρίζουμε εξ' αρχής αυτήν την κατανομή τους και πρέπει πάντα κατά περίπτωση να εκτελούμε στατιστικές μετρήσεις και να αποφαινόμεστε εκ των υστέρων για την κατανομή, η οποία δίδει τις τιμές (ή για να ήμαστε περισσότερο ακριβείς τις μέσες τιμές) των ρυθμών αυτών. Εντούτοις, καίτοι αυτή η πρόταση είναι μαθηματικά και στατιστικά σωστή, φαίνεται ότι η φύση έχει και μία συμπληρωματική ή αν προτιμάτε μία εναλλακτική άποψη.

Στην ενότητα αυτή θα αποδείξουμε μία από τις σημαντικότερες υποθέσεις που κάνουμε κατά τη μελέτη ουρών αναμονής σε συστήματα εξυπηρέτησης. Για την ακρίβεια, θα δείξουμε ότι η κατανομή των ενδιάμεσων χρόνων, δηλαδή των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών απεριόριστων θεωρητικά αφίξεων, που συμβαίνουν με σταθερό ρυθμό λ , είναι ανεξάρτητοι και έχουν ισόνομες εκθετικές τυχαίες μεταβλητές με μέση τιμή $1/\lambda$. Επομένως ενδεχομένως κατά περίπτωση να ισχύουν ιδιότυπες και δύσκολες κατανομές, όμως ξεκινώντας μία μελέτη με την αποδοχή της εκθετικής κατανομής για το ρυθμό γένεσης λ , είμαστε σωστοί, έτσι λέει η φύση.....

Συμβολίζουμε λοιπόν με $p(n,t)$ την πιθανότητα να υπάρχουν n ακριβώς αφίξεις νέων κλήσεων στο σύστημα τη χρονική στιγμή t , έστω ακόμη ότι:

$$p(0,0) = \Pr\{N(0) = 0\} = 1, \quad (3.14)$$

τότε από τη σχέση (4.5) και τη συνθήκη i παραπάνω, για κάθε $\Delta t > 0, t \geq 0$ προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$p(0,t+\Delta t) = p(0,t)a_0(\Delta t) \quad (3.15)$$

και

$$p(n,t+\Delta t) = \sum_{\nu=0}^n p(n-\nu,t)a_{\nu}(\Delta t) \quad (3.16)$$

αφού n αφίξεις γίνονται στο χρονικό διάστημα $(0, t+\Delta t)$ αν $n-\nu$ αφίξεις γίνονται στο διάστημα $(0, t)$ και ν αφίξεις στο διάστημα $(t, t+\Delta t)$, $\nu=0,1,2,\dots,n$. Δεδομένου ότι μία το πολύ άφιξη συμβαίνει σε ένα απειροστό διάστημα Δt , δηλαδή $a_{\nu}(\Delta t) = 0(\Delta t)$ για $\nu > 1$, τότε ισχύει ότι

$$a_0(\Delta t) = 1 - a_1(\Delta t) + 0(\Delta t) \quad \text{ή} \quad a_0(\Delta t) = 1 - \lambda\Delta t + 0(\Delta t)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτουν αντίστοιχα:

$$\frac{p(0,t+\Delta t) - p(0,t)}{\Delta t} = -\lambda p(0,t) + 0(\Delta t) \quad (3.17)$$

και

$$p(n,t+\Delta t) = p(n-1,t)a_1(\Delta t) + p(n,t)a_0(\Delta t) + 0(\Delta t), \quad (3.18)$$

απ' όπου

$$p(n,t+\Delta t) = p(n-1,t)\{\lambda\Delta t + 0(\Delta t)\} + p(n,t)\{1 - \lambda\Delta t + 0(\Delta t)\} + 0(\Delta t) \quad (3.19)$$

ή

$$\frac{p(n,t+\Delta t) - p(n,t)}{\Delta t} = -\lambda p(n,t) + \lambda p(n-1,t) + 0(\Delta t) \quad (3.20)$$

Αν πάρουμε το όριο του αριστερού μέλους των σχέσεων (3.17) και (3.20) για $\Delta t \rightarrow 0$, τότε έχουμε:

$$\frac{dp(0,t)}{dt} = -\lambda p(0,t) \quad (3.21)$$

και

$$\frac{dp(n,t)}{dt} = -\lambda p(n,t) + \lambda p(n-1,t). \quad (3.22)$$

Λόγω της αρχικής συνθήκης (3.14), η διαφορική εξίσωση (3.21) έχει λύση την

$$p(0,t) = e^{-\lambda t}. \quad (3.23)$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση για το $p(0,t)$ και επιλύοντας διαδοχικά την εξίσωση (3.22) προκύπτουν κατά σειρά

$$p(1,t) = \lambda t e^{-\lambda t}, \quad p(2,t) = \frac{(\lambda t)^2}{2!} e^{-\lambda t}, \quad p(3,t) = \frac{(\lambda t)^3}{3!} e^{-\lambda t}, \dots$$

και γενικά,

$$p(n,t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.24)$$

Παρατηρούμε ότι η κατανομή $N(t)$, του αριθμού των νέων κλήσεων, είναι μια κατανομή Poisson. Σύμφωνα λοιπόν με τη σχέση (3.24), η πιθανότητα να μη γίνει νέα κλήση στο χρονικό διάστημα $(0, t)$ είναι $p(0,t) = e^{-\lambda t}$.

Η πιθανότητα η πρώτη κλήση να συμβεί στο χρονικό αυτό διάστημα είναι $1 - e^{-\lambda t}$. Πράγματι έστω T η τυχαία μεταβλητή που παριστάνει το χρόνο μέσα στον οποίο λαμβάνει χώρα η πρώτη κλήση. Αν $f(t)$ και $F(t)$ είναι οι συναρτήσεις πυκνότητας και κατανομής, αντίστοιχα της μεταβλητής T , τότε:

$$F(t) = \Pr\{T \leq t\} = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t > 0. \quad (3.25)$$

Συνεπώς:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t > 0. \quad (3.26)$$

Η σχέση (3.26) αποδεικνύει ότι η τυχαία μεταβλητή T έχει εκθετική κατανομή και μέση τιμή $1/\lambda$.

3.2.6 Τηλεπικοινωνιακό Μοντέλο Κίνησης Erlang-B

Η διαδικασία εξεύρεσης της βέλτιστης τεχνικής, ξεκινάει από το απλό μοντέλο που περιγράφεται από τον τύπο Erlang-B. Είναι η βασική τεχνική η οποία υιοθετείται από τα σημερινά συστήματα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης και τρίτης γενιάς στη διαδικασία σχεδιασμού της απαιτούμενης χωρητικότητας σε ραδιοδιαύλους και σε κανάλια σηματοδοσίας SDCCH.

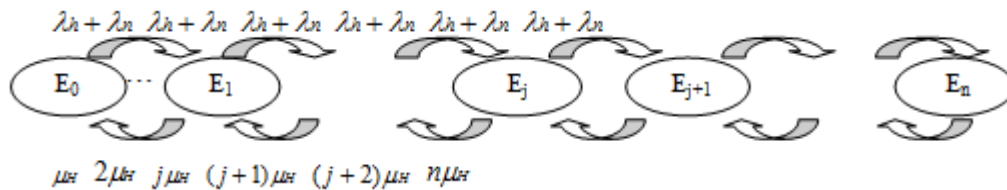
Η χρήση της είναι τόσο πολύ διαδεδομένη και δημοφιλής για δύο βασικούς λόγους. Ο πρώτος λόγος αφορά τη μαθηματική απλότητάς της συγκεκριμένης τεχνικής. Ο δεύτερος και σοβαρότερος λόγος είναι η πολυπλοκότητα των σημερινών δικτύων κινητών επικοινωνιών. Πράγματι τα σημερινά δίκτυα κινητών επικοινωνιών εντός του λογισμικού τους εμπεριέχουν βασικούς αλγόριθμους οι οποίοι αντεπεξέρχονται σε προβλήματα συμφόρησης. Οι αλγόριθμοι αυτοί προτείνονται είτε από την 3GPP είτε από τον εκάστοτε κατασκευαστή λογισμικού και περιλαμβάνουν τεχνικές βελτιστοποίησης της χωρητικότητας του ράδιο-δικτύου.

Επομένως όσο και να περιπλέκουμε το μαθηματικό υπόβαθρο της τεχνικής (δηλαδή να μεταπηδούμε από την τεχνική Erlang-B στην Erlang-C και περαιτέρω με τη χρήση δεσμευμένων καναλιών – guard channels) δεν ανταποκρινόμαστε ποτέ στην πραγματικότητα. Επομένως η χρήση της απλούστατης τεχνικής Erlang-B βοηθάει να έχουμε μία πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς της χωρητικότητας του δικτύου, μία εκτίμηση πολύ σημαντική για τον αρχικό σχεδιασμό του ράδιο-δικτύου GSM.

Προκειμένου να αναλυθεί αυτή η τεχνική, υποθέτουμε ότι δύο είδη κλήσεων δημιουργούνται, σύμφωνα με την κατανομή Poisson, με μέσο ρυθμό άφιξης λ_n για τις νέες κλήσεις και λ_h για τις κλήσεις μεταγωγής (handovers). Αποδεικνύεται ότι ο χρόνος κράτησης καναλιού T_H στο δίκτυο GSM προσεγγίζεται με μια εκθετική κατανομή με μέση τιμή $\bar{T}_H = 1/\mu_H$. Η παράμετρος μ_H , εκφράζει το μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης των κλήσεων, όπως περιγράφεται παρακάτω, κατά την ανάλυση των τεχνικών, μέσω των διαδικασιών Markov “γενέσεως και θανάτου”

Έστω, ότι, τα n διαθέσιμα κανάλια ενός κυττάρου, μοιράζονται αυθαίρετα στις νέες κλήσεις και στις κλήσεις μεταγωγής. Αυτό σημαίνει, ότι δεν επιβάλλεται κανένας περιορισμός σε ότι αφορά την αποδοχή των κλήσεων, συνεπώς τα δύο είδη κλήσεων

έχουν την ίδια πιθανότητα να απορριφθούν. Το διάγραμμα καταστάσεων αυτής της τεχνικής παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2 παρακάτω.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα καταστάσεων - Τεχνική Erlang-B

Ακολουθώντας την προϋπάρχουσα ανάλυση, προκύπτει για την κατάσταση E_0 του συστήματος ότι:

$$P_0(\lambda_n + \lambda_h) = P_1\mu_H \Leftrightarrow P_1 = \frac{P_0(\lambda_n + \lambda_h)}{\mu_H}. \quad (3.27)$$

Για την E_1 προκύπτει:

$$(\lambda_n + \lambda_h)P_0 + 2\mu_H P_2 = (\lambda_n + \lambda_h + \mu_H)P_1. \quad (3.28)$$

Η σχέση (3.28), λόγω της (3.27), μπορεί να λυθεί ως προς P_2 και δίνει:

$$P_2 = \frac{P_0(\lambda_n + \lambda_h)^2}{2!\mu_H^2}. \quad (3.29)$$

Εργαζόμενοι αναλόγως με τις υπόλοιπες καταστάσεις του συστήματος και χρησιμοποιώντας τη συνθήκη κανονικοποίησης, δηλ. $\sum_{j=0}^{\infty} P_j = 1$, προκύπτει η εξής σχέση:

$$P_j = \frac{\frac{1}{j!} \left(\frac{\lambda_n + \lambda_h}{\mu_H}\right)^j}{\sum_{v=0}^n \frac{1}{v!} \left(\frac{\lambda_n + \lambda_h}{\mu_H}\right)^v}. \quad (3.30)$$

Η πιθανότητα ολικής κατάληψης καναλιού για τις νέες κλήσεις, ισούται με την πιθανότητα να αποτύχει μια κλήση μεταγωγής. Συνεπώς, και τα δύο είδη κλήσεων απορρίπτονται, όταν όλα τα κανάλια του κυττάρου είναι κατειλημμένα, δηλαδή:

$$P_B = P_{fh} = P_n. \quad (3.31)$$

n	.007	.008	.009	.01	.02	.03	.05	.1	.2	.4	n
1	.00705	.00806	.00908	.01010	.02041	.03093	.05263	.11111	.25000	.66667	1
2	.12600	.13532	.14416	.15259	.22347	.28155	.38132	.59543	1.0000	2.0000	2
3	.39664	.41757	.43711	.45549	.60221	.71513	.89940	1.2708	1.9299	3.4798	3
4	.77729	.81029	.84085	.86942	1.0923	1.2589	1.5246	2.0454	2.9452	5.0210	4
5	1.2362	1.2810	1.3223	1.3608	1.6571	1.8752	2.2185	2.8811	4.0104	6.5955	5
6	1.7531	1.8093	1.8610	1.9090	2.2759	2.5431	2.9603	3.7584	5.1086	8.1907	6
7	2.3149	2.3820	2.4437	2.5009	2.9354	3.2497	3.7378	4.6662	6.2302	9.7998	7
8	2.9125	2.9902	3.0615	3.1276	3.6271	3.9865	4.5430	5.5971	7.3692	11.419	8
9	3.5395	3.6274	3.7080	3.7825	4.3447	4.7479	5.3702	6.5464	8.5217	13.045	9
10	4.1911	4.2889	4.3784	4.4612	5.0840	5.5294	6.2157	7.5106	9.6850	14.677	10
11	4.8637	4.9709	5.0691	5.1599	5.8415	6.3280	7.0764	8.4871	10.857	16.314	11
12	5.5543	5.6708	5.7774	5.8760	6.6147	7.1410	7.9501	9.4740	12.036	17.954	12
13	6.2607	6.3863	6.5011	6.6072	7.4015	7.9667	8.8349	10.470	13.222	19.598	13
14	6.9811	7.1154	7.2382	7.3517	8.2003	8.8035	9.7295	11.473	14.413	21.243	14
15	7.7139	7.8568	7.9874	8.1080	9.0096	9.6500	10.633	12.484	15.608	22.891	15
16	8.4579	8.6092	8.7474	8.8750	9.8284	10.505	11.544	13.500	16.807	24.541	16
17	9.2119	9.3714	9.6171	9.6516	10.656	11.368	12.461	14.522	18.010	26.192	17
18	9.9751	10.143	10.296	10.437	11.491	12.238	13.385	15.548	19.216	27.844	18
19	10.747	10.922	11.082	11.230	12.333	13.115	14.315	16.579	20.424	29.498	19
20	11.526	11.709	11.876	12.031	13.182	13.997	15.249	17.613	21.635	31.152	20
21	12.312	12.503	12.677	12.838	14.036	14.885	16.189	18.651	22.848	32.808	21
22	13.105	13.303	13.484	13.651	14.896	15.778	17.132	19.692	24.064	34.464	22
23	13.904	14.110	14.297	14.470	15.761	16.675	18.080	20.737	25.281	36.121	23
24	14.709	14.922	15.116	15.295	16.631	17.577	19.031	21.784	26.499	37.779	24
25	15.519	15.739	15.939	16.125	17.505	18.483	19.985	22.833	27.720	39.437	25
26	16.334	16.561	16.768	16.959	18.383	19.392	20.943	23.885	28.941	41.096	26
27	17.153	17.387	17.601	17.797	19.265	20.305	21.904	24.939	30.164	42.755	27
28	17.977	18.218	18.438	18.640	20.150	21.221	22.867	25.995	31.388	44.414	28
29	18.805	19.053	19.279	19.487	21.039	22.140	23.833	27.053	32.614	46.074	29
30	19.637	19.891	20.123	20.337	21.932	23.062	24.802	28.113	33.840	47.735	30
31	20.473	20.734	20.972	21.191	22.827	23.987	25.773	29.174	35.067	49.395	31
32	21.312	21.580	21.823	22.048	23.725	24.914	26.746	30.237	36.295	51.056	32

Πίνακας 1: Erlang-B

3.3 Μαθηματικός Φορμαλισμός Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Τηλεπικοινωνιακή κίνηση ή τηλεπικοινωνιακό φορτίο A ορίζουμε το πηλίκο του χρόνου κατάληψης ενός καναλιού σε κάποιο συγκεκριμένο χρόνο παρατήρησης δια του συνολικού χρόνου παρατήρησης. Το τηλεπικοινωνιακό φορτίο είναι αδιάστατη ποσότητα, εντούτοις της δίδουμε μία μονάδα μέτρησης (Erlang) προς τιμήν του Δανού μαθηματικού A.K. Erlang ο οποίος πρώτος καθιέρωσε τον μαθηματικό κλάδο της θεωρίας τηλεπικοινωνιακής κίνησης και ο οποίος πρώτος μελέτησε τις εφαρμογές του. Το τηλεπικοινωνιακό φορτίο είναι αποτέλεσμα των κλήσεων των συνδρομητών σε ένα τηλεφωνικό δίκτυο και ιδιαίτερη σημασία έχει ο υπολογισμός του χρόνου εξυπηρέτησης μίας κλήσης ή αλλιώς διάρκεια κλήσης s

3.3.1 Παράδειγμα Υπολογισμού Χρόνου Εξυπηρέτησης Μιας Κλήσης

Έστω λοιπόν ότι έχουμε τρία κανάλια πολυπλεγμένα σε μία κοινή γραμμή. Ο χρόνος παρατήρησης είναι μία ώρα και ο συνολικός χρόνος κατάληψης των καναλιών είναι:

- κανάλι 1: 10 λεπτά
- κανάλι 2: 25 λεπτά
- κανάλι 3: 55 λεπτά

Για αυτή την ομάδα των τριών καναλιών έχουμε συνολικό χρόνο κατάληψης ίσο με:

$$10 + 25 + 55 = 90 \text{ λεπτά}$$

Επομένως η τηλεπικοινωνιακή κίνηση της ομάδος είναι:

$$\text{Τηλεπικοινωνιακή κίνηση ομάδος} = 90 \text{ λεπτά} / 60 \text{ λεπτά} = 1.5 \text{ Erlang}$$

ενώ η τηλεπικοινωνιακή κίνηση κάθε καναλιού είναι:

$$\text{κανάλι 1: Τηλεπικοινωνιακή κίνηση} = 10 \text{ λεπτά} / 60 \text{ λεπτά} = 0.166 \text{ Erlang}$$

$$\text{κανάλι 2: Τηλεπικοινωνιακή κίνηση} = 25 \text{ λεπτά} / 60 \text{ λεπτά} = 0.4166 \text{ Erlang}$$

$$\text{κανάλι 3: Τηλεπικοινωνιακή κίνηση} = 55 \text{ λεπτά} / 60 \text{ λεπτά} = 0.9166 \text{ Erlang}$$

Παρατηρούμε ότι η τηλεπικοινωνιακή κίνηση μίας ομάδος καναλιών μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 1 Erlang. Επίσης το άθροισμα των τηλεπικοινωνιακών κινήσεων κάθε καναλιού ξεχωριστά μας δίνει την τηλεπικοινωνιακή κίνηση της ομάδος.

Χρόνος εξυπηρέτησης κλήσης s – service time (ή διάρκεια κλήσης h – holding time) ορίζουμε το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να εξυπηρετηθεί μία κλήση, δηλαδή ο χρόνος από την ώρα της έναρξης της κλήσης έως και τον τερματισμό της.

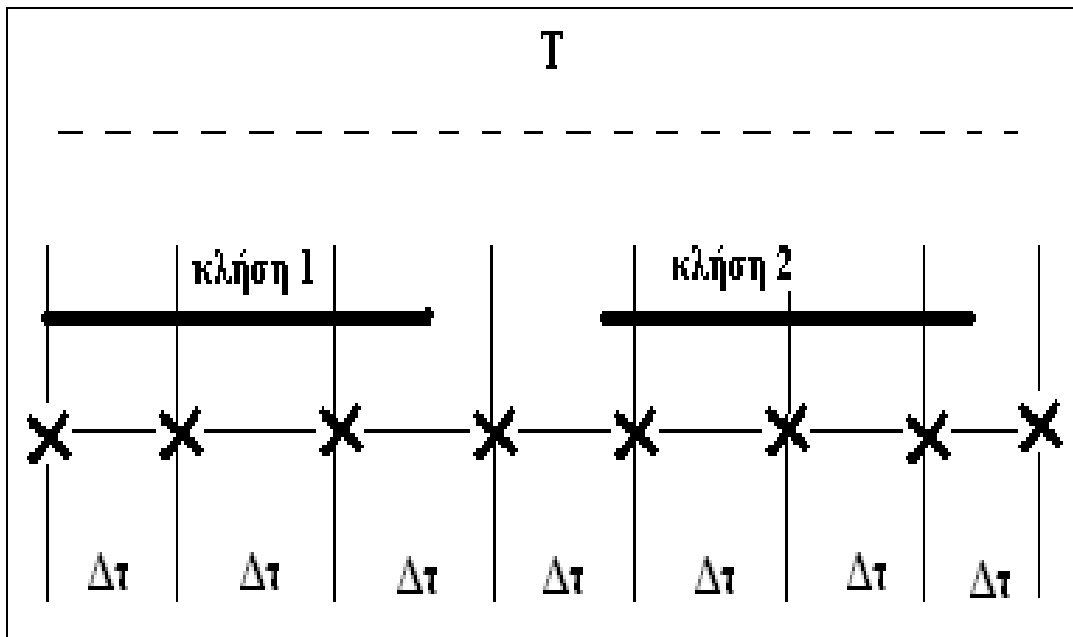
Όπως εξηγήσαμε και παραπάνω σε ένα τηλεφωνικό δίκτυο είναι αδύνατον να παρακολουθούμε ανελλιπώς την κίνηση σε κάθε φορέα – γραμμή διασύνδεσης. Αντ' αυτού έχει επιλεγεί μία μέθοδος δειγματοληψίας. Δείξαμε την ισχύ της μέσω ενός παραδείγματος χωρίς όμως να εξηγήσουμε που βασιστήκαμε για να αναπαράγουμε την τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Τώρα θα αποδείξουμε την μαθηματική συνέπεια της τηλεπικοινωνιακής κίνησης A μέσα από ένα σύνολο ιδιοτήτων του A , οι οποίες θα ορίσουν εναλλακτικούς τρόπους ορισμού της A και οι οποίες θα προκύψουν ως άμεσες συνέπειες του ορισμού της A :

3.3.2 Ιδιότητα 1 Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης A Δειγματοληπτικού Ελέγχου

Τηλεπικοινωνιακή κίνηση A ορίζουμε τον αριθμό των συμβάντων (κλήσεων) οι οποίες προσμετρούνται σε ένα τηλεφωνικό δίκτυο με την μέθοδο της δειγματοληψίας προς τον αριθμό των δειγμάτων που παίρνουμε στο χρονικό διάστημα παρατήρησης

3.3.2.1 Απόδειξη Ιδιότητας 1

Έστω τηλεπικοινωνιακό σύστημα το οποίο παρατηρείται για χρονικό διάστημα T . Το χρονικό διάστημα παρατήρησης το χωρίζω σε n τον αριθμό χρονικές στιγμές δειγματοληψίας διάρκειας Δt έτσι ώστε $T = n \Delta t$



Σχήμα 3.3 Παρατηρούμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε ένα σύστημα

Για την κλήση 1 έχουμε τρεις δειγματοληψίες, άρα $m_1 = 3$ και ο χρόνος διάρκειας είναι $s_1 = m_1 (\Delta\tau) = 3(\Delta\tau)$. Ομοίως για την κλήση 2. Επομένως ο αριθμός των κλήσεων (που προκύπτουν από τα δείγματα) στο διάστημα της δειγματοληψίας είναι: $3 + 3 = 6$ κλήσεις. Επομένως κάθε κλήση θα διαρκεί χρόνο s_i ο οποίος θα είναι μικρότερος του συνολικού χρόνου παρατήρησης T και θα διαρκεί m τον αριθμό χρονικά διαστήματα $\Delta\tau$, δηλαδή:

$$s_i = m_i(\Delta\tau), m_i \leq \nu \quad s_i \leq T \quad \text{και} \quad T = \nu(\Delta\tau)$$

επομένως έστω ότι στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα καταφθάνουν συνολικά $\sum_{i=1}^{\nu} \alpha_i$ κλήσεις και οι $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_\nu$ κλήσεις έχουν χρόνο εξυπηρέτησης s_1, s_2, \dots, s_ν αντιστοίχως.

Τότε:

οι α_1 κλήσεις διαρκούν χρόνο $s_1 = m_1(\Delta\tau)$

οι α_2 κλήσεις διαρκούν χρόνο $s_2 = m_2(\Delta\tau)$

οι α_3 κλήσεις διαρκούν χρόνο $s_3 = m_3(\Delta\tau)$

.....

.....

.....

οι α_ν κλήσεις διαρκούν χρόνο $s_\nu = m_\nu(\Delta\tau)$

Σύμφωνα με τον βασικό ορισμό της τηλεπικοινωνιακής κίνησης:

$$A = \frac{\text{συνολικός χρόνος κατάληψης}}{\text{συνολικός χρόνος παρατήρησης}} = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} \alpha_i s_i}{T} = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} \alpha_i m_i (\Delta\tau)}{\nu(\Delta\tau)} =$$

$$= \frac{(\Delta\tau) \sum_{i=1}^{\nu} \alpha_i m_i}{\nu(\Delta\tau)} \Rightarrow A = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} \alpha_i m_i}{\nu}$$

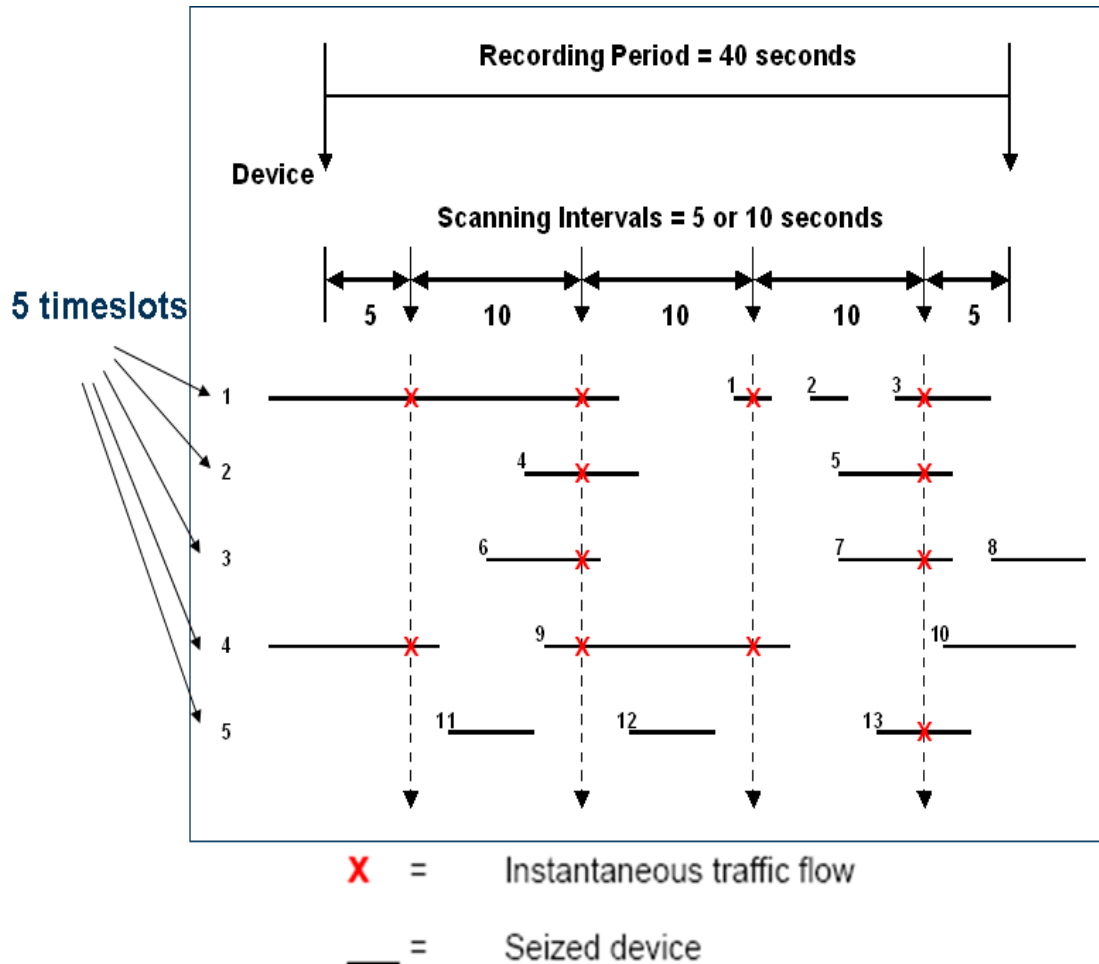
Τώρα ύστερα από τη διεκπεραιωθείσα δειγματοληψία ο συνολικός αριθμός δειγμάτων - συμβάντων (κλήσεων) είναι $\sum_{i=1}^{\nu} \alpha_i m_i$ διότι το γινόμενο $\alpha_i m_i$ καθορίζει τον αριθμό των συμβάντων, δηλαδή $\alpha_i m_i$ σημαίνει είτε α_i κλήσεις διάρκειας $m_i (\Delta\tau)$ χρόνου έκαστη είτε ότι έχω α_i συμβάντα σε κάθε δειγματοληψία επί συνόλου m_i δειγματοληψιών. Επιπλέον ο συνολικός χρόνος παρατήρησης είναι ίσος με τον αριθμό των δειγματοληψιών ν δηλαδή $T = \nu(\Delta\tau)$.

Άρα ένας τρόπος υπολογισμού του τηλεπικοινωνιακού φόρτου σε ένα σύστημα είναι να παρατηρούμε σε τακτά χρονικά τον αριθμό των κατειλημμένων πόρων (καναλιών) και να διαιρούμε δια του αριθμού των δειγματοληψιών. Αυτό είναι πολύ βασικό συμπέρασμα καθότι με αυτόν τον τρόπο μπορούμε σε ένα ψηφιακό κέντρο να ορίσουμε μετρητές (counters) αριθμού συμβάντων (κλήσεων) σε κάθε δειγματοληψία καθώς και counters οι οποίοι μετράνε επίσης τον αριθμό των δειγματοληψιών (ένας τρόπος μέτρησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης ο οποίος μπορεί πάρα πολύ εύκολα να υλοποιηθεί είτε με λογισμικό είτε με hardware. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι τα ψηφιακά κέντρα της Ericsson, στα οποία οι σχεδιαστές του λογισμικού λειτουργίας του κέντρου έχουν ορίσει counters αριθμού συμβάντων (κλήσεων) οι οποίοι ονομάζονται **Accumulators** και counters αριθμού δειγματοληψιών οι οποίοι ονομάζονται **scanners**. Επομένως το τηλεπικοινωνιακό φορτίο ισούται με:

$$A = \frac{\text{Accumulator}}{\text{scanner}}$$

3.3.2.2 Παράδειγμα Απόδειξης Ιδιότητας

Έστω ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με πέντε timeslots, στο οποίο τηλεπικοινωνιακή κίνηση (κλήσεις) καταφθάνουν και τερματίζονται σε τυχαίους χρόνους, όπως στο ακόλουθο σχήμα



Σχήμα 3.4: τηλεπικοινωνιακό σύστημα με πέντε timeslots

Τότε υπολογίζουμε την τηλεπικοινωνιακή κίνηση όπως περιγράφηκε στην ιδιότητα 1. Προσμετρούμε την άφιξη της τηλεπικοινωνιακής κίνησης (κλήσεις) στις χρονικές στιγμές δειγματοληψίας (scanning) στο σύνολο του χρονικού διαστήματος παρατήρησης (recording period). Αυτό το ονομάζουμε instantaneous traffic flow. Εν συνεχεία υπολογίζουμε τον αριθμό των αφιχθέντων κλήσεων εντός του συνολικού διαστήματος παρατήρησης (recording period) και ονομάζουμε αυτό το αποτέλεσμα traffic flow (τηλεπικοινωνιακή ροή). Τέλος διαιρούμε traffic flow / instantaneous traffic flow και βρίσκουμε την μέση τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε Erlang

$$\text{Instantaneous traffic flow} = 2 + 4 + 2 + 4 = 12$$

$$\text{Average traffic flow: } A = \frac{\text{Accumulator}}{\text{scanner}} = \frac{\text{Traffic flow}}{\text{Number of scans}} = \frac{12}{4} = 3$$

Εάν εν συνεχεία θέλουμε να βρούμε τον μέσο χρόνο κράτησης καναλιού (Mean Holding Time), τότε:

$$\text{Mean holding time} = \frac{\text{Average traffic flow} \times \text{Recording period}}{\text{Number of seizures}} = \frac{3 \times 40}{13} = 9,2 \text{ seconds}$$

Αυτός ο μέσος χρόνος κράτησης καναλιού ονομάζεται επίσης και χρόνος εξυπηρέτησης (service time) .

3.3.2.3 Υπολογισμός Ιδιότητας 1 Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης με Χρήση Ericsson Counters

Για να υπολογίσουμε την μέση τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε ένα κύτταρο λοιπόν αρκεί να διαιρέσουμε traffic flow / instantaneous traffic flow. Στα ψηφιακά κέντρα Ericsson υπάρχουν counters λοιπόν οι οποίοι υπολογίζουν τις ποσότητες traffic flow και instantaneous traffic flow. Πράγματι :

- ο counter TF_TRALACC είναι Traffic level accumulator for full-rate TCH
- ο counter TFNSCAN είναι ο scanner Number of accumulations of traffic level counter for full-rate TCH

Επομένως ακολουθώντας τον ορισμό $A = \frac{\text{Accumulator}}{\text{scanner}}$ η μέση τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε Erlang ορίζεται στα ψηφιακά κέντρα Ericsson ως TF_TRAFF και υπολογίζεται ως :

$$TFTRAFF = \frac{TFTRALACC}{TFNSCAN} [\text{Erlang}] \quad (3.32)$$

3.3.2.4 Υπολογισμός Μέσου Χρόνου Κράτησης Καναλιού με Χρήση Ericsson Counters

Εάν εν συνεχεία θέλουμε να βρούμε τον μέσο χρόνο κράτησης καναλιού (Mean Holding Time) ή τον χρόνο εξυπηρέτησης (service time). Αυτό είναι πολύ χρήσιμη παράμετρος στην θεωρία τηλεπικοινωνιακής κίνησης διότι θα μας δώσει τον ρυθμό θανάτου μ στα μοντέλα της θεωρίας ουρών. Πράγματι από την θεωρία ουρών ο μέσος ρυθμός θανάτων ορίζεται ως:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{\bar{T}_{hold}} \quad (3.33)$$

Όπου \bar{T}_{hold} είναι ο μέσος χρόνος κράτησης καναλιού, δηλαδή αυτό που ψάχνουμε.

Βάσει των counters της Ericsson ορίζεται ως Traffic Channel (TCH) Full Rate Mean Holding Time - TF_MEANH και υπολογίζεται από τον ακόλουθο στατιστικό τύπο:

$$TF_MEANH = \frac{TF_TRAFF * PERLEN * 60}{TFMSESTB} \text{ in seconds} \quad (3.34)$$

Όπου αντιστοίχως οι counters ορίζονται ως:

- **TF_TRAFF** είναι η προηγούμενη formula για τον υπολογισμό της τηλεπικοινωνιακής κίνησης A.
 - **TFMSESTB**: Successful MS Establishment on TCH full-rate. Όπου είναι το σύνολο των κλήσεων που είτε ξεκίνησαν επιτυχώς στο κύτταρο είτε μετήχθησαν λόγω handover από γειτονικά κύτταρα, δεν ξέρουμε όμως αν τερματίστηκαν σε αυτό το κύτταρο ή μετήχθησαν με διαδικασία handover.
 - **PERLEN**: είναι η χρονική περίοδος της μέτρησης που χρησιμοποιούνται στην STS in seconds.
- ✓ Εφόσον θέλουμε να κάνουμε υπολογισμούς σε χρονικά διαστήματα μίας ώρας, θα πρέπει να θέσουμε τον counter PERLEN ως 60 min.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

Αυτός ο τύπος υπολογίζει τον μέσο χρόνο κράτησης καναλιού (Mean TCH holding time). Εάν θέλουμε να υπολογίσουμε τον μέσο χρόνο κράτησης κλήσης (Mean call holding time) αυτός ο τύπος έχει ένα μεγάλο μειονέκτημα: υπολογίζει τον μέσο χρόνο κράτησης του Traffic Channel (TCH) και όχι της κλήσης.

Πράγματι ο μέσος χρόνος κλήσης ορίζεται ως ο μέσος χρόνος κράτησης της κλήσης και όχι του TCH καναλιού, διότι κατά την διάρκεια μιας κλήσης υπάρχει πιθανότητα να έχουμε μεταγωγή (handover) σε άλλο κύτταρο.

Επομένως,

$$\text{Μέσος χρόνος κράτησης TCH (TF_MEANH)} < \text{Μέσο χρόνο κράτησης κλήσης}$$

Άρα θα πρέπει να αλλάξουμε τον τύπο υπολογισμού του μέσου χρόνου κράτησης της κλήσης σε έναν νέο τύπο που θα υπολογίζει και τα handover. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την κάτωθι formula για τον υπολογισμό του call mean holding time (seconds):

$$TF\ MEANH = \frac{TF\ TRAFF * PERLEN * 60}{TFCASSALL + TFCASSSUB} \quad (3.35)$$

Όπου αντιστοίχως οι counters ορίζονται ως

- **TFCASSALL**: Number of assignment complete messages for all MS power classes in underlaid subcell, full-rate.
- **TFCASSALLSUB**: Number of assignment complete messages for all MS power classes in overlaid subcell, full-rate.
- **TFCASSALL + TFCASSALLSUB** : αριθμός κλήσεων οι οποίες ξεκίνησαν στο συγκεκριμένο cell (Full rate κλήσεις)

Οι counters αυτοί δηλώνουν το σύνολο των κλήσεων που αφίχθησαν και τερματίστηκαν στο αυτό κύτταρο, άρα δεν υπολογίζουν τις κλήσεις που έφυγαν με handover.

3.3.2.5 Υπολογισμός Αριθμού Αφικνούμενων Κλήσεων με Χρήση Ericsson Counters

Ενδιαφέρον έχει να βρούμε και τον αριθμό των αφικνούμενων κλήσεων στο κύτταρο το οποίο υπολογίζεται από τον counter TFMSESTB όπως δείξαμε παραπάνω.

3.3.2.6 Υπολογισμός Μέσου Ρυθμού Αφικνούμενων Κλήσεων με Χρήση Ericsson Counters

Τώρα ενδιαφέρον έχει να βρούμε τον μέσο ρυθμό αφικνούμενων κλήσεων στο κύτταρο, διότι αυτό θα μας δώσει τον μέσο ρυθμό γεννήσεων λ στα μοντέλα της θεωρίας ουρών. Αυτό υπολογίζεται ως εξής:

Αν γνωρίζω τον αριθμό των αφικνούμενων κλήσεων N σε μία χρονική περίοδο T τότε το πηλίκο N/T θα μου δώσει τον μέσο ρυθμό αφικνούμενων κλήσεων στο κύτταρο.

Από προηγούμενη ανάλυση $N = \text{TFMSESTB}$ και $T = 1 \text{ hr}$, επομένως:

$$\lambda = \frac{N}{T} = \frac{\text{TFMSESTB}}{1 \text{ hr}} = \frac{\text{TFMSESTB}}{3600 \text{ sec}} \quad (3.36)$$

Και επιπλέον μπορώ να υπολογίσω εναλλακτικά και τον μέσο χρόνο κράτησης καναλιού TCH ως:

$$TF_MEANH = \frac{\frac{\text{TFMSESTB}}{\text{number_of_TCH_per_Cell}} [\text{calls/TCH}]}{\lambda [\text{calls/sec}]} \Rightarrow$$

$$TF_MEANH = \frac{\frac{\text{TFMSESTB}}{\text{number_of_TCH_per_Cell}} [\text{calls/TCH}]}{\frac{\text{TFMSESTB}}{3600} [\text{calls/sec}]}$$

Και επομένως ο μέσος χρόνος κράτησης υπολογίζεται :

$$TF_MEANH = \frac{3600}{\text{number_of_TCH_per_cell}} \left[\frac{\text{sec}}{\text{TCH}} \right] \text{ in seconds} \quad (3.37)$$

3.3.3 Δεύτερος Εναλλακτικός Τρόπος Υπολογισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

3.3.3.1 Ιδιότητα 2 Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης A

Τηλεπικοινωνιακή κίνηση A ορίζουμε το γινόμενο του αριθμού των κλήσεων οι οποίες καταφθάνουν σε ένα τηλεφωνικό δίκτυο επί τον μέσο χρόνο εξυπηρέτησης τους (σε Erlang), έτσι:

$$A = c \cdot \bar{s} = c \cdot \bar{h}$$

3.3.3.2 Απόδειξη Ιδιότητας 2

Έστω ότι στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα καταφθάνουν $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_v$ κλήσεις με χρόνο εξυπηρέτησης s_1, s_2, \dots, s_v αντιστοίχως. Τότε ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης σε διάστημα παρατήρησης T το οποίο για Erlang κίνηση είναι 1 ώρα (μέση διάρκεια χρήσης σε Erlang) θα είναι:

$$s = \frac{\alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2 + \dots + \alpha_v s_v}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_v} \Rightarrow s = \frac{\sum_{i=1}^v \alpha_i s_i}{\sum_{i=1}^v \alpha_i} \Rightarrow \left(\sum_{i=1}^v \alpha_i \right) \cdot s = \frac{\sum_{i=1}^v \alpha_i s_i}{T}$$

$$\text{εφόσον } \left(\sum_{i=1}^v \alpha_i \right) = c \text{ και } A = \frac{\text{συνολική διάρκεια κλήσεων}}{\text{συνολικό χρόνο παρατήρησης}} = \frac{\sum_{i=1}^v \alpha_i s_i}{T}$$

τότε προκύπτει ότι $A = c \cdot \bar{s} = c \cdot \bar{h}$

Η παραπάνω ιδιότητα 1 είναι πολύ σημαντική διότι διευκολύνει τον τρόπο μέτρησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης A σε ένα δίκτυο τηλεφωνίας σε σχέση με τον αρχικό ορισμό της ο οποίος είναι δύσχρηστος

3.3.3.3 Επαλήθευση Υπολογισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης βάσει Ιδιότητας 2

Έχουμε ήδη αναφέρει ότι ο τρόπος υπολογισμού της μέσης τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε ένα κύτταρο υπολογίζεται από τον τύπο (3.32):

$$TF_TRAFF = \frac{TF_TRALACC}{TF_NSCAN} [Erlang]$$

Βάσει ιδιότητας 2 όμως μπορεί να υπολογισθεί και εναλλακτικά ως:

$$A = TF_TRAFF = \lambda \cdot TF_MEANH [erlang] \quad (3.38)$$

Επομένως αν χρησιμοποιήσω τον τύπο

$$TF_MEANH = \frac{TF_TRAFF \cdot PERLEN \cdot 60}{TF_MSESTB} \text{ in seconds}$$

Και αν τον διαιρέσω με 3600 θα τον μετατρέψω σε Erlang, και επομένως η μέση τηλεπικοινωνιακή κίνηση θα δίδεται από τον τύπο:

$$A = TF_TRAFF = \lambda \cdot TF_MEANH [erlang] \Rightarrow$$

$$A = \left(\frac{TF_MSESTB}{3600 \text{sec}} \right) \cdot \frac{\left(\frac{TF_TRAFF \cdot PERLEN \cdot 60}{TF_MSESTB} \right)}{3600}$$

Και επομένως η μέση τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε Erlang θα υπολογίζεται από τον τύπο

$$A = \frac{TF_MSESTB \cdot TF_TRAFF \cdot PERLEN \cdot 60}{(3600)^2} [erlang]$$

3.3.4 Τρίτος Εναλλακτικός Τρόπος Υπολογισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

3.3.4.1 Ιδιότητα 3 Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης A

Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση A σε ένα ψηφιακό κέντρο ισούται με τον μέσο αριθμό κατειλημμένων καναλιών μίας γραμμής με πολυπλεξία, ή με τον μέσο αριθμό κατειλημμένων γραμμών σε μία δέσμη

3.3.4.2 Απόδειξη Ιδιότητας 3

Θα αποδείξουμε την ιδιότητα 4 χρησιμοποιώντας το παράδειγμα μία γραμμής με πολυπλεξία καναλιών. Έστω λοιπόν ότι η γραμμή με ν πολυπλεγμένα κανάλια διεκπεραιώνει κίνηση A Erlangs, όπου σύμφωνα με την ιδιότητα 3 ισχύει $0 \leq A \leq \nu$.

Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση που φέρει το i κανάλι της γραμμής, όπου $1 < i < \nu$, θα είναι κατά μέσον όρο ίσο με $A_i = \frac{A}{\nu}$ Erlangs.

Βάσει της ιδιότητας 3 το τηλεπικοινωνιακό φορτίο κάθε καναλιού είναι ίσο με την πιθανότητα κατάληψης του καναλιού, επομένως ο μέσος όρος των κατειλημμένων καναλιών ισούται με το γινόμενο του αριθμού των καναλιών επί την πιθανότητα κατάληψης κάθε καναλιού, έτσι έχουμε:

$$\begin{aligned} \text{Μέσος όρος κατειλημμένων καναλιών} &= \nu \cdot \text{πιθανότητα κατάληψης καναλιού} = \\ &= \nu \cdot \text{τηλεπικοινωνιακό φορτίο κάθε καναλιού} = \\ &= \nu \cdot A_i = \nu \cdot \frac{A}{\nu} = A \end{aligned}$$

επομένως:

$$A = \text{μέσος όρος κατειλημμένων καναλιών}$$

3.3.4.3 Επαλήθευση Υπολογισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης βάσει Ιδιότητας 3

Έχουμε ήδη αναφέρει ότι ο τρόπος υπολογισμού της μέσης τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε ένα κύτταρο υπολογίζεται είτε από τον τύπο:

$$TF_TRAFF = \frac{TF_TRALACC}{TF_NSCAN} [Erlang]$$

Είτε από τον τύπο:

$$A = \frac{TFMSESTB \cdot TF_TRAFF \cdot PERLEN \cdot 60}{TFMSESTB \cdot (3600)^2} [erlang]$$

Ο εναλλακτικός τρόπος της ιδιότητας 3:

Γνωρίζουμε ότι

$$\bar{\mu} = \frac{1}{\bar{T}_{hold}} = \frac{1}{\frac{TF_TRAFF * PERLEN * 60}{TFMSESTB}} = \frac{TFMSESTB}{TF_TRAFF * PERLEN * 60} [calls / sec]$$

Και εφόσον κάθε κλήση διεκπεραιώνεται σε ένα κανάλι

$$\bar{\mu} = \frac{TFMSESTB}{TF_TRAFF * PERLEN * 60} [καναλια / sec]$$

Αν πολλαπλασιάσω τον μέσο χρόνο θανάτου μ επί 3600 για μια ώρα θα έχω τον μέσο αριθμό κατειλημμένων καναλιών σε μία ώρα.

Άρα, βάσει ιδιότητας 3

$$A = \bar{\mu} \cdot 3600 \text{ Erlang}$$

3.4 Επιβεβαίωση Θεωρητικών Υπολογισμών με Στατική Ανάλυση Δεδομένων

Σε αυτό το σημείο της εργασίας θα επιβεβαιώσουμε τους μαθηματικούς τύπους που αποδείξαμε παραπάνω, βάσει πραγματικών μετρήσεων, από κεραία κινητής τηλεφωνίας της εταιρίας Cosmote , τεχνολογίας Ericsson.

Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην περιοχή των Ιωαννίνων σε ένα cell κεντρικού σταθμού κινητής τηλεφωνίας ,τεχνολογίας Ericsson , στις 15 Μαρτίου 2010 για 24 ώρες από όπου εξάγαμε δεδομένα κάθε μια ώρα. Τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των :

- Μέσου Χρόνου Κράτησης Καναλιού
- Μέσου Ρυθμού Αφικνούμενων Κλήσεων στο κύτταρο
- Υπολογισμού Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Οι counters που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις είναι οι εξής:

- **TF_TRAFF** : όπου υπολογίζει την τηλεπικοινωνιακή κίνηση A.
- **TFMSESTB**: Successful MS Establishment on TCH full-rate. Όπου είναι το σύνολο των κλήσεων που είτε ξεκίνησαν επιτυχώς στο κύτταρο είτε μετέχθησαν λόγω handover από γειτονικά κύτταρα, δεν ξέρουμε όμως αν τερματίστηκαν σε αυτό το κύτταρο ή μετέχθησαν με διαδικασία handover.
- **TFCASSALL**: αριθμός εκχώρησης ολοκληρωμένων μηνυμάτων για όλες τις MS κατηγορίες ισχύος (in underlaid subcell, full-rate).
- **TFCASSALLSUB**: αριθμός εκχώρησης ολοκληρωμένων μηνυμάτων για όλες τις MS κατηγορίες ισχύος (in overlaid subcell, full-rate).
- **TFCASSALL + TFCASSALLSUB** : αριθμός κλήσεων οι οποίες ξεκίνησαν στο συγκεκριμένο cell (Full rate κλήσεις).

DATE / TIME	TCH TRAFFIC (Erl)	Call Bids (TFMSESTB)	TCASSALL	TFCASSALLSUB	TCH Seiz.
15/03/2010 00:00	3.49	469	72	0	72
15/03/2010 01:00	2.09	175	38	0	38
15/03/2010 02:00	0.91	93	19	0	19
15/03/2010 03:00	0.34	76	12	0	12
15/03/2010 04:00	0.16	41	9	0	9
15/03/2010 05:00	0.14	33	8	0	8
15/03/2010 06:00	0.36	70	19	0	19
15/03/2010 07:00	1.31	347	103	0	103
15/03/2010 08:00	3.55	946	237	0	237
15/03/2010 09:00	5.15	1400	328	0	328
15/03/2010 10:00	6.78	1794	357	0	357
15/03/2010 11:00	7.29	2097	403	0	403
15/03/2010 12:00	7.89	2110	451	0	451
15/03/2010 13:00	8.40	2311	515	0	515
15/03/2010 14:00	8.71	2325	499	0	499
15/03/2010 15:00	7.85	1851	339	0	339
15/03/2010 16:00	5.13	1260	287	0	287
15/03/2010 17:00	6.61	1589	301	0	301
15/03/2010 18:00	8.12	1984	534	0	534
15/03/2010 19:00	12.59	2924	911	0	911
15/03/2010 20:00	21.43	4747	1611	0	1611
15/03/2010 21:00	16.61	3627	1128	0	1128
15/03/2010 22:00	9.97	1844	509	0	509
15/03/2010 23:00	6.14	967	164	0	164

Πίνακας 2: Μετρήσεις counters

Όπως βλέπουμε στον παραπάνω πίνακα οι μετρήσεις έγιναν για 24 ώρες και για κάθε ώρα εξάγαμε δεδομένα τα οποία θα μας χρησιμεύσουν στους υπολογισμούς μας. Για τον counter TFCASSALLSUB οι μετρήσεις είναι μηδενικές διότι αφορά cell τύπου umbrella, τα οποία δεν υπάρχουν τεχνολογίας Ericsson παρά μόνο Nokia. Για τον λόγο αυτό σε όλους τους υπολογισμούς που θα γίνουν παρακάτω η παράμετρος αυτή θα ισούται με μηδέν.

3.4.1 Μαθηματικός Υπολογισμός Μέσου Χρόνου Κράτησης της Κλήσης με Χρήση Ericsson Counters.

Για τον υπολογισμό του μέσου χρόνου κράτησης της κλήσης (call mean holding time (seconds))ο οποίος θα υπολογίζει και τα handover, θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο (3.35) που αποδείξαμε παραπάνω και είναι :

$$TF\ MEANH = \frac{TF\ TRAFF * PERLEN * 60}{TFCASSALL + TFCASSSUB}$$

Από τις μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί έχουμε όλα τα δεδομένα που χρειαζόμαστε. Εφόσον θέλουμε να κάνουμε υπολογισμούς σε χρονικά διαστήματα μίας ώρας, θα πρέπει να θέσουμε τον counter PERLEN ως 60 min.

Επομένως για τις 15/03/2010 00:00 έχουμε :

$$TF\ MEANH = \frac{3,49 * 60 * 60}{72 + 0} = 174,5 \text{ (seconds)}$$

Για τις 15/03/2010 01:00:

$$TF\ MEANH = \frac{2,09 * 60 * 60}{38 + 0} = 198 \text{ (seconds)}$$

Για τις 15/03/2010 02:00 :

$$TF\ MEANH = \frac{0,91 * 60 * 60}{19 + 0} = 172,42 \text{ (seconds)}$$

Πράττουμε ομοίως και για τις υπόλοιπες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών του μέσου χρόνου κράτησης του καναλιού συμπεριλαμβανομένων και των handover στο cell παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 παρακάτω.

DATE/TIME	TF MEANH
15/3/2010 0:00	174,5
15/3/2010 1:00	198
15/3/2010 2:00	172,4
15/3/2010 3:00	102
15/3/2010 4:00	64
15/3/2010 5:00	63
15/3/2010 6:00	68,21
15/3/2010 7:00	45,78
15/3/2010 8:00	53,92
15/3/2010 9:00	56,52
15/3/2010 10:00	68,36
15/3/2010 11:00	65,12
15/3/2010 12:00	62,98
15/3/2010 13:00	58,71
15/3/2010 14:00	62,83
15/3/2010 15:00	70,82
15/3/2010 16:00	64,34
15/3/2010 17:00	79,05
15/3/2010 18:00	54,74
15/3/2010 19:00	49,75
15/3/2010 20:00	47,88
15/3/2010 21:00	53,01
15/3/2010 22:00	70,51
15/3/2010 23:00	134,78

Πίνακας 3: Αποτελέσματα υπολογισμού μέσου χρόνου κράτησης της κλήσης

3.4.2 Μαθηματικός Υπολογισμός Μέσου Ρυθμού Αφικνούμενων Κλήσεων με Χρήση Ericsson Counters

Ενδιαφέρον έχει να βρούμε τον μέσο ρυθμό αφικνούμενων κλήσεων στο κύτταρο, διότι αυτό θα μας δώσει τον μέσο ρυθμό γεννήσεων λ στα μοντέλα της θεωρίας ουρών. Αυτό υπολογίζεται από τον τύπο (3.36) και είναι ο εξής:

$$\lambda = \frac{N}{T} = \frac{\text{TFMSESTB}}{1\text{hr}} = \frac{\text{TFMSESTB}}{3600\text{sec}}$$

Αν γνωρίζω τον αριθμό των αφικνούμενων κλήσεων N σε μία χρονική περίοδο T τότε το πηλίκο N/T θα μου δώσει τον μέσο ρυθμό αφικνούμενων κλήσεων στο κύτταρο.

Από προηγούμενη ανάλυση $N = \text{TFMSESTB}$ και $T = 1\text{ hr}$, επομένως:

Για τις 15/03/2010 00:00 έχουμε :

$$\lambda = \frac{72}{3600} = 0,02$$

Για τις 15/03/2010 01:00:

$$\lambda = \frac{38}{3600} = 0,010$$

Πράττουμε ομοίως και για τις υπόλοιπες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών του μέσου ρυθμού αφικνούμενων κλήσεων στο κύτταρο απεικονίζονται στον Πίνακα 4 παρακάτω.

DATE/TIME	λ
15/3/2010 0:00	0,02
15/3/2010 1:00	0,01
15/3/2010 2:00	0,0052
15/3/2010 3:00	0,0033
15/3/2010 4:00	0,0025
15/3/2010 5:00	0,0022
15/3/2010 6:00	0,0052
15/3/2010 7:00	0,0286
15/3/2010 8:00	0,0658
15/3/2010 9:00	0,0911
15/3/2010 10:00	0,0991
15/3/2010 11:00	0,1119
15/3/2010 12:00	0,1252
15/3/2010 13:00	0,143
15/3/2010 14:00	0,1386
15/3/2010 15:00	0,09416
15/3/2010 16:00	0,07972
15/3/2010 17:00	0,08361
15/3/2010 18:00	0,1483
15/3/2010 19:00	0,253
15/3/2010 20:00	0,4475
15/3/2010 21:00	0,3133
15/3/2010 22:00	0,1413
15/3/2010 23:00	0,04555

Πίνακας 4 :Αποτελέσματα υπολογισμού μέσου ρυθμού αφικνούμενων κλήσεων στο κύτταρο

3.4.3 Μαθηματικός Υπολογισμός Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης βάσει Ιδιότητας 2

Όπως αποδείξαμε παραπάνω ένας άλλος τρόπος για να υπολογίσουμε την τηλεπικοινωνιακή κίνηση είναι βάση της ιδιότητας 2, απ όπου προκύπτει ο τύπος (3.38):

$$A = TF_TRAFF = \lambda \cdot TF_MEANH[erlang]$$

Έχοντας ήδη υπολογίσει το μέσο ρυθμό αφικνούμενων κλήσεων στο κύτταρο λ τα αποτελέσματα του οποίου βλέπουμε στον Πίνακα 4 καθώς επίσης και τον μέσο χρόνο κράτησης της κλήσης (Πίνακας 3) υπολογίζουμε την τηλεπικοινωνιακή κίνηση.

$$A=TF_TRAFF=0,02*174,5=3,49$$

$$A=TF_TRAFF=0,010*209=2,09$$

$$A=TF_TRAFF=0,0052*175=0,91$$

.

.

.

Ομοίως πράττουμε για κάθε ώρα και υπολογίζουμε την τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 παρακάτω.

DATE/TIME	TF_TRAFF
15/3/2010 0:00	3,49
15/3/2010 1:00	2,09
15/3/2010 2:00	0,91
15/3/2010 3:00	0,34
15/3/2010 4:00	0,16
15/3/2010 5:00	0,14
15/3/2010 6:00	0,36
15/3/2010 7:00	1,31
15/3/2010 8:00	3,55
15/3/2010 9:00	5,15
15/3/2010 10:00	6,78
15/3/2010 11:00	7,29
15/3/2010 12:00	7,89
15/3/2010 13:00	8,4
15/3/2010 14:00	8,71
15/3/2010 15:00	7,85
15/3/2010 16:00	5,13
15/3/2010 17:00	6,61
15/3/2010 18:00	8,12
15/3/2010 19:00	12,59
15/3/2010 20:00	21,43
15/3/2010 21:00	16,61
15/3/2010 22:00	9,97
15/3/2010 23:00	6,14

Πίνακας 5 : Αποτελέσματα υπολογισμού τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

3.4.4 Υπολογισμός μέσου αριθμού κατειλημμένων καναλιών βάσει Ιδιότητας 3

Για να υπολογίσουμε τον μέσο αριθμό κατειλημμένων καναλιών θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο που αποδείξαμε βάσει της Ιδιότητας 3 ο οποίος είναι :

$$A = \bar{\mu} \cdot 3600 \text{ Erlang}$$

Όπου

$$\bar{\mu} = \frac{TFMSESTB}{TF_TRAFF * PERLEN * 60} [\text{καναλια} / \text{sec}]$$

Γνωρίζουμε όλες τις παραμέτρους για τον υπολογισμό αρχικά του μ . Και εδώ θέτουμε την παράμετρο PERLEN =0 εφόσον θέλουμε να πάρουμε αποτελέσματα μίας ώρας.

DATE/TIME	A=μ*3600
15/3/2010 0:00	20,63
15/3/2010 1:00	172,22
15/3/2010 2:00	20,57
15/3/2010 3:00	34,94
15/3/2010 4:00	56,25
15/3/2010 5:00	56,57
15/3/2010 6:00	52
15/3/2010 7:00	78,59
15/3/2010 8:00	66,72
15/3/2010 9:00	63,68
15/3/2010 10:00	52,62
15/3/2010 11:00	55,25
15/3/2010 12:00	57,12
15/3/2010 13:00	61,28
15/3/2010 14:00	57,28
15/3/2010 15:00	43,18
15/3/2010 16:00	55,94
15/3/2010 17:00	45,53
15/3/2010 18:00	65,028
15/3/2010 19:00	72,34
15/3/2010 20:00	75,187
15/3/2010 21:00	67,91
15/3/2010 22:00	51,02
15/3/2010 23:00	26,67

Πίνακας 6 :Αποτελέσματα υπολογισμού μέσου αριθμού κατειλημμένων καναλιών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1 Επίλογος

Το GSM είναι το πιο γνωστό ψηφιακό σύστημα κινητών επικοινωνιών στον κόσμο σήμερα, το οποίο χρησιμοποιείται από δισεκατομμύρια συνδρομητές σε όλες τις χώρες. Η δομή του GSM αποτελείται από τρία κύρια, διασυνδεδεμένα υποσυστήματα, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους αλλά και με τους χρήστες κινητών σταθμών μέσω συγκεκριμένων διεπαφών δικτύου. Μία πληθώρα από υπάρχουσες τεχνολογίες βρίσκεται σήμερα κάτω από την «ομπρέλα» των κινητών επικοινωνιών. Αυτές περιλαμβάνουν αναλογικά και ψηφιακά κυψελωτά συστήματα, δορυφορικά συστήματα, ασύρματη τηλεφωνία, συστήματα τηλεειδοποίησης και ασύρματα τοπικά δίκτυα.

Με την έλευση των Κυψελωτών Συστημάτων Κινητής Τηλεφωνίας στις αρχές της δεκαετίας του '80, οι κινητοί συνδρομητές είχαν πρόσβαση σε ένα σύνολο από επικοινωνιακές υπηρεσίες εντός των γεωγραφικών ορίων της λειτουργικής τηλεπικοινωνιακής περιοχής. Αυτό έγινε πραγματικότητα με τον επιμερισμό της περιοχής υπηρεσιών των συστημάτων αυτών σε μικρότερες γεωγραφικές περιοχές, τις κυψέλες (cells), κάθε μία εκ των οποίων καλύπτεται ηλεκτρομαγνητικά από ένα μόνο σταθμό βάσης. Σε κάθε τέτοιο σταθμό βάσης εκχωρείται ένας ορισμένος αριθμός από το σύνολο των συχνοτήτων που διαθέτει ολόκληρο το σύστημα. Το πλεονέκτημα της κυψελωτής δομής είναι ότι οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε μία κυψέλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε άλλη.

Η θεωρία ουρών, σε συνδυασμό με την προσομοίωση, παίζουν σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της απόδοσης των συστημάτων της Κινητής Τηλεφωνίας και ιδιαίτερος στην εκτίμηση της χωρητικότητας του δικτύου, ώστε να αποφεύγονται περιπτώσεις συμφόρησης (congestion). Μέσα από την μελέτη βασικών μοντέλων θεωρίας ουρών δημιουργήσαμε τύπους οι οποίοι υπολογίζουν την τηλεπικοινωνιακή κίνηση, τον μέσο χρόνο εξυπηρέτησης μιας κλήσης, τον μέσο χρόνο κράτησης καναλιού. Έπειτα από μετρήσεις που έγιναν σε τηλεπικοινωνιακό σταθμό αυτοί οι τύποι υπολογίζονται και μαθηματικά.

Αναφορές :

- 1) K. Wesolowski, *Mobile Communication Systems*, John Wiley & Sons, 2002
- 2) Tanenbaum, Andrew S., "Computer Networks", Third Edition, Prentice Hall, 1996
- 3) James Kurose, Keith Ross, "Computer Networking, 3rd Edition, Int. Edition, Addison Wesley
- 4) Jean Walrand, "Communication Networks", 2nd ed., McGraw Hill, 1998
- 5) Σημειώσεις Θεωρίας Δικτύων Υπολογιστών, Ι.Δ.Αγγελόπουλος, διαθέσιμες σε μορφή pdf στην ιστοσελίδα <http://:auto.teipir.gr>
- 6) Σημειώσεις Ετερογενή Συστήματα Κινητής Τηλεφωνίας GSM-UMTS , Γ.Σ.Μητρόπουλος
- 7) Βελτιστοποίηση της ποιότητας υπηρεσιών (QoS) των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 2G, 3G μέσω αλγορίθμων μεταγωγής και οπτικών ζεύξεων, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2004