

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Τεχνικές ανάθεσης πόρων δικτύων σε
πολυχρηστικά συστήματα πολλαπλής-εισόδου-πολλαπλής-
εξόδου"

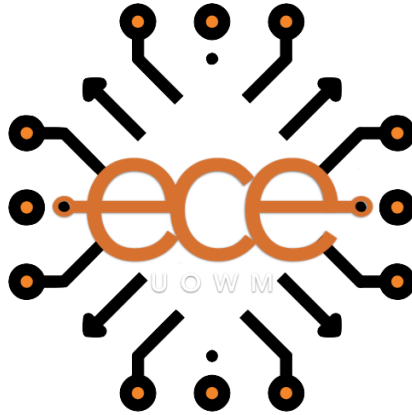
ΜΗΤΤΑ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

A.M. 716

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:

ΛΟΥΤΑ ΜΑΛΑΜΑΤΗ & ΒΑΡΔΑΚΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Resource allocation techniques for multi-user MIMO systems"

ΜΗΤΤΑ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

A.M. 716

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:

ΛΟΥΤΑ ΜΑΛΑΜΑΤΗ & ΒΑΡΔΑΚΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της απόδοσης πολυχρηστικών συστημάτων πολλαπλής εισόδου – πολλαπλής εξόδου (MIMO) ως συνάρτηση της προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Για να αντιμετωπιστεί η συνεχής αύξηση της ροής των δεδομένων, η αυξημένη χωρητικότητα καθώς και η καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών, οι φορείς κινητής τηλεφωνίας αλλάζουν σταδιακά τον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνουν τα δίκτυά τους και στρέφονται προς την δικτύωση πέμπτης γενιάς. Η ανάπτυξη των λειτουργιών δικτύου και η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής τους, έχουν επηρεαστεί και αλλάξει σημαντικά από την εμφάνιση δύο νέων τεχνολογιών, τη δικτύωση που έχει καθοριστεί από το λογισμικό (SDN) και η λειτουργία Virtualization (NFV). Οι αλλαγές που θα έρθουν, θα επιφέρουν μείωση του κόστους, ενίσχυση της ευελιξίας και της επεκτασιμότητας του δικτύου και μείωση του χρόνου διάθεσης νέων εφαρμογών και υπηρεσιών.

Στη παρούσα διπλωματική εφαρμόζονται γνωστά μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης, όπως το μοντέλο πολυδιάστατης κίνησης, καθώς και τα μοντέλα επανάκλησης, μονής ή και πολλαπλής, σε ένα κυψελωτό δίκτυο βασιζόμενο σε SDN/NFV, το οποίο χρησιμοποιεί μία κεραία MIMO. Το μοντέλο επανάκλησης εφαρμόζεται ώστε να επιτευχθεί μείωση της πιθανότητας απώλειας κλήσεων, καθώς εάν μία κλήση απορριφθεί από το σύστημα λόγω των χαρακτηριστικών της, μπορεί να προσπαθήσει ξανά με μειωμένες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, ώστε να γίνει αποδεκτή και να μην χαθεί. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου επανάκλησης αποδεικνύεται μέσα από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της πιθανότητας απώλειας κλήσης των δύο μοντέλων, ως συνάρτηση του προσφερόμενου τηλεπικοινωνιακού φορτίου κίνησης.

Λέξεις κλειδιά: Θεωρία τηλεπικοινωνιακής κίνησης, MIMO, SDN, NFV, 5G, mmWave, SRM, MRM.

Abstract

In this diploma thesis, the evaluation of the performance of multiuser input – multiple output (MIMO) systems is performed, as a function of the offered traffic load. To address the ever increasing data flow, increased capacity, and better quality of service, mobile operators are gradually changing the way they configure their networks and switch to fifth generation networking. The development of network functions and the evolution of their architecture have been significantly affected by the advent of two new technologies, software-defined networking (SDN) and Virtualization (NFV). The changes that will come will reduce costs, enhance network flexibility and scalability, and reduce the time available for new applications and services.

In this diploma thesis, well-studied teletraffic engineering models, like the multirate loss model and the single/multiple retry models are applied in an SDN/NFV based mobile network that utilizes a MIMO antenna. The retry model is applied in order to reduce the blocking probability, since it considers that if a call is blocked, then it can retry with reduced bandwidth requirements in order to be accepted for service. The effectiveness of the retry model is showed through the comparison of blocking results of the two models, as a function of the offered traffic load.

Keywords: Teletraffic theory, MIMO, SDN, NFV, 5G, mmWave, SRM, MRM.

Ευχαριστίες

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους επιβλέποντες, καθηγητή Ιωάννη Βαρδάκα και καθηγήτρια Μαλαμάτη Λούτα, για τη συνεργασία, την εμπιστοσύνη και την πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση της, καθώς και τους γονείς μου για την υπομονή που έδειξαν.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα.....	11
Κατάλογος Σχημάτων	13
Κατάλογος Πινάκων	15
1 Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα 5ης Γενιάς.....	17
1.1 Αναγκαιότητα για νέα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.	17
1.2 Γνωριμία με το 5G.	18
1.2.1 Μαζικά συστήματα πολλαπλής εισόδου – πολλαπλής εξόδου (MIMO).	19
1.2.2 mmWave.....	20
1.3 SDN και NFV.....	21
1.3.1 Γνωριμία με SDN / NFV.	21
1.3.2 Χαρακτηριστικά SDN / NFV.....	22
1.3.3 Συσχέτιση SDN / NFV.....	23
1.3.4 Ενοποίηση SDN / NFV.....	24
1.4 Συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	25
2 Βασικά Μοντέλα της Θεωρίας Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης.....	27
2.1 Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης	27
2.1.1 Συμφόρηση της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης.....	27
2.1.2 Μοντέλα της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης	28
2.1.2.1 Μετρήσεις.....	29
2.1.2.2 Διαδικασία Γεννήσεων Κλήσεων.....	29
2.1.2.3 Κατανομή του χρόνου Εξυπηρέτησης.....	29
2.2 Το Μοντέλο Erlang	29
2.3 Το Μοντέλο Engset.....	32
2.4 Το Μοντέλο Πολυδιάστατης Κίνησης	33
2.4.1 Ορισμός.....	33

2.4.2	Σύστημα Δι-διάστατης Κίνησης	34
2.4.3	Γενικό μοντέλο Πολυδιάστατης Κίνησης.....	37
2.4.3.1	Ανάλυση συστήματος Πολυδιάστατης Κίνησης	38
2.4.4	Πολιτική Δέσμευσης Εύρους Ζώνης	40
2.5	Το μοντέλο Επανάκλησης με Πολιτική Πλήρους Διάθεσης Εύρους Ζώνης	42
2.5.1	Μοντέλο SRM.	42
2.5.2	Μοντέλο Πολλαπλών Επανακλήσεων, MRM.	43
2.5.3	Αναδρομικός τύπος Kaufman στο μοντέλο SRM.....	44
2.5.4	Μοντέλο Πολλαπλών Επανακλήσεων, MRM.	46
3	Εφαρμογή του μοντέλου Πολυδιάστατης Κίνησης σε SDN/NFV δίκτυα 5ης γενιάς	49
3.1	Εισαγωγή.....	49
3.2	Αρχιτεκτονική Κυψελωτού δικτύου βασιζόμενο σε SDN/NFV.....	50
3.3	Μοντέλο Ελέγχου Πρόσβασης δικτύου	53
3.4	Αποτελέσματα.....	55
4	Επέκταση του μοντέλου Πολυδιάστατης Κίνησης σε SDN / NFV δίκτυα 5ης γενιάς για την περίπτωση Επανάκλησης.....	58
4.1	Σκοπός εφαρμογής του μοντέλου επανάκλησης.....	58
4.2	Προσομοίωση με απλή επανάκληση:.....	60
	Βιβλιογραφία	64

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 : Επίπεδα των SDN και NFV και εφαρμοσιμότητα.	23
Σχήμα 1.2: Αρχιτεκτονική ενσωμάτωσης SDN / NFV.....	25
Σχήμα 2.1: Σύστημα απωλειών M/M/s(0).	30
Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Μεταπτώσεων Καταστάσεων M/M/s(0).	31
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα μεταπτώσεων καταστάσεων του M(n)/M/s(0).	32
Σχήμα 2.4: Μοντέλο πολυδιάστατης κίνησης.	34
Σχήμα 2.5: Χώρος καταστάσεων για ένα δι-διάστατο μοντέλο κίνησης.....	35
Σχήματα 2.6 _{α,β,γ} : Διαγράμματα μεταβάσεων καταστάσεων ενός δι-διάστατου μοντέλου κίνησης.....	35
Σχήμα 2.7: Μοντέλο Πολυδιάστατης Κίνησης με K υπηρεσίες.....	37
Σχήμα 2.8: Διάγραμμα μεταβάσεων των καταστάσεων.	38
Σχήμα 2.9: Σύνολο των καταστάσεων πολιτικής εύρους διάθεσης.	38
Σχήμα 2.10: Μοντέλο πολυδιάστατης κίνησης με σύστημα δέσμευσης εύρους ζώνης.	41
Σχήμα 2.11: Μηχανισμός εξυπηρέτησης κλήσης στο μοντέλο απλής επανάκλησης. .	43
Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική κυψελοειδούς δικτύου βασισμένη σε SDN / NFV.	50
Σχήμα 3.2: Έννοια στρώσης σε δίκτυο που ορίζεται από το λογισμικό.....	51
Σχήμα 3.4: Δίκτυο ραδιοεπικοινωνίας βασισμένο σε SDN / NFV.....	52
Σχήμα 3.5: Διάγραμμα μεταβάσεων.	54
Σχήμα 3.6: Πιθανότητες αποκλεισμού κλήσεων έναντι ρυθμού άφιξης κλήσης.	56
Σχήμα 3.7: Πιθανότητες αποκλεισμού κλήσεων έναντι μέσου χρόνου κράτησης κλήσεων.	57
Σχήμα 4.1: Πιθανότητες αποκλεισμού κλήσεων έναντι ρυθμού άφιξης κλήσης.	60
Σχήμα 4.2: Πιθανότητες αποκλεισμού κλήσεων έναντι ρυθμού άφιξης κλήσης με επανάκληση.....	61

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Περιπτώσεις ρυθμού άφιξης κλήσεων.	55
--	----

1 Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα 5ης Γενιάς

1.1 Αναγκαιότητα για νέα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Τα μελλοντικά ασύρματα συστήματα απαιτούν θεμελιώδη κατανόηση των αρχών σχεδιασμού και των μηχανισμών ελέγχου για την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων του δικτύου. Οι πολιτικές κατανομής πόρων βρίσκονται στο επίκεντρο των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας, δεδομένου ότι στοχεύουν στην εξασφάλιση της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) σε επίπεδο χρήστη, εξασφαλίζοντας παράλληλα αποτελεσματική και βελτιστοποιημένη λειτουργία σε επίπεδο δικτύου για τη μεγιστοποίηση των εσόδων των φορέων εκμετάλλευσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην επακόλουθη τεχνολογία πέμπτης γενιάς 5G. Η βασική σκέψη εστιάζει σε μια κοινωνία με απεριόριστη πρόσβαση στο δίκτυο και την ανταλλαγή δεδομένων οπουδήποτε και ανά πάσα στιγμή. Πρέπει να εξετασθούν τα συστατικά στοιχεία της νέας τεχνολογίας για την εξέλιξη των υφιστάμενων ασύρματων τεχνολογιών. Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα 1^{ης} γενιάς (1G) και 2^{ης} γενιάς (2G) χρησιμοποιούν εναλλαγή κυκλώματος, ενώ τόσο η εξέλιξη της 2^{ης} γενιάς (2.5G), όσο και η 3^η γενιά (3G) χρησιμοποιούν τόσο μεταγωγή κυκλώματος όσο και πακέτων. Από την άλλη πλευρά, οι επόμενες γενιές δικτύων (από 3.5G έως την 5^η γενιά (5G)), χρησιμοποιούν τη μεταγωγή πακέτων. Στο περιβάλλον της 5^{ης} γενιάς, οι σημερινές τεχνολογίες που βασίζονται στην ασύρματη τεχνολογία, όπως η τεχνολογία Long Term Evolution (LTE), High Speed Packet Access (HSPA) αλλά και το Wi-Fi, θα ενσωματώνουν νέα τεχνολογικά συστατικά στοιχεία που θα συμβάλλουν στην βελτίωση των συνθηκών πρόσβασης των τελικών χρηστών στο δίκτυο. Η υλοποίηση νέων ασύρματων τεχνολογιών θα συμπληρώσει τις τρέχουσες τεχνολογίες που απαιτούνται για τη μακροπρόθεσμη υλοποίηση ολοκληρωμένων τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

Η ραγδαία εξάπλωση της χρήσης των smartphones επέφερε μεγάλες βελτιώσεις στο δυναμικό των κινητών τηλεπικοινωνιακών δικτύων και εισήγαγε την ευκαιρία για καινοτόμες υπηρεσίες και εφαρμογές, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις κινητής συνδεσιμότητας και προκύπτουσας εκθετικής αύξησης του δικτύου μεταφοράς. Ταυτόχρονα, η βιομηχανία κινητών επικοινωνιών κινείται προς τις πιο προηγμένες τεχνολογίες δικτύωσης και επικοινωνίας. Η ανάπτυξη αυτή των ασύρματων τεχνολογιών οδήγησε στην επιτακτική ανάγκη αύξησης του ρυθμού δεδομένων, της κινητικότητας και της κάλυψης των χρηστών. Επομένως, μερικοί από τους πρωταρχικούς στόχους που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι η αύξηση της χωρητικότητας, η βελτίωση του ρυθμού δεδομένων και της ποιότητας των υπηρεσιών και η μείωση του χρόνου καθυστέρησης. Για να ικανοποιηθούν αυτές οι απαιτήσεις, πρέπει να γίνουν δραστικές βελτιώσεις στην κυψελωτή αρχιτεκτονική δικτύου. Δεδομένου ότι η LTE που χρησιμοποιείται στην 4G έχει αναπτυχθεί αρκετά ώστε να

μπορέσει να δεχτεί επιπρόσθετες αλλαγές για να καλύψει την εκθετική αύξηση ζήτησης των χρηστών στο δίκτυο, να διασφαλίσει επαρκώς χαμηλή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο αλλά και να υποστηρίξει μεγάλο όγκο κυκλοφορίας, όπως απαιτείται σε αυτό το νέο εξελισσόμενο κινητό οικοσύστημα, η 4G θα αντικατασταθεί εύκολα με νέες βελτιωμένες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς.

Παρά την εκτεταμένη ανάπτυξη των πρόσθετων σταθμών βάσης (Base Stations -BS) και των σημείων πρόσβασης (Access points - AP) τα τελευταία χρόνια, η αύξηση της κάλυψης και της χωρητικότητας των σημερινών δικτύων δεν επαρκεί για να εξασφαλιστεί η κατάλληλη ποιότητα της εμπειρίας (Quality of Experience - QoE) των κινητών χρηστών (Mobile Users - MUs). Ως εκ τούτου, υπάρχουν πολλές προσπάθειες να ωθηθούν τα όρια, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη κινητικότητα, τη διαχείριση των ραδιοφωνικών πόρων (RRM) και την παροχή υποστήριξης σε πολλαπλές συνυπάρχουσες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Technologies - RAT). Για το σκοπό αυτό, η δικτύωση καθορισμένη από λογισμικό (Software Defined Networking - SDN) και η οπτικοποίηση λειτουργιών δικτύου (Network Function Virtualization - NFV) θεωρούνται σημαντικές τεχνολογίες γενικής εφαρμογής και θα τις αναλύσουμε παρακάτω.

1.2 Γνωριμία με το 5G.

Η 4^η γενιά αδυνατεί να ανταποκριθεί στην εκθετική αύξηση του αριθμού των χρηστών αλλά και των απαιτήσεών τους, οπότε έρχεται η 5^η γενιά να καλύψει αυτές τις προκλήσεις που προκύπτουν. Η ιδέα πίσω από την τεχνολογία 5G αναπτύσσεται ανάλογα με την κατάσταση και την περίπτωση του σταθμού βάσης που επικοινωνεί με τους κινητούς σταθμούς.

Τα 5G κυψελοειδή δίκτυα πρέπει να αντιμετωπίσουν τις παρακάτω προκλήσεις που δεν αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά από το 4G δηλαδή:

- την υψηλότερη χωρητικότητα,
- τον υψηλότερο ρυθμό δεδομένων,
- τη χαμηλότερη τελική καθυστέρηση (End to End delay),
- τη μαζική συνδεσιμότητα συσκευών,
- και τέλος το κόστος και η συνεπή παροχή πόρων για την Ποιότητα της Εμπειρίας [3].

Αναμένεται ότι ο όγκος του κινητού και ασύρματου δικτύου θα αυξηθεί χίλιες φορές την επόμενη δεκαετία που θα οδηγήσει στις 50 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές μέχρι το 2020 και όλοι πρέπει να έχουν πρόσβαση και να μοιράζονται δεδομένα, οπουδήποτε και οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Με την αύξηση του αριθμού των διασυνδεδεμένων συσκευών, απαιτείται να πραγματοποιηθούν κάποιες αλλαγές, που σχετίζονται με την αύξηση της χωρητικότητας και την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, του κόστους και της χρήσης του φάσματος. Οι βασικοί στόχοι του νέου δικτύου είναι:

- 1000 φορές μεγαλύτερο όγκο δεδομένων ανά περιοχή
- 10 έως 100 φορές μεγαλύτερο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών
- 10 έως 100 φορές μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων χρήστη
- 10 φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης μαζικής επικοινωνίας (MMC)
- 5 φορές μειωμένη καθυστέρηση στο τέλος (End to End).

Οι προαναφερόμενοι στόχοι μπορούν να επιτευχθούν με την υιοθέτηση των παρακάτω τεχνολογιών:

- Massive MIMO
- Millimeter Wave
- Σηματοδοσία και πολλαπλή πρόσβαση(Signaling and multiple access)
- NFV και SDN

1.2.1 Μαζικά συστήματα πολλαπλής εισόδου – πολλαπλής εξόδου (MIMO)

Τα ασύρματα συστήματα πολλαπλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων (MIMO) είναι αυτά που διαθέτουν πολλαπλά στοιχεία κεραίας τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Η επικοινωνία MIMO, όπου ένας σταθμός βάσης πολλαπλών κεραιών (BS) ή σημείο πρόσβασης (AP) μεταδίδει μία ή περισσότερες ροές δεδομένων σε έναν ή περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα, είναι μια τεχνολογία κλειδί για την παροχή υψηλής απόδοσης σε ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα επικοινωνίας.

Υπάρχουν δύο τρόποι μετάδοσης σε συστήματα MIMO: Η λειτουργία ενός χρήστη (Single User) και πολλαπλών χρηστών (Multiple User). Η λειτουργία SU-MIMO, όπου ο δέκτης έχει περιορισμένες διαστάσεις ανάλογα με το πόσες κεραίες μπορεί να χωρέσει σε μια κινητή συσκευή, βελτιώνει την απόδοση ενός μόνο χρήστη, κατανέμοντας μία ή περισσότερες ροές δεδομένων στον ίδιο πόρο. Στη λειτουργία MU-MIMO, ο σταθμός βάσης έχει τοποθετημένες πολλαπλές κεραίες, οι οποίες επικοινωνούν με μία μόνο κεραία που ανήκει στον δέκτη και διαφορετικές ροές δεδομένων αποστέλλονται σε διαφορετικούς χρήστες, ώστε να βελτιστοποιείται η απόδοση. Η επιλογή μεταξύ των τρόπων μετάδοσης SU ή MU-MIMO εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Παρόλα αυτά, οι τεχνικές επεξεργασίας MU-MIMO παρέχουν πολλά κέρδη απόδοσης (κέρδος ποικιλομορφίας, μείωση σφάλματος bit, τα κέρδη κατευθυντικότητας, και μετριάζεται η παρεμβολή μεταξύ χρηστών).

Υπάρχουν δύο είδη καναλιών πολλών χρηστών: το κανάλι κατερχόμενης ζεύξης, επίσης γνωστό ως κανάλι εκπομπής (BC), όπου ένας μόνο πομπός στέλνει διαφορετικά μηνύματα σε πολλούς δέκτες και το κανάλι ανερχόμενης ζεύξης, καλούμενο επίσης κανάλι πολλαπλών προσβάσεων (MAC), όπου πολλοί πομποί επικοινωνούν με έναν μόνο δέκτη. Υπάρχει μια σύνδεση μεταξύ BC και MAC, γνωστή ως δυαδικότητα, η οποία καθιερώνει τη σχέση μεταξύ των περιοχών χωρητικότητας και των δύο καναλιών πρόσβασης. Η δυαδικότητα BC-MAC έχει θεμελιώδη σημασία για τις βέλτιστες πολιτικές για την κατανομή ισχύος, τη σηματοδότηση και την εγγύηση QoS στα συστήματα MU-MIMO.

Τέλος η συνολική απόδοση των MU-MIMO εξετάζει :

- τον αριθμό των χρηστών και των κεραιών
- την κατανομή της ταχύτητας και της ισχύος
- την τεχνική μετάδοσης
- και την χωρική σηματοδότηση.

Από την άλλη πλευρά, τα μαζικά συστήματα MIMO έχουν αναγνωρισθεί ως μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες κεραιών για την αντιμετώπιση της απαιτούμενης χωρητικότητας που απαιτείται από τα δίκτυα 5G. Είναι μια πιο εξελιγμένη μορφή της τεχνολογίας MU-MIMO όπου ο αριθμός των κεραιών στο BS και ο αριθμός των χρηστών είναι ασύγκριτα μεγάλος, σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες. Συγκεκριμένα, εκατοντάδες χρήστες του ίδιου πόρου συχνότητας εξυπηρετούνται από τις χιλιάδες κεραιές που βρίσκονται στο BS. Η επικοινωνία MU-MIMO έχει ενσωματωθεί στο LTE χρησιμοποιώντας 2 έως 4 κεραιές ανά κινητή συσκευή και το πολύ μέχρι 8 για κάθε BS. Έτσι, θα χρειαστεί να τοποθετηθούν στους σταθμούς βάσης κεραιές πολύ περισσότερες από τον αριθμό των ενεργών χρηστών ανά συχνότητα σηματοδότησης, ώστε να αποστέλλονται ταυτόχρονα διαφορετικές ροές δεδομένων στους χρήστες.

1.2.2 mmWave.

Η ανάγκη πρόσβασης στο διαδίκτυο δισεκατομμυρίων χρηστών, συσκευών και συνδέσεων δημιουργούν νέες ανησυχίες μπροστά από την ασύρματη βιομηχανία, αφού το υπάρχον δίκτυο 4G δεν θα μπορεί να τους στηρίξει. Θα είναι απαραίτητο για τον κλάδο της έρευνας να εφαρμόσει νέες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων απαιτήσεων των χρηστών.

Η εποχή λειτουργίας των ασύρματων συστημάτων στο φάσμα των χιλιοστών κυμάτων (millimeter wave - mmWave), που κυμαίνεται από 30 GHz έως 300 GHz, έρχεται. Οι ταχύτητες δεδομένων αυξάνονται στην περιοχή πολλαπλών gigabit ανά δευτερόλεπτο, όπου αυτά τα υψηλά ποσοστά δεδομένων μπορούν να επιτευχθούν με τη βοήθεια των κατευθυντικών κεραιών και του φάσματος mmWave και ταυτόχρονα θα υποστηρίξουν τα δίκτυα κινητής επικοινωνίας. Οι κατευθυντικές κεραιές χρησιμοποιούνται για να ξεπεραστεί η απώλεια διάδοσης, η απώλεια διείσδυσης και η εξασθένιση λόγω βροχής. Με αρκετό φάσμα δυναμικού gigahertz, το mmWave θα χρησιμοποιηθεί για κανάλια πρόσβασης σε δίκτυα κυψελών 5G, για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας multi-gigabit, για τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV) και για υπέρ-υψηλής ευκρίνειας βίντεο (UHDV). Η βασική εστίαση γίνεται στη ζώνη λειτουργίας του WiFi (με το πρότυπο WiGiG στα 60 GHz), όπως και στη ζώνη 28 GHz, τη ζώνη 38 GHz και το E-band (71-76 GHz και 81-86 GHz).

Τα κυψελοειδή δίκτυα mmWave θα λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο από τα συμβατικά κυψελοειδή συστήματα κάτω των 6 GHz: οι μετρήσεις αποκαλύπτουν διαφορετικές συνθήκες διάδοσης, π.χ. την ευαισθησία στο μπλοκάρισμα, σε mmWave από εκείνες στις συχνότητες κάτω των 6 GHz, τα κυψελωτά δίκτυα mmWave θα εφαρμόσουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές, π.χ. αναλογικές ή υβριδικές κατευθυντικές μορφές δέσμης με μεγάλες συστοιχίες, για επεξεργασία σήματος. Συνεπώς, απαιτούνται νέα μαθηματικά μοντέλα για την ανάλυση κυψελωτών δικτύων mmWave,

καθώς τα προηγούμενα για χαμηλές συχνότητες δεν ισχύουν άμεσα. Θετικό είναι ότι οι σταθμοί βάσης είναι άφθονοι και πιο πυκνοί σε αστικές περιοχές, γεγονός που θα μειώσει το κόστος ανά σταθμό βάσης.

Με την αύξηση του εύρους ζώνης, η χωρητικότητα θα αυξηθεί, ενώ η ελαστικότητα θα μειωθεί, πράγμα που θα οδηγήσει σε καλύτερη πρόσβαση στο Διαδίκτυο και σε εφαρμογές. Δεδομένου ότι το μήκος κύματος των mmWave συχνοτήτων είναι πολύ μικρό, θα χρησιμοποιηθούν η πόλωση και οι διαφορετικές τεχνικές χωρικής επεξεργασίας όπως το massive MIMO και την προσαρμοστική μορφοποίηση δέσμης [2].

1.3 SDN και NFV.

1.3.1 Γνωριμία με SDN / NFV.

Η ταχεία πρόοδος στις τεχνολογίες δικτύωσης και πληροφορικής επέτρεψε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών με διάφορες απαιτήσεις στις υπηρεσίες δικτύου. Οι μεγάλη ποικιλία και δυναμική των υπηρεσιών του δικτύου που απαιτούνται και οι αναδυόμενες εφαρμογές δημιουργούν νέες προκλήσεις για την παροχή υπηρεσιών για τα μελλοντικά δίκτυα. Οι τεχνολογίες SDN και NFV είναι δύο σημαντικές πρόσφατες καινοτομίες που αναμένεται να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις. Η εμφάνιση ορισμένων τεχνολογιών, όπως η υπολογιστική νέφους, η εικονικοποίηση δικτύων, το SDN και η λειτουργία NFV έχουν αλλάξει τον τρόπο κατά τον οποίο η προώθηση δικτύου και οι συσκευές εφαρμόζονται, καθώς και τον τρόπο κατασκευής των αρχιτεκτονικών δικτύου.

Συγκεκριμένα, ο εξοπλισμός δικτύου μεταβάλλεται τώρα από κλειστός σε ανοιχτός και γενικεύεται με την τεχνολογία SDN, η οποία επιτρέπει τον διαχωρισμό των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων αλλά και τον προγραμματισμό δικτύων χρησιμοποιώντας ανοιχτές διεπαφές. Με το NFV, οι λειτουργίες δικτύου που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν σε δαπανηρές πλατφόρμες υλικού είναι τώρα εφαρμόσιμες ως συσκευές λογισμικού που τοποθετούνται σε εξοπλισμό χαμηλού κόστους ή λειτουργούν στο περιβάλλον υπολογιστικού νέφους. Αυτές οι δύο τεχνολογίες, μαζί με το cloud computing και την εικονοποίηση δικτύου, ενισχύουν την ευελιξία και την κλιμάκωση του δικτύου και συντόμευσαν τον χρόνο για την αγορά νέων εφαρμογών και υπηρεσιών.

Επιπλέον, με το συνδυασμό SDN και NFV, είναι δυνατό να φέρουν τμήματα του δικτύου κινητών πακέτων πιο κοντά στους χρήστες, μειώνοντας έτσι την καθυστέρηση του δικτύου από άκρο σε άκρο. Το πιο σημαντικό είναι ότι τα SDN και NFV έχουν καθοριστεί ως βασικοί παράγοντες στον σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής δικτύου 5G. Στα συστήματα 5G, τα δίκτυα θα αναλυθούν περαιτέρω σε διαφορετικά κομμάτια δικτύου, διαμορφώνοντας απομονωμένα δίκτυα από άκρο σε άκρο, αναφερόμενα σε διαφορετικούς τύπους υπηρεσιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις. Αυτή η δυνατότητα τεμαχισμού του δικτύου κατευθύνεται μέσω των τεχνολογιών SDN και NFV και αυτή η τεχνολογία αναμένεται πλέον να διαδραματίσει βασικό ρόλο

στην ικανοποίηση των απαιτήσεων των περιπτώσεων χρήσης 5G και των απαιτήσεων κόστους [4].

1.3.2 Χαρακτηριστικά SDN / NFV.

Το SDN είναι ουσιαστικά ένα κεντρικό παράδειγμα δικτύωσης στο οποίο η νοημοσύνη του δικτύου, δηλαδή η λειτουργία ή το επίπεδο ελέγχου, συγκεντρώνεται σε έναν μόνο έλεγχο ή ένα σύνολο οντοτήτων ελέγχου (ελεγκτές SDN), ενώ το επίπεδο διαβίβασης δεδομένων απλοποιείται για εφαρμογές και δίκτυα που ζητούν υπηρεσίες μέσω των ελεγκτών SDN.

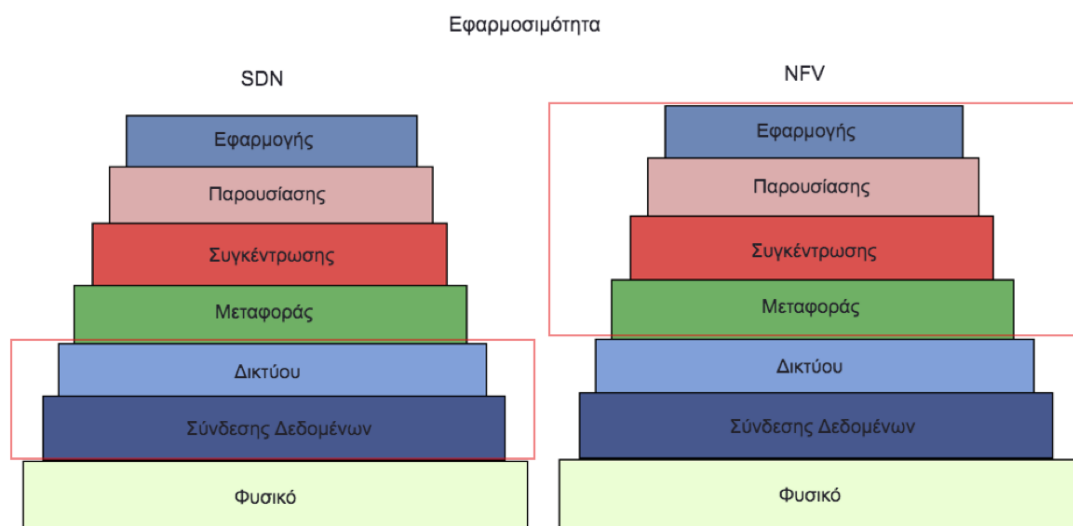
Το επίπεδο εφαρμογής που αποτελείται από εφαρμογές όπως η δρομολόγηση και η εξισορρόπηση φορτίου, επικοινωνεί με τον ελεγκτή SDN στο επίπεδο ελέγχου μέσω διασυνδέσεων προς βορρά. Το επίπεδο ελέγχου αποτελείται από έναν ελεγκτή ή ένα σύνολο ελεγκτών SDN που διατηρεί μια δυναμική προβολή δικτύου, παρέχει λειτουργίες ελέγχου για τη διαχείριση των συσκευών δικτύου στο επίπεδο δεδομένων μέσω του νότου βάσει των αιτημάτων των εφαρμογών. Οι ελεγκτές επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας διεπαφές ανατολής-δύσης. Το επίπεδο δεδομένων αποτελείται από στοιχεία προώθησης δεδομένων (DFE) όπως εικονικοί ή φυσικοί διακόπτες και δρομολογητές, οι οποίοι προωθούν και δρομολογούν τα πακέτα δεδομένων βάσει κανόνων που έχουν εγκατασταθεί από τους ελεγκτές SDN. Το επίπεδο διαχείρισης και διοίκησης είναι υπεύθυνο για όλες τις δραστηριότητες που σχετίζονται με την παροχή και την παρακολούθηση των δικτύων. Σήμερα, η SDN έχει κερδίσει μεγάλη προσοχή από την ακαδημαϊκή κοινότητα και από τη βιομηχανία σε πολλούς τομείς δικτύωσης, όχι μόνο στα ενσύρματα δίκτυα, αλλά επεκτάθηκε επίσης γρήγορα στον τομέα των κινητών και ασύρματων δικτύων.

Η NFV είναι ουσιαστικά η μετεγκατάσταση των λειτουργιών δικτύου που χρησιμοποιούν υλικές συσκευές, σε συσκευές λογισμικού που εκτελούνται στο περιβάλλον cloud ή σε servers γενικού σκοπού. Με τη χρήση του NFV, κάθε συμβατική λειτουργία δικτύου (NF) εκτελείται τώρα σε ένα εικονικό μηχάνημα (Virtual Machine) ως μοντέλο χαρτογράφησης 1: 1 ή αποσυντίθεται σε μικρότερα στοιχεία που ονομάζονται Virtual Function Network Component (VNFC) που εκτελούνται σε πολλαπλά VMs ως 1: N μοντέλο χαρτογράφησης.

Όσον αφορά το αρχιτεκτονικό πλαίσιο NFV, τα Εικονικά Δίκτυα (VNF), που αντιπροσωπεύουν την εφαρμογή των NFs, αναπτύσσονται και εκτελούνται σε υποδομή NFV (NFV Infrastructure). Το NFVI αποτελείται από εικονικούς πόρους, οι οποίοι αφαιρούνται και διαχωρίζονται από τους πόρους υλικού (υπολογιστική, αποθήκευση και δικτύωση) μέσω ενός στρώματος εικονικοποίησης. Η εικονικοποίηση των λειτουργιών (εντός του EPC, που είναι το πιο πρόσφατο δίκτυο και ο πυρήνας του συστήματος LTE) είναι μία από τις σημαντικότερες περιπτώσεις χρήσης και προσελκύει μεγάλη προσοχή, ιδιαίτερα από τους φορείς εκμετάλλευσης κινητών δικτύων (MNO) [4].

Με την εικονοποίηση των δικτύων και των συσκευών δικτύου, υπάρχουν τα ακόλουθα οφέλη:

- Ευελιξία: Γρήγορη ανάπτυξη νέων υπηρεσιών με πολύ πιο ευέλικτο και προσαρμόσιμο δίκτυο - το οποίο μπορεί εύκολα και γρήγορα να εγκατασταθεί και να παρασχεθεί.
- Κόστος: Το κόστος αποτελεί βασικό παράγοντα για οποιονδήποτε φορέα εκμετάλλευσης ή πάροχο υπηρεσιών αυτές τις μέρες.
- Επεκτασιμότητα: Για να προσαρμοστούν γρήγορα στις μεταβαλλόμενες ανάγκες των χρηστών και να παρέχουν νέες υπηρεσίες, οι φορείς εκμετάλλευσης πρέπει να είναι σε θέση να κλιμακώσουν την αρχιτεκτονική δικτύου τους σε πολλούς διακομιστές.
- Ασφάλεια: Η ασφάλεια υπήρξε και εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική πρόκληση στη δικτύωση. Οι φορείς εκμετάλλευσης θέλουν να είναι σε θέση να παρέχουν και να διαχειρίζονται το δίκτυο, ενώ επιτρέπουν στους πελάτες τους να τρέχουν το δικό τους εικονικό χώρο με ασφάλεια μέσα στο δίκτυο.



-Βελτιστοποιεί την υποδομή δικτύου όπως οι διακόπτες Ethernet, οι δρομολογητές, τα σημεία ασύρματης πρόσβασης.
-Επίπεδα 2-3 OSI.

- Βελτιστοποιεί την ανάπτυξη λειτουργίας δικτύου όπως την ισορροπία φορτίου, το τείχος προστασίας, τον ελεγκτή βελτιστοποίησης WAN κλπ.
-Επίπεδα 4-7 OSI.

Σχήμα 1.1 : Επίπεδα των SDN και NFV και εφαρμοσιμότητα[3].

1.3.3 Συσχέτιση SDN / NFV.

Γεννημένες σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και προωθούμενες από διαφορετικές κοινότητες και οργανισμούς, οι αρχιτεκτονικές SDN και NFV μοιράζονται πολλές

ιδιότητες και είναι ιδιαίτερα συμπληρωματικές μεταξύ τους. Και οι δύο αποβλέπουν στην επιτάχυνση της καινοτομίας των νέων υπηρεσιών προς ένα δικτυωμένο σύστημα με γνώμονα το λογισμικό. Πιο συγκεκριμένα, η NFV μπορεί να εξυπηρετήσει την SDN με την εικονοποίηση SDN στοιχείων, όπως ο ελεγκτής SDN, επιτρέποντας έτσι τη δυναμική μετατόπιση αυτών των στοιχείων στις βέλτιστες τοποθεσίες τους. Με τη σειρά της, η SDN εξυπηρετεί την NFV παρέχοντας προγραμματιζόμενη διασύνδεση δικτύου μεταξύ των VNFs για να επιτύχει βελτιστοποιημένη μηχανολογία και σύστημα διεύθυνσης. Αν και η SDN και η NFV είναι αμοιβαία επωφελείς μεταξύ τους, τα πλαίσια δεν εξαρτώνται το ένα από το άλλο. Αυτό σημαίνει ότι οι λειτουργίες του δικτύου μπορούν να υλοποιηθούν και να αναπτυχθούν χωρίς SDN και αντίστροφα. Τέλος, ο συνδυασμός SDN και NFV επιτρέπει δυναμική, ευέλικτη ανάπτυξη και κλιμάκωση των λειτουργιών δικτύου όταν απαιτείται, οι οποίες είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη του μελλοντικού κινητού πυρήνα προς ένα σύστημα 5G.

Τέτοια χαρακτηριστικά έχουν επίσης ενθαρρύνει την ανάπτυξη δικτύωσης σε μικρότερα κομμάτια και την αλυσιδωτή λειτουργία των υπηρεσιών. Επεξηγηματικά, ο τεμαχισμός ενός δικτύου είναι να ομαδοποιήσει συσκευές με παρόμοιες απαιτήσεις επιδόσεων (ρυθμός μετάδοσης, καθυστέρηση, απόδοση, κλπ.) σε μια μονάδα. Από την άποψη του δικτύου, ο τεμαχισμός ενός δικτύου είναι να διαιρέσει μια υποκείμενη φυσική υποδομή δικτύου σε ένα σύνολο απομονωμένων εικονικών δικτύων. Η αλυσιδωτή λειτουργία των υπηρεσιών (SFC) επιτρέπει τη δρομολόγηση των μεταφορών μέσω μιας διατεταγμένης λίστας λειτουργιών δικτύου (firewall, φορτιστές ισορροπίας κ.λπ.) [4].

1.3.4 Ενοποίηση SDN / NFV.

Το μοντέλο αρχιτεκτονικής SDN αποτελείται από τρία στρώματα, από το κάτω στρώμα έως το επάνω στρώμα:

- το στρώμα υποδομής,
- το στρώμα ελέγχου και
- το στρώμα εφαρμογής

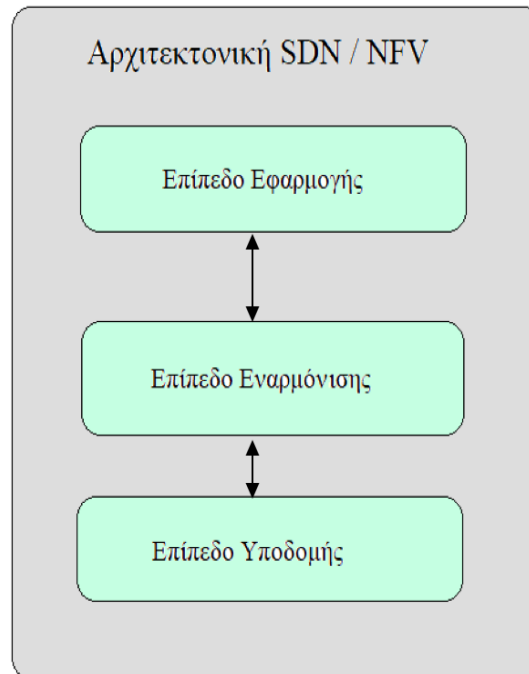
Το μοντέλο αρχιτεκτονικής NFV αποτελείται εξίσου από τρία στρώματα και μια οντότητα NFV MANO Διαχείρισης και Εναρμόνισης, από το κάτω στρώμα στο ανώτερο στρώμα:

- το στρώμα φυσικής υποδομής,
- το στρώμα εικονικής υποδομής και
- το στρώμα λειτουργίας εικονικού δικτύου.

Συνοψίζουμε το μοντέλο αρχιτεκτονικής SDN / NFV από την πλευρά των υπολογιστικών συστημάτων. Η αρχιτεκτονική αποτελείται από τρία στρώματα, από το κάτω έως το επάνω στρώμα:

- το στρώμα υποδομής,

- το στρώμα εναρμόνισης και
- το στρώμα εφαρμογής, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Αρχιτεκτονική ενσωμάτωσης SDN / NFV [5].

Το επίπεδο εφαρμογής είναι παρόμοιο με τις εφαρμογές λογισμικού που εξαρτώνται από τον υπολογισμό των πόρων για την ολοκλήρωση των εργασιών. Το επίπεδο εναρμόνισης είναι παρόμοιο με το λειτουργικό σύστημα του υπολογιστή, το οποίο διαχειρίζεται πόρους υλικού (π.χ. CPU, μνήμη και σκληρό δίσκο), προσφέρει ένα επίπεδο αφαίρεσης για να διευκολύνει την αλληλεπίδραση με το κάτω υλικό και παρέχει μια σειρά κοινών υπηρεσιών που όλες οι εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Το επίπεδο υποδομής είναι παρόμοιο με τις συσκευές υλικού ενός υπολογιστή, το οποίο παρέχει υπολογισμό και επεξεργασία για εφαρμογές λογισμικού. Το SDN και το NFV είναι πολύ συσχετισμένα και συμπληρωματικά και το καθένα μπορεί να ενσωματωθεί στο άλλο για να ενισχύσει την ευελιξία και την κλιμάκωση των δικτύων επικοινωνίας και να διευκολύνει την παροχή υπηρεσίας πάνω σε αυτά [5].

1.4 Συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, στο πρώτο της κεφάλαιο εξηγούνται ορισμένες επικοινωνιακές τεχνολογίες όπως το φάσμα mmWave, που προσφέρουν ένα

ελπιδοφόρο μέλλον όσον αφορά την καλύτερη ποιότητα και τον αυξημένο ρυθμό δεδομένων για τους εσωτερικούς χρήστες, καθώς αναφέρονται και ορισμένες τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ασύρματα συστήματα 5G για να εκπληρώσουν τις πιθανές επιθυμίες απόδοσης, όπως η μαζική επικοινωνία MIMO, MU-MIMO και SU-MIMO και η διαχείριση παρεμβολών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο συναντάμε τα μοντέλα της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης και εξετάζουμε αναλυτικότερα την χωρητικότητα των συστημάτων τους, το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, τις καθυστερήσεις που μπορεί να προκύπτουν, την απόδοση και την ποιότητα μιας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, αναλύουμε το σύστημα απωλειών πολυδιάστατης κίνησης, στο οποίο οι κλήσεις ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους γίνονται αποδεκτές από το σύστημα ή απορρίπτονται και χάνονται. Για αποφευχθεί όμως αυτό, δηλαδή το να χάνεται μία κλήση, χρησιμοποιούμε και αναλύουμε τον μηχανισμό επανάκλησης. Τα μοντέλα Επανάκλησης που εξετάζουμε είναι δύο: Μονής Επανάκλησης και Πολλαπλής Επανάκλησης.

Συνεχίζοντας, εξηγούνται δύο αρχιτεκτονικές ασύρματου δικτύου 5G καθώς και μερικές από τις βασικές αναδυόμενες τεχνολογίες που βοηθούν στη βελτίωση της αρχιτεκτονικής και στην ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών. Οι αρχιτεκτονικές αυτές είναι η Software-Defined Networking (SDN) και η Network Function Virtualization (NFV) που είναι δύο πρόσφατες καινοτομίες που αναμένεται να αντιμετωπίσουν τις σημαντικές προκλήσεις στα δίκτυα 5ης γενιάς.

Το τέταρτο κεφάλαιο εστιάζει στην επέκταση του μοντέλου επανάκλησης σε συνδυασμό με την αρχιτεκτονική του κυψελοειδούς δικτύου της πέμπτης γενιάς, με βάση το SDN / NFV, εφαρμόζοντας προσομοιώσεις που αποδεικνύουν αν είναι δυνατή ή όχι η χρήση αυτού του συνδυασμού.

2 Βασικά Μοντέλα της Θεωρίας Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

2.1 Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Η Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κινήσεως είναι ένας κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών που υπάρχει για τον βέλτιστο σχεδιασμό των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, για την ικανοποίηση των προδιαγραφών ποιότητας εξυπηρέτησης (Quality of Service – QoS) αλλά και για την αξιολόγηση λειτουργίας του δικτύου.

Το ποσό της κίνησης που θα διεκπεραιώνεται από το τηλεπικοινωνιακό σύστημα ορίζει το μέγεθός του, δηλαδή τον αριθμό των κυκλωμάτων και των trunks (κάθε ποσότητα που εξυπηρετεί μία κλήση). Ωστόσο, ο αριθμός των trunks πρέπει να ανταποκρίνεται και στην κίνηση της ώρας μεγίστης αιχμής (busy – hour traffic). Επίσης, η γνώση της κίνησης στην ώρα αιχμής είναι απαραίτητη για την σωστή λειτουργία του συστήματος, ώστε αν είναι κατελιμμένο, να εγκαταστήσουμε περισσότερα trunks, γι' αυτό και η κίνηση μετράται και καταγράφεται. Αυτές οι μετρήσεις αξιοποιούνται για τον σχεδιασμό του κορμού του δικτύου του, την παρακολούθηση της ποιότητας επικοινωνίας που παρέχεται, τον υπολογισμό της δομής των κέντρων του και των ζευτικών κυκλωμάτων.

2.1.1 Συμφόρηση της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Η κατάσταση στην οποία όλες οι γραμμές - trunks μίας δέσμης είναι κατελιμμένες, με συνέπεια η δέσμη να μην μπορεί να δεχτεί πιθανόν άλλες κλήσεις, ονομάζεται συμφόρηση (congestion). Στην συμφόρηση, όταν η εισερχόμενη κλήση μπλοκάρεται και εγκαταλείπει το σύστημα, έχουμε το σύστημα απωλειών, ενώ όταν η κλήση περιμένει για να γίνει η σύνδεση τότε έχουμε το σύστημα αναμονής. Τέλος, το ποσοστό των κλήσεων που χάνονται ή καθυστερούν λόγω της συμφόρησης, είναι ένας δείκτης της ποιότητας εξυπηρέτησης που παρέχεται από την υπηρεσία και ονομάζεται βαθμός εξυπηρέτησης (grade of service – GOS). Τις ώρες που δεν υπάρχει αιχμή, η ποιότητα εξυπηρέτησης που δίνεται είναι πολύ καλύτερη από τον βαθμό που εμφανίζει ο βαθμός εξυπηρέτησης και όταν επικρατεί αιχμή, ο βαθμός αυτός καθορίζεται κάθε φορά, ανάλογα με την κρίση. Δηλαδή, αν τον θέταμε σε μόνιμη βάση αρκετά υψηλό, τότε το αποτέλεσμα θα ήταν να υπάρχουν πολλές ανεπιτυχείς κλήσεις και αν τον θέταμε αρκετά μικρό, πάλι σε μόνιμη βάση, τότε το τηλεπικοινωνιακό σύστημα θα υπολειπούνε για μεγάλα χρονικά διαστήματα μέσα σε μία μέρα. Οπότε, είναι συνετό να σχεδιαστεί διαφορετικό GOS για κάθε περιοχή και ώρα αιχμής και μη. Ο

συμβολισμός του βαθμού εξυπηρέτησης για ένα σύστημα απωλειών γίνεται με το γράμμα B και είναι ο λόγος της κίνησης που χάθηκε προς την κίνηση που προσφέρθηκε.

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

Με το B να σημαίνει :

ή το ποσοστό χρόνου όπου υπάρχει συμφόρηση

ή η πιθανότητα συμφόρησης

ή τέλος η πιθανότητα ότι μία κλήση θα χαθεί λόγω συμφόρησης.

Για παράδειγμα αν έχουμε ένα φορτίο κίνησης a σε μία ζεύξη με $GOS=B$, η κίνηση που θα πραγματοποιηθεί είναι η επίλυση του $a*(1-B)$ και η χαμένη κίνηση θα είναι το γινόμενο του $a*B$.

Ένα μοντέλο που ασχολείται η θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης είναι αυτό του συστήματος χρονομερισμού (timesharing), στο οποίο η CPU σχεδιάζει τις επισκέψεις που θα κάνουν οι κλήσεις σε έναν από τους 2 δίσκους (A και B). Αφού επιτευχθούν οι επισκέψεις των κλήσεων, αυτές, επιστρέφουν πάλι στην CPU, η οποία με την σειρά της πάλι τους καθορίζει την επόμενη επίσκεψή τους που θα είναι, με αποτέλεσμα αυτές να αναχωρούν ξανά. Ένα επίσης ενδιαφέρον μοντέλο, είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός εναλλακτικής δρομολόγησης, το οποίο τίθεται σε λειτουργία όταν επικρατεί συμφόρηση σε μία ζεύξη (AC) και ακολουθεί μία εναλλακτική οδό (την ABC) για να φθάσει στον προορισμό της.

2.1.2 Μοντέλα της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

2.1.2.1 Ορισμοί

Με τον όρο κλήση εννοείτε η απαίτηση για σύνδεση σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα και ο συμβολισμός για την διάρκεια κλήσης είναι το γράμμα h , δηλαδή η διάρκεια της κλήσης και ως φορτίο κίνησης χρησιμοποιούμε το γράμμα a και σημαίνει το σύνολο της διάρκειας όλων των κλήσεων που πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και λαμβάνεται σαν μονάδα. Ιδρυτής της Θεωρίας Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης είναι ο Μαθηματικός Δανός A. K. Erlang, οπότε και η μονάδα φορτίου κίνησης θεμελιώθηκε κυρίως το Erlang – **erl** και τα ειδικά όργανα που απαιτούνταν για τις μετρήσεις, όταν τα τηλεφωνικά κέντρα ήταν αναλογικά, ερλαγκόμετρα. Ωστόσο, κάποιες φορές βλέπουμε να χρησιμοποιείται σαν μονάδα μέτρησης της κίνησης και το Centum Call Seconds – CCS, αν και η προηγούμενη θεωρείται διεθνώς αποδεκτή μονάδα.

2.1.2.1 Μετρήσεις.

Αναλυτικά, όταν μετράτε το φορτίο της κίνησης, $\alpha = \text{ch [erl]}$, στην ουσία λαμβάνονται τιμές για την συνολική κίνηση:

- που πραγματοποιείται στο κέντρο,
- που προσφέρεται
- που τερματίζει
- την εσωτερική
- αλλά και αυτήν που πραγματοποιείται σε κάθε εισερχόμενη και εξερχόμενη δέσμη.

2.1.2.2 Διαδικασία Γεννήσεων Κλήσεων

Ανάμεσα στους τρόπους γεννήσεων κλήσεων (call origination process) ανήκει και ο τυχαίος και ισχύει όταν:

- οι κλήσεις γεννώνται ανεξάρτητα η μία από την άλλη
- η πιθανότητα πάνω από μία κλήση να γεννηθεί σε διάστημα $(t, t+\Delta t]$ τείνει στο μηδέν
- η πιθανότητα μία κλήση να γεννηθεί σε διάστημα $(t, t+\Delta t]$ τείνει στο $\lambda \Delta t$, ανεξαρτήτως χρόνου και με λ σταθερό.

Όταν η πιθανότητα άφιξης στο Δt είναι $\lambda \Delta t$, η τυχαία διαδικασία άφιξης ονομάζεται Poisson.

2.1.2.3 Κατανομή του χρόνου Εξυπηρέτησης

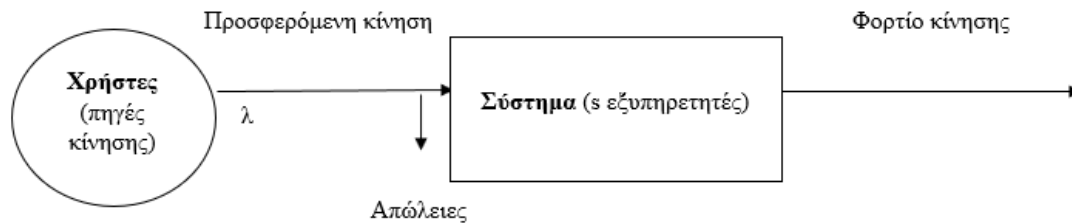
Για να πάρουμε την κατανομή του χρόνου εξυπηρέτησης, θεωρούμε τυχαίο τον τερματισμό μιας κλήσης και ως χρόνο την στιγμή που ο εξυπηρετητής δέχεται μία κλήση. Η πιθανότητα τερματισμού της κλήσης στο $(t, t+\Delta t)$, είναι $\mu \Delta t$ και δεν εξαρτάται από το t .

2.2 Το Μοντέλο Erlang

Η κατανομή Erlang, είναι μια γενίκευση της εκθετικής κατανομής. Μετράει το χρόνο με τον οποίο έρχεται η μία κλήση μετά την άλλη και μαζί με τη διάρκεια των εισερχόμενων κλήσεων, αξιοποιείται για τις μετρήσεις σχετικά με το φορτίο κίνησης. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί η πιθανότητα απωλείας πακέτου ή καθυστέρησης, σύμφωνα με διάφορες παραδοχές σχετικά με το εάν οι μπλοκαρισμένες κλήσεις αποκόπηκαν, δηλαδή αναφερόμαστε στο Erlang B, ή βρίσκονται σε ουρά μέχρι να εξυπηρετηθούν, Erlang C [11].

Με βάση το παρακάτω σχήμα, έχουμε ένα σύστημα απωλειών, σύμφωνα με τον Kendall, M/M/s(0) με αριθμό εξυπηρετητών s , αφίξεις Poisson με ρυθμό λ και εκθετικό

ρυθμό εξυπηρέτησης μ . Ο αριθμός των κλήσεων που απασχολούνται στο σύστημα δεν ξεπερνά τον αριθμό των απασχολημένων εξυπηρετητών που υπάρχουν, καθώς οι επόμενες κλήσεις που κατέφτασαν στο σύστημα παρεμποδίστηκαν λόγω έλλειψης επαρκούς αριθμού διαθέσιμων εξυπηρετητών.



Σχήμα 2.1: Σύστημα απωλειών M/M/s(0).

Έστω την χρονική στιγμή t , ο αριθμός των κλήσεων που υπάρχουν στο σύστημα είναι $N(t)$, και ας υποθέσουμε ότι στο διάστημα $(t, t + \Delta t]$, με Δt να τείνει στο 0 δεν υπάρχουν δύο ή περισσότερες κλήσεις που να ξεκινούν ή να τερματίζουν. Τότε, το γεγονός $\{N(t + \Delta t) = r\}$ προκύπτει από μία από τις περιπτώσεις:

- A: $N(t) = r$ και καμία κλήση δεν ξεκινά ή τερματίζει στο $(t, t + \Delta t]$
- B: $N(t) = r-1$ και μία κλήση ξεκινά στο $(t, t + \Delta t]$
- C: $N(t) = r+1$ και μία κλήση τερματίζει στο $(t, t + \Delta t]$

Αν υποθέσουμε ότι $Pr(t) = P\{N(t)=r\}$ και r κλήσεις να εξελίσσονται, τότε η πιθανότητα να τερματίσει μια κλήση στο $(t, t+\Delta t)$ ισούται με $r\mu \Delta t$, έχουμε τις παρακάτω πιθανότητες:

- $P\{A\} = Pr(t) (1-\lambda\Delta t-r\mu\Delta t)$
- $P\{B\} = P_{r-1}(t) \lambda\Delta t$
- $P\{C\} = P_{r+1}(t) (r+1)\mu\Delta t$ (2.1)

Αν τα γεγονότα A, B, C είναι μοναδικά τότε έχουμε:

$$P_r(t+\Delta t) = P\{A\}+P\{B\}+P\{C\} = P_r(t)+[\lambda P_{r-1}(t)+r\mu P_r(t)+(r+1)\mu P_{r+1}(t)]\Delta t \quad (2.2)$$

Από αυτή την σχέση προχωράμε στην παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{P_r(t+\Delta t) - P_r(t)}{\Delta t} \right) = dP_r(t)/dt = \lambda P_{r-1}(t) - (\lambda + r\mu) P_r(t) + (r+1)\mu P_{r+1}(t). \quad (2.3)$$

Ουσιαστικά το ενδιαφέρον μας εστιάζεται στην σταθερή κατάσταση μετά το πέρασμα του χρόνου και αν είναι εφικτή, τότε υπάρχει και μια μοναδική οριακή πιθανοτική

κατανομή ή πιθανότητα μόνιμης καταστάσεως (steady state probability) $\{Pr\}$ τέτοια ώστε για $t \rightarrow \infty$, η οποία είναι:

$$Pr(t) \rightarrow Pr \text{ με } \{dPr(t)/dt\} \rightarrow 0$$

ανεξαρτήτως της αρχικής καταστάσεως, με αυτό να ονομάζεται στατιστική ισορροπία (statistical equilibrium). Οπότε, το πρώτο μέλος της εξίσωσης ισούται με 0.

$$(\lambda + r\mu)Pr = \lambda P_{r-1} + (r+1)\mu P_{r+1}, \quad r = 0, 1, \dots, s \quad \text{όπου } Pr = 0 \text{ για } r = -1, s+1 \quad (2.4)$$

Η επίλυση της (2.4), μετά την πρόσθεση κατά μέλη των σχέσεων για $r = 0$ ως $r = i-1$, (καλείται μέθοδος ladder) και με $a = \lambda/\mu$ μας δίνει την σχέση:

$$P_i = (a/i) P_{i-1} \text{ με } i=1, 2, \dots, s, \quad (2.5)$$

$$\text{Και } P_i = (a/i) P_{i-1} = [a^2 / i(i-1)] P_{i-2} = \dots = (a^i / i!) P_0 \quad (2.6)$$

όπου P_0 η πιθανότητα το σύστημα να είναι κενό, δηλαδή χωρίς καμία κλήση. Με την κανονικοποίηση που είναι απαραίτητη παίρνουμε την :

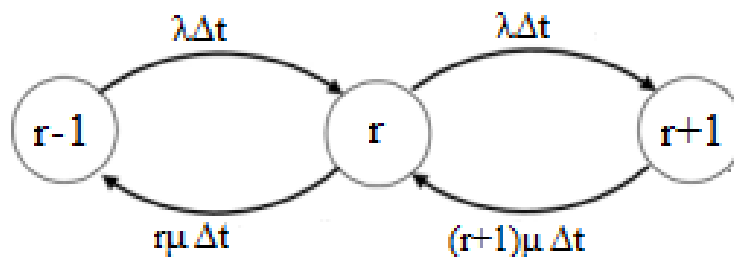
$$\sum_{i=0}^s P_i = P_0 + P_0 \sum_{i=1}^s \frac{a^i}{i!} = 1 \quad (2.7)$$

$$\text{Και προκύπτει η: } P_0 = \left(\sum_{i=0}^s \frac{a^i}{i!} \right)^{-1} \quad (2.8)$$

και λόγω της (2.6), καταλήγουμε στην σχέση κατανομής Erlang (Erlang distribution):

$$P_r = \frac{\frac{a^r}{r!}}{\sum_{i=0}^s \frac{a^i}{i!}} \quad \text{με } r=0, 1, \dots, s \quad (2.9)$$

Στο Σχήμα 2.2 αναπαρίσταται η αλλαγή καταστάσεων σε ένα σύστημα.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Μεταπτώσεων Καταστάσεων M/M/s(0).

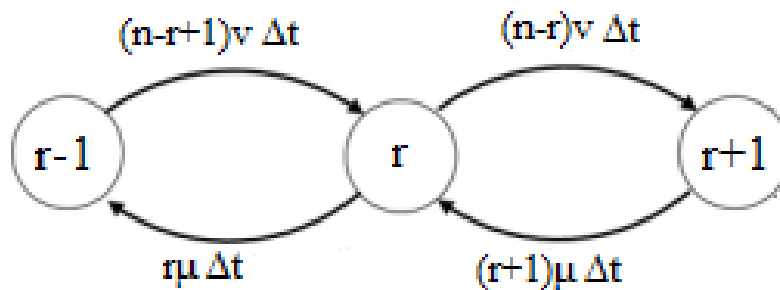
Και αν το s φτάσει να είναι αρκετά μεγάλο τότε έχουμε την κατανομή Poisson ή περικεκομμένη κατανομή Poisson (Truncated Poisson Distribution):

$$Pr \rightarrow \left[\frac{a^r}{r!} \right] e^{-a} \quad \text{με το } s \rightarrow \infty \quad (2.9\alpha)$$

2.3 Το Μοντέλο Engset

Ο υπολογισμός Engset, αναπτύχθηκε από τον Tore Olaus Engset για να προσδιορίσει την πιθανότητα συμφόρησης που συμβαίνει σε μια ομάδα κυκλωμάτων. Το μοντέλο Engset διαφέρει από το μοντέλο του Erlang μόνο στο ότι διαθέτει μία πεπερασμένη πηγή πελατών ενώ ο Erlang υποθέτει έναν άπειρο αριθμό στις πηγές. Διερευνά τη σχέση μεταξύ της προσφερόμενης κίνησης συνήθως κατά τη διάρκεια της κατειλημμένης ώρας, του μπλοκαρίσματος που θα προκύψει σε αυτή την κίνηση και του αριθμού των κυκλωμάτων που παρέχονται όπου είναι γνωστός ο αριθμός πηγών από τις οποίες παράγεται η κίνηση [12].

Με βάση το παρακάτω σχήμα, στο οποίο έχουμε ένα σύστημα απωλειών M/M/s(0), είναι παρόμοιων χαρακτηριστικών με το μοντέλο απωλείας Erlang μόνο που το συγκεκριμένο έχει ένα όριο στις πηγές εισόδου, n και ακολουθεί εκθετικά καταναμημένο χρόνο άφιξης από μία αδρανή είσοδο, με μέση τιμή ν^{-1} , δηλαδή ψευδο-τυχαία είσοδος. Επιπλέον θεωρούμε την ύπαρξη r κλήσεων και ο υπολογισμός των αδρανών πηγών να είναι $(n-r)$ και ο ρυθμός αφίξεων $\nu(n-r)$. Το τελικό διάγραμμα των μεταπτώσεων δίνεται στο σχήμα 2.3β



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα μεταπτώσεων καταστάσεων του M(n)/M/s(0).

Η εξίσωση μονίμου καταστάσεως (steady state equation) προέρχεται από την σχέση «ρυθμός εξόδου = ρυθμός εισόδου» και είναι η εξής:

$$[(n-r)\nu + r\mu] Pr = (n-r+1)\nu P_{r-1} + (r+1)\mu P_{r+1} \quad \text{με } r=0, 1, \dots, s \quad (2.10)$$

$$\text{Και } P_{-1} = P_{s+1} = 0$$

Από την σχέση «ρυθμός ανόδου = ρυθμός καθόδου» είτε αν χρησιμοποιήσουμε κι εδώ την σχέση ladder που είδαμε και στο σύστημα M/M/s(0) έχουμε την αναδρομική σχέση:

$$Pr = \{(n-r+1)\nu h / r\} P_{r-1} \quad \text{με } r = 1, 2, \dots, s \quad (2.10\alpha)$$

και ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης h ισούται με μ^{-1} .

Έτσι, από αυτή την σχέση και την κανονικοποίηση καταλήγουμε στην κατανομή Engset:

$$P_r = \frac{\binom{n}{r} (vh)^r}{\sum_{i=0}^s \binom{n}{i} (vh)^i} \quad (2.11)$$

Αν ισχύει $n \rightarrow \infty$ και το γινόμενο nvh ισούται με το φορτίο a και είναι σταθερό, τότε:

$$\binom{n}{r} (vh)^r = \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-r+1)}{r!} * \frac{(nvh)^r}{r!} \rightarrow \frac{a^r}{r!} \quad (2.12)$$

οπότε η (2.11) συμπίπτει με την (2.9) κατανομή Erlang η οποία παριστά τον αντίστοιχο τύπο Engset με άπειρες πηγές.

Ο παρονομαστής της (2.11) γίνεται $(1+vh)^n$ όταν ισχύει $n \rightarrow s$ και απλοποιείται στην διωνυμική κατανομή (binomial distribution) με το $a=vh/(1+vh)$.

$$P_r = \binom{n}{r} * a^r (1-a)^{n-r} \quad (2.13)$$

Τελικά η 2.11 μπορεί να μας δώσει και την πιθανότητα σταθερής κατάστασης στο σύστημα απωλειών.

2.4 Το Μοντέλο Πολυδιάστατης Κίνησης

Μοντέλα πολυδιάστατης κίνησης εμφανίζονται σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα των ενοποιημένων υπηρεσιών (Narrow – Band και Broadband ISDN) και στα LAN (Local Area Network). Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων απωλείας κλήσεων για κάθε υπηρεσία, θεωρούμε ένα σύστημα απωλειών με ποικιλία όχι μόνο των κινήσεων από τις πηγές για είσοδο αλλά και του εύρους ζώνης για κάθε κλήση. Γι' αυτό το μοντέλο, αρχικά, ήταν αναγκαίος ο σχηματισμός ξεχωριστών αναδρομικών τύπων, οι οποίοι όμως ήταν ισοδύναμοι με τους κλειστούς τύπους υπολογισμού, οπότε απλά προέκυψε η μετατροπή τους.

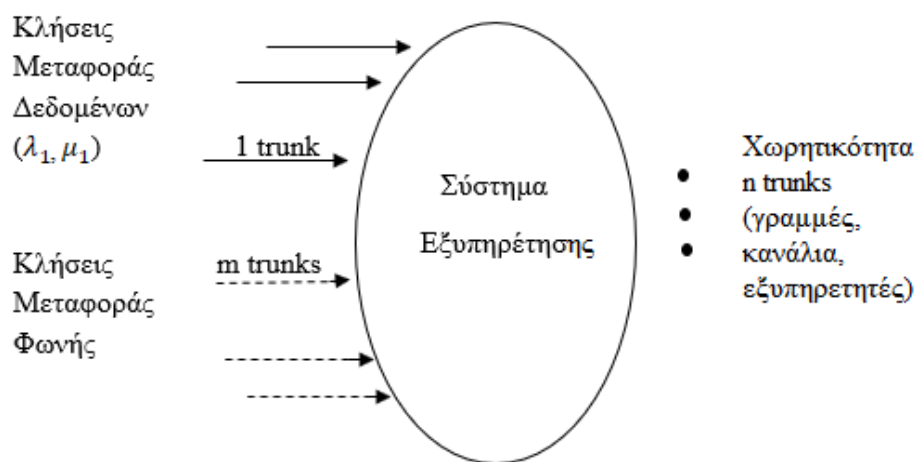
2.4.1 Ορισμός

Σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, όταν οι κλήσεις που κατατάσσονται σε διαφορετικές κατηγορίες κινήσεων, ακολουθούν μία συγκεκριμένη πολιτική για να μοιράζονται το εύρος ζώνης (bandwidth) ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος, καλείται πολυδιάστατη κίνηση (multi – dimensional traffic) και την συναντάμε συχνά, στην μετάδοση φωνής (υψηλής ταχύτητας) και δεδομένων (χαμηλής ταχύτητας) ταυτοχρόνως.

2.4.2 Σύστημα Δι-διάστατης Κίνησης

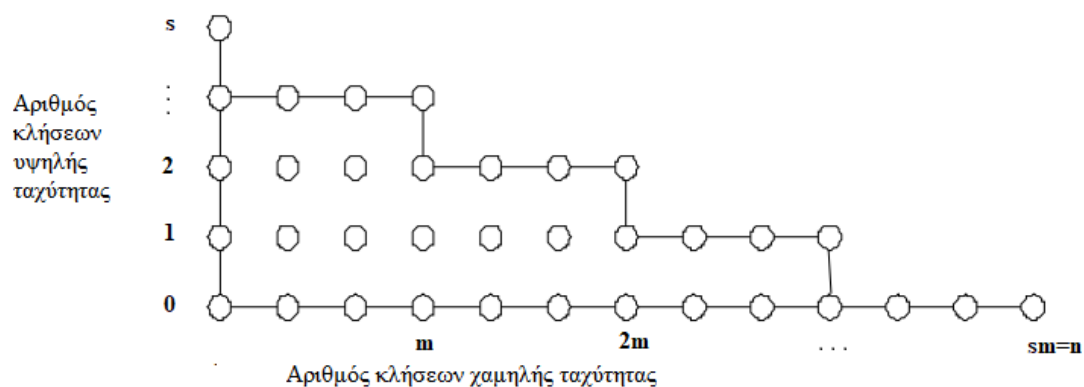
Θεωρούμε ένα πολυδιάστατο σύστημα με δύο τύπους κίνησης, φωνής και δεδομένων, με την κλήση μεταφοράς δεδομένων να χρειάζεται ένα μόνο κανάλι μετάδοσης (time slot) και αν δεν υπάρχει κανένα διαθέσιμο η άφιξη μπλοκάρεται και η κλήση μεταφοράς φωνής να χρειάζεται m κανάλια, δηλαδή η άφιξη φράσσεται όταν λιγότερα από τα αναφερόμενα κανάλια είναι διαθέσιμα. Ο ρυθμός άφιξης της πρώτης κατηγορίας είναι Poisson λ_1 και ο εκθετικός ρυθμός εξυπηρέτησης μ_1^{-1} και της δεύτερης λ_2 και μ_2^{-1} αντίστοιχα. Αυτά τα χαρακτηριστικά των δύο κλήσεων προσφέρονται σε n κανάλια (trunks).

Σχηματικά:



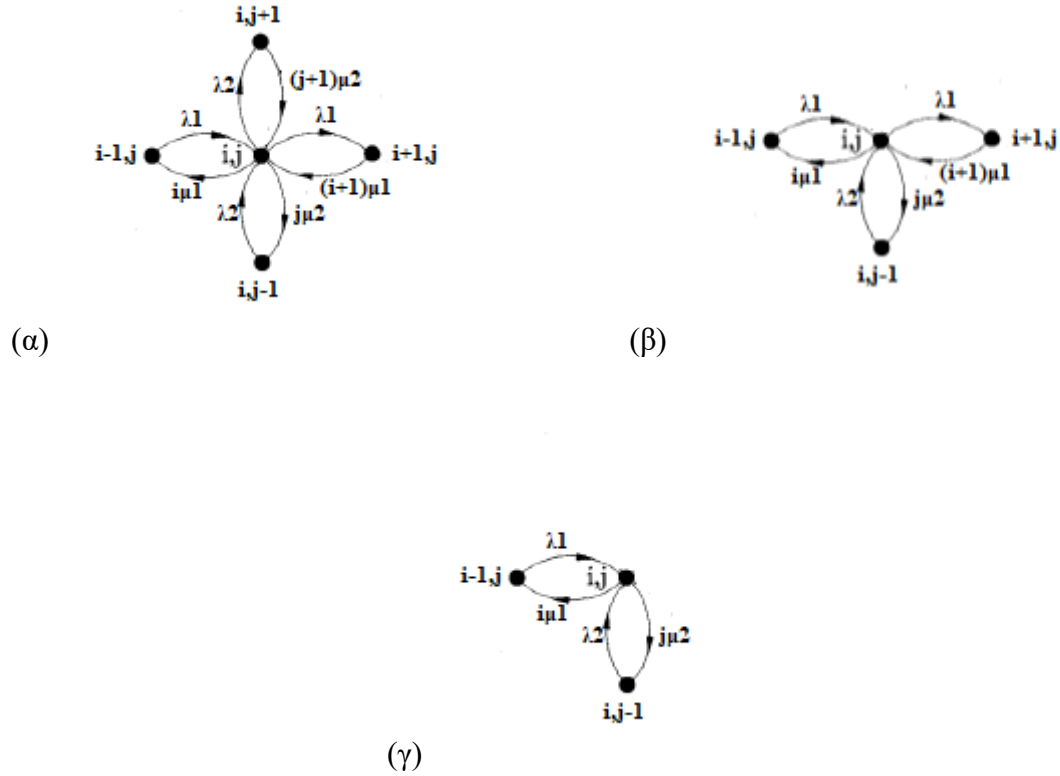
Σχήμα 2.4: Μοντέλο πολυδιάστατης κίνησης.

Έστω P_{ij} η κοινή πιθανότητα, i κλήσεις χαμηλής ταχύτητας και j κλήσεις υψηλής ταχύτητας υπάρχουν στο σύστημα όταν βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Το παρακάτω σχήμα αναπαριστά τον χώρο κατάστασης για ένα δι-διάστατο μοντέλο κίνησης.



Σχήμα 2.5: Χώρος καταστάσεων για ένα δι-διάστατο μοντέλο κίνησης.

Επίσης, παρακάτω θα δούμε 3 διαγράμματα μεταβάσεων καταστάσεων ενός δι-διάστατου μοντέλου κίνησης[8].



Σχήματα 2.6_{α,β,γ}: Διαγράμματα μεταβάσεων καταστάσεων ενός δι-διάστατου μοντέλου κίνησης.

Από το παραπάνω σχήματα προκύπτουν οι εξισώσεις μονίμου καταστάσεως:

$$(\lambda_1 + \lambda_2 + i\mu_1 + j\mu_2)P_{ij} = \lambda_1 P_{i-1,j} + \lambda_2 P_{i,j-1} + (i+1)\mu_1 P_{i+1,j} + (j+1)\mu_2 P_{i,j+1}, \quad 0 \leq i+mj \leq n-m$$

Από το διάγραμμα α. (2.14)

$$(\lambda_1 + i\mu_1 + j\mu_2) P_{ij} = \lambda_1 P_{i-1,j} + \lambda_2 P_{i,j-1} + (i+1)\mu_1 P_{i+1,j}, \quad n-m < i+mj < 0.$$

Από το διάγραμμα β. (2.15)

$$(i\mu_1 + j\mu_2) P_{ij} = \lambda_1 P_{i-1,j} + \lambda_2 P_{i,j-1}, \quad i+mj = n \quad (3) \quad \text{όπου } P_{ij} = 0 \text{ για } i, j < 0.$$

Από το διάγραμμα γ. (2.16)

Συμβολίζοντας τα φορτία κίνησης με $\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}, i=1,2$, μπορεί να δειχθεί ότι η λύση της μορφής γινομένου (product form solution) ικανοποιεί τις παραπάνω 3 σχέσεις:

$$P_{ij} = \frac{\alpha_1^i \alpha_2^j}{i! j!} P_{00} \quad (2.17)$$

Με την συνθήκη κανονικοποίησης, το P_{00} ισούται με:

$$P_{00} = \left(\sum_{j=0}^s \sum_{i=0}^{n-mj} \frac{\alpha_1^i \alpha_2^j}{i! j!} \right)^{-1}. \quad (2.17\alpha)$$

Όπου $s=[n/m]$ αναπαριστά το ακέραιο μέρος

Από την (2.17), οι πιθανότητες απωλείας $B1$ και $B2$ για τις κλήσεις χαμηλής και υψηλής ταχύτητας είναι :

$$B1 = \sum_{j=0}^s P_{n-mj,j} = P_{00} \sum_{j=0}^s \frac{\alpha_1^{n-mj} \alpha_2^j}{(n-mj)! j!} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} B2 &= \sum_{i=0}^k P_{is} \sum_{j=0}^{s-1} \sum_{i=n-mj-m+1}^{n-mj} P_{ij} = \\ &= P_{00} \left(\frac{\alpha_2^2}{s!} \sum_{i=0}^k \frac{\alpha_1^i}{i!} + \sum_{j=0}^{s-1} \sum_{i=n-mj-m+1}^{n-mj} P_{ij} \frac{\alpha_1^i}{i!} \frac{\alpha_2^j}{j!} \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

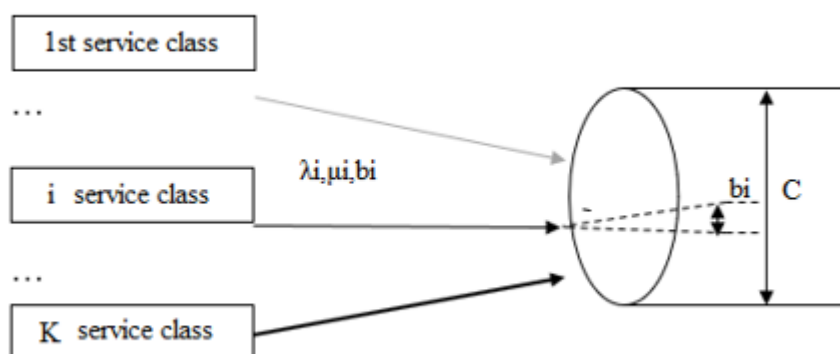
όπου $k = n \bmod m$ δηλαδή το υπόλοιπο της διαίρεσης n/m . Οι τύποι αυτοί είναι κλειστής μορφής και δεν είναι εύκολοι στην χρήση τους λόγω των εκθετικών σχέσεων και των παραγοντικών που διαθέτουν.

Τέλος, η απόδοση του καναλιού (trunk efficiency – occupancy) υπολογίζεται από:

$$n = \frac{1}{n} [a_1(1-B1) + a_2m(1-B2)] = A \frac{1-B}{n} \quad (2.20)$$

Με το A εννοούμε το συνολικό προσφερόμενο φορτίο, δηλαδή: $A = \alpha_1 + m\alpha_2$ και με το B τη μέση πιθανότητα απωλείας κλήσεως: $B = \frac{\alpha_1 + B1 + m\alpha_2 + B2}{A}$ (2.21_{α,β})

2.4.3 Γενικό μοντέλο Πολυδιάστατης Κίνησης



Σχήμα 2.7: Μοντέλο Πολυδιάστατης Κίνησης με K υπηρεσίες.

Αυτό το μοντέλο που παρουσιάζεται παραπάνω, είναι ένα σύστημα εξυπηρέτησης πολυδιάστατης κίνησης, το οποίο υπολογίζει την πιθανότητα απωλειών των κλήσεων, για συστήματα ρεαλιστικού μεγέθους. Για είσοδο διαθέτει κίνηση από διάφορες πηγές κίνησης K , η χωρητικότητα των πόρων είναι C μονάδες εύρους ζώνης (b.u.), ο τρόπος γέννησης των κλήσεων είναι τυχαίος (διαδικασία Poisson) και ο ρυθμός άφιξής τους είναι λ_i και ο ρυθμός εξυπηρέτησης είναι εκθετικά κατανομημένος με μέση τιμή μ_i^{-1} .

Στην περίπτωση που έχουμε αυθαίρετη διάθεση πόρων στο σύστημα, δηλαδή να μην υπάρχει κάποιος περιορισμός ο οποίος θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν, τότε b_i είναι οι μονάδες εύρους ζώνης (όχι απαραίτητα συνεχόμενες) που χρειάζεται μια κλήση i κατηγορίας και είναι εύκαιρες όταν καταφθάνει μία τέτοια κλήση, τότε αξιοποιούνται από την κλήση για όσο και ο χρόνος εξυπηρέτησης και στην συνέχεια απελευθερώνονται τα b_i . Αντιθέτως, αν μία αφιχθείσα κλήση δεν βρει διαθέσιμο εύρος ζώνης, τότε μπλοκάρεται και χάνεται (απώλεια κλήσης).

2.4.3.1 Τρόποι Διάθεσης Πόρων του συστήματος

Το διάστημα μόνιμης - οριακής κατάστασης, με n_i ο αριθμός των κλήσεων τύπου i , όταν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας (local balance), είναι $n = (n_1, n_2, \dots, n_k)$, το διάνυσμα οριακής κατάστασης όταν αυξάνεται κατά έναν ο αριθμός των κλήσεων τύπου i $n_i^+ = (n_1, \dots, n_{i-1}, n_i + 1, n_{i+1}, \dots, n_k)$ και $n_i^- = (n_1, \dots, n_{i-1}, n_i - 1, n_{i+1}, \dots, n_k)$ όταν μειώνεται κατά έναν. Όλες οι δυνατές καταστάσεις που μπορεί να υπάρξουν στο σύστημα είναι Ω , και εξαρτώνται από τον τρόπο διάθεσης πόρων στο σύστημα. Ένας τρόπος διάθεσης πόρων στο σύστημα είναι η **πολιτική πλήρους διάθεσης πόρων** (complete sharing policy), στην οποία οι κλήσεις ανταγωνίζονται για το διαθέσιμο εύρος ζώνης b και αν δεν υπάρχει τόσο ελεύθερο όσο απαιτείται, οι κλήσεις δεν γίνονται αποδεκτές και χάνονται.

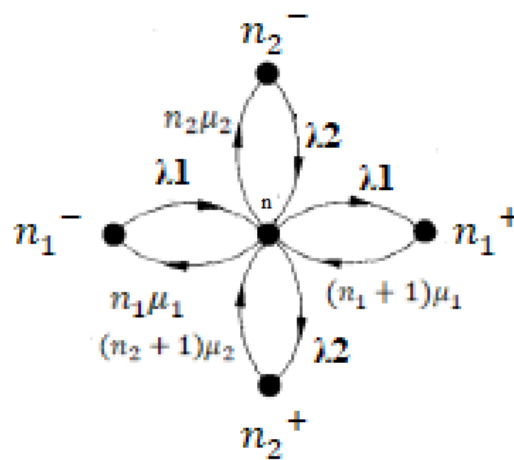
Έτσι, το Ω για αυτή την πολιτική είναι:

$$\Omega = \{n: 0 \leq n_1 \leq C\}, \quad n_2 = \sum_{i=1}^K n_i b_i$$

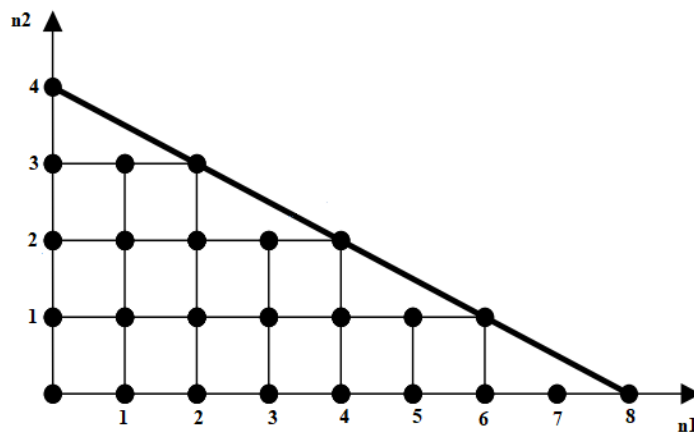
η κάθε δυνατή κατάσταση προέρχεται από την : $n_1 b_1 + n_2 b_2 \leq C$ και τα σημεία από : C/b_2 και C/b_1 .

Παράδειγμα:

Αν έχουμε 2 υπηρεσίες σε ένα σύστημα, με απαίτηση κλήσεων $b_1=1$ και $b_2=2$ μονάδες εύρους ζώνης και με χωρητικότητα $C=8$ trunks, θα ισχύει $n_1 + 2n_2 \leq 8$, τα σημεία 4 και 8 προκύπτουν από τις σχέσεις $\frac{C}{b_2}$ και $\frac{C}{b_1}$ και το σύνολο των καταστάσεων Ω που διαθέτουμε είναι 25 [1]:



Σχήμα 2.8: Διάγραμμα μεταβάσεων των καταστάσεων.



Σχήμα 2.9: Σύνολο των καταστάσεων πολιτικής εύρους διάθεσης.

2.4.3.1 Ανάλυση συστήματος Πολυδιάστατης Κίνησης

Η πιθανότητα απώλειας κλήσεων του τύπου i με b_i μονάδες εύρους ζώνης και Ω το σύνολο των καταστάσεων θα είναι:

$$P_{b_i} = \sum_{n \in B_i} P(n), \quad B_i^+ = \{n \in \Omega : n_i^+ \in \Omega\} \quad (2.22)$$

Όταν, αντί να έχουμε πολλές κατηγορίες κινήσεων έχουμε μόνο μία, ισχύει η οριακή πιθανότητα να υπάρχουν στο σύστημα r κλήσεις, μετά από κάποια διάρκεια:

$$P_r = \frac{\frac{a^r}{r!}}{\sum_{i=0}^s \frac{a^i}{i!}}, \quad r=0,1,\dots,s \text{ με το } r \text{ εννοούμε τους κατειλημμένους πόρους του συστήματος.}$$

Πρόκειται για την κατανομή Erlang, που η άφιξη των κλήσεων ακολουθούν Poisson κατανομή, ενώ οι ρυθμοί εξυπηρέτησης εκθετική. Στην άλλη περίπτωση, των πολλών κατηγοριών κλήσεων ισχύει η σχέση που αναφέρθηκε στις προηγούμενες σελίδες, η (2.17):

$$P_{ij} = \frac{\alpha_1^i \alpha_2^j}{i! j!} P_{00}$$

Από το διάγραμμα μετάβασης των καταστάσεων από την Μαρκοβιανή αλυσίδα K διαστάσεων, παίρνουμε την σχέση, για αυθαίρετο τρόπο διάθεσης πόρων, $P(n)$ την πιθανότητα μονίμου καταστάσεως, ως προσφερόμενο φορτίο $a_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$,

$$\text{Και } P(n) = G^{-1} \left(\prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!} \right) \quad (2.23)$$

$$\text{με } G \equiv G(\Omega) = \sum_{n \in \Omega} \left(\prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!} \right) \quad (2.24)$$

ως $G(\Omega)$ αναφέρεται η σταθερά κανονικοποίησης.

2.4.3.2 Πιθανότητα Απωλείας Κλήσεων με Αναδρομικό τύπο

Σε ένα σύστημα πλήρους διάθεσης πόρων, το $G(\Omega)$ ορίζεται και ως $G(C,K)$. Για να υπολογιστεί η πιθανότητα P_{b_i} απωλείας κλήσης κατηγορίας i , παίρνουμε το υποσύνολο του Ω , το $\Omega_i = \{n \in \Omega : nb \leq C - b_i\}$, [8] δηλαδή το σύνολο των καταστάσεων όπου ακριβώς i γραμμές (trunks) είναι κατειλημμένες.

Οπότε η πιθανότητα απωλείας είναι:

$$P_{b_i} = 1 - \sum_{n \in \Omega_i} P(n) \quad (2.25)$$

και με βάση την (2.24) προκύπτει η:

$$P_{b_i} = 1 - \frac{\sum_{n \in B_i} \prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!}}{\sum_{n \in B_i} \prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!}} = 1 - \frac{G(C-b_i, K)}{G(C, K)} \quad (2.25a)$$

Τώρα, η πιθανότητα να έχουμε j κατειλημμένες γραμμές σε κατάσταση ισορροπίας είναι: $q(j) = \sum_{n \in \Omega_j} P(n) = \sum_{n \in B_j} \prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!} G^{-1}$ (2.25β)

Ενώ η πιθανότητα απωλείας κλήσεως $P_{b_i} = \sum_{\{n: nb > c - b_i\}} P(n)$ (2.25γ)

Για τον υπολογισμό μεγάλης ακρίβειας των τιμών, $q(j)$, χρειαζόμαστε τον αναδρομικό τύπο των Kaufman – Roberts:

$$q(j) = \begin{cases} 1 & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{i=1}^K a_i b_i q(j - b_i) & \text{για } j = 1, \dots, C \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.26)$$

$q(j)$ είναι μη κανονικοποιημένη πιθανότητα να υπάρχουν j κατειλημμένες γραμμές στο σύστημα.

Αυτή η σχέση είναι μία εξίσωση ισορροπίας μιας διαδικασίας γέννησης με ρυθμό $\lambda_j q(j - b_i)$ και θανάτου με ρυθμό $\mu_j q(j)$.

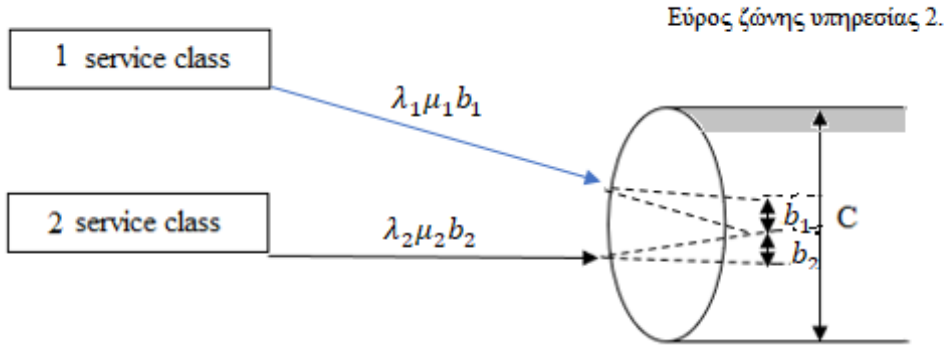
Με την συνθήκη κανονικοποίησης, διαιρούμε με

$\sum_{j=0}^C q(j)$, (α) σχέση, ώστε η (α) να ισούται με την μονάδα.

προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια για τον υπολογισμό της πιθανότητας απωλείας κλήσεως.

2.4.4 Πολιτική Δέσμευσης Εύρους Ζώνης

Έχοντας ένα σύστημα, πολυδιάστατης κίνησης με πολλές υπηρεσίες, διαφορετικού εύρους ζώνης, που ανταγωνίζονται για να χρησιμοποιήσουν τους διαθέσιμους υπάρχοντες κοινούς πόρους που υπάρχουν στο σύστημα, είναι προφανές ότι κάποιες κλήσεις θα εξυπηρετούνται ευκολότερα και κάποιες άλλες πιο σπάνια, έως και καθόλου, ειδικά αυτές που έχουν υψηλότερο αριθμό απαιτήσεων (video). Αυτές θα μπορούν να διεκπεραιωθούν όταν όλο το σύστημα θα είναι κενό. Γι' αυτό το λόγο, για την εξισορρόπηση της πιθανότητας απωλείας κλήσεων των υπηρεσιών, υπάρχει η **πολιτική δέσμευση εύρους ζώνης** (trunk reservation policy). Επεξηγηματικά, ένα ποσοστό του διαθέσιμου εύρους ζώνης του συστήματος, καλείται παράμετρος δέσμευσης εύρους ζώνης, δεσμεύεται για να ευνοηθούν οι κατηγορίες κίνησης με υψηλότερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα.



Σχήμα 2.10: Μοντέλο πολυδιάστατης κίνησης με σύστημα δέσμευσης εύρους ζώνης.

Για την εύρεση ακριβούς αριθμού δέσμευσης εύρους ζώνης κάθε υπηρεσίας για την εξισορρόπηση της πιθανότητας απωλείας κλήσεων, θα πρέπει να προσθέσουμε για κάθε υπηρεσία τις μονάδες εύρους ζώνης ανά κλήση μιας υπηρεσίας και το εύρος ζώνης που δεσμεύεται από αυτήν. Το τελικό αποτέλεσμα, επιβάλλεται να είναι ίσο για κάθε υπηρεσία, ώστε να αξιοποιηθεί και η πολιτική δέσμευση εύρους ζώνης και οι πιθανότητες απωλείας κλήσεων να είναι ίδιες για κάθε κλήση.

Δηλαδή να ισχύει: $b_1+t_1 = b_2+t_2 = \dots = b_n+t_n$

2.4.4.1 Υπολογισμός Πιθανότητας Απωλειών Κλήσεων για σύστημα Δέσμευσης Εύρους Ζώνης

Σε ένα σύστημα με πλήθος διαφορετικών υπηρεσιών K , συνολικό αριθμό εξυπηρετητών C , με κατηγορία υπηρεσιών i , απαιτούμενο εύρος ζώνης b_i και προσφερόμενη κίνηση από την υπηρεσία a_i , οι κλήσεις υπηρεσίας i δεν θα εξυπηρετείται όταν ο αριθμός τους είναι μεγαλύτερος από t_i μονάδες εύρους ζώνης, οπότε για να εξυπηρετηθούν όλες ισότιμα, εφαρμόζουμε την πολιτική δέσμευση εύρους ζώνης. Έτσι, μπορούμε να υπολογίσουμε τις πιθανότητες απωλείας κλήσεων για συστήματα που εφαρμόζεται δέσμευση εύρους ζώνης.

Οπότε αξιοποιούμε την σχέση (2.25_γ) και έχουμε:

$$q(j) = \begin{cases} 1 & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{i=1}^K a_i D_i q(j - b_i) q(j - b_i) & \text{για } j = 1, \dots, C \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\text{με το } D_i(j - b_i) = \begin{cases} b_i & \text{για } j \leq C - t(i) \\ 0 & \text{για } j > C - t(i) \end{cases} \quad (2.27_a)$$

$$P_{b_i} = \sum_{j=0}^{b_i+t(i)-1} G^{-1} q(C - j)$$

$$\text{Με } G = \sum_{j=0}^C q(j) \quad (2.27\beta)$$

Όταν το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση j , μία κλήση γίνεται δεκτή όταν $j \leq C - t(i)$, δηλαδή όταν δεν ξεπερνά τη συνολική διαθέσιμη χωρητικότητα που προκύπτει και χάνεται όταν $j > C - t(i)$ [9].

2.5 Το μοντέλο Επανάκλησης με Πολιτική Πλήρους Διάθεσης Εύρους Ζώνης

Με τον όρο "ελαστική κυκλοφορία" εννοούμε τις κλήσεις των οποίων το καθορισμένο εύρος ζώνης μπορεί να συμπιεστεί ή να επεκταθεί κατά τη διάρκεια της ζωής τους στο σύστημα. Η μοντελοποίηση της ελαστικής κίνησης σε επίπεδο κλήσης μπορεί να βασιστεί στο κλασικό Μοντέλο Απώλειας Πολλαπλών Erlang (EMLM) το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά, τόσο σε ενσύρματα περιβάλλοντα όσο και ασύρματα, για να μπορέσουν να μοντελοποιήσουν συστήματα που εξυπηρετούν κλήσεις διαφορετικών υπηρεσιών, με διαφορετικές απαιτήσεις κίνησης και εύρους ζώνης.

2.5.1 Μοντέλο SRM.

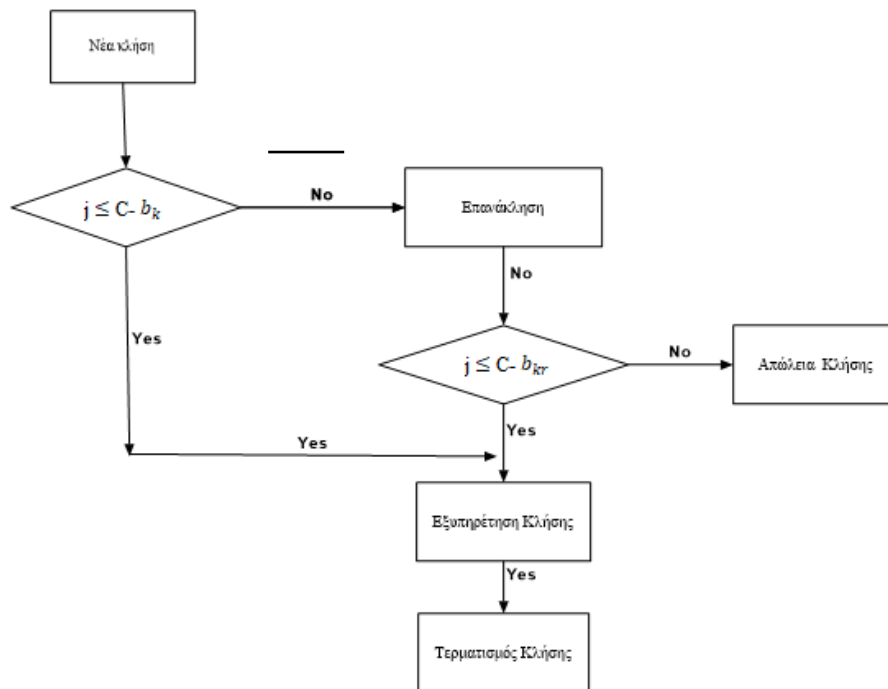
Στο EMLM (Erlang Multi-rate Loss Model), κλήσεις διαφορετικών κατηγοριών υπηρεσιών φθάνουν σε μια σύνδεση χωρητικότητας C , ακολουθώντας τη διαδικασία Poisson και οι χρόνοι εξυπηρέτησης την εκθετική κατανομή. Οι κλήσεις ανταγωνίζονται για το διαθέσιμο εύρος ζώνης, σύμφωνα με την πολιτική πλήρης κοινής χρήσης (όλες οι κλήσεις ανταγωνίζονται για όλους τους πόρους) [6].

Ας πάρουμε να εξετάσουμε την περίπτωση όπου, κατά την άφιξη της κλήσης στο σύστημα να μην υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης και η κλήση να απορρίπτεται. Με τη χρήση του μοντέλου απλής επανάκλησης (single retry loss model, SRM), η κλήση έχει την ευκαιρία να προσπαθήσει ξανά, μόνο που αυτή τη φορά θα ζητήσει να εξυπηρετηθεί χρησιμοποιώντας μικρότερο εύρος ζώνης από το παλιό, $b_{2r} < b_2$ και νέο ρυθμό εξυπηρέτησης μ_{2r} , ώστε η μέση τιμή του να είναι μεγαλύτερη από αυτήν που είχε στην πρώτη προσπάθεια κλήσης, $\mu_{2r}^{-1} > \mu_2^{-1}$. Οπότε, πάλι εξετάζεται η τιμή του νέου j , όπου αν είναι εντός του εύρους τιμών η κλήση γίνεται δεκτή, αν δεν είναι, η κλήση θα αποκλειστεί, εκτός και αν ζητήσει να προσπαθήσει ξανά, απλά με ακόμη μικρότερο εύρος ζώνης. Έτσι, θα ακολουθήσει πάλι η διαδικασία επανελέγχου των τιμών και των εύρους ζώνης και θα συνεχιστεί η ίδια διαδικασία.

Μία κλήση k κατηγορίας κίνησης, για να επαναληφθεί με μικρότερο εύρος ζώνης και να γίνει αποδεκτή θα πρέπει να ισχύει $C - b_k \geq j > C - b_{k'}$ και με $j = \sum_{k+1}^k (n_k b_k + n_{kr} b_{kr})$. Στο μοντέλο απλής επανάκλησης χάνεται η τοπική ισορροπία, οπότε δεν ισχύει η λύση γινομένου. Σε αυτή την περίπτωση, οι καταστάσεις είναι πολύ περισσότερες, για SRM θα είναι $\hat{n} = (n_1 n_{1r}, n_2 n_{2r}, \dots, n_k n_{kr})$ [10]. Παίρνουμε

προσεγγιστικούς αναδρομικούς τύπους υπολογισμού της πιθανότητας απώλειας κλήσεως και της εκμετάλλευσης της χωρητικότητας της ζεύξης.

Οπότε, όταν το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση (n_1, n_2, n_{2r}) και μεταβαίνουμε στην κατάσταση $(n_1, n_2, n_{2r} + 1)$, δηλαδή έχουμε άφιξη κλήσης επανάκλησης, σημαίνει ότι το σύστημα στην αρχική του κατάσταση δεν ήταν σε θέση να δεχτεί την κλήση, λόγω έλλειψης εύρους ζώνης και ισχύει $j > C - b_2$.



Σχήμα 2.11: Μηχανισμός εξυπηρέτησης κλήσης στο μοντέλο απλής επανάκλησης.

2.5.2 Μοντέλο Πολλαπλών Επανακλήσεων, MRM.

Αν όμως τα βήματα αυτά επαναληφθούν πολλές φορές και ξεκινήσει με αρκετά μεγάλη χωρητικότητα και μεγάλο εύρος ζώνης και καταλήξει να εξυπηρετείται με όλο και μικρότερο εύρος ζώνης και παράλληλα αυξημένο χρόνο λειτουργίας, ο οποίος είναι εκθετικά κατανομημένος, τότε θα έχουμε το μοντέλο απωλειών πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης πολλαπλών επανακλήσεων με πολιτική πλήρους διάθεσης εύρους ζώνης (multi retry loss model – MRM) [10].

Στα προτεινόμενα μοντέλα, όταν μια κλήση επανάληψης επιχειρεί να συνδεθεί στο σύστημα και η τελευταία απαίτηση εύρους ζώνης είναι υψηλότερη από το διαθέσιμο εύρος ζώνης, το σύστημα δέχεται αυτή την κλήση μετά τη συμπίεση. Αντίθετα, Μια κλήση επανάληψης απορρίπτεται και χάνεται από το σύστημα όταν το συμπιεσμένο εύρος ζώνης είναι λιγότερο από το ελάχιστο προηγούμενο απαιτούμενο εύρος [6].

2.5.3 Αναδρομικός τύπος Kaufman στο μοντέλο SRM

Σε ένα σύστημα πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης, μία ζεύξη χωρητικότητας C μονάδων εύρους ζώνης (b.u.) εξυπηρετεί 2 κατηγορίες κίνησης, εύρους ζώνης b_1 και b_2 , με ρυθμό άφιξης λ_1 και λ_2 και μέσο χρόνο εξυπηρέτησης $\frac{1}{\mu_1}$ και $\frac{1}{\mu_2}$. Οι κλήσεις της 1ης κατηγορίας δεν έχουν παραμέτρους επανάκλησης $b_{1r} = 0$ και της 2ης b_{2r} και μ_{2r}^{-1} και έχουμε την αναδρομική σχέση:

$$a_k q(j - b_k) = y_k(j) q(j) \quad j=1, \dots, C \quad k=1,2,$$

Που είναι μία εξίσωση τοπικής ισορροπίας (local balance equation) και ισχύει για το μοντέλο απωλειών πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης, με q να σημαίνει ότι j γραμμές είναι κατειλημμένες, y_k το μέσο πλήθος κλήσεων και a το προσφερόμενο φορτίο κίνησης. Αν $a_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k}$ η εξίσωση τοπικής ισορροπίας γίνεται:

$$\lambda_2 q(j - b_{2r}) = y_{2r}(j) \mu_{2r} q(j) \quad \text{με } j - b_{2r} > C - b_2 \quad (2.28)$$

με b_{2r} το νέο μικρότερο εύρος ζώνης αν η προηγούμενη κλήση απορριφθεί ($j > C - b_2$) και ζητήσει να εξυπηρετηθεί ξανά.

Στην συνέχεια, διαιρώ με μ_{2r} και πολλαπλασιάζω με b_{2r} την εξίσωση τοπικής ισορροπίας:

$$a_k q(j - b_k) = y_k(j) q(j) \quad \text{και παίρνω την}$$

$$a_{2r} q(j - b_{2r}) = y_2(j) b_{2r} q(j) \quad \text{με } C \geq j \geq C - (b_2 - b_{2r}) \quad (2.29)$$

και $a_{2r} = \frac{\lambda_2}{\mu_{2r}}$ το προσφερόμενο φορτίο της 2ης κατηγορίας.

Από την εξίσωση τοπικής ισορροπίας αν την πολλαπλασιάσω με b_k έχω:

$$a_k b_k q(j - b_k) = y_k(j) q(j) b_k$$

Αν έχω 2 κατηγορίες κίνησης τότε θα πάρω:

$$a_1 b_1 q(j - b_1) + a_2 b_2 q(j - b_2) = y_1(j) q(j) b_1 + y_2(j) q(j) b_2 \quad (2.30)$$

Προσθέτοντας τις τελευταίες 2 σχέσεις έχω:

$$a_1 b_1 q(j - b_1) + a_2 b_2 q(j - b_2) + a_{2r} b_2 q(j - b_{2r}) =$$

$$y_1(j) q(j) b_1 + y_2(j) q(j) b_2 + y_{2r}(j) q(j) b_{2r}.$$

Επειδή $y_1(j) b_1 + y_2(j) b_2 + y_{2r}(j) b_{2r} = j$ τελικά παίρνω την σχέση

$$a_1 b_1 q(j - b_1) + a_2 b_2 q(j - b_2) + a_{2r} b_{2r} q(j - b_{2r}) = j q(j)$$

$$\text{με } C \geq j \geq C - (b_2 - b_{2r}) \quad (2.31)$$

$$\text{Επίσης } y_1(j) b_1 + y_2(j) b_2 = 1 \text{ όταν } j=1, \dots, C - (b_2 - b_{2r}) \quad (2.32)$$

Το κατεχόμενο ζεύγος ζεύξης από τις επαναλαμβανόμενες κλήσεις είναι αμελητέο όταν η πληρότητα συνδέσμου είναι μικρότερη ή ίση με το επαναλαμβανόμενο όριο, δηλαδή όταν $j \leq C - (b_k - b_{kr})$. Δηλαδή το y_{2r} είναι αμελητέο σε σχέση με την τιμή του $y_1(j) b_1 + y_2(j) b_2$ και έχουμε την ην εφαρμογή της Μετανάστευσης (Migration Approximation) και η σχέση γράφεται [6]:

$$a_1 b_1 q(j - b_1) + a_2 b_2 q(j - b_2) = j q(j) \quad (2.33)$$

Τελικά, ο απλός αναδρομικός τύπος που παίρνω είναι :

$$q(j) = \begin{cases} 1 & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} [\sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K a_{kr} b_{kr} \gamma_k(j) q(j - b_{kr})] & \\ 0 & \text{άλλο} \end{cases} \quad (2.34)$$

με $q(j)$ να είναι μη κανονικοποιημένη πιθανότητα και $q(j)=1$ όταν $j=0$.

Η σχέση $D_k(j - b_k)$ ισούται με b_k όταν $j \leq C - t_k$ και με 0 όταν $j > C - t_k$ και $\gamma_k(j)$ ισούται με 1 όταν $j > C - (b_k - b_{kr})$, σε κάθε άλλη περίπτωση είναι 0.

Τέλος, θα διαιρέσω με το $\sum_{j=0}^C q(j)$ για να την κανονικοποιήσω:

Η πιθανότητα απώλειας κατηγορίας k και με εύρος ζώνης b_k :

$$P'b_k = \frac{q(j)}{\sum_{j=C-b_k+1}^C q(j)} \quad (2.35)$$

$$\text{Και με εύρος ζώνης } b_{kr} : Pb_{kr} = \frac{q(j)}{\sum_{j=C-b_{kr}+1}^C q(j)} \quad (2.36)$$

Η δεσμευμένη πιθανότητα απώλειας κλήσης που έχει απορριφθεί με αρχικό εύρος ζώνης είναι :

$$Pb_{kr} = \frac{Pb_k}{P'b_{kr}} \quad (2.37)$$

2.5.3.1 Παράδειγμα Πολιτικής Εύρους Ζώνης στο SRM με Αναδρομικό τύπο

Έχουμε ένα σύστημα SRM με χωρητικότητα $C=5$, 2 κατηγορίες κίνησης K απαιτούν εξυπηρέτηση με εύρος ζώνης $b_1 = 1$ και για την 2^η κατηγορία $b_2 = 3$, η οποία αν δεν εξυπηρετηθεί, μπορεί να προσπαθήσει ξανά με $b_{2r} = 2$. Οι ρυθμοί άφιξης είναι $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ και ο ρυθμός εξυπηρέτησης $\mu_1 = \mu_2 = 1$ και της 2^{ης} κατηγορίας μ_2^{-1} και μ_{2r}^{-1} και γι' αυτές ισχύει [10]:

$$b_2 \mu_2^{-1} = b_{2r} \mu_{2r}^{-1} = \text{const}, \quad \mu_{2r}^{-1} = \frac{b_2}{b_{2r}} \mu_2^{-1} = 3/2 \text{ οπότε } \mu_{2r} = 2/3.$$

Οι πιθανότητες κατειλημμένων γραμμών $q(j)$ και $q'(j)$ είναι:

$$q(0)=1$$

$$1.q(1)= a_1 b_1 q(1 - b_1) + a_2 b_2 q(1 - b_2) = 1.q(0)+0=1$$

$$2.q(2)= a_1 b_1 q(2 - b_1) + a_2 b_2 q(2 - b_2) \Rightarrow 1.q(1)+0=1 \Rightarrow q(2)=0,5$$

$$3.q(3)= a_1 b_1 q(3 - b_1) + a_2 b_2 q(3 - b_2) = 1.q(2)+ 3.q(0) \Rightarrow q(3)=1,1666$$

$$4.q(4)= a_1 b_1 q(4 - b_1) + a_2 b_2 q(4 - b_2) = 1.q(3)+ 3.q(1) \Rightarrow q(4)=1,041666667$$

$$5.q(5)= a_1 b_1 q(5 - b_1) + a_2 b_2 q(5 - b_2) + a_{2r} b_{2r} q(5 - b_{2r}) = 1.q(4)+ 3.q(2)+ 1,5.2.q(3) \Rightarrow q(5)=(1,041666667 + 3.0,5 + 3.1,1666) /5= 1,2083292$$

Και για το $q'(j)$ προσθέτω όλα τα $q(j)$.

$$G=\sum_{j=0}^5 q(j)= 1+1+0,5+1,1666+1,041666667+1,2083292= 5,916595867$$

Εύρεση πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων Pb_1 , Pb_2 και Pb_{2r} :

$$Pb_1: j>C-b_1 \Rightarrow j>4 \Rightarrow Pb_1=q(5)/G= 0,2042270973313 \text{ και η ακριβής } 0,206923$$

$$Pb_2: j>C-b_2 \Rightarrow j>2 \Rightarrow Pb_2 = (q(3) + q(4) + q(5))/G=$$

$$(1,1666 + 1,041666667 + 1,2083292) / 5,916595867 = 3,915995867 / 5,916595867 = 0,6$$

και η ακριβής λύση είναι 0,552262

και

$$Pb_{2r}: j>C-b_{2r} \Rightarrow j>3 \Rightarrow Pb_{2r} = (q(4) + q(5))/G=$$

$$2,249995867 / 5,916595867 = 0,380285395619 \text{ με ακριβή λύση } 0,377639.$$

2.5.4 Μοντέλο Πολλαπλών Επανακλήσεων, MRM.

Σε ένα σύστημα MRM, ο αριθμός των επανακλήσεων κατηγορίας k , είναι $S(k)$ και το εύρος ζώνης μειώνεται κατά $b_k > b_{kr1} > \dots > b_{krs} > b_{krs(k)}$ με το b_{krs} να είναι οι μονάδες εύρους ζώνης στην s επανάληψη. Η κλήση γίνεται δεκτή στο σύστημα όταν ικανοποιείται η σχέση: $C - b_{krs-1} < j < C - b_{krs}$. Σύμφωνα με τις σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο παραπάνω μοντέλο απλής επανάκλησης, ο αναδρομικός προσεγγιστικός τύπος για το MRM θα είναι :

$$q(j) = \begin{cases} 1 & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} & [\sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S(k)} a_{krs} b_{krs} \gamma_{ks}(j) q(j - b_{krs})] \\ 0 & \text{άλλο} \end{cases}$$

(2.39)

με $a_{kr} = \lambda_k \mu_{kr}^{-1}$, $\gamma_k(j)=1$ με $j > C - (b_{krs-1} - b_{krs})$, αλλιώς έχουμε $\gamma_k(j)=0$.

Οι κανονικοποιημένες πιθανότητες θα είναι: $q'(j) = \frac{q(j)}{G}$ με το $G = \sum_{j=0}^C q(j)$

Η δεσμευμένη πιθανότητα απώλειας κλήσεων

με το αρχικό εύρος ζώνης είναι: $Pb_{krs(k)} = \frac{Pb_k}{Pb_k}$

με το τελικό $b_{krs(k)}$: $Pb_k = \sum_{j=C-b_{krs(k)+1}}^C G^{-1}q(j)$

και για εύρος b_{krs} : $Pb_{krs(k)} = \frac{\sum_{j=C-b_{krs}+1}^C q(j)}{\sum_{j=C-b_{krs-1}+1}^C q(j)}$

Παράδειγμα:

Έχουμε ένα σύστημα MRM με χωρητικότητα $C=4$, 2 κατηγορίες κίνησης K απαιτούν εξυπηρέτηση με εύρος ζώνης $b_1=1$ και για την 2^η κατηγορία $b_2=3$, η οποία αν δεν εξυπηρετηθεί, μπορεί να προσπαθήσει ξανά με $b_{2r1} = 2$ και αν δεν γίνει δεκτή να προσπαθήσει πάλι με ακόμη μικρότερο $b_{2r2} = 1$. Οι ρυθμοί άφιξης είναι $\lambda_1=\lambda_2=1$ και ο ρυθμός εξυπηρέτησης $\mu_1=\mu_2=1$, $\mu_{2r1} = 0,5$ και $\mu_{2r2} = 0,25$ και τα φορτία θα είναι $\alpha_{2r1} = 2$ και $\alpha_{2r2} = 4$.

Οι πιθανότητες κατελημμένων γραμμών προκύπτουν από τον αναδρομικό τύπο και με βάση τον τύπο 2.38:

$$q(j) = [\sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S(k)} a_{krs} b_{krs} \gamma_{ks}(j) q(j - b_{krs})]$$

Όταν $j > 4 - 3 + 2 \Rightarrow j > 3$, $\gamma_{22}(j) = 1$ και όταν $j > 4 - 2 + 1 \Rightarrow j > 3$, $\gamma_{21}(j) = 1$

Οπότε:

$$q(0) = 1$$

$$1q(1) = a_1 b_1 q(1 - b_1) + a_2 b_2 q(1 - b_2) = 1.1.q(0) + 1.3q(-2) = 1 \Rightarrow q(1) = 1$$

$$2q(2) = a_1 b_1 q(2 - b_1) + a_2 b_2 q(2 - b_2) = 1.1.q(1) + 1.3q(-1) = q(1) \Rightarrow q(2) = 0,5$$

$$3q(3) = a_1 b_1 q(3 - b_1) + a_2 b_2 q(3 - b_2) = 1.1.q(2) + 1.3q(0) = 0,5 + 3 = 3,5 \Rightarrow q(3) = 3,5/3 = 1,16667$$

$$4q(4) = a_1 b_1 q(4 - b_1) + a_2 b_2 q(4 - b_2) + a_{2r1} b_{2r1} q(4 - b_{2r1}) + a_{2r2} b_{2r2} q(4 - b_{2r2}) = \\ \Rightarrow 4q(4) = 1.1.q(3) + 1.3.q(1) + 2.2.q(2) + 4.1.q(3) = 10,83335 \Rightarrow \\ \Rightarrow q(4) = 10,83335/4 = 2,7083375.$$

Το άθροισμα των q είναι η σχέση (2.40):

$$G = \sum_{j=0}^C q(j) = q(0) + q(1) + q(2) + q(3) + q(4) = 6,3750075.$$

Κανονικοποιώ τις πιθανότητες:

$$q'(0) = q(0)/G = 0,15686256$$

$$q'(1) = q(1)/G = 0,15686256$$

$$q'(2) = q(2)/G = 0,07843128$$

$$q'(3) = q(3)/G = 0,183006843$$

$$q'(4) = q(4)/G = 0,424836755$$

Οι πιθανότητες απώλειας κλήσεις :

$$Pb_1 = \sum_{j=C-b_1+1}^C q'(j) = \sum_{j=4}^4 q'(j) = q'(4) = 0,424836755$$

$$Pb_2 = \sum_{j=C-b_2+1}^C q'(j) = \sum_{j=2}^4 q'(j) = q'(2) + q'(3) + q'(4) = 0,686274878$$

$$Pb_{2r1} = \sum_{j=C-b_{2r1}+1}^C q'(j) = \sum_{j=3}^4 q'(j) = q'(3) + q'(4) = 0,607843598$$

$$Pb_{2r2} = \sum_{j=C-b_{2r2}+1}^C q'(j) = \sum_{j=4}^4 q'(j) = q'(4) = 0,424836755$$

3 Εφαρμογή του μοντέλου Πολυδιάστατης Κίνησης σε SDN/NFV δίκτυα 5ης γενιάς

3.1 Εισαγωγή

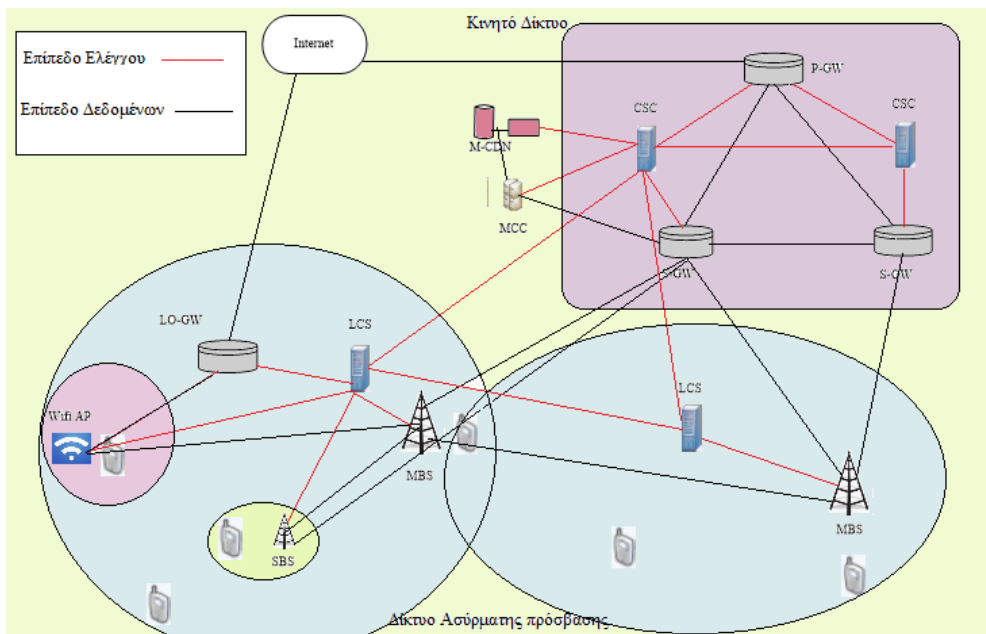
Ο γρήγορος πολλαπλασιασμός των smartphones εισήγαγε την ευκαιρία για καινοτόμες υπηρεσίες και εφαρμογές στον τομέα των κινητών τηλεφώνων. Ταυτόχρονα, η βιομηχανία κινητών επικοινωνιών κινείται προς πιο προηγμένες τεχνολογίες δικτύωσης και επικοινωνίας. Ένας από τους παράγοντες που επέβαλαν αυτή την κίνηση είναι η αδυναμία της τρέχουσας τεχνολογίας μακροχρόνιας εξέλιξης (LTE) να διασφαλίσει επαρκώς χαμηλή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και να υποστηρίξει μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών και μεγάλους όγκους κυκλοφορίας. Παρά την εκτεταμένη ανάπτυξη πρόσθετων σταθμών βάσης (BS) και σημείων πρόσβασης (AP) τα τελευταία χρόνια, η αύξηση της κάλυψης και της χωρητικότητας των σημερινών δικτύων δεν επαρκεί για να εξασφαλιστεί η κατάλληλη ποιότητα της εμπειρίας (QoE) των χρηστών κινητών (MUs). Ως εκ τούτου, υπάρχουν πολλές προσπάθειες να ωθηθούν τα όρια, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη και ευέλικτη κινητικότητα και τη διαχείριση των ραδιοφωνικών πόρων (RRM - radio resource management) και την παροχή εγγενούς υποστήριξης σε πολλαπλές συνυπάρχουσες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RAT). Για το σκοπό αυτό, η SDN (software-defined networking) και η NFV (network function virtualization) θεωρούνται σημαντικές τεχνολογίες γενικής εφαρμογής και θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στα αναδυόμενα συστήματα 5ης γενιάς [7].

Έχοντας ένα εξελιγμένο οικοσύστημα για κινητά κυψελοειδή συστήματα 5G με αρχιτεκτονική δικτύου SDN και NFV στο RRM, που περιλαμβάνει: τον διαχωρισμό χρήστη / ελέγχου που ενεργοποιείται από το SDN, την εικονικοποίηση των λειτουργιών BS, που ενεργοποιείται από το NFV και την συνύπαρξη καθεστώτων πρόσβασης πολλαπλών καναλιών. Συγκεκριμένα, ο στόχος του μηχανισμού RRM είναι να διασφαλίσει την ποιότητα QoE των MU με αποτελεσματικό και ευέλικτο τρόπο. Για το σκοπό αυτό, μελετάται η εφαρμογή της γνωστής αναδρομής του Kaufman Roberts (KR), για την κατανομή των ραδιοφωνικών πόρων (RRA) καθώς και για τον καθορισμό διαφορετικών μέτρων του συστήματος, όπως οι πιθανότητες αποκλεισμού κλήσεων. Το CBP είναι μια μέτρηση που παραδοσιακά χρησιμοποιείται από τους τηλεπικοινωνιακούς φορείς για να καθορίσει την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS), η οποία αναφέρεται στην ικανότητα του δικτύου να παρέχει καλύτερη εξυπηρέτηση σε επιλεγμένο δίκτυο μεταφοράς. Από την άλλη πλευρά, η QoE αναφέρεται συνήθως στην αποδοχή μιας εφαρμογής ή υπηρεσίας, όπως υπονοείται από τον τελικό χρήστη. Η QoE μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά από την υψηλή CBP και τη χαμηλή QoS. Σε αυτή την εργασία, θεωρούμε μόνο την CBP ως παράγοντα που μπορεί να επηρεάσουν την QoE.

3.2 Αρχιτεκτονική Κυψελοειδούς δικτύου βασιζόμενο σε SDN/NFV

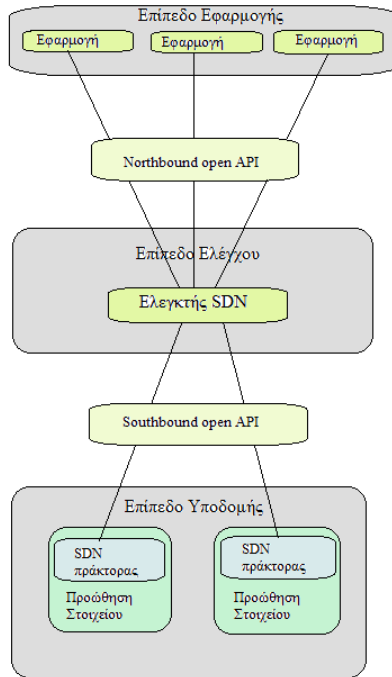
Αρχικά, περιγράφεται σύντομα η αρχιτεκτονική κυψελοειδούς δικτύου με βάση το SDN / NFV, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1, και τα κύρια στοιχεία της.

Η υλοποίηση ενός έξυπνου RAN διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό από τις τεχνολογίες SDN και NFV. Το SDN επιτρέπει την αφαίρεση και τη διαμόρφωση των λειτουργιών του δικτύου σε επίπεδο RAN. Κατά συνέπεια, μπορεί να εφαρμοστεί μια ιεραρχική αρχιτεκτονική ελέγχου, στην οποία το υψηλό επίπεδο ελέγχου ελέγχει τα χαμηλότερα στρώματα καθορίζοντας τις διαδικασίες και χωρίς την απαίτηση να έχουν πρόσβαση στις συγκεκριμένες λεπτομέρειες εφαρμογής των κάτω στρωμάτων. Μια τέτοια υλοποίηση, ωστόσο, απαιτεί μια σφαιρική άποψη του κυψελοειδούς δικτύου στο υψηλότερο στρώμα ελέγχου, που θα σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη την κατάλληλη αφαίρεση των κατώτερων στρωμάτων μέσω καλώς καθορισμένων διεπαφών ελέγχου. Αυτό είναι απαραίτητο για την ενεργοποίηση προγραμματιζόμενων λειτουργιών RRM, όπως το RRA και ο έλεγχος εισαγωγής κλήσεων (CAC). Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία NFV επιτρέπει την εκτέλεση προγραμμάτων ελέγχου, γενικού σκοπού σε πόρους υπολογιστών / αποθήκευσης. Αυτό είναι αντίθετο με την παραδοσιακή προσέγγιση στην οποία το BS αποτελείται από μια σφικτά συνδεδεμένη πλατφόρμα λογισμικού και υλικού. Ως εκ τούτου, ένα BS που βασίζεται σε NFV μπορεί να έχει ορισμένες λειτουργίες δικτύου υλοποιημένες ως φυσικές (PNF), ενώ άλλες ως εικονικές (VNFs). Ένα πλεονέκτημα των εικονικών λειτουργιών είναι ότι το υποκείμενο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά, δεδομένου ότι οι VNF λειτουργούν με κοινή υποδομή NFV (NFVI) [7].



Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική κυψελοειδούς δικτύου βασισμένη σε SDN / NFV.

Η αρχιτεκτονική του Σχήματος 3.1 στηρίζεται στην έννοια SDN των οποίων τα διαφορετικά στρώματα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Έννοια στρώσης σε δίκτυο που ορίζεται από το λογισμικό.

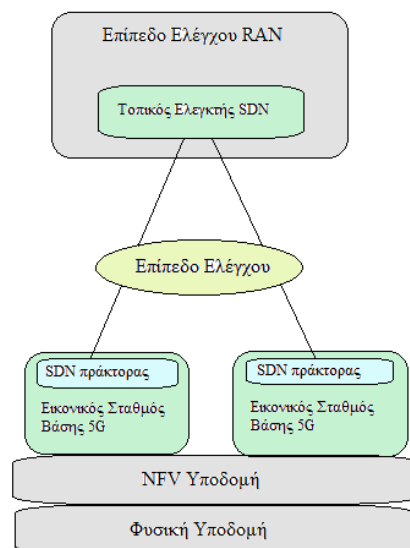
Στο Επίπεδο Ελέγχου, ο ελεγκτής SDN παρέχει μια συνολική εικόνα των διαθέσιμων υποκείμενων πόρων για μία ή περισσότερες εφαρμογές δικτύου που βρίσκονται στο επίπεδο εφαρμογής. Αυτή η επικοινωνία γίνεται χρησιμοποιώντας τη διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών (API) . Από την άλλη πλευρά, το API χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των στοιχείων προώθησης (FEs) που βρίσκονται στο επίπεδο Υποδομής. Η διαμόρφωση των FE γίνεται από τον ελεγκτή SDN ο οποίος στέλνει μηνύματα ελέγχου στους πράκτορες SDN που βρίσκονται εντός των FE.

Τα βασικά στοιχεία στο επίπεδο RAN είναι: μικρά κυψέλες BS (SBS), μακροστοιχεία BS (MBSs), WiFi APs, τοπικές πύλες πρόσβασης (LO-GWs) και MUs. Αυτές οι οντότητες ελέγχονται από τον τοπικό ελεγκτή SDN (LSC). Η γεωγραφική περιοχή του RAN αποτελείται από ένα σύμπλεγμα . Κάθε σύμπλεγμα αποτελείται συνήθως από πολλά κύτταρα και βρίσκεται υπό τον έλεγχο ενός μοναδικού LSC. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 1 το πρώτο σύμπλεγμα περιέχει ένα MBS, ένα SBS, ένα WiFi AP, ένα LO-GW και τέσσερα MUs, ενώ το δεύτερο σύμπλεγμα περιέχει ένα MBS και τρεις MUs. Τα MUs μπορούν να κινούνται ελεύθερα μεταξύ συμπλεγμάτων ή ακόμη και να ανήκουν σε περισσότερα από ένα σύμπλεγμα την ίδια στιγμή.

Όταν μια οντότητα δικτύου επιθυμεί να δημιουργήσει μια σύνδεση, στέλνει το αίτημα στην αντίστοιχη LSC του συμπλέγματος. Με τη λήψη της αίτησης, η LSC θα προσδιορίσει την κατάλληλη διεύθυνση προορισμού για τη ζητούμενη σύνδεση. Συγκεκριμένα, η LSC είτε θα διαβιβάσει το αίτημα στον κατάλληλο παραλήπτη εντός του συμπλέγματος (π.χ. MU ή MBS) είτε στο MCN, εάν ο παραλήπτης βρίσκεται έξω από το σύμπλεγμα. Για να μπορέσει να εκτελέσει αυτό το LSC διατηρεί τη γνώση της τοπολογίας του συμπλέγματος καθώς και των εξωτερικών συνδέσεων προς το MCN

και τις γειτονικές ομάδες. Η LSC είναι επίσης υπεύθυνη για το συντονισμό πολλαπλών RAT. Δηλαδή, παίρνει τις αποφάσεις RRA σε γεωγραφικές περιοχές όπου είναι διαθέσιμες πολλαπλές RAT (π.χ. LTE και WiFi). Στη λειτουργία ενεργοποίησης της προσωρινής μνήμης, η LSC λαμβάνει αποφάσεις προσωρινής αποθήκευσης, αξιοποιώντας τη γνώση του περιεχομένου και των διαθέσιμων πόρων εντός των συμπλεγμάτων. Μια άλλη σημαντική λειτουργία του LSC είναι η δρομολόγηση περιεχομένου εντός συμπλέγματος. Μετά την παραλαβή της αίτησης σύνδεσης από ένα MU, το LSC κατασκευάζει τη διαδρομή από την πηγή περιεχομένου (αν η πηγή βρίσκεται μέσα στο σύμπλεγμα) ή την οριακή οντότητα (αν η πηγή βρίσκεται εκτός του συμπλέγματος) προς την αιτούσα MU. Στη συνέχεια, η LSC τροποποιεί τους πίνακες ροής στα FE κατά μήκος της διαδρομής παράδοσης περιεχομένου. Τέλος, το LSC είναι υπεύθυνο για την κινητικότητα του MU εντός του συμπλέγματος. Ως εκ τούτου, οι πληροφορίες σχετικά με την κινητικότητα δεν χρειάζεται να αποστέλλονται στο MCN.

Η ενσωμάτωση του SDN με το NFV έχει σημαντικό ενδιαφέρον. Στο σχήμα 3.4, εμφανίζονται τα βασικά στοιχεία ενός εικονικού RAN. Οι πολλαπλοί εικονικοί σταθμοί βάσης (VBS) μπορούν να λειτουργούν στην κορυφή του NFVI, ουσιαστικά να μοιράζονται τους πόρους από το ίδιο φυσικό επίπεδο.



Σχήμα 3.4: Δίκτυο ραδιοεπικοινωνίας βασισμένο σε SDN / NFV.

Το MCN αποτελείται από την υποδομή κινητού cloud computing (MCC), από διακομιστές M-CDN, από πακέτα δεδομένων δικτύου (PDN) πυλών (PDN-GWs) και από τις πύλες εξυπηρέτησης (S-GWs). Ο έλεγχος εκτελείται από έναν ή περισσότερους ελεγκτές SDN πυρήνα (CSCs). Ένα CSC λαμβάνει και χειρίζεται τα αιτήματα σύνδεσης από το RAN μέσω των αντίστοιχων LSCs. Ένα CSC είναι επίσης υπεύθυνο για την αποθήκευση (π.χ. M-CDN), τον υπολογισμό (π.χ., το MCC), το φάσμα και τους

ενεργειακούς πόρους και για την παροχή υποστήριξης QoS. Τέλος, το PDN-GW προωθείται από / προς το Internet και άλλα εξωτερικά δίκτυα IP, ενώ το S-GW λαμβάνει / στέλνει μεταφορές από / προς το RAN [7].

3.3 Μοντέλο Ελέγχου Πρόσβασης δικτύου

Παρακάτω περιγράφουμε το μοντέλο RAN που εξετάσαμε στο κυψελοειδές δίκτυο με δυνατότητα SDN / NFV. Υποθέτουμε μια δέσμη εικονικών σταθμών βάσης - VBS που ελέγχεται από ένα ενιαίο LSC στο επίπεδο RAN (Εικ. 3.3). Το σύμπλεγμα έχει έναν σταθερό αριθμό V των VBS. Για τους σκοπούς της ανάλυσης, θεωρείται ότι το ποσό των ραδιοφωνικών πόρων στο RAN μπορεί να διακριτοποιηθεί και μετράται σε μονάδες πόρων (RU). Ο ορισμός της RU εξαρτάται από το υιοθετημένο σύστημα πρόσβασης καναλιού. Όταν χρησιμοποιούνται συστήματα βασιζόμενα στην πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDMA) και στην πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDMA), η RU μπορεί να οριστεί ως ένας ακέραιος αριθμός φορέων συχνότητας ή χρονικών θυρίδων. Από την άλλη πλευρά, όταν χρησιμοποιούνται συστήματα βάσει της πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA), ο ορισμός της RU πρέπει να λαμβάνει υπόψη την παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν οι έννοιες του φορτίου κυψέλης και του συντελεστή φορτίου. Σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε ορθογώνιο το σχήμα LTE (OFDMA). Ορίζουμε μια RU να είναι ίση με μία OFDMA ομάδα πόρων (RB).

Για παράδειγμα, εάν το εύρος ζώνης καναλιού LTE είναι 9 MHz και ένας υποφορέας είναι 15 KHz, τότε υπάρχουν συνολικά 600 φορείς. Δεδομένου ότι ένα OFDMA RB αντιστοιχεί σε 12 υποφορείς, έχουμε 50 RUs ανά κανάλι και ανά χρονική θυρίδα. Παρομοίως, ένα κανάλι LTE 13,5 MHz έχει 75 μονάδες RU και ένα κανάλι 18 MHz LTE έχει 100 μονάδες RU. Ας δηλώσουμε με τον C τον συνολικό αριθμό των RU στο RAN. Οι μονάδες RU κατανέμονται δυναμικά από το LSC στα VBSs έτσι ώστε το VBS v ($v = 1, \dots, V$) να δέχεται r_v RUs. Ως εκ τούτου, σε οποιαδήποτε στιγμή πρέπει να το κρατήσει

$$C = \sum_{v=1}^V r_v \quad (3.1)$$

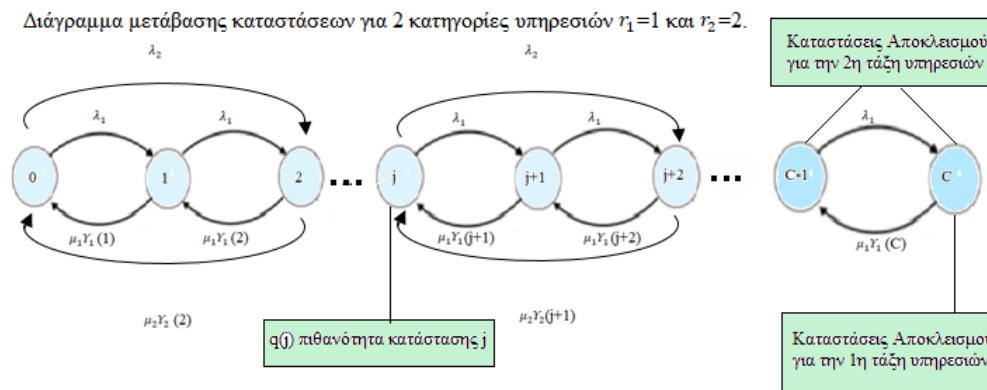
Θεωρούμε K διαφορετικές κατηγορίες υπηρεσιών. Οι κλάσεις υπηρεσιών διακρίνονται από τον αριθμό των RUs που ζητούνται από μία μόνο κλήση που προέρχεται από ένα MU. Υποθέτουμε ότι οι κλήσεις ακολουθούν μια κατανομή Poisson. Ο ρυθμός άφιξης των κλήσεων k υπηρεσίας τάξης υποδηλώνεται ως λ_k . Μία κλάση υπηρεσιών k κλήσης απαιτεί r_k RUs. Εάν οι απαιτούμενες RUs είναι διαθέσιμες στο σύμπλεγμα, τότε η κλήση γίνεται δεκτή στο σύστημα και παραμένει σε υπηρεσία για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, η μέση τιμή του οποίου δηλώνεται ως μ_k^{-1} . Αυτή η πολιτική CAC, όπου όλες οι κλήσεις ανταγωνίζονται τις διαθέσιμες RUs, αναφέρεται ως η πλήρης πολιτική κοινής χρήσης. Ο λόγος $\frac{\lambda_k}{\mu_k}$ αντιπροσωπεύει την ένταση μεταφοράς.

Ας υποδείξουμε ως n_k τον αριθμό των κλήσεων στην υπηρεσία της κλάσης υπηρεσιών k . Στη συνέχεια, ο συνολικός αριθμός των κατεχόμενων RUs στο σύμπλεγμα δίνεται από

$$j = \sum_{k=1}^K n_k \lambda r_k \quad (3.2)$$

Το j θεωρείται ως κατάσταση συστήματος και παίρνει τιμές ακέραιων τιμών στο $[0, \dots, C]$. Όταν μια νέα κλάση υπηρεσίας k είναι αποδεκτή στο σύμπλεγμα, η κατάσταση συστήματος μεταβαίνει από j σε υψηλότερη κατάσταση $j + b_k$. Ομοίως, όταν ένα k φεύγει από το σύμπλεγμα, η κατάσταση μεταβαίνει από j σε χαμηλότερη κατάσταση $j - b_k$.

Ως παράδειγμα σεμιναρίου θεωρούμε ένα σύμπλεγμα με C RUs και $K = 2$. Οι απαιτήσεις RU των κλήσεων είναι $r_1 = 1, r_2 = 2$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, οι μεταβάσεις προς τις υψηλότερες καταστάσεις εξαρτώνται από τον ρυθμό άφιξης κλήσης, λ_k , ενώ οι μεταβάσεις προς τις κατώτερες καταστάσεις εξαρτώνται από το ρυθμό εξυπηρέτησης, μ_k , (που είναι το αντίστροφο του μέσου χρόνου συγκράτησης) και $Y_k(j)$ ο μέσος αριθμός κλήσης k υπηρεσίας σε δεδομένη κατάσταση j . Παρατηρούμε επίσης ότι οι πρώτες κλήσεις κατηγορίας υπηρεσίας έχουν μία κατάσταση φραγής: $j = C$, ενώ οι δεύτερες κλήσεις κατηγορίας υπηρεσίας έχουν δύο καταστάσεις αποκλεισμού: $j = C - 1$ και $j = C$. Γενικά, όταν η ζήτηση RU είναι r_k , τότε οι καταστάσεις δέσμευσης είναι: $j > C - r_k$ [7].



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα μεταβάσεων.

Δηλώνουμε με $q(j)$ την πιθανότητα της κατάστασης j . Με βάση την παραπάνω συζήτηση, για να υπολογίσουμε το CBP, B_k , μιας κλάσης υπηρεσίας k , πρέπει να προσθέσουμε τις πιθανότητες, $q(j)$ όλων των καταστάσεων δέσμευσης

$$B_k = \sum_{j=C-r_k+1}^C q(j) \quad (3.3)$$

Για να υπολογίσουμε το CBP μέσω (3.3), πρέπει να προσδιορίσουμε το $q(j)$. Χρησιμοποιώντας το γεγονός ότι η αλυσίδα Markov του μοντέλου είναι αντιστρέψιμη, μπορούμε να γράψουμε την ακόλουθη εξίσωση LB (rate-up = rate-down) μεταξύ των γειτονικών καταστάσεων j και $j + r_k$

$$r_k q(j) = \mu_k Y_k(j + r_k) q(j + r_k) \quad (3.4)$$

Οι πιθανότητες μη κανονικοποιημένης κατάστασης, $\hat{q}(j)$, προσδιορίζονται με ακρίβεια μέσω

$$j\hat{q}(j) = \sum_{k=1}^C \frac{\lambda_k}{\mu_k} r_k \hat{q}(j-r_k), j=1, \dots, C. \quad (3.5)$$

με $\hat{q}(0) = 1$ και $\hat{q}(j) = 0$ για $j < 0$. Τελικά, τα $q(j)$ προέρχονται διαιρώντας το $\hat{q}(j)$ με τον συντελεστή κανονικοποίησης G

$$q(j) = \frac{\hat{q}(j)}{G}, j=0, \dots, C \quad \text{με } G = \sum_{j=0}^C \hat{q}(j). \quad (3.6)$$

3.4 Αποτελέσματα

Όταν υπάρχουν διαθέσιμες μονάδες RU στη συστοιχία RAN, η κλήση που φθάνει είναι αποδεκτή. Διαφορετικά, η κλήση είναι αποκλεισμένη. Ο προσομοιωτής καταγράφει τέτοια γεγονότα αποκλεισμού για να παράγει τελικά CBP για κάθε κατηγορία υπηρεσιών. Ο υπολογισμός των πιθανών καταστάσεων και της CBP βασίζεται στις (3.5) και (3.3) σχέσεις, αντίστοιχα. Επειδή το αναλυτικό μοντέλο είναι ακριβές, τα αποτελέσματα προσομοίωσης συμπίπτουν με τα αναλυτικά αποτελέσματα.

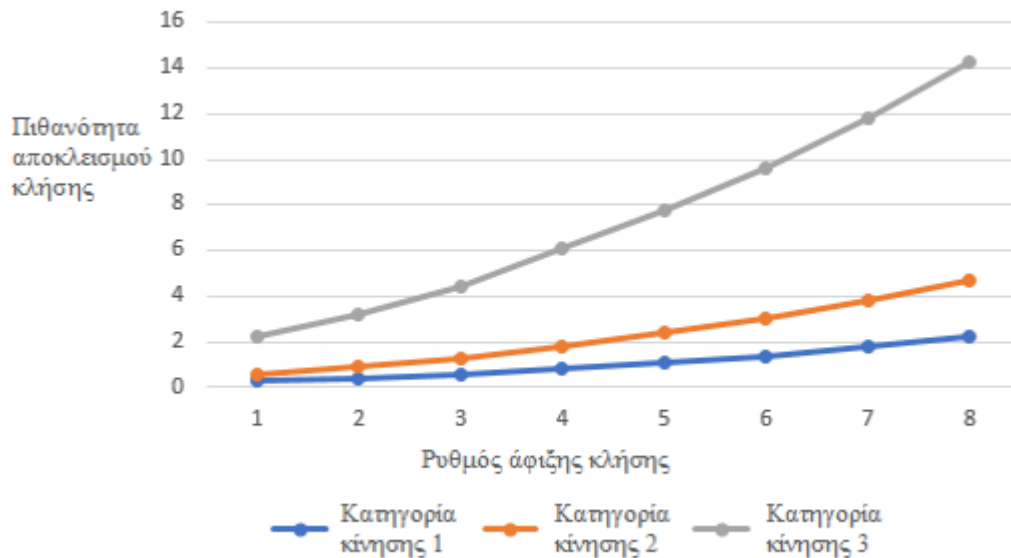
Ως πειραματικό σενάριο, προσομοιώνουμε ένα σύμπλεγμα με 50 μονάδες RU (αυτό αντιστοιχεί σε ένα κανάλι LTE των 9 MHz) και $K = 3$ κλάσεις υπηρεσιών. Οι απαιτήσεις πόρων είναι $r_1 = 1$ RU, $r_2 = 2$ RUs και $r_3 = 5$ RUs. Οι μέσοι χρόνοι κράτησης κλήσεων είναι $\mu_1^{-1} = 4$ λεπτά, $\mu_2^{-1} = 2$ λεπτά και $\mu_3^{-1} = 1$ λεπτό. Αρχικά μελετάμε τον αντίκτυπο του ποσοστού άφιξης της κλήσης στην CBP. Οι ρυθμοί άφιξης της κλήσης, λ_k ($k = 1, 2, 3$), κυμαίνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Περιπτώσεις ρυθμού άφιξης κλήσεων.

	1η κατηγορία κίνησης	2η κατηγορία κίνησης	3η κατηγορία κίνησης
Περίπτωση:	λ_1	λ_2	λ_3
1	4.25	2.00	1.00
2	4.50	2.10	1.02
3	4.75	2.20	1.02
4	5.00	2.30	1.04
5	5.25	2.35	1.06
6	5.50	2.40	1.06
7	5.75	2.45	1.08
8	6.00	2.50	1.10

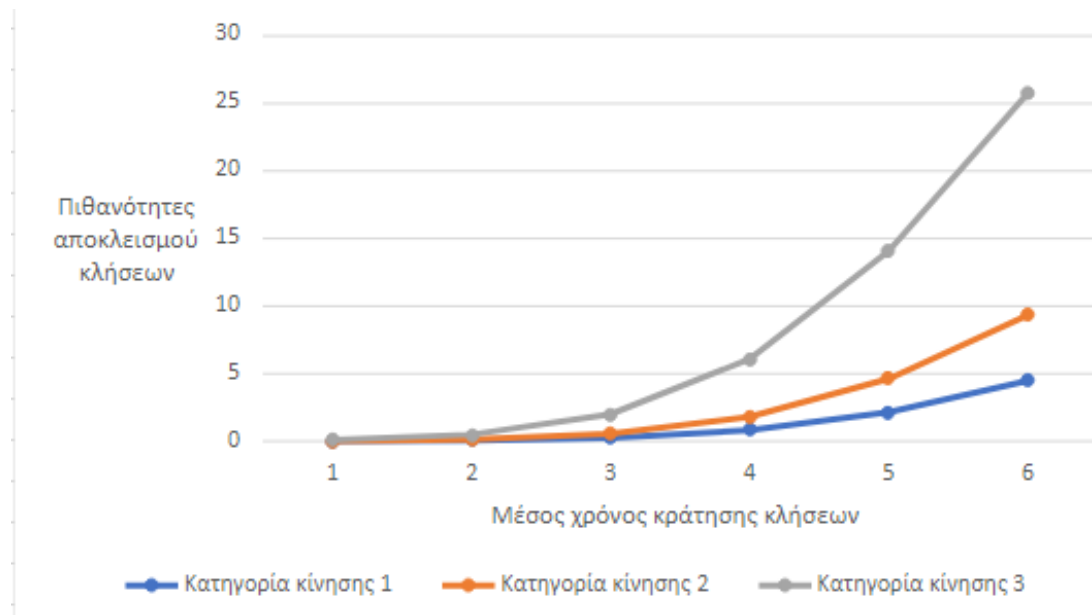
Αρχικά η CBP και των τριών υπηρεσιών είναι διαφορετική και αυξάνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης που έχει η καθεμία ξεχωριστά. Το ίδιο συμβαίνει όταν αυξάνεται και ο ρυθμός άφιξης, η CBP μεγαλώνει αφού οι αιτήσεις σύνδεσης γίνονται περισσότερες. Στον άξονα y , δείχνουμε την προκύπτουσα CBP. Παρατηρούμε ότι η CBP των πρώτων δύο κατηγοριών υπηρεσιών είναι σχετικά χαμηλή και σε όλες τις

περιπτώσεις παραμένει κάτω από το κατώτατο όριο του 5%, πράγμα που αποτελεί αποδεκτή απόδοση σε επίπεδο κλήσεων. Από την άλλη πλευρά, λόγω της υψηλής απαίτησης πόρων, η τρίτη τάξη εξυπηρέτησης έχει πολύ υψηλότερη CBP και είναι κάτω από το 5% μόνο για τις τρεις πρώτες περιπτώσεις του ποσοστού άφιξης κλήσης.



Σχήμα 3.6: Πιθανότητες αποκλεισμού κλήσεων έναντι ρυθμού άφιξης κλήσης.

Επιπλέον, για να παρατηρήσουμε τον αντίκτυπο του μέσου χρόνου κράτησης στην CBP, διατηρούμε σταθερό το ρυθμό άφιξης της κλήσης σε $\lambda_1 = 5$, $\lambda_2 = 2.3$, $\lambda_3 = 1.04$ και μεταβάλλουμε το μ_1^{-1} από 1 έως 6 λεπτά, τον άξονα x. Παρατηρούμε ότι για το $\mu_1^{-1} = 3$ λεπτά, το \leq CBP είναι κάτω από το όριο 5% και για τις τρεις κατηγορίες υπηρεσιών. Με την αύξηση του μ_1^{-1} , η CBP, ειδικά της 3ης τάξης εξυπηρέτησης, αυξάνει και φτάνει το $B3 = 25\%$ όταν $\mu_1^{-1} = 6$. Αυτό το παράδειγμα δείχνει ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά τον σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση του RAN για να αποφύγετε υψηλή CBP.



Σχήμα 3.7: Πιθανότητες αποκλεισμού κλήσεων έναντι μέσου χρόνου κράτησης κλήσεων

4 Επέκταση του μοντέλου Πολυδιάστατης Κίνησης σε SDN / NFV δίκτυα 5ης γενιάς για την περίπτωση Επανάκλησης.

Στο κεφάλαιο 2.5 συναντήσαμε το μοντέλο απλής επανάκλησης, SRM, όπου όταν σε ένα σύστημα k κατηγορίας κίνησης δεν υπάρχει αρκετό διαθέσιμο εύρος ζώνης b_k για να εξυπηρετηθεί μία κλήση, δηλαδή ισχύει $j > C - b_k$, τότε αυτή απορρίπτεται, όμως μπορεί να κάνει επανάκληση με νέο εύρος ζώνης το οποίο θα είναι και μικρότερο από την προηγούμενη φορά, δηλαδή θα ισχύει $b_{kr} < b_k$, ώστε να έχει περισσότερες πιθανότητες να γίνει αποδεκτή από το σύστημα και με διαφορετικό ρυθμό εξυπηρέτησης μ_{kr} , ώστε να ισχύει $\mu_{kr}^{-1} > \mu_k^{-1}$. Η κλήση θα γίνει αποδεκτή όταν $j \leq C - b_{kr}$.

Αντιθέτως, στο κεφάλαιο 3.3 συναντήσαμε το μοντέλο RAN και την ενσωμάτωση της αρχιτεκτονικής δικτύου SDN / NFV, όπου το ποσό των ραδιοφωνικών πόρων στο RAN μετράται σε μονάδες πόρων – RUs και με C συμβολίζεται ο συνολικός αριθμός τους. Οι διαφορετικές κατηγορίες υπηρεσιών, K , και n_k ο αριθμός των κλήσεων της που ακολουθούν κατανομή Poisson, ο ρυθμός άφιξης των κλήσεων k υπηρεσίας τάξης υποδηλώνεται ως λ_k και τέλος $Y_k(j)$ ο μέσος αριθμός κλήσης k υπηρεσίας σε δεδομένη κατάσταση j . Μία κλήση γίνεται δεκτή στο σύστημα όταν είναι διαθέσιμες οι απαιτούμενες μονάδες πόρων RUs και παραμένει σε αυτό με μέση τιμή μ_k^{-1} η κατάσταση μετατρέπεται από j σε $j + b_k$. Αυτό φέρει ως αποτέλεσμα οι κλήσεις να ανταγωνίζονται ώστε να βρουν διαθέσιμα RUs. Ωστόσο αν φύγει μία κλήση από το σύστημα τότε η τελική κατάσταση θα είναι $j - b_k$.

4.1 Σκοπός εφαρμογής του μοντέλου επανάκλησης

Σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, το ιδανικό είναι όλες οι κλήσεις να γίνονται δεκτές, ωστόσο πάντα υπάρχουν και οι απορριφθείσες. Σκοπός είναι σε αυτό το μοντέλο να εφαρμοστεί το μοντέλο της απλής επανάκλησης, ώστε να χάνονται πολύ λιγότερες κλήσεις από ότι θα χάνονταν χωρίς την λειτουργία του SRM. Οπότε, όταν μία κλήση θα μπλοκάρεται, αντί να χαθεί, θα προσπαθεί ξανά να περάσει στο σύστημα, αλλά με μικρότερο εύρος ζώνης από ότι είχε πριν, όπως ακριβώς δηλαδή πραγματοποιείται αυτή η διαδικασία στο SRM. Στην συνέχεια, η κλήση θα περνάει στο σύστημα όταν θα πληρεί τις προϋποθέσεις με τα καινούρια χαρακτηριστικά της. Παρ' όλα αυτά, στο τέλος αυτής της διαδικασίας, η κλήση μπορεί να μην καταφέρει να μπει στο σύστημα για να εξυπηρετηθεί με αποτέλεσμα να χάνεται.

Εφόσον τα δύο αυτά μοντέλα αποτελούνται από ίδια χαρακτηριστικά και απαιτήσεις, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους ίδιους τύπους με αυτούς της απλής επανάκλησης και στις δύο περιπτώσεις. Οπότε για το μοντέλο που χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική SDN / NFV μπορούμε να εφαρμόσουμε για τον υπολογισμό του Αναδρομικού τύπου Kaufman όχι μόνο τον τύπο που συναντήσαμε παραπάνω στην σχέση 3.5

$$j\hat{q}(j) = \sum_{k=1}^C \frac{\lambda_k}{\mu_k} r_k \hat{q}(j-r_k) \Rightarrow \hat{q}(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^C \frac{\lambda_k}{\mu_k} r_k \hat{q}(j-r_k) \text{ με } j=1, \dots, C$$

αλλά αν εφαρμόσουμε την επανάκληση, τότε θα πάρουμε και τον τύπο που ισχύει σε αυτή. Δηλαδή τον 2.34:

$$\hat{q}(j) = \frac{1}{j} [\sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K a_{kr} b_{kr} \gamma_k(j) q(j - b_{kr})]$$

με $\hat{q}(j)$ να είναι μη κανονικοποιημένη πιθανότητα και στις δύο περιπτώσεις.

Όπως φαίνεται, οι δύο αυτές εξισώσεις είναι πανομοιότυπες, με την δεύτερη να έχει επεκταθεί, δηλαδή έχουν προστεθεί και τα χαρακτηριστικά της επανάκλησης. Οπότε πλέον θα εφαρμόσουμε την 2.34 σχέση στο μοντέλο RAN. Το ίδιο θα κάνουμε και με τους τύπους που υπολογίζουν το σύνολο των $q(j)$ στο RAN τον (3.3) ως:

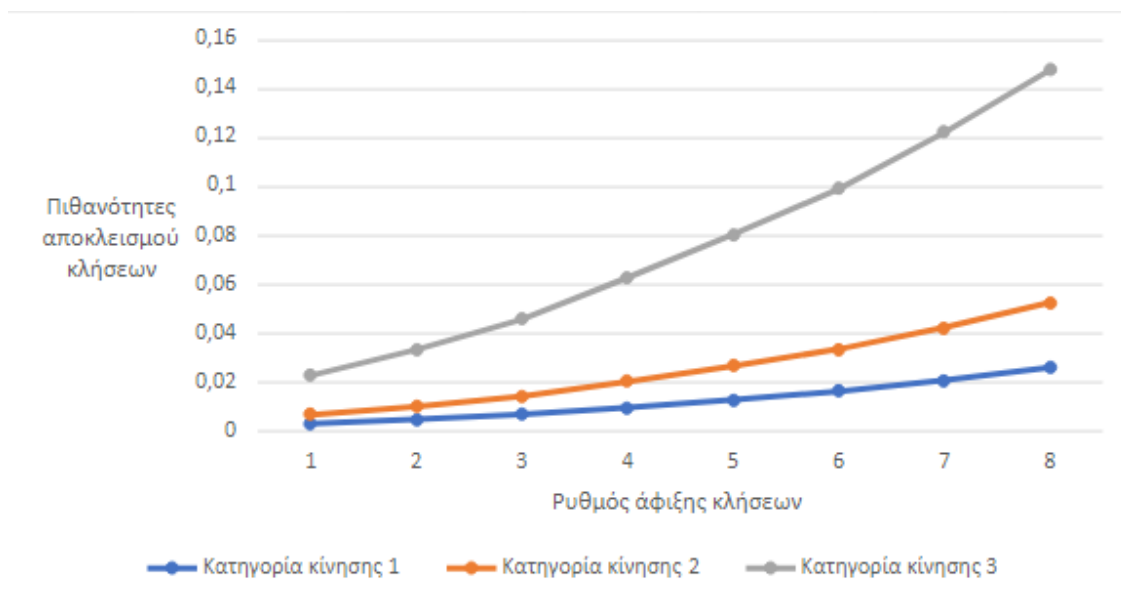
$$B_k = \sum_{j=C-r_k+1}^C q(j)$$

και τον (2.40):

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

που εφαρμόζεται στο SRM και θα τον χρησιμοποιήσουμε για το μοντέλο SDN / NFV για την επανάκληση.

Ως πειραματικό σενάριο, προσομοιώνουμε ένα σύμπλεγμα με 50 μονάδες RU (αυτό αντιστοιχεί σε ένα κανάλι LTE των 9 MHz) και $K = 3$ κλάσεις υπηρεσιών. Οι απαιτήσεις πόρων είναι $r_1 = 1$ RU, $r_2 = 2$ RUs και $r_3 = 5$ RUs. Οι μέσοι χρόνοι κράτησης κλήσεων είναι $\mu_1^{-1} = 4$ λεπτά, $\mu_2^{-1} = 2$ λεπτά και $\mu_3^{-1} = 1$ λεπτό. Εάν κλήσεις της 2ης και 3ης υπηρεσίας δεν μπορούν να βρουν διαθέσιμες RU για εξυπηρέτηση, προσπαθούν να επανασυνδεθούν με χαμηλότερες απαιτήσεις, $r_{2,1} = 1$ RU και $r_{3,1} = 3$ RU, αυξάνοντας ταυτόχρονα το χρόνο εξυπηρέτησης $\mu_{2,1}^{-1} = 1.5$ λεπτά και $\mu_{3,1}^{-1} = 0.66$ λεπτά. Αρχικά μελετάμε τον αντίκτυπο του ποσοστού άφιξης της κλήσης στην CBP. Οι ρυθμοί άφιξης της κλήσης, λ_k ($k = 1, 2, 3$), κυμαίνονται όπως φαίνεται στον παραπάνω Πίνακα 3.1.



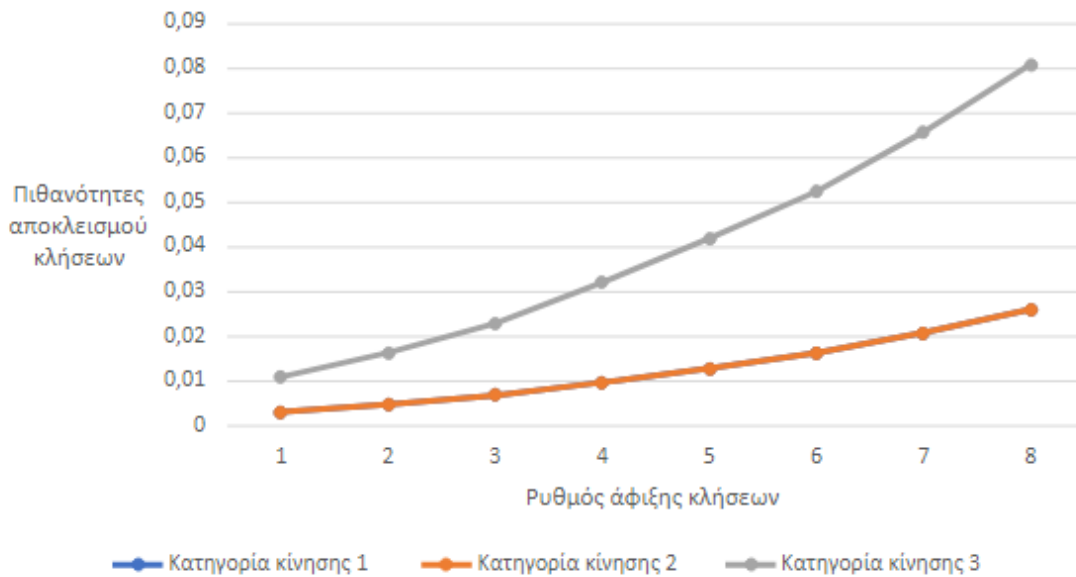
Σχήμα 4.1: Πιθανότητες αποκλεισμού κλήσεων έναντι ρυθμού άφιξης κλήσης.

Χρησιμοποιώντας τα πρώτα δεδομένα που δίνονται, χωρίς δηλαδή να πραγματοποιηθεί επανάκληση, διακρίνουμε ότι η γραφική παράσταση που παίρνουμε είναι ίδια με αυτήν που δόθηκε παραπάνω στο σχήμα 3.6 και αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό, αφού τα στοιχεία που εισήγαμε είναι ίδια καθώς και το ζητούμενο αποτέλεσμα του γραφήματος, οπότε είναι και τα συμπεράσματα. Δηλαδή:

Οι διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης καθώς και η αύξηση του ρυθμού αφίξεως της κάθε κατηγορίας κίνησης αυξάνει αντίστοιχα και την CBP κάθε υπηρεσίας. Στον άξονα y , δείχνουμε την προκύπτουσα CBP. Η CBP της 1^{ης} κατηγορίας κυμαίνεται από 0,31% έως και 2,6%, της 2^{ης} κατηγορίας από 0,67% μέχρι 5,2%, ενώ η 3^η κατηγορία ξεπερνάει κατά πολύ τις δύο πρώτες, λόγω της υψηλότερης απαίτησης πόρων και ξεκινάει από 2,2% και βλέπουμε να καταλήγει στο ποσοστό του 14,8%.

4.2 Προσομοίωση με απλή επανάκληση:

Στην συνέχεια, εφαρμόζοντας την απλή επανάκληση με νέα δεδομένα πλέον, τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι άλλα. Οι κλήσεις της δεύτερης και της τρίτης κατηγορίας με σκοπό να εξυπηρετηθούν, προσπαθούν να επανασυνδεθούν με χαμηλότερες απαιτήσεις εύρους ζώνης, $r_{2,1}$ και $r_{3,1}$, αυξάνοντας ταυτόχρονα το χρόνο εξυπηρέτησης $\mu_{2,1}^{-1}$ και $\mu_{3,1}^{-1}$. Οπότε η γραφική παράσταση που εξάγεται είναι η παρακάτω:



Σχήμα 4.2: Πιθανότητες αποκλεισμού κλήσεων έναντι ρυθμού άφιξης κλήσης με επανάκληση.

Στον άξονα y , φαίνεται η προκύπτουσα CBP. Παρατηρώντας το γράφημα, η CBP των υπηρεσιών κατηγορίας 1 και 2 είναι ίδια, καθώς οι απαιτήσεις εύρους ζώνης r_1 και $r_{2,1}$ είναι πλέον ισάριθμες (και οι δύο ισούνται με την μονάδα) και ο ρυθμός άφιξης της 2ης μεγαλώνει. Η CBP τους παραμένει κάτω από το όριο 3% σε όλες τις περιπτώσεις. Αντιθέτως, η CBP της 3^{ης} κατηγορίας, ανάλογα με τη δική της υψηλή απαίτηση εύρους ζώνης και τον νέο αυξημένο ρυθμό άφιξης, αυξάνεται διαφορετικά, αγγίζοντας το ποσοστό 8% με τις τελευταίες 5 περιπτώσεις να ξεπερνάνε το 3% των προηγούμενων κατηγοριών κινήσεων.

Συγκρίνοντας τις δύο προσομοιώσεις, της χωρίς επανάκλησης και αυτήν της απλής επανάκλησης εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα. Η εφαρμογή της απλής επανάκλησης επιφέρει αλλαγές στα δεδομένα που χρησιμοποιούνται και κάποια επαναπροσδιορίζονται. Αρχικά, οι κλήσεις για την επίτευξη της επανασύνδεσης μειώνουν τις απαιτήσεις που έχουν σε εύρος ζώνης, δηλαδή τα RUs, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η ταχύτητα μετάδοσης, ενώ παράλληλα αυξάνεται ο χρόνος εξυπηρέτησης. Όλη αυτή η διαδικασία φέρει σαν αποτέλεσμα την μείωση του call blocking probability κατά πολύ.

Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και από τα δοσμένα γραφήματα. Στο σχήμα 4.1 η πιθανότητα απώλειας της 2^{ης} κατηγορίας κίνησης ξεκινάει στην πρώτη περίπτωση από το 0,67% και καταλήγει στην 8^η και τελευταία περίπτωση του παραδείγματός μας στο 5,26%, ενώ στο σχήμα 4.2 με την διαδικασία της επανάκλησης SRM η ίδια κατηγορία κίνησης κυμαίνεται από 0,31% μέχρι το 2,6%. Διακρίνουμε ότι η CBP μειώθηκε σχεδόν στο μισό του αρχικού ποσοστού της 2^{ης} υπηρεσίας. Παρόμοια μείωση στην CBP συναντάμε και στην 3^η κατηγορία κίνησης η οποία στην αρχική προσομοίωση ήταν στο 2,27% και ανερχόταν στην τελευταία περίπτωση στο 14,78%, σε αντίθεση με

την εξαγωγή αποτελεσμάτων της εφαρμογής του μοντέλου απλής επανάκλησης, τα οποία είναι τα ποσοστά 1,09% και 8,09% αντίστοιχα.

Καταλήγοντας , διαπιστώνουμε ότι η διαφορά της CBP που προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου RAN που εξετάσαμε στο κυψελοειδές δίκτυο με δυνατότητα SDN / NFV και της χρήσης του μοντέλου απλής επανάκλησης SRM, στο ίδιο πειραματικό σενάριο , δεν είναι αμελητέα. Αντιθέτως είναι σημαντική και διακριτή, οπότε η χρήση και η εφαρμογή της επανάκλησης φέρει θετικά αποτελέσματα με τις κλήσεις να έχουν πλέον μειωμένη πιθανότητα απώλειας.

Βιβλιογραφία

Βιβλίο:

[1] Μ. Δ. Λογοθέτης, «Θεωρία τηλεπικοινωνιακής κινήσεως και εφαρμογές», 2η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2012.

Άρθρα:

[2] Eduardo Castañeda, Member, IEEE, Adão Silva, Member, IEEE, Atilio Gameiro, and Marios Kountouris, Senior Member, IEEE «An Overview on Resource Allocation Techniques for Multi-User MIMO Systems», *EE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, VOL. 19, NO. 1, FIRST QUARTER 2017 239.

[3] AKHIL GUPTA, (Student Member, IEEE), AND RAKESH UMAR JHA, (Senior Member, IEEE), «A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies» Received July 11, 2015, accepted July 22, 2015, date of publication July 28, 2015, date of current version August 7, 2015.

[4] Van-Giang Nguyen, Student Member, IEE, Anna Brunstrom, Member, IEEE, Karl-Johan Grinnemo, Senior Member, IEEE, and Javid Taheri, Member, IEEE, «SDN/NFV-Based Mobile Packet Core Network Architectures: A Survey», *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, VOL. 19, NO. 3, THIRD QUARTER 2017 1567.

[5] Xiaoning Zhang, Yunqing Wang, Zhichao Xu, Shui Yu, *SDN/NFV Integration: A Comprehensive Survey*, *JOURNAL OF LATEX CLASS FILES*, VOL. 11, NO. 4, DECEMBER 2012 1.

[6] Ioannis D. Moscholios¹, Vassilios G. Vasilakis², John S. Vardakas² and Michael D. Logothetis². *Retry Loss Models Supporting Elastic Traffic.1. Dept. of Telecommunications Science and Technology, University of Peloponnese, 2. WCL, Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Patras. January 2014.*

[7] Trois, C., Del Fabro, M. D., de Bona, L. C., & Martinello, M. (2016). *A survey on SDN programming languages: Toward a taxonomy. IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2687-2712.

[8] Ι. Δ. Μοσχολιός, Ελευθερία Π. Μάτα. «Ανάλυση συστήματος απωλειών πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης κλήσεων on-off» Πτυχιακή εργασία, Σχολή θετικών επιστημών και τεχνολογίας, Τμήμα επιστήμης και τεχνολογίας τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Ιούλιος 2012.

[9] Ι. Δ. Μοσχολιός, Κασιβά Μαρία. «Υπολογισμός της πιθανότητας συμφόρησης κλήσεων πολυδιάστατης ψευδο-τυχαίας κίνησης στην ανερχόμενη ζεύξη κυψέλης WCDMA» Διπλωματική εργασία, Σχολή οικονομίας, διοίκησης και πληροφορικής, Τμήμα πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Απρίλιος 2014.

[10] I. Δ. Μοσχολιός, Κώστας Ευαγγέλου Νέστωρ. «Ανάλυση συστήματος απωλειών πολυδιάστατης τυχαίας και ψευδοτυχαίας κίνησης με δυνατότητα επανάκλησης» Διπλωματική εργασία, Σχολή Θετικών επιστημών και τεχνολογίας, Μάϊος 2012.

[11] Oliver C. Ibe, «Markov Processes for Stochastic Modeling», 2nd edition, 2013.

[12] Richard Parkinson «Traffic Engineering Techniques in Telecommunications», 2007.

