

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών *Συστήματα
Ασύρματης Επικοινωνίας*

Μεταπτυχιακή Διατριβή



Υπολογισμός της Πιθανότητας απώλειας κλήσεων με σταθερή ροή δεδομένων και δυνατότητα επανάληψης με μικρότερη ροή, σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα τεχνολογίας WCDMA

Ελευθερία Χαρίση

Επιβλέπων Καθηγητής
Μιχαήλ Λογοθέτης

Μάιος 2023

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Συστήματα

Ασύρματης Επικοινωνίας

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσεων με σταθερή ροή δεδομένων και δυνατότητα επανάληψης με μικρότερη ροή, σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα τεχνολογίας WCDMA

Ελευθερία Χαρίση

**Επιβλέπων Καθηγητής
Μιχαήλ Λογοθέτης**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Μάιος 2023

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσεων με σταθερή ροή δεδομένων και δυνατότητα επανάληψης με μικρότερη ροή, σε περίπτωση μπλοκαρίσματος της κλήσης, σε κυψελωτά δίκτυα τεχνολογίας WCDMA. Στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται στοιχεία της Θεωρίας Τηλεπικοινωνιακής Κινήσεως και των τριών βασικών παραγόντων ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου, δηλαδή της χωρητικότητας, του βαθμού εξυπηρέτησης και του φορτίου καθώς και μοντέλα εξυπηρέτησης κλήσεων. Γίνεται αναφορά επίσης στα ασύρματα δίκτυα WCDMA. Στο Κεφάλαιο 2, αναφέρονται οι κύριες παράμετροι των δικτύων αυτών και στο Κεφάλαιο 3 αναφέρονται τα στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό τους καθώς αναλύεται και ο αναδρομικός τύπος Kaufman – Roberts. Στο Κεφάλαιο 4, αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων σ' ένα σύστημα WCDMA. Στο Κεφάλαιο 5, αναφέρεται ο τρόπος που υπολογίζονται οι παρεμβολές σε κυψέλη δικτύου WCDMA και στο Κεφάλαιο 6 υπολογίζεται η τοπική πιθανότητα απώλειας κλήσεων. Στο Κεφάλαιο 7, υπολογίζεται η συνολική πιθανότητα απώλειας κλήσεων, στο Κεφάλαιο 8 αναφέρεται ένας προσεγγιστικός υπολογιστής της συνολικής πιθανότητας απώλειας κλήσεων και στο κεφάλαιο 9, αναλύονται τα γενικά μοντέλα Single Retry και CDTM καθώς και εφαρμογή τους στα ασύρματα δίκτυα WCDMA.

Summary

The purpose of this work is to calculate the call blocking probability (CBP) with a constant data flow and the possibility of repetition with a lower flow, in case of blocking of the call, in cellular networks of WCDMA technology. In Chapter 1, elements of Teletraffic Theory are presented and the three main factors of a telecommunication network, namely capacity, degree of service and load, as well as call service models are mentioned. Reference is made also to WCDMA wireless networks. In Chapter 2, the main parameters of these networks are mentioned, and in Chapter 3, the elements that must be taken into account for their design are mentioned, as the recursive Kaufman-Roberts formula is also analyzed. In Chapter 4, it is mentioned how call admission control is done in a WCDMA system. In Chapter 5, it is mentioned how the interference in a WCDMA network cell is calculated and in Chapter 6 the local probability of call blocking is calculated. In Chapter 7, the total probability of call blocking is calculated, in Chapter 8 an approximate calculator of the total probability of call blocking is reported, and in chapter 9, the general Single Retry and CDTM models and their application to WCDMA wireless networks are analyzed.

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία με θέμα «Υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσεων με σταθερή ροή δεδομένων και δυνατότητα επανάληψης με μικρότερη ροή, σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα τεχνολογίας WCDMA», αποτελεί διπλωματική διατριβή του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας» του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Για την εκπόνησή της, συνέβαλλαν ορισμένοι άνθρωποι που χρήζουν εκτίμησης, σεβασμού και εγκάρδιων ευχαριστηρίων, καθώς η συνεργασία μαζί τους ήταν καταλυτική.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες των ευχαριστιών μου στον επιβλέποντα καθηγητή της διατριβής, τον κ. Μιχαήλ Λογοθέτη για την πολύτιμη καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράσταση, όπως επίσης και τις ουσιώδεις και στοχευμένες συμβουλές που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινώς την οικογένειά μου, το σύζυγό μου Ιωάννη και την κόρη μου Μαρία, τους γονείς μου Ιωάννη και Μαρία και τον αδερφό μου Αναστάσιο, που στάθηκαν αρωγοί στη συνολική μου προσπάθεια έως σήμερα και χωρίς την απόλυτη στήριξή τους, δεν θα είχα καταφέρει το παραμικρό.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση	1
1.1.1	Φορτίο Κίνησης.....	2
1.1.2	Βαθμός Εξυπηρέτησης	4
1.1.3	Χωρητικότητα Συστήματος	5
1.2	Θεμελιώδη Μοντέλα Τηλεπικοινωνιακής Κινήσεως	7
1.2.1	Μοντέλο Άφιξης Κλήσεων	7
1.2.2	Συστήματα Εξυπηρέτησης	8
1.3	Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Τεχνολογίας WCDMA.....	10
2	Κύριες Παράμετροι Δικτύων WCDMA	12
3	Σχεδιασμός Δικτύων WCDMA	16
4	Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων	22
5	Παρεμβολές σε Κυψέλη Δικτύου WCDMA	24
6	Τοπική Πιθανότητα Απώλειας Κλήσεων	27
7	Συνολική Πιθανότητα Απώλειας Κλήσεων	30
8	Προσεγγιστικός Υπολογιστής της Συνολικής Πιθανότητας Απώλειας Κλήσεων	33
9	Εφαρμογές	39
10	Επίλογος	53
Παράρτημα	54	
Διωνυμική κατανομή	54	
Κατανομή Poisson	55	
Gaussian κατανομή	56	
Λογαριθμική κανονική κατανομή	59	
Βιβλιογραφία	61	

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα έχουν εξελιχθεί από τα πατροπαράδοτα τηλεφωνικά δίκτυα σε ψηφιακά δίκτυα πολλαπλών υπηρεσιών, τα οποία διεκπεραιώνουν την μεταγωγή και την μετάδοση φωνής, δεδομένων και εικόνων. Η γενικότερη πρόοδος στις τηλεπικοινωνίες, υπόσχονται στο άμεσο μέλλον, δίκτυα ευρείας ζώνης (ταχύτητες $\gg 2$ Mbps) με βασική υπηρεσία το video υψηλής ταχύτητας και ευκρίνειας (HD video – 1920×1080 pixels).

Η εξέλιξη των δικτύων έχει γιγαντώσει την κλασσική θεωρία τηλεπικοινωνιακής κινήσεως. Ένα μάθημα θεωρίας τηλεπικοινωνιακής κινήσεως την δεκαετία του 1980, θα μπορούσε να περιορισθεί στην μελέτη των χαρακτηριστικών μίας μόνον υπηρεσίας (της τηλεφωνίας). Ένα σύγχρονο όμως μάθημα, είναι αδιανόητο να μη θεωρεί ως πραγματικότητα το περιβάλλον των πολλαπλών υπηρεσιών.

1.1 Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

Η Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κινήσεως είναι ένας κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών και ειδικότερα της εφαρμοσμένης πιθανοθεωρίας. Στην βιβλιογραφία απαντάται με διάφορα ονόματα, όπως θεωρία συμφόρησης (congestion theory), θεωρία των στοχαστικών συστημάτων εξυπηρέτησης (theory of stochastic service systems), θεωρία ουρών (queuing theory) και θεωρία της μαζικής εξυπηρέτησης (theory of mass service). Ο όρος Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κινήσεως (Teletraffic Theory) χρησιμοποιείται για θεωρίες ανάλυσης της κίνησης τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, αρχίζοντας από τα τηλεφωνικά συστήματα.

Το αντικείμενο της τηλεπικοινωνιακής κινήσεως μπορεί να περιλαμβάνει τον βέλτιστο υπολογισμό των διαστάσεων μιας ζεύξης, της αξιοποίηση υποσυστημάτων συστήματος χρονομερισμού, τον βέλτιστο σχεδιασμό εναλλακτικής δρομολόγησης και την αξιολόγηση καλής λειτουργίας.

Η θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης αποτελεί την μαθηματική βάση τόσο για το βέλτιστο σχεδιασμό των τηλεπικοινωνιακών δικτύων όσο και για την ικανοποίηση των προδιαγραφών σχετικά με την ποιότητα εξυπηρέτησης (Quality of Service – QoS). Με άλλα λόγια, η θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης δίνει τη δυνατότητα αξιολόγησης της λειτουργίας ενός δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, είναι απαραίτητη η εύρεση μαθηματικών σχέσεων που συνδέουν τους τρεις βασικούς παράγοντες ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Οι παράγοντες αυτοί είναι:

1. η χωρητικότητα του συστήματος (system capacity), C
2. η προσφερόμενη ποιότητα εξυπηρέτησης (quality of service – QoS) ή ο βαθμός των προσφερόμενων υπηρεσιών
3. το φορτίο κίνησης (traffic load) α

Σκοπός της θεωρίας τηλεπικοινωνιακής κίνησης είναι η εύρεση των σχέσεων που συνδέουν αυτούς τους τρεις παράγοντες. [Moscholios, Logothetis, 2019]

1.1.1 Φορτίο Κίνησης

Το φορτίο κίνησης σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο αναφέρεται στη κίνηση που δημιουργείται από τις κλήσεις (call) σε αυτό. Κλήση είναι η απαίτηση για σύνδεση σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Ο αριθμός των κλήσεων μεταβάλλεται τυχαία, καθώς οι κλήσεις αρχίζουν και τελειώνουν τυχαία. Ως διάρκεια κλήσης (call holding time), τ ορίζεται το χρονικό διάστημα που διαρκεί μια κλήση, γνωστό και ως χρόνος εξυπηρέτησης (service time). Στην περίπτωση που όλες οι γραμμές (trunks) είναι κατειλημμένες, δεν είναι δυνατόν να εξυπηρετηθούν άλλες κλήσεις. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται συμφόρηση (congestion) και οι εισερχόμενες κλήσεις μπλοκάρονται και εγκαταλείπουν το σύστημα.

Το φορτίο κίνησης αποτελεί τη συνολική διάρκεια όλων των κλήσεων κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος παρατήρησης διαιρεμένο με το χρονικό διάστημα παρατήρησης. Οι Λογοθέτης και Μοσχολιός αναφέρουν ότι, από αυτό τον ορισμό,

προκύπτει ότι το φορτίο κίνησης είναι ένα αδιάστατο μέγεθος. Ωστόσο, χρησιμοποιείται η μονάδα φορτίου κίνησης Erlang (erl) προς τιμήν του Δανού μαθηματικού Agner Kragur Erlang (1878–1929), ο οποίος είναι ο ιδρυτής της θεωρίας τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

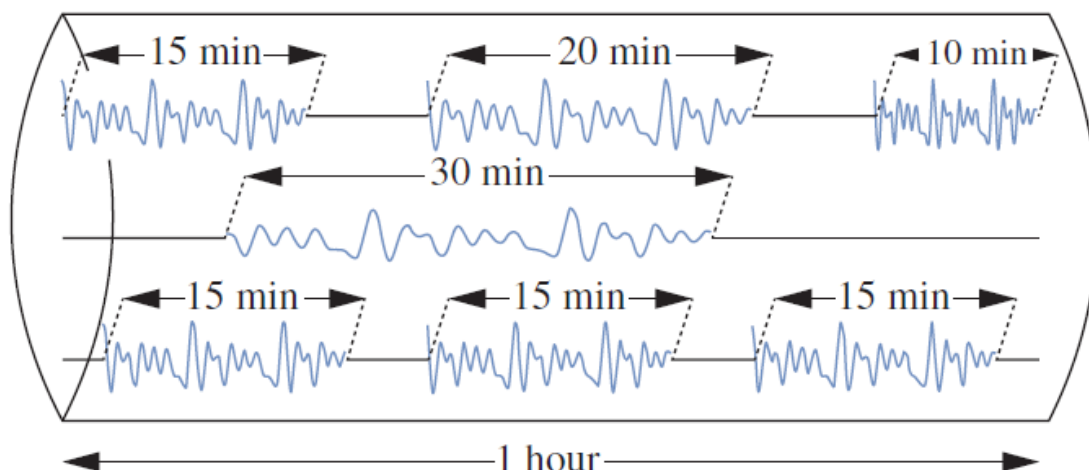
Εκτός από τη μονάδα Erlang, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μονάδα μέτρησης το CCS (Centum Call Seconds), όπου ο χρόνος παρατήρησης ισούται με εκατό δευτερόλεπτα (100 sec). Σε αυτή την περίπτωση, υπολογίζεται πόσες εκατοντάδες δευτερόλεπτα ήταν κατειλημμένη μία γραμμή. Έτσι, το φορτίο κίνησης σε erl είναι

- Φορτίο κίνησης (erl) = (συνολικός χρόνος κατάληψης του καναλιού σε δευτερόλεπτα) / 3600
- Φορτίο κίνησης (CCS) = (συνολικός χρόνος κατάληψης του καναλιού σε δευτερόλεπτα) / 100

Άρα, $1 \text{ erl} = 36 \text{ CCS}$

Με βάση τον ορισμό του φορτίου κίνησης, μια γραμμή μεταφέρει 1 erl, αν είναι πλήρως κατειλημμένη για όλο το διάστημα παρατήρησης. Με άλλα λόγια, το φορτίο κίνησης που διεκπεραιώνεται από μία γραμμή μόνο, είναι ισοδύναμο με την πιθανότητα η γραμμή να είναι κατειλημμένη. Επομένως μία γραμμή δεν μπορεί να μεταφέρει παρά μόνον 1 erl το πολύ (αφού η μέγιστη τιμή πιθανότητας είναι 1).

Για παράδειγμα, στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα 3 γραμμών, όπου πραγματοποιούνται 7 κλήσεις σε ένα χρονικό διάστημα 1 ώρας.



Εικόνα 1. Τηλεπικοινωνιακό σύστημα 3 γραμμών με 7 κλήσεις σε χρονικό διάστημα 1 ώρας [2]

Το φορτίο κίνησης ισούται με τη συνολική διάρκεια κλήσεων προς το χρόνο παρατήρησης. Έτσι, στην παραπάνω εικόνα, η πρώτη γραμμή καταλαμβάνεται από τρεις κλήσεις για $(15 + 20 + 10)$ λεπτά = 45 λεπτά, η δεύτερη γραμμή από μία κλήση για 30 λεπτά και η τρίτη από τρεις κλήσεις για $(15 + 15 + 15)$ λεπτά = 45 λεπτά. Έτσι, το φορτίο κίνησης α είναι:

$$\alpha = (45 + 30 + 45) \text{ min} / 60 \text{ min} = 2 \text{ erl.}$$

Αν c είναι ο αριθμός των κλήσεων που φθάνουν σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα και h είναι η μέση διάρκειά τους, τότε το φορτίο κίνησης α δίδεται από την σχέση:

$$\alpha = ch.$$

1.1.2 Βαθμός Εξυπηρέτησης

Η δημιουργία ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος που θα μπορούσε να εξυπηρετήσει το μέγιστο όγκο κίνησης απαιτεί όσο το δυνατόν περισσότερους πόρους, το οποίο είναι ανέφικτο οικονομικά. Έτσι, όταν όλες οι γραμμές ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι κατειλημμένες, το σύστημα δεν μπορεί να δεχτεί περισσότερες κλήσεις. Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση συμφόρησης (congestion), οι εισερχόμενες κλήσεις μπλοκάρονται και εγκαταλείπουν το σύστημα. Ένα τέτοιο σύστημα ονομάζεται σύστημα απωλειών (loss system). Σε κάποιες περιπτώσεις, μία μπλοκαρισμένη εισερχόμενη κλήση μπορεί να περιμένει να συνδεθεί στο σύστημα σε κάποιο σύστημα αναμονής (waiting or delay system) ή κάποια ουρά (queue). Το ποσοστό των κλήσεων που χάνονται ή καθυστερούν λόγω συμφόρησης του συστήματος

υποδηλώνει το βαθμό εξυπηρέτησης (Grade Of Service – GOS) που παρέχεται από το σύστημα. Το GOS αποτελεί το QoS ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος και καθορίζει το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη/πελάτη από τη προσφερόμενη υπηρεσία.

Σε ένα σύστημα απωλειών ο βαθμός εξυπηρέτησης B ορίζεται ως:

$$B = \frac{\text{Συνολικός αριθμός χαμένων κλήσεων}}{\text{Συνολικός αριθμός προσφερθεισών κλήσεων}}$$

ή διαφορετικά

$$B = \frac{\text{Κίνηση που χάθηκε}}{\text{Κίνηση που προσφέρθηκε}}$$

ή

B = Ποσοστό χρόνου όπου υπάρχει συμφόρηση, ή

B = Πιθανότητα συμφόρησης, ή

B = Πιθανότητα ότι μία κλήση θα χαθεί λόγω συμφόρησης

Επομένως, αν το φορτίο κίνησης α προσφερθεί σε ζεύξη με $GOS = B$, η κίνηση που θα χαθεί είναι $\alpha * B$ και η κίνηση που θα διεκπεραιωθεί είναι $\alpha * (1 - B)$.

Ο βαθμός εξυπηρέτησης:

1. Καθορίζεται για την κίνηση κατά την ώρα αιχμής.
2. Είναι μικρότερος ή ίσος της μονάδας (εξ ορισμού)
3. Όσο μεγαλύτερος είναι (υψηλή πιθανότητα συμφόρησης), τόσο χειρότερο είναι το σύστημα και οι χρήστες θα παραπονιούνται ότι οι κλήσεις συχνά αποτυγχάνουν
4. Δεν είναι ενιαίος για ολόκληρο το τηλεπικοινωνιακό σύστημα αλλά μεταβάλλεται στα διάφορα μέρη του (π.χ. διαφορετικό GOS στις αστικές ζεύξεις απ' ότι στις διεθνείς ζεύξεις).

1.1.3 Χωρητικότητα Συστήματος

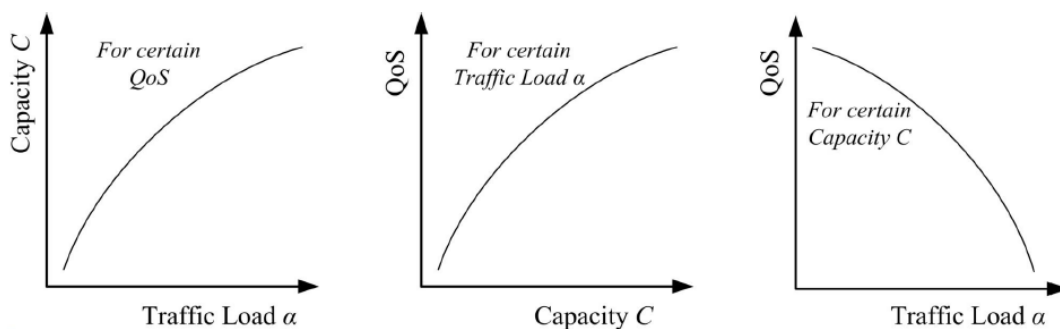
Ο υπολογισμός της χωρητικότητας ενός συστήματος αποτελεί ένα πρόβλημα γνωστό ως διαστασιολόγησης / διαστασιοποίησης (dimensioning problem). Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα αυτό μπορεί να ορισθεί ως εξής:

Δεδομένου του προσφερόμενου φορτίου κίνησης α και του επιθυμητού βαθμού εξυπηρέτησης B , ποια είναι η χωρητικότητα του τηλεπικοινωνιακού συστήματος;

Το πρόβλημα αυτό είναι περίπλοκο ακόμα και στην σημερινή εποχή, όπου σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα παρέχονται περισσότερες από μία υπηρεσίες, καθεμία από τις οποίες συνήθως απαιτεί διαφορετικό QoS.

Ένα σύστημα επικοινωνίας δεν έχει πάντα τη δυνατότητα να καλύψει όλες τις πιθανές αιχμές του κυκλοφοριακού φόρτου. Έτσι, συνήθως, η χωρητικότητα ενός συστήματος καθορίζεται με βάση τις ανάγκες σε φόρτο κατά την ώρα αιχμής (busy hour). Ο όρος busy hour αναφέρεται στο χρονικό διάστημα 1 ώρας όπου ο κυκλοφοριακός φόρτος φτάνει στο (συνηθισμένο) μέγιστο. Σαν αποτέλεσμα, το σύστημα επικοινωνίας θα υπολειπεται τον υπόλοιπο χρόνο. [Moscholios, Logothetis, 2019]

Οι σχέσεις μεταξύ των τριών προηγούμενων παραγόντων φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 2. Σχέση μεταξύ των παραγόντων της Θεωρίας Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Η αριστερή καμπύλη εκφράζει το πρόβλημα διαστασιολόγησης, ενώ η μεσαία και η δεξιά καμπύλη εκφράζουν το πρόβλημα αξιολόγησης απόδοσης, ανάλογα με το τι διορθώνεται ανάμεσα στο προσφερόμενο κυκλοφοριακό φόρτο και τη χωρητικότητα του συστήματος, αντίστοιχα.

1.2 Θεμελιώδη Μοντέλα Τηλεπικοινωνιακής Κινήσεως

Η μέτρηση της τηλεπικοινωνιακής κινήσεως έχει ως βασικό στόχο τον υπολογισμό της κίνησης την ώρα αιχμής, προκειμένου να σχεδιαστεί το δίκτυο με ικανοποιητικό και οικονομικό τρόπο. Η μέτρηση αυτή περιλαμβάνει τη μέτρηση των κλήσεων ανά τακτά

χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ώρας αιχμής και εύρεση του μέσου όρου. (Λογοθέτης, 2018)

1.2.1 Μοντέλο Άφιξης Κλήσεων

Σύμφωνα με τους Λογοθέτη και Μοσχολιό, σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, ο τρόπος γεννήσεως (αφίξεως) μιας κλήσης είναι τυχαίος. Η άφιξη μιας κλήσης σε κάποιο σύστημα καλείται τυχαία όταν:

1. Η πιθανότητα $P_1(\Delta t)$ ότι μια κλήση θα γεννηθεί σε χρονικό διάστημα $(t, t + \Delta t]$ τείνει στο $\lambda \Delta t$, ανεξάρτητα από τον χρόνο t , όπου λ είναι σταθερός αριθμός.
2. Η πιθανότητα $P_{2+}(\Delta t)$ ότι δύο ή περισσότερες κλήσεις γεννώνται εντός του χρονικού διαστήματος $(t, t + \Delta t]$ τείνει στο μηδέν.
3. Οι κλήσεις γεννώνται ανεξάρτητα η μία από την άλλη.

Η διαδικασία άφιξης κλήσεων ακολουθεί την κατανομή Poisson (Poisson distribution) με μέση τιμή λt , όπου το λ καλείται ρυθμός άφιξης των κλήσεων (arrival rate). Με βάση την κατανομή Poisson, η πιθανότητα $P_k^1(t)$ να γεννηθεί μία ακριβώς κλήση σε k διαστήματα ενώ στα υπόλοιπα $n - k$ διαστήματα να μη γεννηθεί κλήση είναι: $P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$.

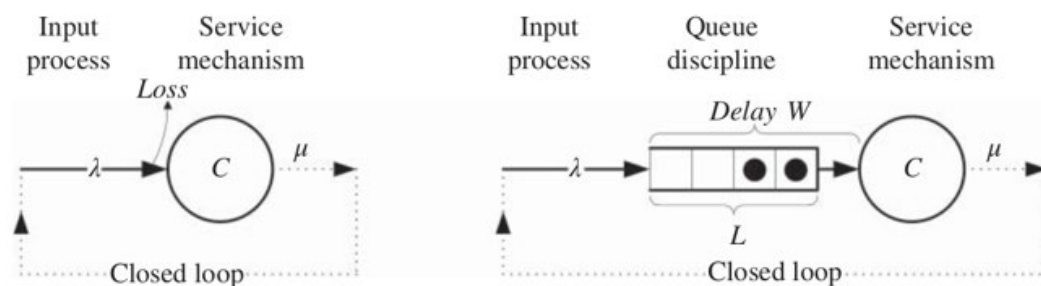
1.2.2 Μοντέλο Εξυπηρέτησης Κλήσεων

Σε ένα σύστημα απώλειας κλήσεων, μια αποδεκτή κλήση ξεκινά να εξυπηρετείται και όταν η κλήση εξυπηρετηθεί, αναχωρεί αμέσως από το σύστημα. Ο τερματισμός των κλήσεων είναι τυχαίος. Για την τυχαία αναχώρηση μίας κλήσης μέσα σε ένα απειροελάχιστο χρονικό διάστημα Δt , ισχύουν οι ίδιες τρεις συνθήκες όπως στην περίπτωση της τυχαίας άφιξης κλήσεων. Η μέτρηση του χρόνου ξεκινά όταν μία κλήση αρχίζει να εξυπηρετείται και η πιθανότητα να τερματίσει τυχαία η κλήση αυτή σε διάστημα $(t, t + \Delta t)$ είναι $\mu \Delta t$, δηλαδή είναι ανάλογη του Δt για οποιαδήποτε χρονική στιγμή t . Η πιθανότητα ο χρόνος εξυπηρέτησης να είναι μεγαλύτερος από t , $H(t)$, δηλαδή η πιθανότητα η κλήση να μην τερματιστεί σε διάστημα $[0, t]$, είναι: $H(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} (1 - \frac{\mu t}{n})^n = e^{-\mu t}$. Κάθε εξυπηρέτηση και αναχώρηση μίας κλήσης συμβαίνει ανεξάρτητα από τις άλλες κλήσεις, ενώ η πιθανότητα ταυτόχρονων αναχωρήσεων (δύο ή περισσότερες σε Δt) είναι μηδέν.

Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι ο χρόνος εξυπηρέτησης είναι εκθετικά κατανομημένος με μέση τιμή μt , όπου το μ ονομάζεται ρυθμός εξυπηρέτησης (service rate). [Moscholios, Logothetis, 2019]

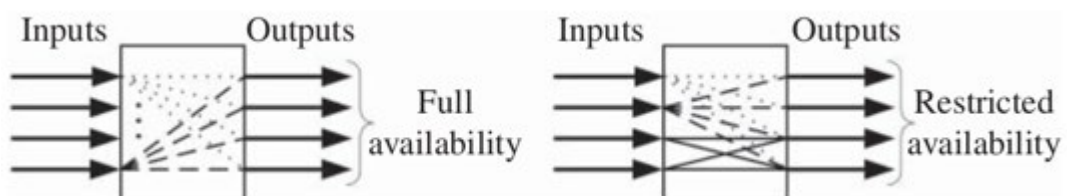
1.2.3 Συστήματα Εξυπηρέτησης

Υπάρχουν δύο διαφορετικά βασικά συστήματα εξυπηρέτησης: το σύστημα απώλειας και το σύστημα αναμονής, όπως φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα. Τα συστήματα αυτά μπορούν να αποτελούνται από έναν ανοιχτό ή κλειστό τύπο βρόχου.



Εικόνα 3. Σύστημα απώλειας και σύστημα αναμονής

Ένα σύστημα που συνδέει κάποιες εισερχόμενες με κάποιες εξερχόμενες γραμμές καλείται διακοπτικό – επιλογικό σύστημα (switching system). Κατά την άφιξη μίας κλήσης σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, κάθε κλήση έχει πρόσβαση σε ένα κανάλι προκειμένου να εξυπηρετηθεί με ρυθμό εξυπηρέτησης μ . Όταν κάθε εισερχόμενη γραμμή μπορεί να συνδεθεί με κάθε εξερχόμενη, το σύστημα καλείται πλήρους διαθεσιμότητας (full availability system). Αντίθετα, το σύστημα καλείται σύστημα περιορισμένης διαθεσιμότητας (restricted availability system). Τα δύο αυτά συστήματα φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4. Σύστημα πλήρους και περιορισμένης διαθεσιμότητας

Τα συστήματα πλήρους διαθεσιμότητας ταξινομούνται σύμφωνα με τον συμβολισμό του Kendall: $A/B/s$

όπου:

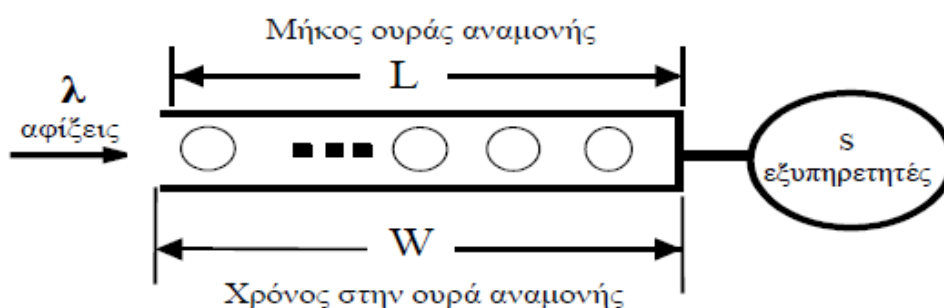
A : η κατανομή πιθανότητας των χρονικών διαστημάτων μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων (διαδικασία εισόδου ή τρόπος άφιξης των κλήσεων στο σύστημα),

B : η κατανομή του χρόνου εξυπηρέτησης (μηχανισμός εξυπηρέτησης) και,

s : ο αριθμός των εξερχομένων γραμμών (εξυπηρετητές – servers) ή ο τρόπος διαχείρισης των κλήσεων όταν υπάρχει συμφόρηση. [Moscholios, Logothetis, 2019]

Σε ένα σύστημα αναμονής, με ρυθμό άφιξης κλήσεων λ , L η μέση τιμή των κλήσεων στην ουρά αναμονής και W ο μέσος όρος χρόνου αναμονής στην ουρά, από το νόμο του Little, τα μεγέθη L , λ και W συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$L = \lambda W$$



Εικόνα 5. Σύστημα αναμονής [13]

Ο χρόνος παραμονής μιας κλήσεως στο σύστημα (system time) ισούται με το άθροισμα του χρόνου αναμονής της κλήσεως στην ουρά και του χρόνου εξυπηρετήσεώς της. Η μέση τιμή T , του χρόνου παραμονής των κλήσεων στο σύστημα καλείται χρόνος απόκρισης του συστήματος (response time).

Αν N είναι ο μέσος αριθμός κλήσεων στο σύστημα, τότε κατ' επέκταση του νόμου του Little ισχύει ότι: $N = \lambda T$.

1.3 Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Τεχνολογίας

WCDMA

Τα δίκτυα Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) έχουν σχεδιαστεί για την παροχή οποιουδήποτε τύπου υπηρεσίας στα ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς βασιζόμενο στο δίκτυο GSM, που ανήκει στην δεύτερη γενιά και σχεδιάστηκε αρχικά για τη χρήση από υπηρεσίες φωνής και σύντομων μηνυμάτων. Τα δίκτυα UMTS παρέχουν

ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών φωνής και δεδομένων, είναι ευέλικτα και δεν χρειάζονται κάποια αλλαγή ή βελτίωση κατά την εμφάνιση νέων υπηρεσιών. [Stahle, Mader, 2003]

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα των UMTS δικτύων ξεχωρίζουν οι αυξημένοι ρυθμοί μετάδοσης των δεδομένων και η ταυτόχρονη υποστήριξη μεγαλύτερου όγκου δεδομένων και φωνής. Πιο συγκεκριμένα, το UMTS δίκτυο στην αρχική του φάση, θεωρητικά προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 384 kbps σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται αυξημένη κινητικότητα του χρήστη. Αντίθετα, όταν ο χρήστης παραμένει ακίνητος οι ρυθμοί μετάδοσης αυξάνουν κατά πολύ φθάνοντας την τιμή των 2 Mbps.

Επιπλέον παρέχονται υπηρεσίες πολυπλεξίας, όπου επιτρέπονται πολλαπλές υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας να διέλθουν μέσα από το ίδιο φυσικό μέσο (ένα καλώδιο, στην ενσύρματη επικοινωνία, ή ο ελεύθερος χώρος, στην ασύρματη επικοινωνία). Για να είναι εφικτή η ικανοποίηση αυτών των νέων αναγκών έχει αναπτυχθεί η νέα τεχνολογία Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA). Η WCDMA αποτελεί την τεχνολογία πρόσβασης στις ραδιοεπικοινωνίες του UMTS και μπορεί να προσφέρει περισσότερες δυνατότητες και να υποστηρίξει νέες υπηρεσίες. Ορισμένες από αυτές τις δυνατότητες είναι οι ακόλουθες:

- Υψηλός ρυθμός bit έως και 2 Mbps
- Μείωση καθυστερήσεων, καθώς οι μετ' επιστροφής χρόνοι μετάδοσης των πακέτων είναι κάτω των 200 ms
- Αποτελεσματική παροχή ποιότητας υπηρεσιών
- Δυνατότητα μετάδοσης φωνής και δεδομένων ταυτόχρονα
- Συνεργασία με υπάρχοντα δίκτυα GSM/GPRS

Η τεχνολογία WCDMA αποτελεί ένα παγκόσμιο πρότυπο, που αποσκοπεί στην παροχή υπηρεσιών πολυμέσων σε πραγματικό χρόνο. Η WCDMA αποτελεί τη πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε συστήματα τρίτης γενιάς. Οι προδιαγραφές για τη τεχνολογία WCDMA σε σχέση με το 3GPP (3rd Generation Partnership Project - 3GPP), είναι αποτέλεσμα ενός κοινού έργου τυποποίησης, για το οποίο συνεργάστηκαν η Ευρώπη, η Ιαπωνία, η Κορέα, οι ΗΠΑ και η Κίνα. Στα πλαίσια του 3GPP, το WCDMA μπορεί να έχει την Ευρωπαϊκή εκδοχή του (WCDMA UMTS), όπου η ασύρματη επικοινωνία πραγματοποιείται με κανάλια των 5 MHz στα 1900 MHz. Μία διαφορετική του εκδοχή είναι η UTRA (Universal Terrestrial Radio Access), όπου η

εκδοχή της UTRA-FDD (Frequency Division Duplex) είναι διαθέσιμη με συχνότητες 1920-1980 MHz (uplink) και 2110-2170 MHz (downlink) και η UTRA-TDD (Time Division Duplex) εκδοχή της, που χρησιμοποιεί τις συχνότητες 1900-1920 MHz (uplink) και 2010-2025 MHz (downlink). [Holma, Toskala, 2000]

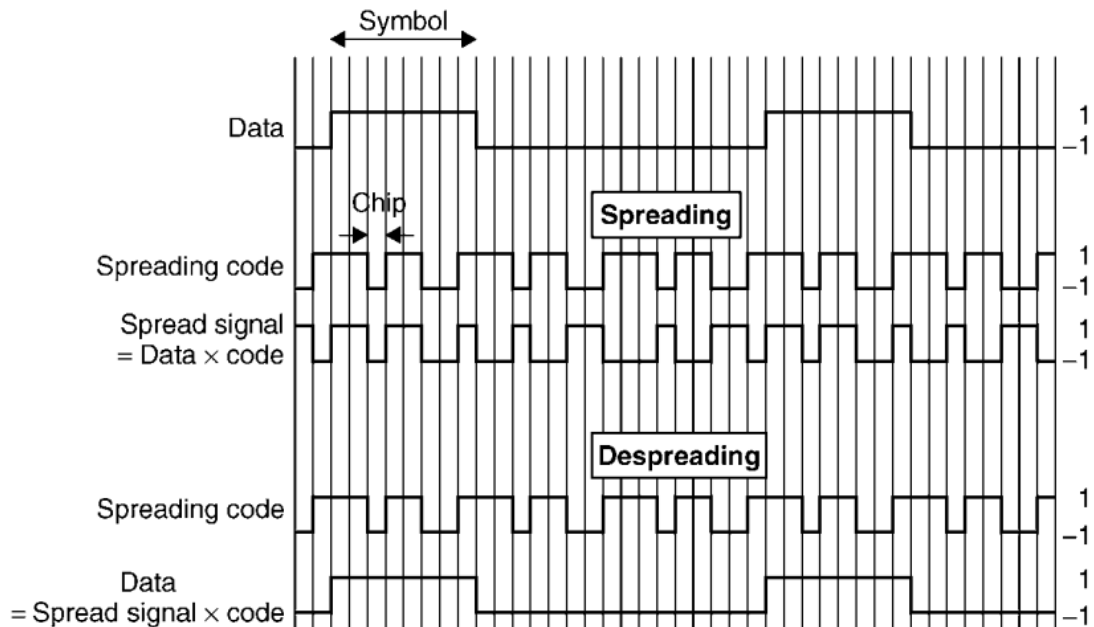
Κεφάλαιο 2

Κύριες Παράμετροι Δικτύων WCDMA

Το WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) αποτελεί ένα σύστημα πρόσβασης πολυπλεξίας διαίρεσης κώδικα ευρείας ζώνης (Direct-Sequence Code Division Multiple - DS-SS-CDMA), το οποίο επιτρέπει τη κατανομή των bit της πληροφορίας του χρήστη σε ένα ευρύ εύρος ζώνης. Για να είναι αυτό εφικτό, η πληροφορία του χρήστη σπάει σε μικρά κομμάτια και κάθε επιμέρους κομμάτι πολλαπλασιάζεται με έναν κωδικό διασποράς CDMA (CDMA Spreading Code). Τα bit που αποτελούν το κωδικό διασποράς είναι σχεδόν τυχαία και ονομάζονται chips για να τα διαφοροποιούν από τα bit της ακολουθίας δεδομένων, που ονομάζονται σύμβολα. Η χρήση των chips μετατρέπει το αρχικό σήμα σε ένα σήμα διαφορετικής μορφής το οποίο καταλαμβάνει μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σχέση με αυτό που θα χρειαζόταν από το αρχικό σήμα. Για να είναι δυνατή η υποστήριξη πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης bit (έως 2 Mbps), χρησιμοποιούνται διαφορετικοί παράγοντες διασποράς, οι οποίοι συνδυάζονται με τη πληροφορία χρήστη και σαν αποτέλεσμα υποστηρίζονται συνδέσεις πολλαπλών κωδικών. [Holma, Toskala, 2000]

Κάθε χρήστης έχει το δικό του κώδικα διασποράς. Αυτός ο κώδικας διασποράς χρησιμοποιείται για το μετασχηματισμό του αρχικού σήματος τόσο κατά την αποστολή όσο και κατά τη λήψη του σήματος. Έτσι, κατά την αποστολή του σήματος, παράγεται ένα σήμα μεγαλύτερου εύρους ζώνης και η διαδικασία αυτή ονομάζεται Spreading, ενώ κατά τη λήψη του σήματος παράγεται το αρχικό σήμα με την αντίστροφη διαδικασία που ονομάζεται Despreading. Αυτή η διαδικασία φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Τα δεδομένα του χρήστη αποτελούν μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων που παίρνει τιμές ± 1 . Ο κώδικας διασποράς είναι μια ακολουθία 8 bit κώδικα. Από το πολλαπλασιασμό αυτών των δύο σημάτων (διαδικασία Spreading), προκύπτει ένα σήμα μεγαλύτερου εύρους ζώνης. Το σήμα αυτό θα πολλαπλασιαστεί bit προς bit, με τον ίδιο κώδικα διασποράς κατά τη λήψη του (διαδικασία Despreading), ώστε να προκύψει το αρχικό σήμα. Η χρήση

ανεξάρτητων κωδικών διασποράς μεταξύ διαφορετικών χρηστών επιτρέπει στον δέκτη να μπορεί να διακρίνει τον κάθε χρήστη, εφαρμόζοντας τον κωδικό διασποράς του χρήστη, και με αυτό τον τρόπο, πολλοί διαφορετικοί χρήστες εκπέμπουν ταυτόχρονα στις ίδιες συχνότητες. [Holma, Toskala, 2000]



Εικόνα 6. Διαδικασία Spreading/Despreading

Κάθε χρήστης μπορεί να κάνει χρήση πολλαπλών κωδικών διασποράς σταθερού μήκους, ανάλογα με τα αιτήματα ρυθμού του. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατή η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των πληροφοριών σε σχέση με ένα διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επιπλέον, παρέχεται ευελιξία με βάση τους πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

Ο ρυθμός εκπομπής είναι σταθερός και ανεξάρτητος από τον ρυθμό μετάδοσης των πραγματικών δεδομένων και ανέρχεται στα 3,84 Mchips/s. Ο ρυθμός chip της τάξης των 3,84 Mchips/s οδηγεί σε εύρος ζώνης καναλιού περίπου 5 MHz. Συστήματα εύρους ζώνης WCDMA, περίπου 1 MHz, ονομάζονται συστήματα CDMA στενής ζώνης. Όσο μεγαλύτερο εύρος ζώνης WCDMA χρησιμοποιείται, τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων χρήστη. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού, είναι η δυνατότητα χρήσης πολλαπλών καναλιών εύρους ζώνης για την αποστολή της πληροφορίας. Έτσι, οι πάροχοι δικτύου μπορούν να αναπτύξουν κανάλια διαφορετικού εύρους ζώνης για αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου.

Η χρήση κωδικών διασποράς έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός σήματος υψηλής στάθμης έναντι των υπολοίπων ειδών δικτύων, τα οποία χαρακτηρίζονται σαν χαμηλής

στάθμης παρεμβολής. Ωστόσο, ένας μεγάλος αριθμός χρηστών ή η εκπομπή σε ανεξέλεγκτα επίπεδα ισχύος λειτουργούν σαν μια αυξανόμενη πηγή παρεμβολών προς τον κάθε μεμονωμένο χρήστη. Η αύξηση των παρεμβολών επιδεινώνει την ποιότητα της επικοινωνίας. Για αυτό το λόγο, στα δίκτυα αυτά, πρέπει να γίνεται χρήση διαδικασιών ελέγχου της εκπεμπόμενης ισχύος αλλά και να τίθενται κάποια ανώτατα όρια στην χωρητικότητα του συστήματος. Τα όρια αυτά είναι υπεύθυνα στο να καθορίσουν το ύψος των παρεμβολών και το λόγο SIR (Signal to Interference Ratio) που αντιλαμβάνεται ο κάθε χρήστης.

Το WCDMA υποστηρίζει τους δύο βασικούς τύπους πολυπλεξίας, οι οποίοι είναι η πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Duplex - FDD) και η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplex - TDD). Κατά τη πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας, χρησιμοποιούνται διαφορετικές συχνότητες από το διαθέσιμο εύρος ζώνης 5 MHz για το uplink και το downlink. Αντίθετα, κατά τη πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου, ένα κανάλι 5 MHz διαμοιράζεται με βάση το χρόνο μεταξύ uplink και το downlink. Με τον όρο downlink αναφερόμαστε στο σήμα από τον σταθμό βάσης προς την κινητή συσκευή και με τον όρο uplink αναφερόμαστε στο σήμα του τηλεφώνου προς τον σταθμό βάσης.

Η πολυπλεξία δίνει τη δυνατότητα παροχής πολλαπλών υπηρεσιών με χρήση μίας κοινής σύνδεσης και μπορεί να υποστηρίξει διαφορετική ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service - QoS).

Το WCDMA χρησιμοποιεί συνεκτική ανίχνευση τόσο κατά το uplink όσο και κατά το downlink, η οποία βασίζεται στη χρήση είτε pilot symbols είτε common pilot. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται στο downlink στο IS-95. Ωστόσο, η χρήση της και στο uplink έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής κάλυψης και χωρητικότητας. Κατά το uplink, η παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Interference - MAI) σε ένα σταθμό βάσης (Base Station - BS) προκαλείται από όλους τους κινητούς σταθμούς (mobile stations - MS), είτε ανήκουν σε αυτό το σταθμό βάσης είτε όχι. Κατά το downlink, η χωρητικότητα περιορίζεται από την ισχύ εκπομπής του σταθμού βάσης ή από την παρεμβολή που προκαλείται, αντίστοιχα. Οι μηχανισμοί ελέγχου ισχύος και στις δύο κατευθύνσεις προβλέπουν ότι τα σήματα μεταδίδονται με τέτοια ισχύς που για κάθε υπηρεσία λαμβάνονται με σχεδόν ίση δύναμη. [Stahle, Mader, 2003]

Το WCDMA υποστηρίζει, επίσης, τη λειτουργία ασύγχρονων σταθμών βάσης. Αυτό είναι σημαντικό καθώς δεν απαιτείται η χρήση ενός παγκόσμιου ρολογιού όπως στην

περίπτωση του GPS. Έτσι, είναι δυνατή η εγκατάσταση εσωτερικών και μικροσταθμών βάσης, καθώς δεν χρειάζεται η λήψη σήματος GPS.

Όσον αφορά τη χωρητικότητα ενός σταθμού βάσης ή ενός NodeB σε ένα δίκτυο WCDMA μπορεί να περιορίζεται από τις παρεμβολές. Σε αντίθεση στο δίκτυο GSM, η χωρητικότητα ενός σταθμού βάσης καθορίζεται μόνο από τον αριθμό των διαθέσιμων συχνοτήτων και είναι ανεξάρτητη από το φορτίο του δικτύου. Λόγω της καθολικής επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας στο UMTS, όλοι οι χρήστες τόσο σε ένα δεδομένο κελί όσο και στα γειτονικά του, συνεισφέρουν στις συνολικές παρεμβολές (SNR), επηρεάζοντας έτσι την ποιότητα της σύνδεσης, δηλαδή το λόγο της λαμβανόμενης ενέργειας ανά bit προς την φασματική πυκνότητα του θορύβου (E_b/N_0).

Κεφάλαιο 3

Σχεδιασμός Δικτύων WCDMA

Κατά το σχεδιασμό των δικτύων WCDMA, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη δύο συνιστώσες: η περιοχή κάλυψης και η χωρητικότητα. Με τον όρο χωρητικότητα αναφερόμαστε στο μέγιστο δυνατό προσφερόμενο φορτίο σε ένα σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης προσφέρει ένα συγκεκριμένο σύνολο υπηρεσιών, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιεί κάποιες προκαθορισμένες πιθανότητες απώλειας κλήσεων (call blocking probabilities – CBP). Η πιθανότητα απώλειας κλήσεως αποτελεί ένα μέγεθος που εκφράζει την πιθανότητα μια αίτηση για νέα κλήση (new call) να απορριφθεί λόγω συμφόρησης κλήσεων στον σταθμό βάσης. Στα δίκτυα WCDMA υπάρχει αντιστάθμιση μεταξύ της περιοχής κάλυψης και της χωρητικότητας ενός σταθμού βάσης. Αντίθετα στα δίκτυα GSM, η περιοχή κάλυψης και η χωρητικότητα δεν μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες συνιστώσες. Πιο συγκεκριμένα, στα δίκτυα WCDMA όσοι περισσότεροι είναι οι ενεργοί χρήστες σε ένα σταθμό βάσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης σε αυτόν και τόσο υψηλότερη ισχύς μετάδοσης απαιτείται από τις κινητές μονάδες ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις E_b/N_0 . Επιπρόσθετα, η παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης προκαλείται όχι μόνο από τις ενεργές κινητές μονάδες των χρηστών που βρίσκονται στον σταθμό βάσης αλλά και από αυτές που βρίσκονται στους γειτονικούς σταθμούς βάσης.

Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι εφαρμόζεται περιορισμός της ισχύος μετάδοσης των κινητών συσκευών (π.χ. εκ της νομοθεσίας), επομένως δεν μπορούμε να αντισταθμίσουμε την παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης με αύξηση της ισχύος των κινητών συσκευών και τελικά η περιοχή κάλυψης συρρικνώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών. Έτσι, για να είναι δυνατή η κάλυψη μιας συγκεκριμένης περιοχής από ένα σταθμό βάσης πρέπει να υπάρχει περιορισμός της παρεμβολής πολλαπλής πρόσβασης και για να επιτευχθεί ο περιορισμός πρέπει να ελέγχουμε τον αριθμό των νέων κλήσεων (από τους ενεργούς χρήστες) σε κάθε σταθμό βάσης. Ο έλεγχος αυτός

ονομάζεται έλεγχος αποδοχής κλήσεων (call admission control – CAC). Το χρησιμοποιούμενο όριο (κατώφλι – threshold) παρεμβολής πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται για την αποδοχή νέων κλήσεων καθορίζει όχι μόνο την περιοχή κάλυψης αλλά και από τη χωρητικότητα του σταθμού βάσης.

Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων και η χωρητικότητα του συστήματος απαιτεί εντατική έρευνα, ακόμα στα συστήματα CDMA. Σύμφωνα με τους Gilhousen et al [3], όσον αφορά στα συστήματα CDMA η χωρητικότητα υπολογίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται η απαίτηση E_b/N_0 για σταθερό αριθμό χρηστών. Οι Viterbi και Viterbi [4] επέκτειναν την εργασία αυτή, μοντελοποιώντας το σύστημα ως μία ουρά M/M/∞, έτσι ώστε ο αριθμός των χρηστών να αποτελεί μια τυχαία μεταβλητή Poisson. Σε αυτή την περίπτωση η δραστηριότητα κάθε μεμονωμένου χρήστη περιγράφεται ως μια τυχαία μεταβλητή Bernoulli, ενώ η παρεμβολή άλλων κυψελών περιλαμβάνεται ως πολλαπλάσιο της παρεμβολής μεταξύ των χρηστών της συγκεκριμένης κυψέλης που μελετάται. Σε μια διαφορετική μελέτη, η συνολική παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης μοντελοποιείται ως το άθροισμα ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών κατανομής Poisson [Evans, Everitt, 1999]. Με βάση την συνολική παρεμβολή προκύπτουν οι πιθανότητες διακοπής κλήσεων (Outage probabilities). Θεωρείται δεδομένο πως ο κάθε χρήστης εκμεταλλεύεται μόνο μία υπηρεσία στο δίκτυο (δηλαδή, όλοι οι χρήστες κάνουν χρήση της τηλεφωνικής υπηρεσίας με σταθερό ρυθμό μετάδοσης).

Σε άλλες εργασίες που μελετούν την περίπτωση πολλαπλών υπηρεσιών [Evans, Everitt, 1999], το δίκτυο CDMA περιγράφεται ως ένα μοντέλο κίνησης (μορφής γινομένου) όπου μια κατάσταση αντιστοιχεί στον αριθμό των χρηστών ανά υπηρεσία και κελί. Οι αποδεκτές καταστάσεις υπολογίζονται χρησιμοποιώντας ανάλυση στατιστικής πολυπλεξίας για κάθε κατάσταση και το άθροισμα των πιθανοτήτων κάθε κατάστασης στα όρια των αποδεκτών περιοχών αποδίδει τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων.

Σε μία διαφορετική προσέγγιση [Ho, Copeland, Chin – Tau, Stuber, 2001], στην περίπτωση μίας μοναδικής υπηρεσίας μία μεμονωμένη κυψελίδα μοντελοποιείται ως μία ουρά αναμονής με διαδικασία άφιξης κλήσεων την Poisson και με εκθετικούς χρόνους διάρκειας κλήσεων (holding times). Μια κατάσταση περιγράφεται από τον αριθμό των χρηστών στο σύστημα. Έτσι, σε μια συγκεκριμένη κατάσταση, μια νέα κλήση γίνεται αποδεκτή με μία πιθανότητα η οποία εξαρτάται από τις παρεμβολές των γειτονικών κυψελών και τις πραγματικές δραστηριότητες του χρήστη.

Οι δύο τελευταίες προσεγγίσεις ενδεχομένως να μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία μίας νέας μεθόδου για τον προσδιορισμό της πιθανότητας απώλειας κλήσεως στην άνω ζεύξη (uplink) και της χωρητικότητας μιας κυψέλης WCDMA, όπου στο δίκτυο θα υποστηρίζονται πολλαπλές κατηγορίες υπηρεσιών. Από την μία εργασία, χρησιμοποιείται το μοντέλο κίνησης μορφής γινομένου για την ανάλυση μιας κυψέλης ασύρματου δικτύου πολλαπλών υπηρεσιών και από την άλλη εργασία, χρησιμοποιείται η έννοια των καταστάσεων, οι οποίες βασίζονται στις πιθανότητες απώλειας κλήσεων.

Ωστόσο, οι δύο αυτές προσεγγίσεις δεν ταιριάζουν μεταξύ τους, καθώς η προτεινόμενη λύση μορφής γινομένου (για τις πιθανότητες μονίμου καταστάσεως) δεν είναι έγκυρη εάν οι πιθανότητες απώλειας κλήσεως εξαρτώνται από την κατάσταση του συστήματος. Η προσπάθεια υπολογισμού της πιθανότητας μίας κατάστασης αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του αριθμού των υπηρεσιών αν θεωρήσουμε την ύπαρξη λύσης μορφής γινομένου. Αυτό σημαίνει ότι η λύση μορφής γινομένου είναι πολύ δύσκολα εφαρμόσιμη σε πρακτικά δίκτυα. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται μία διαφορετική προσέγγιση που προτάθηκε ανεξάρτητα από τους Kaufman [8] και Roberts [9] για τη μείωση του πολυδιάστατου χώρου καταστάσεων σε χώρο καταστάσεων μίας μόνο διάστασης.

Σε ένα σύστημα πλήρους διάθεσης, για μεγάλες τιμές χωρητικότητας C , ο υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσεων είναι επίπονος και όταν είναι μεγάλη και η τιμή του K (αριθμός υπηρεσιών), τότε είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος. Έτσι, η πιθανότητα απώλειας κλήσεων υπολογίζεται μέσω ενός μονοδιάστατου αναδρομικού τύπου.

Θεωρούμε το σύνολο των καταστάσεων

$$\Omega_j = \{n \in \Omega : nb = j\}$$

Το σύνολο Ω_j είναι το σύνολο εκείνο όπου j γραμμές είναι κατειλημμένες. Η πιθανότητα να έχουμε j κατειλημμένες γραμμές (trunks) στην κατάσταση ισορροπίας δίνεται από τη σχέση:

$$q(j) = \sum_{n \in \Omega_j} P(n) = \sum_{n \in \Omega_j} \prod_{i=1}^K \frac{\alpha_i^{n_i}}{n_i!} G^{-1}(C, K) \quad (1)$$

Η πιθανότητα απώλειας κλήσεων μπορεί να εκφραστεί και ως:

$$P_{b_i} = \sum_{n: nb > C - b_i} P(n) \quad (2)$$

Όμως, στην περίπτωση που οι κατελημμένες γραμμές είναι j , θα έχουμε απώλεια των κλήσεων της υπηρεσίας τύπου i . Άρα, η πιθανότητα P_{b_i} εκφράζεται και ως άθροισμα των $q(j)$ όπου $j > C - b_i$.

$$P_{b_i} = \sum_{j=C+1-b_i}^C q(j) = \sum_{j=0}^{b_i-1} q(C-j) \quad (3)$$

Τελικά, για τον υπολογισμό της πιθανότητας P_{b_i} χρειάζεται να βρεθεί ένας αναδρομικός τύπος για τον υπολογισμό του $q(j)$.

Μετά από υπολογισμούς, καταλήγουμε στην αναδρομική σχέση:

$$q(j) = \begin{cases} 1 & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{i=1}^K a_i b_i q(j - b_i) & \text{για } j = 1, \dots, C \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (4)$$

όπου a_i είναι το προσφερόμενο φορτίο κίνησης των κλήσεων i ,

b_i το εύρος ζώνης σε μονάδες για κλήσεις τύπου i

Στην συνέχεια, κανονικοποιούμε ώστε τα $q(j)$ να γίνουν πιθανότητες, διαιρώντας με

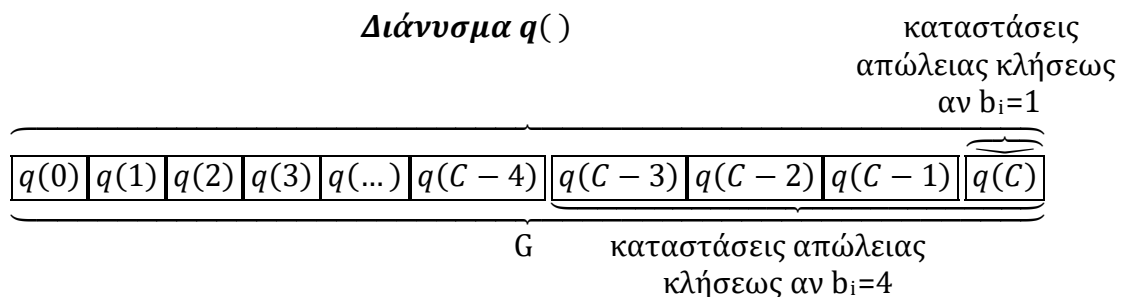
$$G = \sum_{j=0}^C q(j) \quad (5)$$

όπου θα ισχύει $0 < q(j) < 1$

θα ισχύει:

$$\sum_{j=0}^C q(j) = 1 \quad (6)$$

Παρακάτω εμφανίζεται το σχήμα που απεικονίζει τον υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας κλήσεων βάσει του διανύσματος $q(j)$ και της παραπάνω σχέσης. Η σχέση αυτή μαζί με την αναδρομική σχέση $q(j)$, απαρτίζουν το Erlang Multirate Loss Model (EMLM).



Σχήμα 1. Απεικόνιση του υπολογισμού πιθανότητας P_{b_i}

Αν θεωρήσουμε παράδειγμα, η απαίτηση σε μονάδες εύρους ζώνης μίας κλήσης τύπου i να είναι $b_i = 4$ και το σύστημα έχει χωρητικότητα C , τότε για να εξυπηρετηθεί η κλήση

χρειαζόμαστε τουλάχιστον 4 γραμμές εξυπηρέτησης ελεύθερες κατά την άφιξη της κλήσης. Οι γραμμές αυτές διατίθενται στην κλήση για όση διάρκεια χρειάζεται για να εξυπηρετηθεί. Μετά την πάροδο του χρόνου, οι b_i μονάδες εύρους ζώνης αποδεσμεύονται. Όταν το εύρος ζώνης b_i δεν είναι διαθέσιμο, η κλήση δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί, φράσσεται και χάνεται.

Αν θεωρήσουμε, μία κλήση με απαίτηση σε μονάδες εύρους ζώνης $b_1 = 4$ και χωρητικότητα $C = 8$ μονάδες εύρους ζώνης, με πολιτική πλήρους διάθεσης συστήματος, η κλήση θα φράσσεται αν και μόνο αν οι διαθέσιμες μονάδες εύρους είναι λιγότερες από b από τις C . Αν μία κλήση απαιτεί $b_1 = 1$ μονάδα εύρους ζώνης με $C = 1$ μονάδα εύρους ζώνης, η κλήση θα φράσσεται εάν υπάρχει κλήση στο σύστημα.

Έστω ότι έχουμε μία κλήση μίας υπηρεσίας ($K = 1$) και υπολογίζουμε την πιθανότητα απώλειας κλήσεων από την αναδρομική σχέση EMLM

$$P_{b_i} = \sum_{j=C+1-b_i}^C q(j) = \sum_{j=0}^{b_i-1} q(C-j) \quad (7)$$

Θεωρούμε $b_1 = 1$, $\alpha_1 = 1$ και $C = 3$.

Βρίσκουμε αρχικά τα $q(j)$ και έχουμε

$$q(0) = 1, q(1) = 1, q(2) = 0,5 \text{ και } q(3) = 1/6.$$

Στη συνέχεια, βρίσκουμε το $G = q(0) + q(1) + q(2) + q(3) = 2,666$

Έχουμε:

$$\text{Για } j=0 : q(0)/G = 0,375 \text{ ή } 37,5\%$$

$$\text{Για } j=1 : q(1)/G = 0,375 \text{ ή } 37,5\%$$

$$\text{Για } j=2 : q(2)/G = 0,1875 \text{ ή } 18,75\%$$

$$\text{Για } j=3 : q(3)/G = 0,0625 \text{ ή } 6,25\%$$

Υπολογίσουμε την πιθανότητα απώλειας κλήσεων από τον τύπο Erlang – Erlang B, ο οποίος είναι ο τύπος για μονοδιάστατη κίνηση.

Ο τύπος του Erlang δίνεται από τη σχέση :

$$B = B_T = \frac{a^s}{s!} \equiv E_s(a)$$

όπου a είναι το φορτίο κίνησης

s η χωρητικότητα του συστήματος

$B = E_s(a)$ η πιθανότητα απώλειας κλήσεων

$$B = \frac{a^s}{s!} = \frac{3}{3!} = \frac{1}{6} = 0,0625 \text{ ή } 6,25\%$$

Για να είναι εφικτή η εφαρμογή του μοντέλου Kaufman-Roberts σε ασύρματα δίκτυα τεχνολογίας WCDMA, ακολούθως θα δείξουμε πώς μοντελοποιείται μια κυψελίδα του δικτύου WCDMA, ώστε να έχουμε μια καλή μέθοδο υπολογισμού της συνολικής πιθανότητας απώλειας κλήσεων η οποία εξαρτάται τόσο από την χωρητικότητα του σταθμού βάσης όσο και από το σύνολο των παρεμβολών που δέχεται μια κλήση.

Κάθε κυψέλη WCDMA, πολλαπλών υπηρεσιών, μοντελοποιείται ως ένα σύστημα απωλειών με μια αλυσίδα Markov διάστασης T , όπου T είναι ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών κίνησης (δηλ. T διαφορετικών παρεχόμενων υπηρεσιών). Το μοντέλο αυτό υποθέτει μια ανεξάρτητη διαδικασία άφιξης Poisson για κάθε κατηγορία υπηρεσίας t ($t = 1, 2, \dots, T$) με ρυθμό άφιξης λ_t και εκθετικό χρόνο διάρκειας κλήσεων με μέσο όρο $h_t \frac{1}{\mu_t}$ (όπου μ_t ο ρυθμός εξυπηρέτησης των κλήσεων της κατηγορίας t , κατά μέσον όρο). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα προσφερόμενο φορτίο $a_t = \frac{\lambda_t}{\mu_t}$. Η δραστηριότητα του χρήστη την χρονική στιγμή της άφιξης (της κλήσης) μοντελοποιείται από μια τυχαία μεταβλητή Bernoulli με συντελεστή δραστηριότητας (activity factor) v_t . Ο συντελεστής δραστηριότητας θεωρείται ανεξάρτητος μεταξύ διαδοχικών στιγμών άφιξης.

Κεφάλαιο 4

Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων

Το βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων WCDMA είναι ότι όλοι οι χρήστες εκπέμπουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων και τα σήματα τους διαχωρίζονται χρησιμοποιώντας ορθογώνιους ή ψευδό-ορθογώνιους κώδικες. Εκτός από την ιδανική περίπτωση που χρησιμοποιούνται πραγματικοί ορθογώνιοι κώδικες (π.χ. στην περίπτωση δυαδικών κωδίκων τα αντίστοιχα bit μιας κωδικής λέξης είναι διαφορετικά – όταν το ένα είναι «1» το άλλο είναι «0») και δεν πραγματοποιείται διάδοση πολλαπλών διαδρομών, ο χρήστης βλέπει το σήμα των άλλων χρηστών ως παρεμβολή. Όπως έχουμε αναφέρει, η παρεμβολή αυτή αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των χρηστών στο σύστημα και περιορίζει τη χωρητικότητα της ανοδικής ζεύξης.

Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων (CAC) σε ένα σύστημα WCDMA εκτελείται με βάση τη μετρούμενη αύξηση θορύβου (noise rise). Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων εκτιμά την αύξηση θορύβου που θα προκαλέσει η αποδοχή μίας νέας σύνδεσης/κλήσης, ενώ παράλληλα καθορίζει αν μία νέα κλήση πρέπει να αποκλειστεί ή όχι, επειδή ο θόρυβος θα υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο εφόσον η κλήση γίνει αποδεκτή. Η αύξηση θορύβου, όπως υπολογίζεται από ένα σταθμό βάσης, αποτελεί τον λόγο της συνολικής παρεμβολής \hat{I}_0 προς την παρεμβολή του συστήματος χωρίς φορτίο, δηλ. με την ύπαρξη μόνο θερμικού θορύβου \hat{N}_0 . Η συνολική πυκνότητα παρεμβολής περιλαμβάνει την παρεμβολή της συγκεκριμένης κυψέλης (που μελετάμε) \hat{I}_{own} , τη παρεμβολή άλλων (γειτονικών) κυψελών \hat{I}_{other} καθώς επίσης και το θερμικό θόρυβο \hat{N}_0 . Οπότε, η αύξηση θορύβου ορίζεται ως:

$$Noise\ rise = \frac{\hat{I}_0}{\hat{N}_0} = \frac{\hat{I}_{own} + \hat{I}_{other} + \hat{N}_0}{\hat{N}_0} \quad (8)$$

όπου οι τιμές της ισχύος μετρώνται σε mW (όχι σε dBm).

Το πραγματικό φορτίο του συστήματος που μελετάμε, δηλαδή το φορτίο η της κυψέλης, προκύπτει από τον μετασχηματισμό του προηγούμενου τύπου ως εξής:

$$Noise\ rise = \frac{1}{\frac{\hat{N}_0}{\hat{I}_{own} + \hat{I}_{other} + \hat{N}_0}} = \frac{1}{1 - \frac{\hat{I}_{own} + \hat{I}_{other}}{\hat{I}_{own} + \hat{I}_{other} + \hat{N}_0}} = \frac{1}{1 - \eta} \quad (9)$$

Ένα φορτίο κυψέλης ίσο με 1 ορίζει την οριακή χωρητικότητα ενός κελιού WCDMA. Ορίζουμε ως η_{max} , το φορτίο κυψέλης που αντιστοιχεί στην αύξηση θορύβου που χρησιμοποιείται ως κατώφλι στον έλεγχο αποδοχής κλήσεως. Κατά την άφιξη μιας νέας κλήσης μίας υπηρεσίας t , ο αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής κλήσεων εκτιμά το πρόσθετο φορτίο α_t της νέας κλήσης. Η εκτίμηση του φορτίου αυτού βασίζεται στο ρυθμό μετάδοσης bit και το μέγιστο ρυθμό σφάλματος (bit error rate – BER). Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων σε σύστημα WCDMA αποδέχεται συνεπώς μια εισερχόμενη σύνδεση εάν το εκτιμώμενο φορτίο κυψέλης η_{est} είναι κάτω από το όριο φορτίου κυψέλης η_{max} :

$$\eta_{est} = \eta + \alpha_t < \eta_{max} \Leftrightarrow \frac{\hat{I}_{own} + \hat{I}_{other}}{\hat{I}_{own} + \hat{I}_{other} + \hat{N}_0} < \eta_{max} \quad (10)$$

Από τα παραπάνω, η αποδοχή μιας νέας κλήσης εξαρτάται από την παρεμβολή τόσο της ίδιας κυψέλης όσο και άλλων (γειτονικών) κυψελών.

Κεφάλαιο 5

Παρεμβολές σε Κυψέλη Δικτύου WCDMA

Η συνολική παρεμβολή που λαμβάνεται από ένα σταθμό βάσης καθορίζει τη χωρητικότητα της ανερχόμενης ζεύξης μίας κυψέλης WCDMA. Ο θερμικός θόρυβος είναι μια σταθερή τιμή και σε ένα πρώτο βήμα υποθέτουμε ότι η παρεμβολή από κάποια άλλη κυψέλη είναι γνωστή. Η πυκνότητα της ισχύος της παρεμβολής που οφείλεται στις κλήσεις που υπάρχουν στην ίδια κυψέλη αντιστοιχεί στο άθροισμα των λαμβανόμενων ισχύων $m = (m_1, \dots, m_T)$ των ενεργών κινητών σταθμών που ελέγχονται από τον σταθμό βάσης διαιρούμενο με το εύρος ζώνης του συστήματος W :

$$\hat{I}_{own} = \sum_{t=1}^T \frac{m_t \hat{S}_t}{W} \quad (11)$$

Για να επιτευχθεί ο τέλειος έλεγχος ισχύος, οι λαμβανόμενες τιμές ισχύος των κινητών σταθμών \hat{S}_t πρέπει να πληρούν την εξίσωση ελέγχου ισχύος

$$\varepsilon_t^* = \frac{\frac{\hat{S}_t}{R_t}}{\hat{I}_{own} + \hat{I}_{other} + \hat{N}_0 - \frac{\hat{S}_t}{W}} \quad (12)$$

όπου τα ε_t^* και ο ρυθμός μετάδοσης R_t (σε bps) των κινητών σταθμών που χρησιμοποιούν την υπηρεσία t αντιστοιχούν στον επιθυμητό λόγο E_b/N_0 . Σε μία κατάσταση τέλειου ελέγχου της ισχύος, όλοι οι κινητοί σταθμοί μιας υπηρεσίας απαιτούν να λαμβάνουν την ίδια ισχύ. Ο τύπος (5), ως προς την ισχύ \hat{S}_t ισούται με:

$$\hat{S}_t = W \frac{\varepsilon_t^* R_t}{W + \varepsilon_t^* R_t} (\hat{I}_{own} + \hat{I}_{other} + \hat{N}_0) \quad (13)$$

Αντικαθιστώντας το \hat{S}_t στον τύπο (4) λαμβάνουμε την πυκνότητα της ισχύος της παρεμβολής της ίδιας της κυψέλης ως

$$\hat{I}_{own} = (\hat{I}_{own} + \hat{I}_{other} + \hat{N}_0) \sum_{t=1}^T m_t \omega_t \quad (14)$$

όπου

$$\omega_t = \frac{\hat{\varepsilon}_t^* R_t}{W + \hat{\varepsilon}_t^* R_t} \quad (15)$$

Η μεταβλητή ω_t περιέχει όλες τις παραμέτρους που σχετίζονται με την υπηρεσία t και είναι αρκετή για να περιγράψει την επίδραση της υπηρεσίας αυτής στην παρεμβολή.

Λύνοντας τον τύπο (7) ως προς \hat{I}_{own} , έχουμε:

$$\hat{I}_{own} = \frac{A(\bar{m})}{1 - A(\bar{m})} (\hat{I}_{other} + \hat{N}_0) \quad (16)$$

όπου:

$$A(\bar{m}) = \sum_{t=1}^T m_t \omega_t \quad (17)$$

Ο τύπος (9) ορίζει την παρεμβολή της ίδιας της κυψέλης σε σχέση με τη μεταβλητή $A(\bar{m})$, το οποίο αποτελεί το άθροισμα των ω_t των ενεργών χρηστών στην κυψέλη.

Με βάση αυτό τον ορισμό, το φορτίο της κυψέλης η , μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\eta = \frac{\frac{A(\bar{m})}{1-A(\bar{m})}(\hat{I}_{other} + \hat{N}_0) + \hat{I}_{other}}{\frac{A(\bar{m})}{1-A(\bar{m})}(\hat{I}_{other} + \hat{N}_0) + \hat{I}_{other} + \hat{N}_0} = \frac{\hat{N}_0}{\hat{N}_0 + \hat{I}_{other}} A(\bar{m}) + \frac{\hat{I}_{other}}{\hat{I}_{other} + \hat{N}_0} \quad (18)$$

Ορίζοντας το \bar{m}^{t+} ως $(m_1, \dots, m_t + 1, \dots, m_T)$, ο τύπος ελέγχου αποδοχής κλήσεων, τύπος (3) αναδιατυπώνεται σε:

$$\frac{\hat{N}_0}{\hat{I}_{other} + \hat{N}_0} A(\bar{m}^{t+}) + \frac{\hat{I}_{other}}{\hat{I}_{other} + \hat{N}_0} < \eta_{max} \Leftrightarrow A(\bar{m}^{t+}) + (1 - \eta_{max}) \frac{\hat{I}_{other}}{\hat{N}_0} < \eta_{max} \quad (19)$$

Το κύριο χαρακτηριστικό της εξίσωσης (12) είναι ότι το φορτίο της ίδιας κυψέλης αλλά και των διαφορετικών κυψελών διαχωρίζεται μεταξύ αυτών. Το φορτίο της ίδιας της κυψέλης είναι ίσο με $A(\bar{m})$ και το όριο της χωρητικότητας επιτυγχάνεται για $A(\bar{m}) = 1$, εφόσον παραβλεφθεί η παρεμβολή των υπόλοιπων κυψελών. Χωρίς τη παρεμβολή των υπόλοιπων κυψελών το $A(\bar{m}^{t+})$ ισούται με η_{est} . Συνεπώς, το φορτίο της ίδιας της κυψέλης για \bar{m} χρήστες ορίζεται ως:

$$\eta_{own}(\bar{m}) = A(\bar{m}) \quad (20)$$

και το φορτίο ανά υπηρεσία είναι $\alpha_t = \omega_t$. Εφόσον μπορεί να προκύψει ίδιο φορτίο κυψέλης για διαφορετικό αριθμό χρηστών \bar{m} , χρησιμοποιούμε απλά το σύμβολο η_{own} .

Κεφάλαιο 6

Τοπική Πιθανότητα Απώλειας Κλήσεως

Ο αποκλεισμός μιας νέας κλήσης μπορεί να συμβεί όταν η συνολική παρεμβολή που δέχεται η κλήση υπερβαίνει ένα καθορισμένο μέγιστο επίπεδο ισχύος ή εάν το φορτίο κυψέλης υπερβαίνει το μέγιστο όριο η_{max} , αντίστοιχα. Σε αυτήν την περίπτωση, ο έλεγχος αποδοχής κλήσεως στο δίκτυο WCDMA απορρίπτει το αίτημα για νέα σύνδεση/κλήση. Η πιθανότητα απώλειας κλήσεως $\beta_t(\eta|_{max})$ μιας νέας κλήσης μίας υπηρεσίας t , όταν κατά την άφιξη της κλήσης το φορτίο κυψέλης είναι η_{own} , ονομάζεται τοπική πιθανότητα απώλειας κλήσεως (local blocking probability – LBP). Η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$\beta_t(\eta|_{own}) = P\left(\eta_{own} + \omega_t(1 - \eta_{max}) \frac{\hat{I}_{other}}{N_0} \geq \eta_{max}\right) \quad (21)$$

Σε αυτή την εξίσωση, όλες οι μεταβλητές είναι γνωστές εκτός από την παρεμβολή των άλλων κυψελών \hat{I}_{other} . Η παρεμβολή αυτή μοντελοποιείται ως μία τυχαία μεταβλητή, η οποία είναι ανεξάρτητη από τα διαδοχικά γεγονότα άφιξης κλήσεων. Γενικά η κατανομή της παρεμβολής των άλλων κυψελών μπορεί να εξαρτάται από το στιγμιαίο φορτίο της ίδιας της κυψέλης. Ωστόσο, υποθέτουμε ότι η παρεμβολή των άλλων κυψελών είναι μια λογαριθμική τυχαία μεταβλητή με παραμέτρους μ και σ , οι οποίες δεν εξαρτώνται από το φορτίο της ίδιας κυψέλης.

Όσον αφορά τις περιοχές κάλυψης, έρευνες έχουν δείξει ότι προσδιορίζονται από την υπόθεση ότι η παρεμβολή από άλλες κυψέλες είναι ανεξάρτητη από το τρέχον φορτίο της κυψέλης.

Με αυτήν την προϋπόθεση, ο αποκλεισμός μιας κλήσης για ένα δεδομένο φορτίο κυψέλης λαμβάνει χώρα εάν η παρεμβολή από τις άλλες κυψέλες υπερβαίνει ένα ορισμένο όριο. Έστω η_{other} μια τυχαία μεταβλητή που υποδηλώνει το φορτίο των άλλων κυψελών:

$$\eta_{other} = (1 - \eta_{max}) \frac{\hat{I}_{other}}{\hat{N}_0} \quad (22)$$

Το φορτίο των γειτονικών κυψελών αποτελεί επίσης μια λογαριθμική κανονική (lognormal) τυχαία μεταβλητή με συνάρτηση κατανομής $\Gamma(x)$ (gamma distribution) και παραμέτρους:

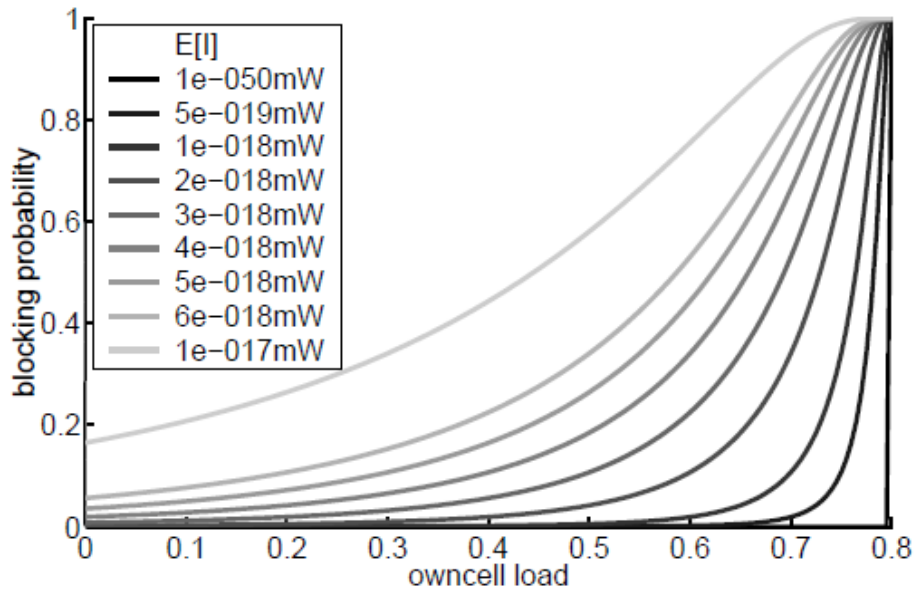
$$\mu_\Gamma = \mu + \log(1 - \eta_{max}) - \log(\hat{N}_0) \text{ και } \sigma_\Gamma = \sigma \quad (23)$$

οπότε η τοπική πιθανότητα απώλειας κλήσεως γίνεται:

$$\beta_t(\eta_{own}) = \begin{cases} 1 - \Gamma(\eta_{max} - (\eta_{own} + \omega_t)), & \text{αν } \eta_{max} - (\eta_{own} + \omega_t) > 0 \\ 1, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (24)$$

Σύμφωνα με αυτή την εξίσωση, μπορούμε να υπολογίσουμε τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων με βάση το φορτίο της ίδιας της κυψέλης η_{own} .

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται οι τοπικές πιθανότητες απώλειας κλήσεων με βάση το εκτιμώμενο φορτίο της ίδιας της κυψέλης. Οι καμπύλες σχεδιάζονται με βάση διαφορετικές μέσες παρεμβολές άλλων κυψελών και σταθερό συντελεστή διακύμανσης 1. Μία πολύ υψηλή παρεμβολή άλλης κυψέλης προκαλεί πιθανότητες απώλειας κλήσεων σχεδόν 20% ακόμη και για μηδενικό φορτίο της ίδιας της κυψέλης, δηλαδή χωρίς να υπάρχει κάποιος χρήστης στο σύστημα. Η καμπύλη για $E[\hat{I}_{other}] = 10^{-50} mW$ αντιπροσωπεύει την περίπτωση που δεν υπάρχει παρεμβολή από άλλες κυψέλες. Ενώ οι άλλες καμπύλες αντιστοιχούν σε πιο ρεαλιστικές τιμές $E[\hat{I}_{other}]$, οι οποίες βρίσκονται μεταξύ $5 \times 10^{-19} mW$ και $6 \times 10^{-18} mW$. Στην γραφική παράσταση το \hat{I}_{other} φαίνεται ως I .



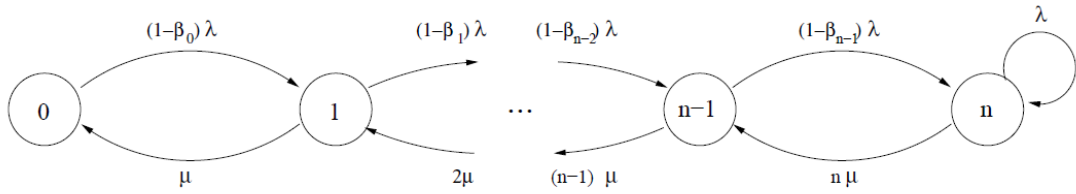
Εικόνα 7. Τοπικές πιθανότητες απώλειας κλήσεως με βάση το εκτιμώμενο φορτίο της ίδιας της κυψέλης [2]

Κεφάλαιο 7

Συνολική Πιθανότητα Απώλειας Κλήσεως

Στη συνέχεια στοχεύουμε στον υπολογισμό της πιθανότητας μονίμου καταστάσεως του φορτίου που οφείλεται στην κυψέλη που εξετάζουμε, για να λάβουμε την συνολική πιθανότητα απώλειας κλήσεως χρησιμοποιώντας το θεώρημα της ολικής πιθανότητας. Για να επιτευχθεί αυτό, προτείνεται ένα μοντέλο για τον ακριβή υπολογισμό της πιθανότητας μονίμου καταστάσεως του φορτίου και στη συνέχεια εισάγεται μια προσέγγιση που βασίζεται στην αναδρομική σχέση Kaufman-Roberts [8, 9].

Στο μοντέλο που χρησιμοποιείται, κάθε κατάσταση στην αλυσίδα Markov ορίζεται από τον αριθμό n των χρηστών στο σύστημα και ο χώρος καταστάσεων Ω περιορίζεται από το μέγιστο αριθμό χρηστών. Ο μέγιστος αριθμός χρηστών είναι αρκετά μεγάλος αρκεί να μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον σταθμό βάσης της κυψέλης. Ορίζεται ένας πίνακας ρυθμού μετάβασης για τον ακριβή υπολογισμό των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεως. Στους ρυθμούς μετάβασης λαμβάνεται υπ' όψη η τοπική πιθανότητα απώλειας κλήσεως (λόγω παρεμβολής), η οποία για κάθε μετάβαση $\bar{n} \rightarrow \bar{n}^{t+}$ οδηγεί σε μείωση του ρυθμού μετάβασης. Η αλυσίδα Markov είναι προσαρμοσμένη προκειμένου να ακολουθεί τη κατάλληλη συμπεριφορά του μοντέλου. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η τροποποιημένη μονοδιάστατη αλυσίδα Markov με τοπική απώλεια κλήσεων για μία μόνο υπηρεσία



Εικόνα 8. Τροποποιημένη μονοδιάστατη αλυσίδα Markov με τοπική απώλεια κλήσεων για μία μόνο υπηρεσία

Ο υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσεως στην τρέχουσα κατάσταση απαιτεί τη γνώση της κατανομής της στιγμιαίας δραστηριότητας χρήστη. Η μεταβλητή n_t υποδηλώνει τον αριθμό των χρηστών της υπηρεσίας t του συστήματος και m_t είναι οι ενεργές συνδέσεις. Η τοπική πιθανότητα απώλειας κλήσεως $B_t(\bar{n})$ μιας νέας κλήσης της υπηρεσίας t στην κατάσταση (\bar{n}) είναι:

$$B_t(\bar{n}) = \sum_{\bar{m} \leq \bar{n}}^T P(\bar{m}|\bar{n}) \beta_t(\eta_{own}(\bar{m})) \quad (25)$$

Από την εξίσωση (13) υπολογίζουμε το φορτίο της κυψέλης $\eta_{own}(\bar{m})$, ενώ από την (17) την τοπική πιθανότητα απώλειας κλήσεως $\beta_t(\eta_{own}(\bar{m}))$. Ο αριθμός των ενεργών χρηστών για την υπηρεσία t αποτελεί ακολουθεί τη διωνυμική κατανομή:

$$P(\bar{m}|\bar{n}) = \binom{n_t}{m_t} (1 - \nu_t)^{n_t - m_t} \nu_t^{m_t} \quad (26)$$

Μια νέα κλήση υπηρεσίας t που φτάνει στην κατάσταση (\bar{n}) γίνεται αποδεκτή με πιθανότητα $1 - B_t(\bar{n})$. Έτσι, ο ρυθμός μετάβασης από την κατάσταση (\bar{n}) στην μειώνεται από λ_t σε $(1 - B_t(\bar{n}))\lambda_t$. Ο πίνακας ρυθμού μετάβασης Q ορίζεται ως:

$$Q(f(\bar{n}), f(\bar{n}^{\pm})) = \begin{cases} (1 - B_t(\bar{n}))\lambda_t, & \text{για } \bar{n} \rightarrow \bar{n}^{t+} \\ n_t \mu_t, & \text{για } \bar{n} \rightarrow \bar{n}^{t-} \end{cases} \quad (27)$$

και $Q = 0$ αλλού. Η συνάρτηση *injective index* f αντιστοιχίζει τον χώρο καταστάσεων Ω στους φυσικούς αριθμούς N . Το διάνυσμα κατανομής μόνιμου καταστάσεως \bar{X} υπολογίζεται λύνοντας το σύστημα εξισώσεων:

$$Q\bar{X}^T = 0 \text{ και } \sum_{\bar{n} \in \Omega} \bar{X}(f(\bar{n})) = 1 \quad (28)$$

Από την σταθερή κατάσταση κατανομής, η συνολική πιθανότητα απώλειας κλήσεως $P_{block}(t)$ για την υπηρεσία t ισούται με

$$P_{block}(t) = \sum_{\bar{n} \in \Omega} \bar{X}(f(\bar{n})) B_t(\bar{n}) \quad (29)$$

Αυτή η μέθοδος είναι αριθμητικά δυσεπίλυτη και δεν είναι κατάλληλη για πολυδιάστατα σενάρια με μεγάλα διαστήματα καταστάσεων, αφού το μέγεθος του Q αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό των υπηρεσιών.

Κεφάλαιο 8

Προσεγγιστικός Υπολογιστής της Συνολικής Πιθανότητας Απώλειας Κλήσεως

Ο αναδρομικός τύπος Kaufman-Roberts ισχύει για συστήματα όπου χρησιμοποιούνται κοινόχρηστοι πόροι και ένα σύνολο από διάφορες υπηρεσίες, οι οποίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά τους πόρους. Ο αλγόριθμος βασίζεται στο γεγονός ότι η απώλεια μιας κλήσης δεν εξαρτάται ρητά από τον αριθμό των χρηστών στο σύστημα αλλά από ένα σύνολο απαιτήσεων Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS) καθώς και από τη διαθεσιμότητα των πόρων στην κυψέλη. [Kallos, Vassilakis, Moscholios, Logothetis, 2006]

Γενικά, ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα εξυπηρετεί κλήσεις Poisson, οι οποίες αντιστοιχούν σε $T(1, 2, \dots, t)$ διαφορετικές κατηγορίες κίνησης. Οι κλήσεις που φθάνουν στο σύστημα, ανταγωνίζονται για τις διαθέσιμες μονάδες πόρων. Κατά την άφιξή της, μία κλήση, έχει απαίτηση πόρων r_t . Αν οι πόροι αυτοί είναι διαθέσιμοι, η κλήση γίνεται αποδεκτή από το σύστημα και οι αντίστοιχοι πόροι καταλαμβάνονται από την κλήση για ένα χρονικό διάστημα, το οποίο είναι εκθετικά κατανομημένο με μέση τιμή μ_t^{-1} . Διαφορετικά, η κλήση μπλοκάρεται και χάνεται. Το παραπάνω ισχύει και για κάποιο σύστημα που διαθέτει ορισμένη χωρητικότητα.

Από τα παραπάνω, αρκεί να προσδιοριστεί η κατανομή μονίμου καταστάσεως της κατοχής πόρων. Ο αλγόριθμος των Kaufman-Roberts μειώνει το πολυδιάστατο χώρο καταστάσεων μεγέθους T σε μονοδιάστατο χώρο καταστάσεων, συνδυάζοντας τις καταστάσεις που καταλαμβάνουν την ίδια ποσότητα πόρων σε μία κατάσταση. Για ένα σύστημα με χωρητικότητα C και χώρο καταστάσεων μεγέθους T , υπηρεσίες με

απαιτήσεις πόρων r_t και προσφερόμενο φορτίο a_t η πιθανότητα μόνιμου κατάστασεως $p(j)$, όπου j οι κατειλημμένοι πόροι, είναι:

$$\tilde{p}(j) = \begin{cases} 0, \text{ για } 0 < j \text{ ή } j < C & (30) \\ 1, \text{ για } j = 0 \text{ και } p(j) = \frac{\tilde{p}(j)}{\sum_{c=0}^C \tilde{p}(j)} \\ \sum_{t=1}^T a_t \frac{r_t}{j} \tilde{p}(j - r_t), & \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

Οι συγκεκριμένες πιθανότητες απώλειας κλήσεων μίας υπηρεσίας είναι:

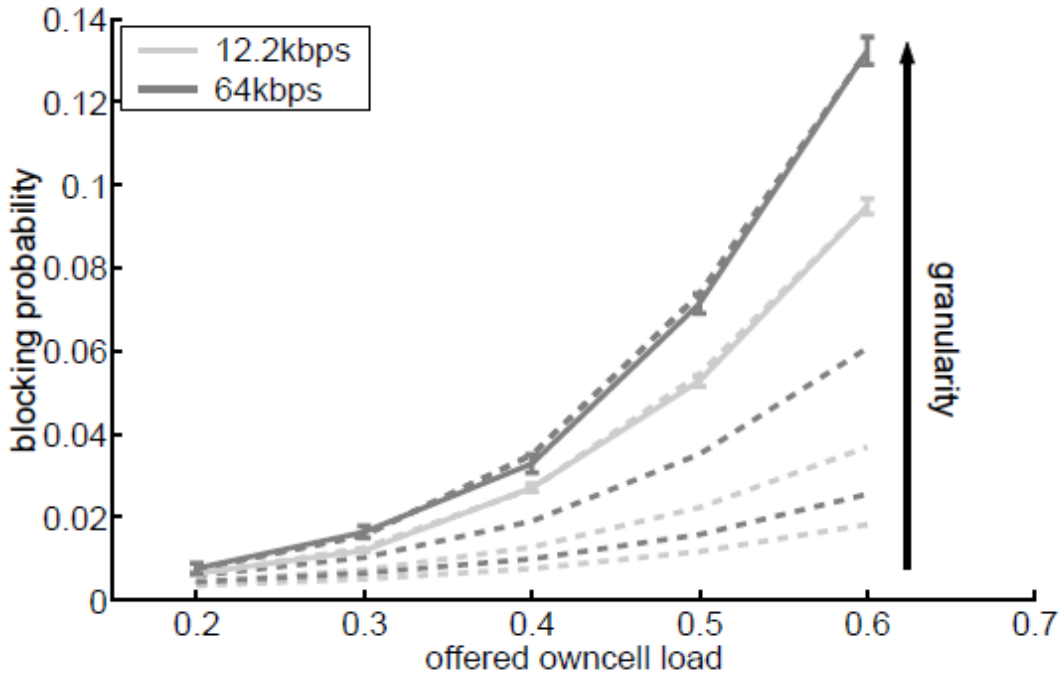
$$P_t^{block} = \sum_{j=0}^{r_t-1} p(C - j) \quad (31)$$

Στα δίκτυα WCDMA το φορτίο της κυψέλης η μπορεί να αντιμετωπιστεί ως κοινόχρηστος πόρος και το φορτίο ανά υπηρεσία ω_t ως απαίτηση πόρων. Η εφαρμογή του αλγορίθμου Kaufman-Roberts απαιτεί ένα διακριτό διαμοιρασμό πόρων και διακριτές απαιτήσεις υπηρεσιών. Επιπλέον, ο αλγόριθμος είναι επωφελής μόνο εάν μία κατάσταση (j) συνδυάζει ένα πολυδιάστατο χώρο καταστάσεων (\bar{n}). Έτσι, διακριτοποιούμε το φορτίο της κυψέλης εισάγοντας τη μονάδα φορτίου g της κυψέλης του οποίου το η_{max} πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο. Η προκύπτουσα χωρητικότητα και οι απαιτήσεις σε πόρους είναι:

$$C = \frac{\eta_{max}}{g} \text{ και } r_t = \text{round} \left(\frac{\omega_t}{g} \right) \quad (32)$$

Η μονάδα g αποτελεί το φορτίο της κυψέλης και ελέγχει την ευαισθησία του χώρου καταστάσεων του αλγορίθμου Kaufman-Roberts. Όσο μικρότερο είναι το g , τόσο μεγαλύτερος είναι ο χώρος καταστάσεων και τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση τοπικής πιθανότητας απώλειας κλήσεως. Στην απλή περίπτωση, όπου δεν υπάρχει παρεμβολή άλλων γειτονικών κυψελών και δεν δραστηριοποιείται κάποιος χρήστης, η αναδρομική σχέση Kaufman-Roberts αποδίδει ακριβείς πιθανότητες κατανομής μόνιμου καταστάσεως εκτός από την περίπτωση σφάλματος που προκαλείται από τη διακριτοποίηση του φορτίου της κυψέλης. Το ακόλουθο σχήμα δείχνει τις συνολικές πιθανότητες απώλειας κλήσεων για ένα τέτοιο σενάριο, λαμβάνοντας υπόψη δύο υπηρεσίες με ρυθμούς bit 12,2 kbps και 64 kbps και αντίστοιχες τιμές για E_b/N_0 , 5dB και 4dB, αντίστοιχα. Οι συμπαγείς καμπύλες απεικονίζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και οι διακεκομμένες καμπύλες αποτελούν αναλυτικά αποτελέσματα για διαφορετικές τιμές ευαισθησίας του χώρου καταστάσεων. Όσο πιο λεπτομερείς είναι οι

καμπύλες, τόσο πιο ακριβή αποτελέσματα λαμβάνουμε. Οι δύο μικρότερες μονάδες φορτίου κυψέλης 0,005 και 0,001 οδηγούν σε σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα και καμπύλες. Για αυτό το λόγο, έχει επιλεγθεί $g = 0,005$ ως μονάδα φορτίου της κυψέλης για τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην συνέχεια.



Εικόνα 9. Συνολικές πιθανότητες αποκλεισμού [2]

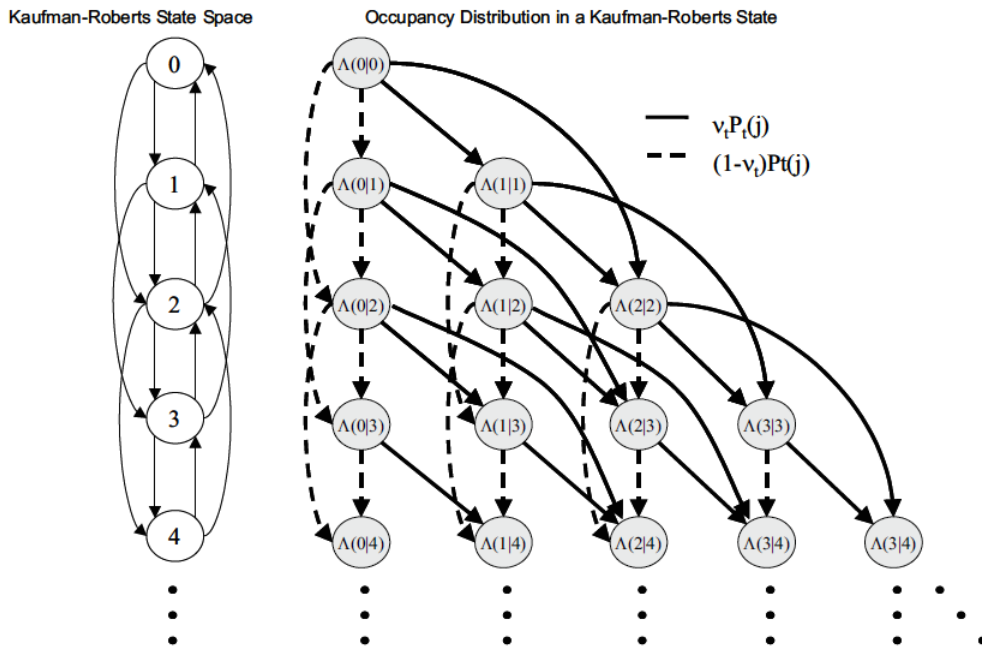
Η ενσωμάτωση των τοπικών πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων στην αναδρομική σχέση Kaufman-Roberts δεν είναι πάντα άμεσα δυνατή. Μια κατάσταση αντιστοιχεί στη χρήση όλων των πόρων όταν όλοι οι χρήστες είναι ενεργοί. Η περιγραφή μίας κατάστασης, όπου δεν παρέχεται ο αριθμός των ενεργών χρηστών και ο μέγιστος αριθμός κατειλημμένων πόρων δεν επαρκεί για να καθορίσει την κατανομή της κατοχής πόρων. Για αυτό το λόγο, εισάγεται μία τυχαία μεταβλητή Λ που υποδηλώνει τον αριθμό των κατεχόμενων πόρων. Ακόμα και αν δεν υπάρχει κάποια τοπική απώλεια κλήσεων, η πιθανότητα $\Lambda(c|j)$ όπου c οι πόροι που καταλαμβάνονται από την κατάσταση j υπολογίζεται αναδρομικά:

$$\Lambda(c|j) = \sum_{t=1}^T P_t(j) [v_t \Lambda(c - r_t | j - r_t) + (1 - v_t) \Lambda(c | j - r_t)] \quad (33)$$

Το $P_t(j)$ υποδηλώνει την πιθανότητα όπου μία κατάσταση j θα επιτευχθεί από μια νέα κλήση της υπηρεσίας t και δίνεται από:

$$P_t(j) = \frac{\tilde{p}(j - r_t) a_t \frac{r_t}{j}}{\tilde{p}(j)} \quad (34)$$

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται ο αλγόριθμος για τον αναδρομικό υπολογισμό της κατανομής κατάληψης πόρων Λ . Το σχήμα αυτό απεικονίζει ένα σύστημα δύο υπηρεσιών με απαιτήσεις πόρων 1 και 2. Στα αριστερά, είναι ο χώρος καταστάσεων Kaufman-Roberts. Οι μεταβάσεις μεταξύ γειτονικών καταστάσεων σχετίζονται με την υπηρεσία απαίτησης 1 και οι μεταβάσεις που υπερκαλύπτουν μία κατάσταση είναι για την υπηρεσία απαίτησης 2. Η δεξιά πλευρά δείχνει τον αναδρομικό υπολογισμό της κατανομής κατάληψης των πόρων. Στην κατάσταση (0) χωρίς χρήστες δεν υπάρχουν κατειλημμένοι πόροι, δηλαδή $\Lambda(0|0) = 1$. Στην κατάσταση (1) έχουμε έναν χρήστη για την υπηρεσία 1 που είναι είτε ενεργός είτε όχι. Αυτό οδηγεί σε $\Lambda(0,1) = 1 - v_1$ και $\Lambda(1,1) = v_2$. Η κατάσταση (2) είναι πιο περίπλοκη καθώς έχουμε είτε δύο χρήστες με μία υπηρεσία με πιθανότητα $P_1(2)$ είτε ένα χρήστη με δύο υπηρεσίες με πιθανότητα $P_2(2)$.



Εικόνα 10. Αλγόριθμος για τον αναδρομικό υπολογισμό της κατανομής κατάληψης πόρων Λ [2]

Η πιθανότητα $P_1(2)$ αποτελεί την κατανομή κατοχής της κατάστασης (1) συν έναν νέο χρήστη με μία υπηρεσία που είτε είναι ενεργή είτε όχι. Η πιθανότητα $P_2(2)$ αποτελεί την κατανομή κατοχής της κατάστασης (0) συν έναν νέο χρήστη για την υπηρεσία δύο που είτε είναι ενεργή είτε όχι. Συνδυάζοντας τα, έχουμε τη πιθανότητα κανέναν χρήστη να μην είναι ενεργός στην κατάσταση δύο:

$$\Lambda(0|2) = P_1(2)\Lambda(0|1)(1 - v_1) + P_2(2)\Lambda(0|0)(1 - v_2) \quad (35)$$

Στο σχήμα αυτός ο υπολογισμός υποδεικνύεται με βέλη. Ένα συμπαγές βέλος ισούται με την πιθανότητα μία νέα κλήση να είναι ενεργή και το διακεκομμένο βέλος ισούται με μία νέα κλήση να είναι παθητική.

Για παράδειγμα, μια άλλη ειδική περίπτωση είναι η πιθανότητα $\Lambda(2,4)$ που σημαίνει ότι 2 πόροι είναι κατειλημμένοι στην κατάσταση (4). Αυτή η περίπτωση είναι αρκετά γενική αφού υπάρχουν τέσσερεις τρόποι για να επιτευχθεί η κατοχή αυτών των πόρων. Ο νέος χρήστης μπορεί να είναι είτε στην υπηρεσία ένα ή δύο και μπορεί να είναι ενεργός ή παθητικός. Τα τέσσερα βέλη που εκτείνονται στον κύκλο με την ένδειξη $\Lambda(2|4)$ υποδεικνύουν τον αναδρομικό υπολογισμό αυτών των τεσσάρων πιθανοτήτων.

Η χρήση του αναδρομικού υπολογισμού για την κατανομή κατοχής των πόρων αποτελεί μία ακριβή λύση εάν δεν συμβεί κάποια τοπική απώλεια κλήσεων. Οι πιθανότητες τοπικής απώλειας κλήσεων περιλαμβάνουν τη μείωση του ρυθμού μετάβασης και θα πρέπει να τροποποιηθεί η αναδρομή. Σε αυτή την περίπτωση, η κατάσταση (0) αποτελεί ένα κενό σύστημα και ισχύει:

$$\tilde{p}(0) = 1, \Lambda(0|0) = 1, \Lambda(i|0) = 0 \text{ για } i \neq 0, \text{ και } B_t(0) = \beta_t(0) \quad (36)$$

Αρχικοποιούμε $\tilde{p}(j) = 0$ για $j < 0$. Οι μη κανονικοποιημένες πιθανότητες και οι τοπικές πιθανότητες απώλειας κλήσεων για την κατάσταση j υπολογίζονται αναδρομικά. Η πιθανότητα μη κανονικοποιημένης κατάστασης $\tilde{p}(j)$, σύμφωνα με την εξίσωση (23) επεκτείνεται με βάση την τοπική απώλεια κλήσεων:

$$\tilde{p}(j) = \sum_{t=1}^T \tilde{p}(j - r_t)(1 - B_t(j - r_t)) a_t \frac{r_t}{j} \quad (37)$$

Αυτή η πιθανότητα βασίζεται στο $\tilde{p}(j - r_t)$ και $B_t(j - r_t)$, τα οποία είναι γνωστά για όλες τις καταστάσεις c με $c < j$. Για να τον προσδιορισμό των πιθανοτήτων τοπικής απώλειας κλήσεων $B_t(j)$, η πιθανότητα η κατάσταση j να προκύψει από την κατάσταση $j - r_t$ είναι:

$$P_t(j) = \frac{\tilde{p}(j - r_t)(1 - B_t(j - r_t)) a_t \frac{r_t}{j}}{\tilde{p}(j)} \quad (38)$$

Η κατανομή κατοχής πόρων υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (26) και οι τοπικές πιθανότητες απώλειας κλήσεων $B_t(j)$ προκύπτουν χρησιμοποιώντας το θεώρημα της ολικής πιθανότητας:

$$B_t(j) = \sum_{c=0}^T \Lambda(c|j) \beta_t(c) \quad (39)$$

Ο επαναληπτικός υπολογισμός των πιθανοτήτων των μη κανονικοποιημένων καταστάσεων και των πιθανοτήτων τοπικής απώλειας κλήσεων γίνεται μέχρι είτε οι πιθανότητες τοπικής απώλειας κλήσεων να προσεγγίζουν μία ή περισσότερες καταστάσεις, οι οποίες είναι απρόσιτες λόγω περιορισμού του υλικού. Με τον προσδιορισμό όλων των πιθανοτήτων μη κανονικοποιημένης κατάστασης $\tilde{p}(j)$, οι πιθανότητες κατανομής μονίμου κατάστασεων $p(j)$ ακολουθούν την κανονικοποίηση:

$$p(j) = \frac{\tilde{p}(j)}{\sum_{c=0}^c \tilde{p}(j)} \quad (40)$$

Η συνολική πιθανότητα απώλειας κλήσεως για μια υπηρεσία t είναι το άθροισμα όλων των πιθανοτήτων κατάστασης $p(j)$ πολλαπλασιαζόμενη με τις τοπικές πιθανότητες απωλείας κλήσεων $B_t(j)$ για όλες τις προσβάσιμες καταστάσεις:

$$P_{block}(t) = \sum_{j=0}^{j_{max}} B_t(j) p(j) \quad (41)$$

Κεφάλαιο 9

Εφαρμογές μοντέλων

Είδαμε παραπάνω, τον ορισμό της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, τα ασύρματα δίκτυα WCDMA, τις παραμέτρους τους αλλά και τύπους μέσω των οποίων υπολογίζεται η πιθανότητα απώλειας κλήσεων.

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα μέσω των οποίων πραγματοποιείται ο υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσεων.

Ένα μοντέλο που περιγράφει τον υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας κλήσεων είναι το γενικό μοντέλο EMLM με σταθερή ροή δεδομένων, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2. Παρακάτω εμφανίζονται παραδείγματα υπολογισμού των πιθανοτήτων απωλειών κλήσεων για τον αναδρομικό τύπο EMLM με χρήση του link <https://teletraffic-models.appspot.com/>

Εφαρμογή 1

Εφαρμογή του αναδρομικού τύπου EMLM όπου έχουμε θεωρήσει χωρητικότητα $C = 5$, $K = 2$ τάξης υπηρεσίας, μονάδες εύρους ζώνης $b_1 = 1$ και $b_2 = 2$ και $\alpha_1 = 1 \text{ erl}$, $\alpha_2 = 0,5 \text{ erl}$ τα φορτία κίνησης

Λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα σχετικά με το διάνυσμα $q(j)$ για $j = 0, \dots, 5$ για όλες τις τάξεις υπηρεσιών και την Πιθανότητα απώλειας κλήσεων B_k

Input data

Model:

Calculate:
 Blocking probabilities Link capacity

Link Capacity (C):

Number of service classes (k):
 2

Max value = 6

Bandwidth Reservation

Service class 1

Traffic load (a):

Bandwidth demand (b):

Reserved bandwidth (t):

Service class 2

Traffic load (a):

Bandwidth demand (b):

Reserved bandwidth (t):

Εικόνα 11. Εισαγωγή δεδομένων

Results		
service class (k)		Blocking Probability (B_k)
1		0.0042385
2		0.014535
Link Utilization (U)		1.9812
j	$q(j)$	$Q(j)$
0	1	0.22369
1	1	0.22369
2	1	0.22369
3	0.66667	0.14912
4	0.41667	0.093203
5	0.21667	0.048465
6	0.10556	0.023611
7	0.046032	0.010297
8	0.018948	0.0042385
j	$\gamma_1(j)$	$\gamma_2(j)$
0	0	0
1	1	0
2	1	0.5
3	1.5	0.75
4	1.6	1.2
5	1.9231	1.5385
6	2.0526	1.9737
7	2.2931	2.3534
8	2.4293	2.7853

Εικόνα 12. Εμφάνιση αποτελεσμάτων

Εφαρμογή 2

Εδώ δοκιμάζουμε να υπολογίσουμε τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων για υπηρεσίες τάξης $K = 2$ και με μικρότερη ροή δεδομένων. Οι παράμετροι που έχουν δηλωθεί είναι $C = 8$, μονάδες εύρους ζώνης $b_1 = 1$ και $b_2 = 2$ και $\alpha_1 = 0.5 \text{ erl}$, $\alpha_2 = 0,20 \text{ erl}$ τα φορτία κίνησης

Εμφανίζονται τα παρακάτω αποτελέσματα

Multirate Teletraffic Loss Models

Calculations for several teletraffic loss models

Input data

Model: Erlang (Kaufman - Robinson formula)

Calculate: Blocking probability Link capacity

Link Capacity (C): 8

Number of service classes (K): 2

Use value = Bandwidth Reclamation

Service class 1

Traffic load (a₁): 0.2

Bandwidth demand (b₁): 1

Reclaimed bandwidth (r₁): Bandwidth units

Service class 2

Traffic load (a₂): 0.20

Bandwidth demand (b₂): 2

Reclaimed bandwidth (r₂): Bandwidth units

Calculate

Results

service class (k)	Blocking Probability (B _k)
1	0.00014294
2	0.00070627

Link Utilization (U): 0.66664

f	a _f (f)	Q(f)
0	1	0.49999
1	0.2	0.24889
2	0.225	0.16144
3	0.12089	0.060007
4	0.047604	0.022641
5	0.014427	0.0071646
6	0.0042729	0.0021721
7	0.001127	0.00056462
8	0.00028885	0.00014294

f	γ _f (f)	γ _f (f)
0	0	0
1	1	0
2	0.76923	0.61239
3	1.2449	0.82729
4	1.2591	1.2624

Εικόνα 13. Εισαγωγή δεδομένων και αποτελέσματα

Παρατηρούμε πως στις περιπτώσεις με μικρότερη ροή δεδομένων, δηλαδή όταν έχουμε μικρότερο φορτίο υπηρεσιών, η πιθανότητα απώλειας κλήσεων είναι μικρότερη και τείνει στο μηδέν όσο μειώνεται το φορτίο κίνησης.

Εφαρμογή 3

Εδώ δοκιμάζουμε να υπολογίσουμε τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων για υπηρεσίες τάξης $K = 2$ και με μικρότερη ροή δεδομένων. Οι παράμετροι που έχουν δηλωθεί είναι $C = 8$, μονάδες εύρους ζώνης $b_1 = 1$ και $b_2 = 2$ και $\alpha_1 = 0.25 \text{ erl}$, $\alpha_2 = 0,15 \text{ erl}$ τα φορτία κίνησης

Εμφανίζεται πως η απώλεια πιθανότητας κλήσεων, συνεχίζει και μειώνεται.

Multirate Teletraffic Loss Models

Calculations for several teletraffic loss models

Input data

Model:

Calculators: Blocking probability Link capacity

Link Capacity (C):

Number of service classes (K):

Utilization = 0

Bandwidth Reservation

Service class 1

Trafficload (a):

Bandwidth demand (b):

Reserved bandwidth (r):

Service class 2

Trafficload (a):

Bandwidth demand (b):

Reserved bandwidth (r):

Calculate

Results

Service class (K)	Blocking Probability (B _k)
1	2.7164E-05
2	0.00016191

Link Utilization (U):

J	Q _J	Q _J
0	1	0.97092
1	0.25	0.16729
2	0.16125	0.1215
3	0.040104	0.026882
4	0.0161	0.010792
5	0.0022112	0.0021226
6	0.00062882	0.00062921
7	0.00017112	0.00011672
8	4.0224E-05	2.7164E-05

J	3xQ _J	3xQ _J
0	0	0
1	1	0
2	0.24483	0.62729
3	1.1299	0.93206
4	0.62272	1.6886

Εικόνα 14. Εισαγωγή δεδομένων και αποτελέσματα

Όσο αυξάνει το φορτίο, αυξάνεται και η πιθανότητα απώλειας κλήσεων, άρα μειώνεται ο βαθμός εξυπηρέτησης, το οποίο είναι σύμφωνο με την Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κινησεως.

Στη συνέχεια, θα αναφέρουμε το γενικό μοντέλο single retry μέσω του οποίου υπολογίζεται η πιθανότητα απώλειας κλήσεων με μία μόνο επανάληψη κλήσης. Για να περιγράψουμε το μοντέλο, θα θεωρήσουμε μία απλή ζεύξη χωρητικότητας C που φιλοξενεί κλήσεις υπηρεσιών τάξης 2 με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (λ_1, λ_2) , (μ_1^{-1}, μ_2^{-1}) , (b_1, b_2) .

Οι μπλοκαρισμένες κλήσεις της υπηρεσίας τάξης 2 μπορούν να ξαναδοκιμάσουν με παραμέτρους (b_{2r}, μ_{2r}^{-1}) , ενώ οι μπλοκαρισμένες κλήσεις της υπηρεσίας τάξης 1 δεν επιτρέπεται να ξαναδοκιμάσουν. Δηλαδή, σε ένα σύστημα χωρητικότητας C όπου έχουμε κλήσεις υπηρεσίας τάξης $K = 2$, όταν υπάρχουν μία κλήση υπηρεσίας τάξης 1 και μία κλήση υπηρεσίας τάξης 2 και η κλήση υπηρεσίας τάξης 2 μπλοκάρεται, έχει δυνατότητα να ξαναπροσπαθήσει να συνδεθεί στο σύστημα με μικρότερο εύρος ζώνης.

Υποθέτουμε ότι ισχύει η ισότητα:

$$\lambda_k q(j - b_k) = y_k \mu_k q(j) \text{ για } j = 1, \dots, C \text{ και } k = 1, 2 \quad (42)$$

Η παραπάνω ισότητα είναι σημαντική για την παραγωγή μιας προσεγγιστικής και αναδρομικής σχέσης για τον υπολογισμό του $q(j)$.

Η εξίσωση εκφράζει το γεγονός ότι δεν πραγματοποιείται κλήση στην κατάσταση $(j-b_k)$ εάν υπάρχουν διαθέσιμες μονάδες εύρους ζώνης b_k ($K = 1, 2$). Αν $j > C - b_2$ όταν μία νέα κλήση υπηρεσίας τάξης 2 φτάνει στο σύστημα, τότε η κλήση μπλοκάρει και ξαναδοκιμάζει να συνδεθεί με b_{2r} μονάδες εύρους ζώνης. Αν $j \leq C - b_2$, τότε η επαναλαμβανόμενη κλήση θα γίνει αποδεκτή από το σύστημα.

Για να περιγράψουμε την τελευταία περίπτωση χρειαζόμαστε μία επιπλέον εξίσωση:

$$\lambda_2 q(j - b_{2r}) = y_{2r}(j) \mu_{2r} q(j) \text{ με } j - b_{2r} > C - b_2 \quad (43)$$

όπου y_{2r} είναι ο μέσος αριθμός των κλήσεων υπηρεσίας τάξης K που είναι αποδεκτές από το σύστημα με b_{2r} στην κατάσταση j .

Αν διαιρέσουμε με μ_{2r} και πολλαπλασιάσουμε με b_{2r} έχουμε την εξίσωση:

$$\alpha_{2r} b_{2r} q(j - b_{2r}) = y_{2r}(j) b_{2r} q(j) \text{ με } C \geq j > C - (b_2 - b_{2r}) \quad (44)$$

όπου $\alpha_{2r} = \lambda_2 \mu_{2r}^{-1}$ είναι το προσφερόμενο φορτίο κλήσεων υπηρεσίας τάξης 2 με b_{2r} .

Κάνοντας πράξεις καταλήγουμε στη σχέση

$$\alpha_1 b_1 q(j - b_1) + \alpha_2 b_2 q(j - b_2) + \alpha_{2r} b_{2r} q(j - b_{2r}) = j q(j) \quad (45)$$

με $C \geq j \geq C - (b_2 - b_{2r})$ και $j = 1, \dots, C$

Μία άλλη προσέγγιση για τον υπολογισμό του $q(j)$ είναι:

$$y_1(j) b_1 + y_2(j) b_2 \approx j \text{ για } j = 1, \dots, C - (b_2 - b_{2r}) \quad (46)$$

Η εξίσωση εκφράζει την προσέγγιση στην οποία ο αριθμός των κλήσεων που είναι αποδεκτές στο σύστημα με απαίτηση άλλη από αυτή του μέγιστου bandwidth είναι αμελητέος μέσα σε ένα σταθερό διάστημα.

Σε αυτό το διάστημα, η ποσότητα $y_{2r}(j) b_{2r}$ είναι αμελητέα συγκρινόμενη με την ποσότητα

$$y_1(j) b_1 + y_2(j) b_2$$

Για τον υπολογισμό της προσεγγιστικής αναδρομικής σχέσης, έγινε χρήση της παραμέτρου γ , υποθέτοντας υπηρεσίες τάξης 2 όπου μόνο κλήσης της υπηρεσίας τάξης 2 μπορεί να δοκιμάσει να συνδεθεί εκ νέου.

Έχουμε,

$$\alpha_1 b_1 q(j - b_1) + \alpha_2 b_2 q(j - b_2) + \alpha_{2r} b_{2r} \gamma_2(j) q(j - b_{2r}) = j q(j)$$

$$\text{για } j = 1, \dots, C - (b_2 - b_{2r}) \quad (47)$$

$$\gamma_2(j) = \begin{cases} 1 & \text{όταν } j > C - (b_2 - b_{2r}) \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Η γενίκευση της παραπάνω σχέσης για υπηρεσίες τάξεις K όπου ξαναδοκιμάζουν να συνδεθούν όλες οι υπηρεσίες τάξεις K , είναι:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & \text{αν } j = 0 \\ \frac{1}{j} (\sum_{k=1}^K \alpha_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K \alpha_{kr} b_{kr} \gamma_k(j) q(j - b_{kr})), & j = 1, \dots, C \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (48)$$

όπου $\alpha_{kr} = \lambda_{kr} \mu_{kr}^{-1}$ και $\gamma_k(j) = 1$ όταν $j > C - (b_k - b_{kr})$ (αλλιώς, $\gamma_k(j) = 0$)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, υπολογίζουμε τις τιμές:

1. Πιθανότητας απώλειας κλήσεων, B_{kr} , υπηρεσίας τάξης K με μονάδες εύρους ζώνης b_{kr} (με επαναπροσπάθεια):

$$B_{kr} = \sum_{j=C-b_{kr}+1}^C G^{-1} q(j) \quad (49)$$

2. Πιθανότητας απώλειας κλήσεων, B_k , υπηρεσίας τάξης K με μονάδες εύρους ζώνης b_k (χωρίς επαναπροσπάθεια, ή την πιθανότητα επαναπροσπάθειας στην περίπτωση υπηρεσίας τάξης K με επαναπροσπάθεια):

$$B_k = \sum_{j=C-b_k+1}^C G^{-1} q(j) \quad (50)$$

3. Υποθετικής πιθανότητας απώλειας επαναλαμβανόμενων κλήσεων B_{kr}^* , υπηρεσίας τάξης K δεδομένου ότι έχουν μπλοκαριστεί με την αρχική τιμή εύρους ζώνης:

$$B_{kr}^* = Prob\{j > C - b_{kr} | j > C - b_k\} = \frac{B_{kr}}{B_k} \quad (51)$$

Παρακάτω εμφανίζονται εφαρμογές του μοντέλου single retry μέσω του link <https://teletraffic-models.appspot.com>

Εφαρμογή 4

Εδώ δοκιμάζουμε να υπολογίσουμε τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων για υπηρεσίες τάξης $K = 2$ και με δυνατότητα μίας επανάληψης με μικρότερη ροή δεδομένων. Οι παράμετροι που έχουν δηλωθεί είναι $C = 8$, μονάδες εύρους ζώνης $b_1 = 1$ και $b_2 = 3$, $b_{2r} = 2$ και $\alpha_1 = 1 \text{ erl}$, $\alpha_2 = 1 \text{ erl}$ και $\alpha_{2r} = 1,5$ φορτία κίνησης

Input data

Model:

Calculator: Blocking probabilities Link capacity

Link capacity (C):

Number of service classes (K):

Bandwidth Reservation

Service class 1

Traffic load (α):

Retry traffic load (α_r):

Bandwidth demand (β):

Retry bandwidth demand (β_r):

Reserved bandwidth (r):

Service class 2

Traffic load (α):

Retry traffic load (α_r):

Bandwidth demand (β):

Retry bandwidth demand (β_r):

Reserved bandwidth (r):

Results

service class (k)	Retry Blocking Probability (P _{k,r})	Blocking Probability (P _k)	Conditional Blocking Probability (P _{k c})
1	-	0.071171	-
2	0.1515	0.24761	0.61131

Link Utilization (U):

j	μ(j)	Q(j)
0	1	0.16619
1	1	0.16619
2	0.5	0.071092
3	1.1667	0.16622
4	1.6417	0.15019
5	0.50922	0.071092
6	0.66406	0.066225
7	0.52107	0.07012
8	0.50666	0.071171

j	μ _r (j)	μ _c (j)
0	0	0
1	1	0
2	2	0
3	0.61627	0.62716
4	1.12	0.96
5	2.062	0.66161
6	0.76091	1.7664
7	1.3229	1.6229

Εικόνα 15 : Εισαγωγή δεδομένων και αποτελέσματα για το μοντέλο Single Retry

Results

service class (<i>k</i>)	Retry Blocking Probability (B_{kr})	Blocking Probability (B_k)	Conditional Blocking Probability (B_{kr}^*)
1	-	0.073373	-
2	0.1515	0.24783	0.61132

Εικόνα 16: Αποτελέσματα πιθανότητας απώλειας κλήσεων

Η εφαρμογή των παραπάνω μοντέλων για τον υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας κλήσεων, υπηρεσίας περισσότερων της μιας τάξης, δηλαδή για πολύ μεγάλους αριθμούς K , είναι δύσκολος.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιούμε το μοντέλο CDTM (Connection-Dependent Threshold Model), το οποίο είναι το μοντέλο επανάληψης και κατωφλίου. Το αρχικό κίνητρο για το CDTM ήταν το διαθέσιμο bit rate (ABR – Available Bit Rate) στην υπηρεσία ATM δικτύων (ασύγχρονης μετάδοσης –asynchronous transfer mode), όπου το ABR είναι μία υπηρεσία η οποία χρησιμοποιείται στα ATM δίκτυα όταν η πηγή και ο προορισμός δεν χρειάζεται να είναι συγχρονισμένα. Το CTDM μοντελοποιεί μία ελαστική κλήση, θέτοντας επαρκώς τις παραμέτρους κατωφλίου. Το CDTM είναι εφαρμόσιμο σε κάθε ελαστική υπηρεσία για κλήση που είναι στη φάση της έναρξής της, αρκεί να μην είναι χρησιμοποιείται όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης για την εφαρμογή της. Οι απαιτήσεις του ελάχιστου και του μέγιστου bandwidth είναι σημαντικές παράμετροι του CDTM για τον υπολογισμό του CBP (Call Blocking Probabilities) ανεξαρτήτως κατωφλίου. Εάν το ελάχιστο απαιτούμενο bandwidth είναι μηδέν, μια ελαστική κλήση θα έπρεπε να είναι σε αναμονή για κάθε διαθέσιμο bandwidth κατά την έναρξη εξυπηρέτησής της.

Το CDTM μπορεί να εφαρμοστεί στα δίκτυα WCDM με παρόμοιο τρόπο με αυτόν του EMLM. Ένας απλός σταθμός βάσης που ελέγχει μία κυψέλη μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα σύστημα δεδομένης χωρητικότητας bandwidth. Οι μονάδες bandwidth (b.u.) μπορεί να είναι ισοδύναμες με το bandwidth που ορίζεται από τον εισαγόμενο

συντελεστή φορτίου, για παράδειγμα, από τον χαμηλότερο ρυθμό υπηρεσίας (π.χ. φωνής). Ο συντελεστής φορτίου καθορίζεται από την αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR – signal to noise ratio), το ρυθμό δεδομένων και τον παράγοντα δραστηριότητας της συνδεδεμένης υπηρεσίας. Μία κλήση είναι αποδεκτή για εξυπηρέτηση όσο υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες πηγές στην κυψέλη. Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, η πολιτική CAC είναι βασισμένη στην εκτίμηση της αύξησης στο σύνολο της παρεμβολής (παρεμβολή που προκαλείται εσωτερικά της κυψέλης καθώς και από τις γειτονικές, πλέον του θερμικού θορύβου) που προκαλείται από την αποδοχή νέων κλήσεων. Μετά την αποδοχή κλήσης, το SNR όλων των κλήσεων που εξυπηρετούνται χειροτερεύει, εξαιτίας αυτού, τα συστήματα WCDMA συνήθως δεν έχουν ισχυρά όρια στη χωρητικότητα κλήσης. Μία κλήση δεν θα έπρεπε να είναι αποδεκτή, εάν αυτό αυξήσει το θόρυβο σε μία κλήση σε υπηρεσία, πάνω από ένα ανεκτό επίπεδο. Οι εισερχόμενες κλήσεις με ροή Poisson σε μία κυψέλη, μπορούν να έχουν πολλαπλές ενδεχόμενες πηγές / QoS απαιτήσεις.

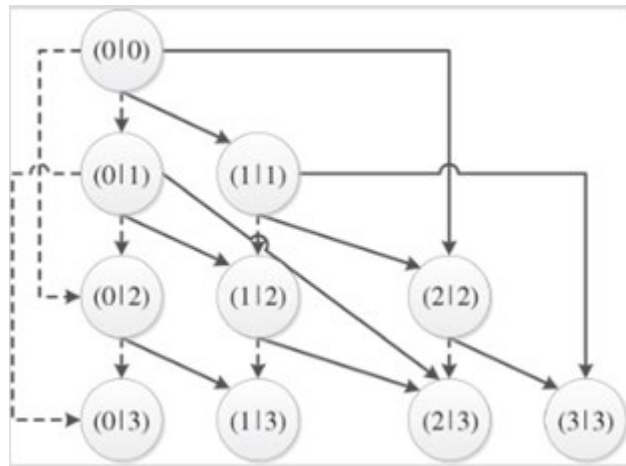
Αν αναλογιστεί κανείς, το προσφερόμενο QoS σε κάθε υπηρεσία K ($K = 1, \dots, K$) ανήκει σε ένα από τα $S(K) + 1$ εναλλακτικά QoS επίπεδα, τα οποία εξαρτώνται από την κατεχόμενη κυψέλη. Σε ό, τι ακολουθεί, μία υπηρεσία κλήσης K του επιπέδου QoS l ($l = 0, \dots, S(l)$) αναφέρονται ως υπηρεσία (K, l) κλήσης. Μία υπηρεσία κλήσης (K, l) χαρακτηρίζονται από τις ακόλουθες παραμέτρους QoS:

- i) $TR_{k,l}$ ρυθμός μετάδοσης
- ii) $\mu^{-1}_{k,l}$ μέση τιμή χρόνου εξυπηρέτησης (εκθετική κατανομή)
- iii) $(E_b / N_0)_{k,l}$ BER παράμετρος

Η εφαρμογή CDTM για αξιολόγηση της απόδοσης του επιπέδου κλήσης στα δίκτυα WCDMA είναι απαραίτητη όταν υποθέτουμε ότι μία κυψέλη WCDMA φιλοξενεί όχι μόνο streaming υπηρεσίες (υπηρεσίες τάξης που έχουν μόνο ένα επίπεδο QoS ($S(k) = 0$)) αλλά και ελαστικές (υπηρεσίες τάξης που έχουν περισσότερα του ενός QoS επίπεδα ($S(k) > 0$ και η μέση τιμή του χρόνου εξυπηρέτησης είναι στενά ορισμένη στο QoS επίπεδο), οι οποίες σχετίζονται με τα μεμονωμένα σύνολα κατωφλίων. Μία ελαστική κλήση έχει ένα ορισμένο ποσό δεδομένων προς μετάδοση. Ο χρόνος εξυπηρέτησης θα έπρεπε να είναι αντιστρόφως ανάλογος με τις κατανεμημένες πηγές. Γι' αυτό το λόγο, η μέση τιμή $\mu_{k,l}^{-1}$ επιλέγεται έτσι ώστε η ποσότητα $\mu_{k,l}^{-1} L F_{k,l}$ να παραμένει σταθερή για κάθε επίπεδο QoS l . Μία παραλλαγή της ελαστικής υπηρεσίας είναι μία προσαρμοστική υπηρεσία, στην οποία οι κλήσεις ίσως περιορίσουν τις πηγές/ bandwidth, αλλά ο χρόνος εξυπηρέτησης παραμένει σταθερός.

Παράδειγμα 1

Εάν θεωρήσουμε ένα σύστημα με υπηρεσία - τάξης $K = 2$ και απλό επίπεδο QoS ανά τάξη υπηρεσίας $S(K) = 0$, όπου $K = 1, 2$, ενώ οι μονάδες εύρους ζώνης είναι $b_1 = 1$ και $b_2 = 2$. Στο σχήμα βλέπουμε τον επαναλαμβανόμενο προσδιορισμό των πόρων



Εικόνα 17. Επαναλαμβανόμενος προσδιορισμός των πόρων

Όπου η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την άφιξη ενός παθητικού χρήστη, ενώ η συνεχόμενη γραμμή δείχνει την άφιξη ενός ενεργού χρήστη.

Ο παθητικός χρήστης της υπηρεσίας τάξης 1 είναι αποδεκτός στο σύστημα, με πιθανότητα $(1-v_1)P_1(0)$ και το σύστημα περνά στην κατάσταση $(0|1)$

Ο παθητικός χρήστης της υπηρεσίας τάξης 2 είναι αποδεκτός στο σύστημα, με πιθανότητα $(1-v_2)P_2(0)$ και το σύστημα περνά στην κατάσταση $(0|2)$

Ένας ενεργός χρήστης της υπηρεσίας τάξης 1 είναι αποδεκτός στο σύστημα, με πιθανότητα $v_1P_1(0)$ και το σύστημα περνά στην κατάσταση $(1|1)$

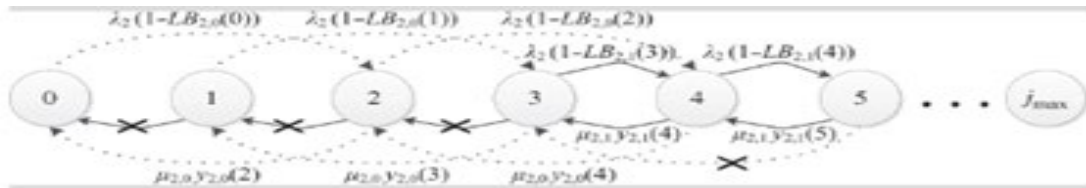
Ένας ενεργός χρήστης της υπηρεσίας τάξης 2 είναι αποδεκτός στο σύστημα, με πιθανότητα $v_2P_2(0)$ και το σύστημα περνά στην κατάσταση $(2|2)$

Τότε, το $\Lambda(1|2)$ καθορίζεται από τα $\Lambda(0|1)$ και $\Lambda(1|1)$:

$$\Lambda(1|2) = (1-v_1)P_1(0) \Lambda(0|1) + v_1P_1(0) \Lambda(1|1)$$

Παράδειγμα 2: Παρουσίαση WCDMA κυψέλης στο CDTM

Υποθέτουμε πως έχουμε κυψέλη με χωρητικότητα $C = 5$ μονάδες εύρους ζώνης σε $K = 3$ τάξεις υπηρεσιών. Οι κλήσεις τάξης υπηρεσίας 1 απαιτούν 1 μονάδα εύρους ζώνης χωρίς κανένα όριο κατωφλίου. Η κλήση τάξης υπηρεσίας 2 έχει ένα κατώφλι $J_{2,1} = 2$ και 2 ενδεχόμενες τιμές για εύρος ζώνης $b_{2,0} = 2$ $b_{2,1} = 1$. Η κλήση τάξης υπηρεσίας 3 έχει 2 τιμές κατωφλίου $J_{3,1} = 2$ $J_{3,2} = 3$ και 3 ενδεχόμενες τιμές μονάδων εύρους ζώνης $b_{3,0} = 3$ $b_{3,1} = 2$ και $b_{3,2} = 1$.



Εικόνα 18. Μαρκοβιανή αλυσίδα μεταβάσεως τάξης υπηρεσίας 2

Μία κλήση μπλοκάρεται και χάνεται όταν το εύρος ζώνης είναι πλήρως κατειλημμένο διότι υπάρχει η απαίτηση του ελάχιστου εύρους ζώνης ανά κλήση να είναι 1 στις κλήσεις όλων των τάξεων υπηρεσιών. Εάν εφαρμόσουμε αυτή την τιμή κατωφλίου, σε ένα σύστημα WCDMA, λόγω ύπαρξης της τοπικής απώλειας, δεν υπάρχει ξεκάθαρη κατάσταση μπλοκαρίσματος και μη μπλοκαρίσματος (blocking και no - blocking). Η μπλοκαρισμένη κλήση υπηρεσίας τάξης (K,l) θα συμβεί σε οποιαδήποτε j κατάσταση με πιθανότητα $LB_{K,l}(j)$ (LBF). Παρατηρούμε στην Εικόνα 16 παραπάνω, πως ο ρυθμός μετάβασης από χαμηλότερη σε υψηλότερη κατάσταση μειώνεται κατά ένα παράγοντα $1 - LB_{K,l}(j)$. Μία άλλη σημαντική διαφορά είναι πως η τιμή j μπορεί να υπερβεί το C . Η μέγιστη τιμή του j συμβολίζεται με j_{max} και είναι στην οποία το $LB_{K,l}(j)$ πλησιάζει το 1.

Δεδομένων των ανωτέρω, εμφανίζεται ότι τα WCDMA συστήματα δεν έχουν αυστηρά όρια στις τιμές χωρητικότητας του συστήματος.

Οι σχέσεις που εκφράζουν την εφαρμογή του μοντέλου CDTM στα ασύρματα δίκτυα είναι:

$$jq(j) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{S(k)} \alpha_{k,l} (1 - LB_{k,l}(j - b_{k,l})) b_{k,l} \delta_{k,l}(j) q(j - b_{k,l}) \quad (52)$$

For $j=1, \dots, j_{max}$ and $q(j) = 0$ for $j < 0$, with $\sum_{j=0}^{j_{max}} q(j) = 1$

$$B_k = \sum_{j=0}^{j_{max}} q(j) \sum_{l=0}^{S(k)} \gamma_{k,l} LB_{k,l}(j) \quad (53)$$

$$\gamma_{k,0}(j) \begin{cases} 1, & \text{if } j \leq J_{k,0} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \gamma_{k,0}(j) \begin{cases} 1, & \text{if } J_{k,l} < j \leq J_{k,l+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Οι παραπάνω σχέσεις καλύπτουν και την εφαρμογή του single retry model στα ασύρματα δίκτυα WCDMA, στα οποία συμβαίνει μόνο μία επανάληψη στην περίπτωση μη αποδοχής της κλήσης.

Παράδειγμα 3

Για μία WCDMA κυψέλη φορτίου $c_{max} = 0,8$ με μέση τιμή $E [I_{inter}] = 2 \cdot 10^{-18}$ mW και $CV[I_{inter}] = 1$, υποστηρίζει $K = 2$ τάξεις ελαστικές υπηρεσίες, έχει $S(1) = S(2) = 1$, $TR_{1,0} = 0,6$, $TR_{2,0} = 0,5$ ($TR_{1,0} = 64$, $TR_{1,1} = 32$, $TR_{2,0} = 144$, $TR_{2,1} = 112$) kbps και $(\alpha_1, \alpha_2) = (4,1)$ ή $(8,2)$ erl. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα

	Service class 1		Service class 2	
Activity factor	1		0,7	
E_b / N_0	4 dB		3 dB	
Traffic load	4 erl	8 erl	1 erl	2 erl
CPB (EMLM)	0,9052%	5,1663%	1,1131%	6,8848%
CBP(CDTM)	0,9%	4,5441%	1,0978%	5,9980%

Από τα αποτελέσματα του πίνακα, εμφανίζεται πως αυξανόμενου του φορτίου αυξάνει και η πιθανότητα απώλειας κλήσεων και στα δύο μοντέλα. Στην περίπτωση όμως που έχουμε επανάληψη κλήσης, η αύξηση της πιθανότητας απώλειας κλήσεων παρατηρείται πως είναι μικρότερη, άρα συμπεραίνουμε πως για το ίδιο φορτίο κίνησης είναι μικρότερη η πιθανότητα απώλειας κλήσης. Στην περίπτωση της κλήσης υπηρεσίας τάξης 2, η διαφορά πιθανότητας απώλειας κλήσης για το μεγαλύτερο φορτίο (2 erl) είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη διαφορά της κλήσης υπηρεσίας τάξης 1 (8 erl), συγκρινόμενα τα δύο μοντέλα, διότι το φορτίο είναι μικρότερο.

Κεφάλαιο 10

Επίλογος

Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων στα δίκτυα UMTS δέχεται ή απορρίπτει κλήσεις ανάλογα με το επίπεδο τρέχουσας παρεμβολής, στο οποίο περιλαμβάνονται παρεμβολές τόσο της ίδιας όσο και άλλων γειτονικών κυψελών. Για αυτό το λόγο, η συνθήκη απώλειας κλήσεων εκφράζεται με το φορτίο τόσο της ίδιας όσο και των γειτονικών κυψελών. Υποθέτοντας ότι η παρεμβολή των γειτονικών κυψελών αποτελεί μία τυχαία ανεξάρτητη λογαριθμική - κανονική (lognormal) μεταβλητή του φορτίου της κυψέλης, μπορούν να υπολογιστούν οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων. Οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων είναι τυπικές για τα δίκτυα WCDMA με ήπια απώλεια κλήσεων, δηλαδή χωρίς αυστηρό όριο όσον αφορά τον αριθμό των χρηστών στο σύστημα ή τον αριθμό των κατειλημμένων πόρων. Ο κοινός πόρος που αντιστοιχεί στο φορτίο της κυψέλης είναι στοχαστικός. Έτσι, οι πιθανότητες τοπικής απώλειας κλήσεων εμποδίζουν τον ακριβή προσδιορισμό των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων, καθώς απαιτείται ένας αντίστροφος πίνακας του ρυθμού μετάβασης που είναι αριθμητικά δυσεπίλυτος. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος που βασίζεται στην αναδρομική σχέση Kaufman-Roberts. Ο αλγόριθμος αυτός επιτρέπει μια χρονικά αποδοτική προσέγγιση των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων. Ο αλγόριθμος έχει επέκταση στο μοντέλο Single Retry Model (SRM) και στη συνέχεια στο CDTM με τα οποία υπολογίζεται η CBP στα WCDMA δίκτυα με δυνατότητα επανάληψης με μικρότερη ροή. Εμφανίζεται η πιθανότητα απώλειας κλήσεων να μειώνεται όσο περισσότερες δυνατότητες επανάληψης έχουμε με μικρότερη ροή, αρκεί να υπάρχουν διαθέσιμες μονάδες εύρους ζώνης ώστε να συνδεθεί η κλήση σύμφωνα με τις μονάδες εύρους ζώνης που απαιτεί η κλήση.[2]

Παράρτημα Α

A.1 Διωνυμική Κατανομή

Η διωνυμική κατανομή είναι μία διακριτή συνάρτηση τυχαίας μεταβλητής. Περιγράφει ένα τυχαίο πείραμα, το οποίο αποτελείται από δοκιμές η καθεμιά από τις οποίες έχει μόνο δύο δυνατά αποτελέσματα, επιτυχία (E) ή αποτυχία (A) και για το οποίο ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές:

- η πιθανότητα E ή A παραμένει σταθερή σε όλες τις δοκιμές
- οι δοκιμές στο πείραμα είναι στοχαστικά ανεξάρτητες

Το πείραμα μπορεί να ονομαστεί και διωνυμικό πείραμα.

Η διωνυμική κατανομή περιγράφεται από τη σχέση

$$\binom{n}{x} p^x q^{n-x}, x=0,1,2$$

Όπου n είναι ο αριθμός των δοκιμών. Τα n, p λέγονται παράμετροι της διωνυμικής κατανομής. [Κοκκολάκης, Σπηλιώτης, 2002]

A.2 Κατανομή Poisson

Η κατανομή Poisson αποτελεί μία διακριτή συνάρτηση κατανομής που εκφράζει την πιθανότητα ένας δεδομένος αριθμός γεγονότων που συμβαίνουν σε ένα σταθερό διάστημα χρόνου ή/και χώρου να συμβαίνουν με ένα γνωστό μέσο ρυθμό και να είναι ανεξάρτητα από το χρονικό διάστημα του τελευταίου γεγονότος. [Κοκκολάκης, Σπηλιώτης, 2002]

Παραδείγματα τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν την κατανομή Poisson είναι:

- Ο αριθμός των κλήσεων για παροχή άμεσης βοήθειας σε διάστημα π.χ. μίας ώρας
- Ο αριθμός των διακοπών λειτουργίας μιας μηχανής σε διάστημα μίας ημέρας

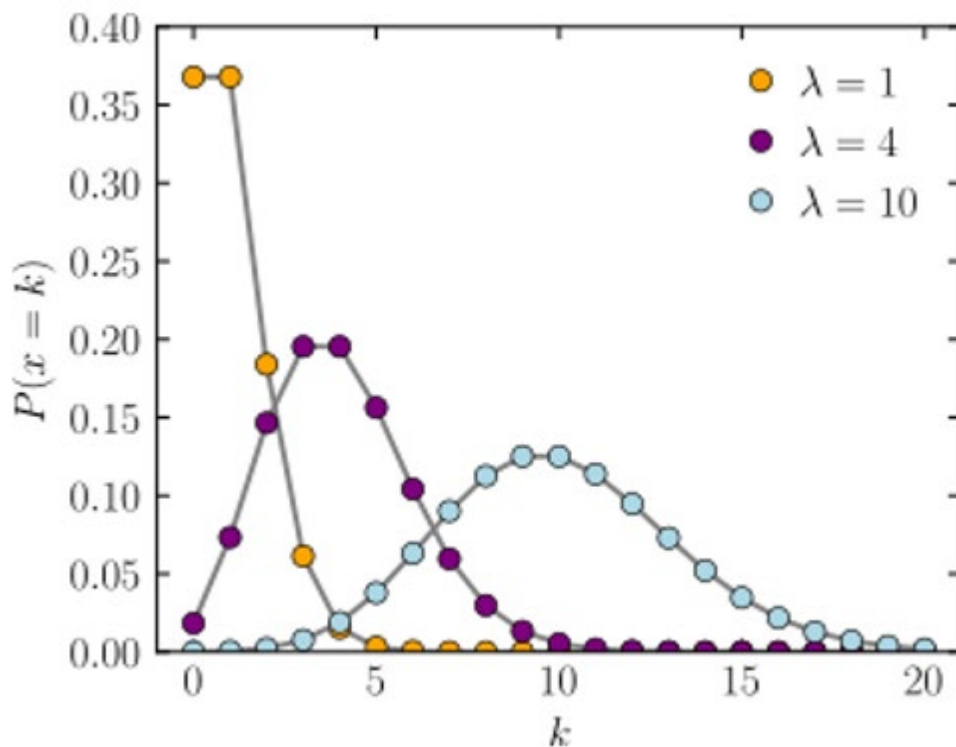
Εκτός από το χρόνο ή το χώρο, η κατανομή Poisson μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έναν αριθμό γεγονότων που συμβαίνουν σε ξένα διαστήματα όπως είναι η απόσταση, η επιφάνεια ή ο όγκος.

Μία τυχαία μεταβλητή X ακολουθεί τη κατανομή Poisson με παράμετρο $\lambda > 0$ όταν έχει συνάρτηση μάζας πιθανότητας την

$$P_k(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, k = 0, 1, 2, \dots,$$

όπου το λ δηλώνει το ρυθμό των εμφανίσεων ενός γεγονότος και είναι ανεξάρτητες της τελευταίας χρονικής στιγμής εμφάνισης του γεγονότος και k ο αριθμός των εμφανίσεων.

Στην ακόλουθη γραφική παράσταση, από τον Παπαδόπουλο, φαίνεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Poisson για διάφορες τιμές του λ . Ο οριζόντιος άξονας είναι ο δείκτης k , που υποδηλώνει τον αριθμό των γεγονότων. Η συνάρτηση ορίζεται μόνο στις ακέραιες τιμές του k .



Εικόνα 19. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Poisson για διάφορες τιμές λ

A.3 Gaussian Κατανομή

Η κανονική κατανομή (normal distribution) ή η Gaussian κατανομή αποτελεί ένα τύπο συνεχούς συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για μια τυχαία συνεχής μεταβλητή. Η γενική μορφή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας είναι

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

όπου:

μ : η παράμετρος που αποτελεί τη μέση τιμή της μεταβλητής με $-\infty < \mu < +\infty$,

σ : αποτελεί την τυπική απόκλιση με $\sigma > 0$,

x : μια τιμή της συνεχούς τυχαίας μεταβλητής στο διάστημα $-\infty$ έως $+\infty$.



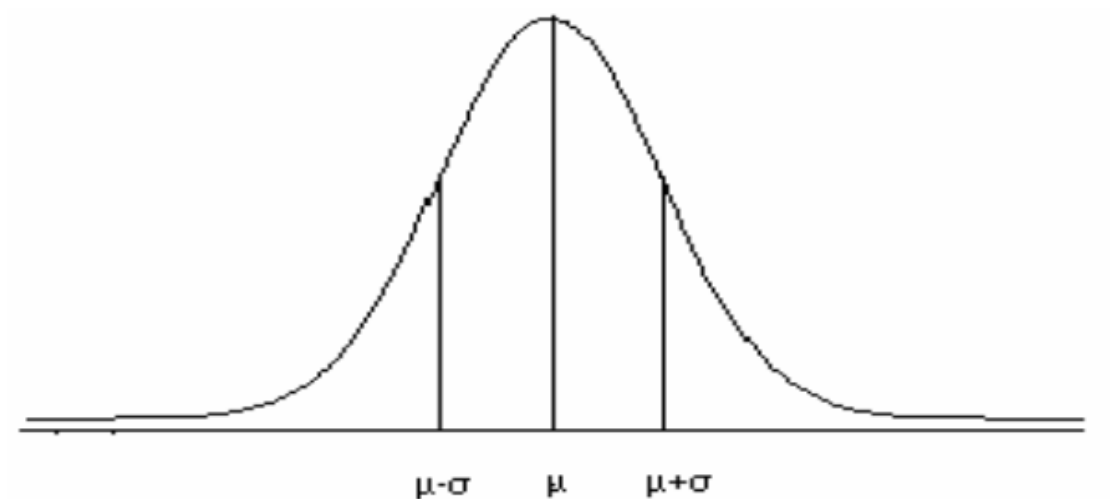
Εικόνα 20. Γραφήματα Gaussian κατανομής

Το εμβαδόν του χωρίου που περικλείεται από την καμπύλη της συνάρτησης και τον άξονα x είναι ίσο με 1 και εκφράζει την πιθανότητα η X να πάρει κάποια τιμή μεταξύ $-\infty$ και $+\infty$ ανάλογα με το διάστημα που υπολογίζεται πάνω στον άξονα x .

Από τον Ζαμάνη έχουμε ότι, η τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας $f(x)$ εκφράζει πυκνότητα και δεν αντιστοιχεί σε πιθανότητα. Δηλαδή, δεν ισχύει $f(x) = P(X = x)$. Αυτό συμβαίνει καθώς στις συνεχείς μεταβλητές, η πιθανότητα $P(X = x)$ είναι μηδέν.

Η Gaussian κατανομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη περιγραφή τυχαίων μεταβλητών πραγματικών τιμών, οι οποίες τείνουν να συγκεντρώνονται γύρω από μια μέση τιμή καθώς αυξάνεται ο αριθμός των δειγμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η Gaussian κατανομή ακολουθεί το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα, σύμφωνα με το οποίο, το άθροισμα και η μέση τιμή ενός μεγάλου αριθμού ανεξάρτητων μεταβλητών (παρατηρήσεων), ακολουθεί κατά προσέγγιση τη κανονική κατανομή, ανεξαρτήτως από το ποια κατανομή ακολουθεί η κάθε μεταβλητή (παρατήρηση) ξεχωριστά. Η γραφική παράσταση της σχετιζόμενης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας είναι μία κανονική καμπύλη που έχει σχήμα καμπάνας, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Αυτή η γραφική παράσταση είναι συμμετρική και οι «ουρές» της πλησιάζουν τον οριζόντιο άξονα ομαλά (ασυμπτωτικά). Αυτή η γραφική παράσταση είναι γνωστή ως Gaussian συνάρτηση ή κωδωνοειδής

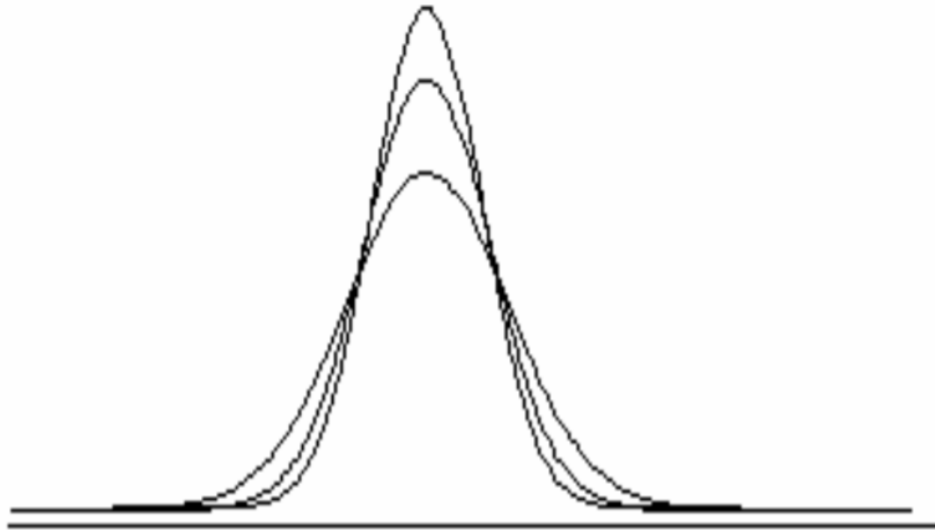
καμπύλη. Η μέση τιμή και η διάμεσος ταυτίζονται. Επίσης, η κορυφή της Gaussian κατανομής ταυτίζεται με τη μέση τιμή και τη διάμεσο. Στην Gaussian κατανομή, στο μέσο της κατανομής υπάρχει και η μεγαλύτερη πυκνότητα τιμών μιας μεταβλητής, δηλαδή εκεί συγκεντρώνονται και οι περισσότερες τιμές ενώ, όσο απομακρυνόμαστε από τη μέση τιμή, οι τιμές λιγοστεύουν.



Εικόνα 21. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Gaussian κατανομής

Η καμπύλη της συνάρτησης πυκνότητας της κανονικής κατανομής, στη θέση $x = \mu$ παρουσιάζει μέγιστη τιμή (ίση με $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$) και στις θέσεις $x = \mu - \sigma$ και $x = \mu + \sigma$ παρουσιάζει σημεία καμπής. Δηλαδή, η συνάρτηση πυκνότητας της κανονικής κατανομής δεν ορίζει μια συγκεκριμένη κανονική καμπύλη αλλά μια οικογένεια κανονικών καμπύλων για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων μ και σ .

Έτσι, στην ακόλουθη γραφική παράσταση, οι καμπύλες έχουν ίδια μέση τιμή και διαφορετικές τυπικές αποκλίσεις.



Εικόνα 22. Gaussian καμπύλες με ίδια μέση τιμή και διαφορετικές τυπικές αποκλίσεις

Ενώ, στην ακόλουθη γραφική παράσταση, οι καμπύλες έχουν τις ίδιες τυπικές αποκλίσεις και διαφορετικές μέσες τιμές.

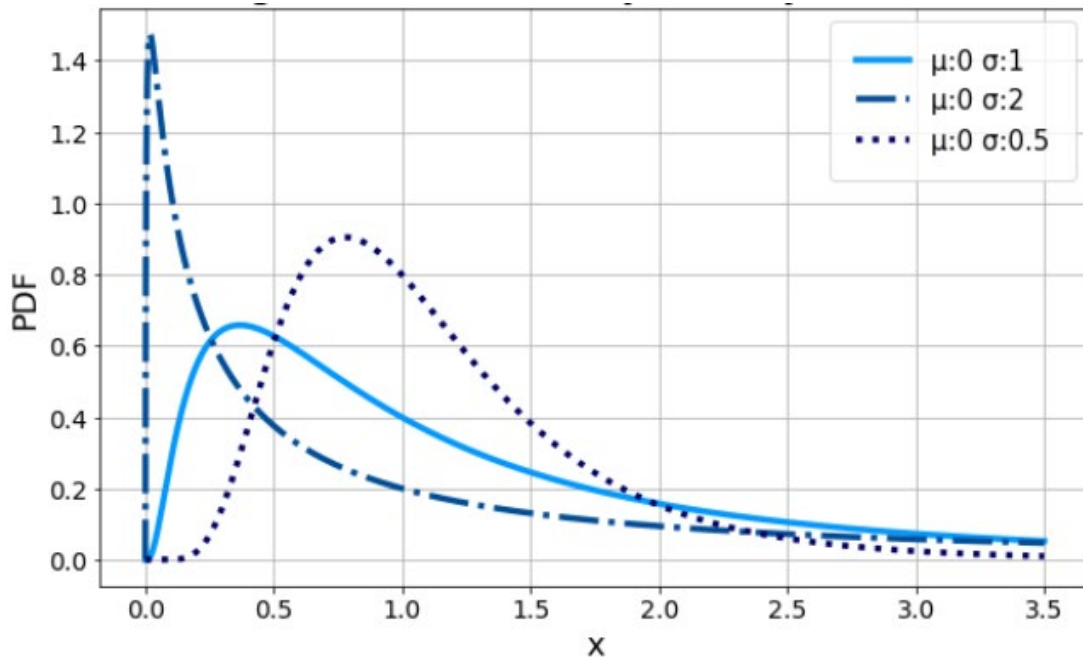


Εικόνα 23. Gaussian καμπύλες με ίδιες τυπικές αποκλίσεις και διαφορετικές μέσες τιμές

Τα κύρια χαρακτηριστικά της κανονικής κατανομής ακολουθούν είτε με ακρίβεια είτε με μεγάλη προσέγγιση τα περισσότερα συνεχή φαινόμενα. Εκτός αυτού, πολλές ασυνεχείς κατανομές πιθανοτήτων μπορούν να προσεγγιστούν μέσω της κανονικής κατανομής. Τέλος, την κανονική κατανομή ακολουθούν τα τυχαία σφάλματα (όχι τα συστηματικά) που εμφανίζονται σε διάφορες μετρήσεις. Έτσι, η κανονική κατανομή ονομάζεται και κατανομή των σφαλμάτων (law of errors). [Κοκκολάκης, Σπηλιώτης, 2002]

A.4 Λογαριθμική Κανονική Κατανομή

Η λογαριθμική κανονική (log-normal ή lognormal) κατανομή αποτελεί μια συνεχή κατανομή πιθανότητας μιας τυχαίας μεταβλητής της οποίας ο λογάριθμος κατανέμεται κανονικά. Η λογαριθμική κανονική χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση διαφόρων φυσικών φαινομένων, τη διάρκεια παιχνιδιών σκάκι ή το χρόνο που απαιτείται για την επισκευή ενός συστήματος και άλλα.



Εικόνα 24. Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Λογαριθμική Κανονική Κατανομή

Έστω Z μια τυπική κανονική μεταβλητή και με μ και $\sigma > 0$ να είναι δύο πραγματικοί αριθμοί. Η κατανομή της τυχαίας μεταβλητής

$$X = e^{\mu + \sigma Z}$$

ονομάζεται λογαριθμική κανονική κατανομή με παραμέτρους μ και σ , όπου μ αποτελεί την αναμενόμενη τιμή ή τη μέση τιμή και σ είναι η τυπική απόκλιση του φυσικού λογάριθμου της μεταβλητής με $\sigma > 0$. Με άλλα λόγια, η λογαριθμική κανονική προκύπτει ως το εκθετικό μίας κανονικής κατανομής με μέσο μ και τυπική απόκλιση $\sigma > 0$.

Η πυκνότητα πιθανότητας της λογαριθμικής κατανομής, ορίζεται από τις παραμέτρους μ και σ και για $x > 0$ δίνεται από τη σχέση:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2}$$

Η μέση τιμή δίνεται από τον τύπο $\exp(\mu + \frac{\sigma^2}{2})$ και η τυπική απόκλιση από τον τύπο $[\exp(\sigma^2) - 1]\exp(2\mu + \sigma^2)$

Βιβλιογραφία

[1] Harri Holma and Antti Toskala (2000). WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications, 5th Edition. Wiley.

[2] Dirk Staehle and Andreas Mader (2003). An Analytic Approximation of the Uplink Capacity in a UMTS Network with Heterogeneous Traffic. University of Wurzburg, Dept. of Computer Science.

[3] K. Gilhousen, I. Jacobs, R. Padovani, A. Viterbi, L. Weaver, and C. Wheatley, "On the capacity of a cellular CDMA system," Transactions on Vehicular Technology, vol. 40, pp. 303–311, May 1991.

[4] A. Viterbi and A. Viterbi, "Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System," IEEE Journal on Selected Areas in Communication, vol. 11, August 1993.

[5] J. Evans and D. Everitt, "On the teletraffic capacity of CDMA cellular networks," Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, pp. 153–165, Jan 1999.

[6] J. Evans and D. Everitt, "Effective bandwidth-based admission control for multiservice CDMA cellular networks," Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, pp. 36–46, Jan 1999.

[7] C.-J. Ho, J. Copeland, L. Chin-Tau, and G. Stuber, "On Call Admission Control in DS/CDMA Cellular Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 38, November 2001.

- [8] J. Kaufman, "Blocking in a Shared Resource Environment," IEEE Transactions on Communications, vol. 29, October 1981.
- [9] J.W. Roberts, Performance of Data Communication Systems and their Applications. North Holland, 1981.
- [10] Γιώργος Παπαδόπουλος, Η Κατανομή Poisson. Διαθέσιμο από <https://www.aua.gr/gpapadopoulos/files/Poisson13.pdf>
- [11] Γιώργος Παπαδόπουλος, Η Κανονική Κατανομή. Διαθέσιμο από <https://www.aua.gr/gpapadopoulos/files/normal010-2.pdf>
- [12] Μιχάλης Ζαζάνης, Η Κανονική Κατανομή. Διαθέσιμο από <http://www2.stat-athens.aueb.gr/~mzazanis/courses/ptprob/normal.pdf>
- [13] Μιχαήλ Λογοθέτης και Ιωάννης Μοσχολιός, Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης (& Συστήματα Αναμονής). Διαθέσιμο από <https://eclass.upatras.gr/modules/document/index.php?course=EE772&openDir=/557c7161PUjV>
- [14] I. Moscholios and M. Logothetis, Efficient Multirate Teletraffic Loss Models Beyond Erlang, IEEE PRESS – John Wiley and Sons Ltd, 2019.
- [15] G. A. Kallos, V. G. Vassilakis, I. D. Moscholios and M. D. Logothetis, "Performance Modelling of W-CDMA Networks supporting Elastic and Adaptive Traffic", Proc. 4th International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs '06), Ilkley, West Yorkshire, U.K, 11-13 September 2006.
- [16] Γ. Κοκολάκης, Ι.Σπηλιώτης, "Εισαγωγή στις Πιθανότητες, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2002"
- [17] I.D.Moscholios, M.D. Logothetis, G.K. Kokkinakis, "Connection – dependent threshold model: a generalization of the Erlang multiple rate loss model", 2002
- [18] <https://teletraffic-models.appspot.com>