



УНИВЕРЗИТЕТ “СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ” - СКОПЈЕ
Факултет за електротехника и информациски технологии
Институт за телекомуникации



**МЕХАНИЗМИ ЗА КВАЛИТЕТ НА СЕРВИСОТ И ВЕРТИКАЛЕН
MULTI-HOMING ЗА 5G МОБИЛНИ И БЕЗЖИЧНИ МРЕЖИ
- Докторска дисертација -**

Кандидат:

м-р Томислав Шуминоски

Ментор:

Проф. Д-р Тони Јаневски

Април 2016

Скопје

Благодарност

Овој труд претставува круна на моите докторски студии, едно доста значајно време од мојот животен пат, исполнет со доста настани, истражувања, искуства и несомнено со огромна поддршка, помош, љубов, радост, среќа и разбирање од многу луѓе, без што оваа дисертација не би била ваква каква што е. Иако, невозможно е да се споменат сите, и невозможно е во овие моменти да се доловат било какви модули со кои би им ја искажал, напишал или насликал мојата огромна благодарност, сепак ќе се обидам во овие редови искрено да им се заблагодарам на:

- Моите родители Зорица и Миодраг, за целокупната пружена поддршка, разбирање, љубов, слобода, прифаќање, мотивираност и пожртвуваност во текот на целото мое образование, за да бидам тоа што сум денес.
- До мојата прекрасна сопруга Анастасија, мојата љубовна инспирација, мојата сопатничка низ многуте препреки и искушенија, радости и тажни моменти, успеси и среќи, за над сè повторно да остане љубовта. Бескрајно сум ти благодарен за сè!
- Благодарност до мојата сестра Соња и нејзиниот сопруг Александар, за ведрината, искреноста, љубовта и вербата во мене, и особено огромна благодарност до внуката Јана – мојата вечна инспирација и животна радост!
- Особена благодарност на мојот ментор Проф. Д-р Тони Јаневски, како професор, човек и најблизок пријател, кој со своето несебично знаење, висока стручност и искуство, цело време низ студиите (почнувајќи од дипломската, па до денес) ме мотивираше, ми ги покажуваше насоките, правците и решенијата во најтешките проблеми, водејќи ме до конечното финализирање на оваа дисертација. Посебна благодарност за финансиското ослободување во врска со моите докторски студии и во врска со овој докторат, кога направи сè што беше во негова можност да ми помогнете да бидам порастеретен и посреќно да ја работам докторската дисертација. Воедно, благодарност за постојаното вклучување во разни научни и апликативни проекти, курсеви и работилници со кои растам и се развивам во разни полиња.
- Особена благодарност до Раководителот на Институтот за телекомуникации Проф. Д-р Лилјана Гавриловска, и како професор, и како најблизок пријател, која со своето огромно искуство, знаење, спремност и огромна грижа и љубов, цело време низ докторските студии ме мотивираше, насочуваше, советуваше и помагаше, како со збор, така и финансиски преку несебично залагање да бидам ослободен од голем дел од финансиските обврски кон докторските студии, правејќи сè што беше во нејзина можност да ми помогнете со леснотија да можам да ја работам дисертацијата.

- Особена благодарност до Проф. Д-р Борислав Поповски и Проф. Д-р Александар Ристески кои безрезервно ми помагаа во текот на студиите, преку мотивација, разговор, излегување во пресрет во разни непогоди и со финансиско ослободување за дел од трошоците на докторските студии. Особена благодарност за тоа што активно ме вклучуваат во Лабораторијата за Оптички комуникации, како и во разни научни и апликативни проекти, давајќи ми можност да се развивам и растам и на овие полиња.
- Благодарност на сите останати членови на Институтот за телекомуникации, на Проф. Д-р Татјана Улчар-Ставрова, Проф. Д-р Зоран Хаџи-Велков, Проф. Д-р Венцеслав Кафеџиски, Проф. Д-р Перо Латкоски, Проф. Д-р Владимир Атанасовски, Доц. Д-р Марко Порјазоски и моите драги со-канцеларивци Доц. Д-р Славе Пејоски и М-р Валентин Раковиќ за огромната поддршка, соработка, прифаќање, помош, разбирање и особено за излегувањето во пресрет со идеи, финансии, разговори, жестоки дискусии како за космички проблеми – така и за неважни работи, разрешување на тешки оптимизациски проблеми, давање насоки во безизлезни моменти на истражување, шегии, смеење и многу дружење. Искрено ја користам ова прилика да ја изразам мојата радост и гордост што сум дел од еден ваков прекрасен Институт.
- Благодарност на сите членови од Wireless Network Group (WinGroup), Истражувачките групи на Институтот за телекомуникации кои работаат на разни научни проекти и апликации и на Групата од Лабораторијата за оптички мрежи, за дружењето, помошта, шегите, какаото, чајот и разговорите.
- Благодарност до Доц. Д-р Сања Атанасова, М-р Горјан Нацински, М-р Матеј Добревски и М-р Душко Ставров за безрезервната помош и поддршката при совладувањето на Љапуновата оптимизација и Љапуновите функции.
- Благодарност на моите драги искрени пријатели: Гого и Буба, Јасминка, Рита, Вице со Маја и Свезда, Александра и Филип, Стеф, Катерина, Мелвин, Фросина, Кате, Елена со Јулиус и Саше, Биле, Диме и останатите драги битија, за инспирацијата, пружењето на искрена пријателска помош и потсетување и во најтешките делови од патот, да бидам мудар, да бидам тоа што сум.
- Благодарност до моите кумови Даринка и Живко Богданоски, заедно со целото нивно семејство, кумашините Миле и Тања Кирови, родителите од мојата сопруга – Марина и Александар Устјужанини, и сите братучеди, роднини и пријатели кои безрезервно беа тука, со нивното внимание, љубов и верба во мене, постојано бодрейќи ме во изработката на оваа докторска дисертација.

СОДРЖИНА

Листа на Акроними.....	5
Abstract	7
Апстракт	8
1. Вовед.....	9
2. 5G развој и концепти.....	15
2.1 Историски развој и патот до 5G.....	17
2.2 5G столбови	20
3. QoS во мобилни и безжични мрежи	26
3.1 QoS во WLAN (IEEE 802.11)	29
3.2 QoS во UMTS мрежите.....	32
3.3 QoS во WiMAX	37
3.4 QoS во LTE/LTE-Advanced мрежите.....	42
3.5 QoS во MANET	45
4. Напреден QoS-базиран корисничко-центриран модел за 5G со RAT-агрегација на IP ниво	49
4.1 Преглед на слични QoS механизми и концепти	50
4.2 Системски модел со напредни QoS механизми за 5G мрежи	53
4.3 AQUA алгоритам	59
4.4 Симулациски резултати и анализи.....	63
4.4.1 Симулациски резултати и анализи од Сценарио 1	63
4.4.2 Симулациски резултати и анализи од Сценарио 2	73
4.4.3 Симулациски резултати и анализи од Сценарио 3	77
4.4.4 Симулациски резултати и анализи од Сценарио 4.....	88
4.5 Заклучок за симулациските резултати и анализи	101
5. QoS модул за 5G терминали со Љапунова оптимизација.....	103
5.1 Поважни дефиниции, леми и теореми за Љапуновата оптимизација	103
5.2 Преглед на слични примени на Љапуновата оптимизација	109
5.3 Системски модел со Љапунова оптимизација за 5GT со оптимално опслужување на мултимедиски пакети и максимизација на проток	111
5.3.1 Љапунова drift-plus-penalty оптимизација и AQUAplus алгоритам	113
5.3.2 Перформансни граници на AQUAplus алгоритмот	116
5.3.3 Потрошена моќност и времетраење на батеријата за 5GT со AQUAplus алгоритам	119
5.3.4 Симулациски резултати и анализи за 5GT со AQUAplus алгоритам.....	122
5.4 Системски модел со Љапунова оптимизација за 5GT со минимално доцнење и максимизација на проток.....	126
5.4.1 Љапунова drift-plus-penalty оптимизација со MassiveAQUA алгоритмот	129
5.4.2 Перформансни граници на MassiveAQUA алгоритмот	133
5.4.3 Доцнење во најлош случај за MassiveAQUA алгоритмот.....	138
5.4.4 Симулациски резултати и анализи за 5GT со MassiveAQUA алгоритмот	139
5.5 Заклучок за симулациските резултати и анализи за 5GT со Љапунова оптимизација.....	145
6. Некои примени на 5G јазлите со AQUA модул	146
7. Заклучок.....	157
Работна библиографија:	162

Листа на Акроними

5G (5th Generation mobile networks)

5GT (5G Terminal)

5GMT (5G Mobile Terminal)

ARA (Ant-Colony Based Algorithm)

ARQ (Automatic Repeat Request)

AQUA (Advanced QoS-based User-centric (RAT-) Aggregation)

BER (Bit Error Ratio)

CB (Capacity Building)

CDMA (code-division multiple access)

CI (Confidence interval)

CID (Connection ID)

DSCH (Downlink Shared Channels)

EARA-QoS (Emergent Ad hoc Routing Algorithm with QoS provisioning)

FACH (Forward Access Channel)

FTP (File Transfer Protocol)

GA (Generic Algorithm)

GSM (Global System for Mobile communication)

IIS (Internet Information Services)

IMT (International Mobile Telecommunications)

IoE (Internet of Everything)

IoT (Internet of Things)

ITU (International Telecommunication Union)

HIP (Host Identity Protocol)

HTTP (Hypertext Transfer Protocol)

KPI (Key Performance Indicators)

LP (Linear Programming)

M2M (Machine-to-Machine)

MANET (Mobile ad-hoc network)

ME (Mobile Equipment)

MIMO (Multiple Input Multiple Output)

MOS (Mean Opinion Score)

MT (Mobile Terminal)

MMS (Multimedia Messaging Service)
MPEG (Motion Picture Express Group)
MS (Mobile Station)
NAT (Network Address Translation)
NGMB (Next Generation Mobile Broadband)
NLP (Network Layer Processor)
OTT (Over-The-Top)
OWA (Open Wireless Architecture)
PDR (Packet Delivery Ratio)
PER (Packet Error Ratio)
PPP (Point to Point Protocol)
PSTN (Public Switched Telephone Network)
QoS (Quality of Service)
RAN (Radio Access Network)
RAT (Radio Access Technology)
RRC (Radio Resource Control)
RSVP (Resource Reservation Protocol)
RTT (Round-Trip Time)
SDU (Service Data Unit)
SFID (Service Flow ID)
SLAs (Service Level Agreements)
SNR (Signal to Noise Ratio)
SON (Self-Organising Network)
UE (User Equipment)
UHD (Ultra-High Definition)
UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)
URA (UTRAN Registration Area)
UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network)
VoIP (Voice over IP)
WCDMA (Wideband Code Divided Multiple Access)
WCMP (Wireless Control Message Protocol)
WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

Abstract

Inspired by the extremely fast development of the telecommunications' science, especially from the tremendous development in the field of wireless mobile technology, in this doctoral dissertation are presented novel scientific researches, frameworks, analysis, comparisons and mechanisms which are related to the intelligent and excellent QoS provisioning in 5G mobile and wireless networks. Considering the novel researches and papers, the nowadays telecommunications are at the point where the top 5G scientific researches are going, moreover now is the time when the first 5G prototypes and probes are launched, and the beginning of the 4G standardization process. Moreover, this is the moment when ITU is submitting the IMT-2020 specifications, together with the technical performances and requirements. In this doctoral dissertation an advanced QoS provisioning frameworks with vertical multi-homing and multi-streaming features for mobile and fixed terminals with radio network aggregation capability in next 5G mobile and wireless broadband networks is presented. The proposed 5G QoS framework is user-centric, targeted to always-on connectivity, and is leading to high performance utility networks with high level of QoS provisioning for any given multimedia service (voice, audio and video), high average throughput, seamless handovers, session continuity, low delay, minimal queue backlog, multi-RAT and mobile broadband capabilities, at the same time achieving stochastic queuing network stability. Undoubtedly, the common "heart" for all of existing and future Radio Access Technologies (RATs), which connect them all as a unifying technology, is IP. That is the main reason why the main changes and improvements we are proposing in the network layer within the future 5G mobile and fixed terminals. Also, each RAT will be responsible for handling user-mobility, while the mobile terminal will make the final choice among different existing (available) RATs for a given service or for a traffic flow, base on its smart module (here named Advanced QoS-based User-centric (RAT-) Aggregation (AQUA) module) within. Moreover, the proposed algorithms implemented within the mobile terminals and the proxy servers, having vertical multi-homing and multi-streaming capabilities are able to handle simultaneously multiple multimedia sources via multiple RAT (including any present and future RAT) interfaces and choosing the most appropriate RATs for a given multimedia service. Proposed 5G framework is using different optimization algorithms, from the optimization algorithm database. We have presented two optimization paradigms; the first is using linear programming or genetic algorithms, for solving the optimization problem, where several key QoS parameters (average system throughput and multimedia access probability) for different radio network conditions were considered. The second optimization problem is using Lyapunov drift-plus-penalty optimization technique that provides a methodology for designing algorithm to maximize the time average throughput – achieving mobile broadband capabilities and stabilizes the queuing, regarding the minimal queue delay and minimal queue backlog. The performance of our proposed 5G terminals with AQUA module is evaluated using simulations and performance analysis with multimedia traffic in different heterogeneous mobile and wireless scenarios with coexistence of multiple RATs, such as 3G, 4G as well as future 5G radio access networks. The analysis has shown significant QoS performances regarding the achievable mobile broadband throughput, minimal delays, maximal multimedia access probability ratio and other superior results regarding the key QoS parameters in heterogeneous mobile and wireless environments, achieving optimal utilization of network resources due to the optimal traffic load scheduling. Above all, the given framework for 5G terminals can be one of the feasible solutions for use in nowadays and future 5G mobile and wireless network architectures.

Key Words: 5G, Lyapunov optimization, Multi-homing, Multi-streaming Multi-RAT, QoS.

Апстракт

Инспириран од екстремно брзиот развој на телекомуникациската наука, особено огромниот развој во полето на безжичната мобилна технологија, во рамките на оваа докторска дисертација се презентирани нови научни испитувања, рамки-водилки, анализи, споредби и механизми кои се однесуваат на обезбедување на интелегентна и одлична QoS поддршка во 5G мобилни и безжични мрежи. Според најновите студии и трудови во денешните телекомуникации се наоѓаме во време кога се водат врвните научни истражувања за 5G мобилните и безжичните мрежи, време кога се прават првите 5G прототипи и проби, и почеток на 5G стандардизацискиот процес. Момент кога се поднесуваат ИМТ-2020 предлог спецификациите од страна на ИТУ, заедно со техничките перформанси и побарувања. Така, во рамките на оваа докторска дисертација се презентирани напредни рамки-водилки за обезбедување врвен квалитет на сервис (QoS) со вертикален multi-homing и multi-streaming својства за мобилни и фиксни терминали со способност за радио мрежна агрегација во следната генерација на 5G мобилни и безжични широкопојасни мрежи. Генерално, предложената 5G QoS рамка-водилка е корисничко-ориентирана, наменета да има постојано конекција, и да води кон високи перформансни искористувања на мрежите, со високо ниво на QoS поддршка за секој даден мултимедиски сервис (говор, аудио и видео), високи агрегирани битски брзини, хомоген и транспарентен хендовер, континуитет на сесиите, мало доцнење, мали варијации на доцнење, минимален број на заостанати пакети во редовите на чекање, multi-RAT и мобилни широкопојасни можности, и во исто време постигнува стохастичка стабилност на мрежните редови на чекање. Несомнено, здруженото „срце“ на сите постојни и идни радио пристапни технологии (RAT), кое ги обединува сите нив како обединувачка технологија е Интернет протоколот (IP). Тоа е главната причина зошто главните промени и подобрувања ги предлагаме да бидат имплементирани на мрежното ниво во идните 5G мобилни и фиксни терминали. Исто така, секоја RAT ќе биде одговорна да управува со корисничката мобилност, додека мобилниот терминал ќе ја прави конечната одлука помеѓу различните достапни RAT-и за даден сервис или за сообраќаен поток, врз база на неговите паметни модули (овде наречени Напредни QoS-базирани корисничко-центрирани агрегациски (на англ. Advanced QoS-based User-centric (RAT-) Aggregation (AQUA)) модули). Воедно, предложените алгоритми кои се имплементирани во мобилните терминали и во проху серверите, имајќи multi-homing и multi-streaming својства, се способни да управуваат едновременно со повеќе мултимедиски извори на информации, преку повеќе RAT (вклучувајќи било која постојна и идна RAT) интерфејси и можат да одберат најсоодветната/најсоодветните RAT/и за даден мултимедиски сервис. Предложената 5G рамка-водилка користи различни алгоритми за оптимизација од база на податоци во која има повеќе оптимизирачки алгоритми. Во рамките на дисертацијата се претставени во главно две оптимизирачки парадигми; првата за решавање на оптимизацискиот проблем, користи линеарно програмирање и генетски алгоритми, каде што се земаат во предвид неколку клучни QoS параметри (средниот системски проток и мултимедиската пристапна веројатност) при различни радио мрежни околности. Вториот оптимизациски проблем користи Љапунова drift-plus-penalty (ток-плус-казна) оптимизациска техника, која обезбедува методологија за дизајнирање на алгоритам кој го максимизира средниот временски проток – постигнувајќи ги мобилните широкопојасни можности и стабилизирајќи ги редовите на чекање, во поглед на минимизирање на доцнењата во редот на чекање и минимизирање на бројот на пакети кои се заостанати (чекаат) во редот. Перформансите на нашите предложени 5G терминали со AQUA модул се евалуирани и потврдени користејќи симулациски и перформансни анализи за повеќе различни хетерогени мобилни и безжични сценарија со мултимедиски сообраќај и со коегзистенција на повеќе RAT-и, како што се 3G, 4G, а исто така и идни 5G радио пристапни мрежи. Анализите покажаа значителни QoS перформанси во поглед на постигнување мобилен широкопојасен проток (битски брзини), минимални доцнења, максимална мултимедиска пристапна веројатност и други супериорни резултати за клучни QoS параметри во хетерогени мобилни и безжични средини, постигнувајќи оптимално искористување на мрежните ресурси, заради оптималното опслужување на сообраќај. Над се, прикажаната рамка-водилка за 5G терминали, може да биде една од остварливите решенија кое ќе се применува во сегашните и идни 5G мобилни и безжични мрежни архитектури.

Клучни зборови: 5G, Љапунов оптимизација, Multi-homing, Multi-streaming Multi-RAT, QoS.

1. Вовед

Мотивиран од екстремно брзиот развој на телекомуникациите и воопшто на комуникациско-информациската наука, особено огромниот развој во полето на безжичната мобилна технологија во последните десетина години, во рамките на оваа дисертација ќе бидат презентирани низа научни истражувања, анализи, споредби и механизми кои се однесуваат на обезбедување на интелегентна QoS (Quality of Service) поддршка во идната генерација на безжични и мобилни мрежи наречена 5 Генерација (од сега: 5G) мобилни и безжични мрежи. До сега, развојот во полето на телекомуникациите бележи екстреман прогрес, при што она што било незамисливо пред само 20-тина години, денес станува реалност, преку самата телекомуникациска технологија. На пример: користење на разни услуги (сервиси) кои бараат Gb/s проток од мобилни уреди додека корисниците се движат со воз, автомобил или просто пешачат; потоа, достапност до интернет сервисите од кое било место, во кое било време, од кој било мобилен или статичен уред, плаќање на сметки од домашен компјутер или мобилен телефон, постоење на холограмски (3-димензионални) сервиси и уреди, користење на разни сензори кои мерат температура, влажност на воздухот, интензитет на светлина во разни околности, пренос на информациите со брзина на светлина до кое било место на земјата (што пред стотина години за истото било потребно месеци, па и години да се пренесе од еден крај на земјината сфера до друг) и многу други примери кои ги носат современите телекомуникации. Сегашните 3G и 4G безжични мрежи обезбедуваат IP конективност за сервиси во реално време и вон реално време со задоволителен квалитет на услуга, при што постојат низа нови хетерогени можности со 3G и 4G безжичните мрежи 802.11 (WLAN), LTE, LTE-Advanced, IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Network, безжичните мрежи за пренос на дигитална TV (со висока резолуција), а исто така во последните години се покажуваат особено важни не само во научната средина туку и за индустриски цели, самите PAN (персоналните ad-hoc мрежи) и MANET (мобилните ad-hoc мрежи) мрежи. Во сите нив се посветува особено внимание на QoS, некаде тоа е одлично дефинирано (на пример во Mobile WiMAX, во UMTS, LTE/LTE-Advanced итн.), некаде предизвикува особен предизвик истото да се имплементира на задоволително ниво (како во сензорските Ad-Hoc мрежи), но секако неопходноста за добивање на различен квалитет на услугата за различни корисници и на задоволително ниво претставува приоритет во било која телекомуникациска мрежа, особено за услугите во реално време. Според најновите истражувања и трудови во денешните телекомуникации се наоѓаме во време кога се

имплементираат 4G стандардите (кои се сервисно-ориентиран), а 5G е се уште во развојна фаза, во врвот на научно-истражувачката фаза и од него постојат само главните концепти, предлози и појава на некои стандарди кои со голема веројатност можат да влезат во овој стандард (како IEEE 802.11ac, IEEE 802.11ad и IEEE 802.11af). Добро е познато дека во самиот 4G стандард влегуваат, покрај стандардите IEEE 802.11, 802.16 и 802.21 и повеќе стандарди слични на 3G и 3,5 G (UMTS, WiMAX), LTE, LTE-Advanced, поконкретно кажано, според ITU-T во IMT-Advanced мрежите ќе влезат: LTE-Advanced (LTE Release 10 и поновите Release 11 и 12) и Mobile WiMAX 2.0 (IEEE 802.16m). На последната средба на World Radiocommunication Conference (WRC), во Женева, Швајцарија (2-27 Ноември 2015), ITU - R ги разгледа и ревидира радио регулациите, поставувајќи ги насоките, можностите и целите спецификации за идните IMT-2020 системи, во кои спецификациски рамки треба да влезе 5G.

Сепак гледајќи ја мрежната имплементација и новите напредоци во ова поле, транзицијата на мобилната индустрија од 4G во 5G би побарувала појава на поинтелигентни уреди, кои се способни да обезбедат широк опсег на мултимедиски услуги (говор, аудио и видео апликации) до мобилните корисници, со проширена мобилност, поддршка на широкопојасни конекции, огромни процесирачки моќи на мобилниот уред, поддршка на комуникации машина-до-машина, напредни мрежни технологии, подобра искористеност на безжичниот медиум, балансирање на товарот, напредна QoS поддршка на било кој сервис (намалена веројатност за испад, намалена пакетска веројатност за грешка, минимално доцнење (од неколку мили секунди), високи битски брзини по корисник, multi-homing, multi-streaming, итн), како и подолго траење на батеријата, поголема мемориска моќ, кои ќе обезбедат доволно слободен капацитет за контролни информации и голем број на други напредни способности. Како што може да се увиди, 5G е дефинитивно корисничко-ориентиран стандард, каде интелигенцијата на мрежата се спушта до корисничките уреди, така што мобилните уреди ќе може да се поврзе на една или повеќе достапни безжична мобилна мрежа, во исто време, и ќе може да комбинира различни потоци од различни технологии. Сепак, се разбира дека интелигенцијата и целата пресметковна и процесирачка работа не треба да се остави на мобилниот уред, туку потребно ќе биде да се унапреди и надгради и останатиот дел од мрежата со дополнителна интелигенција за контрола и дополнителни јазли кои би ги поддржале погоре споменатите способности на 5G мобилните уреди.

Токму главната идеја со оваа дисертација е да допринесе во подетално дефинирање на QoS поддршката во хетерогените безжични и мобилни 5G мрежи, што е од суштински

интерес и придонес при реализацијата и имплементацијата на наведените способности и перформанси на 5G мрежите и 5G мобилните уреди, како и при формирањето на конечниот изглед на 5G стандардот (за кој постојат низа концепти и техничко-перформансни побарувања и насоки [1-10]). Имено во рамките на ова истражување ќе бидат презентирани резултати и анализи од симулации и практични експерименти за повеќе сценарија за различни услови и мрежни технологии, при што ќе се разгледува интелегентното QoS управување со вертикален multi-homing и multi-streaming карактеристики ([11] и [12]). Самото интелегентно обезбедување на QoS ќе се базира на чување на одредени измерени информации (различни QoS параметри, KPI и сл.) од физичко до апликациско OSI ниво, анализи под различни услови и за различни оптимизирачки алгоритми (меѓу кои во нашата рамка-водилка ги користиме: Linear Programming, Genetic Algorithms, и Lyapunov optimization technique) за QoS поддршка за различни мрежни технологии. При тоа самата мобилна станица би вршела повремени тестови, и чување на сите релевантни информации во одредена база во локална меморија, за да може интелегентно да ја одбере најпогодната телекомуникациска технологија за оптимални QoS задоволувања на сообраќајот. Со тоа попрецизно ќе се разгледаат концептите на креирање на еден напреден 5G мобилен уред кој во себе би имал интелегентен QoS модул со поддршка на вертикален multi-homing и multi-streaming и со повеќе интерфејси (за секоја радио пристапна технологија по еден), кој избира најадекватен и најквалитетен канал на комуникација со користење на една или повеќе различни технологии истовремено. Вакви истражувања сеуште нема во овој дел од Европа, но во светот почнува да се експериментира и истражува во таа насока на подобрување на QoS и формирање на адаптивни QoS модули кои би биле имплементирани во идната генерација на мобилните уреди, базните станици и рпоху сервери во јадрото на мобилните и безжични мрежи.

Факт е дека, самата еволуција кон 5G мобилни уреди и мрежи наметнува низа нови барања, како: високо ниво на QoS, употреба на посложени алгоритми, повеќе интерфејси (кон различни мрежни технологии), како и одредена модификација на OSI протоколниот стек. Имено, новите мобилни уреди ќе можат во себе дополнително да имплементираат сензори, Bluetooth, WLAN, GPS и други интерфејси, а сè со цел да можат да понудат разни сервиси за мобилните корисници, како на пример персонални сервиси: за здравје, информации за околината (хотели, мотели, стадиони, бензински станици, ресторани и сл.), локациски зависни сервиси, сервиси за итни случаеви итн. Но, во целиот овој напреден концепт за мобилен уред како главна идеја се пројавува нудењето на ефикасен QoS, кој е

независен од која било мрежна технологија (на пример, HSPA, 3G-LTE, 4G, WLAN, IEEE 802.16m, UMTS, LTE-Advanced итн.) и кој што ќе покаже висок степен на QoE (Quality of Experience) кај корисниците, без што би било апсурдно да се зборува за која било технологија, сервис или комуникација. Токму затоа, при дефинирањето на **истражувачкиот проблем** се поставуваат прашања од типот: како да се изведе самото протоколно ниво и напредна интелигенција на QoS управување во сегашните и идните мобилни и безжични мрежи? Како до подобар квалитет на сервис кај идните 5G мобилни и безжични мрежи (за било кој сервис)? Како да се изградат новите мобилни и безжични IP мрежи? Каде во архитектурата на 5G мрежите да се постави QoS модулот?

Предмет на истражувањето во рамките на оваа дисертација е: влијанието на напредните интелигентни QoS механизми (кратко понатаму ги наречуваме група на AQUA (Advanced QoS User-centric (RAT-) Aggregation) механизми и модули) и вертикални multi-homing и multi-streaming во хетерогените мобилни и безжични сегашни и идни 5G мрежи, во процесот на подобрување на квалитетот на услуга (QoS) и квалитетот на искуство (QoE) параметрите. Воедно, е истражено комбинирањето и едновременото користење на агрегираниот проток од повеќе радио пристапни технологии од различните мултимедиски сервиси кои ги вклучува корисникот на својот мобилен телефон, користејќи еден ваков AQUA модул со вертикални multi-homing и multi-streaming поддршки и повеќе интерфејси (до сите присутни радио пристапни технологии).

Во истражувањата на оваа докторска дисертација, како **главна (општа) хипотеза** се јавува следнава:

Воведувањето на напредни механизми и модули за квалитет на услугата (QoS) во постојни и идни 5G мобилните и безжични мрежи допринесува кон високо задоволително ниво на сите QoS параметри и добивање врвни оценки за QoE параметрите за кој било мултимедиски сервиси.

Првата посебна теза е следнава:

1) Воведувањето на напредни интелигентни механизми и модули за квалитет на услугата (QoS) во 3G/4G постоечки хомогени мобилните и безжични IP мрежи допринесува кон високо задоволително ниво на сите QoS параметри за даден мултимедиски сервис.

Втората посебна теза е следнава:

2) Воведувањето на напредни интелигентни механизми и модули за квалитет на услугата (QoS) во идни 5G хетерогени мобилните и безжични IP мрежи допринесува кон

високо задоволително ниво на сите QoS и QoE параметри за било кои дадени мултимедиски сервиси.

Понатаму, оваа докторска дисертација е организирана на следниот начин: во следната глава е разгледан 5G развој, 5G концептите и носечките столбови и постулати врз кои почиваат идните 5G мобилни и безжични мрежи. Во третата глава се дадени основни дефиниции за QoS и преглед на QoS механизмите во денешните и дел од идните мобилни и безжични мрежи, начинот на функционирање и карактеристики. Во четвртата глава е објаснет напредниот QoS-базиран корисничко-центриран модел за 5G со RAT-агрегација на IP ниво и со вклучени вертикален multi-homing карактеристики, при што се дадени и симулациски резултати и анализи за четири различни сценарија, при различни мрежни услови. Во петтата глава е презентираан надграден AQUA модул за 5G јазлите кои користат Љапунова drift-plus-penalty (ток-плус-казна) оптимизациска техника за разрешување на оптимизацискиот проблем и постигнување стабилност според Љапунов, при што истиот обезбедува методологија за дизајнирање на алгоритам кој го максимизира средниот временски проток, го минимизира средното доцнење и средната големина на редовите на чекање во 5G јазлите. Шестата глава дава некои примени на 5G мобилниот уред со AQUA и multi-homing карактеристики во себе, во следната генерација на мобилни широкопојасни мрежи и сервиси. На крајот, седмата глава ги дава главните заклучоци и придонеси на оваа докторска дисертација.

Воедно, од оваа докторска дисертација произлегоја и следните трудови објавени во светски списанија со фактор на влијание, реномирани светски списанија, домашни и меѓународни конференции и поглавја во книга:

- [1] T. Shuminoski; T. Janevski, "Lyapunov Optimization Framework for 5G Mobile Nodes with Multi-Homing," in IEEE Communications Letters, Vol. 20, No. 5, pp. 1026-1029, May 2016, Date of Publication: 10 March 2016. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2540622, **Impact Factor: 1.268.**
- [2] Shuminoski, Tomislav and Janevski, Toni, "Advanced QoS-Based User-Centric Aggregation (AQUA) for 5G Mobile Terminals in Heterogeneous Wireless and Mobile Networks", book title: "Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures" editors: Atanasovski, Vladimir and Leon-Garcia, Alberto, Springer International Publishing, pp(s): 299-306, isbn 978-3-319-27072-2, doi 10.1007/978-3-319-27072-2_39, 30 December 2015.
- [3] Tomislav Shuminoski, Toni Janevski, "5G Mobile Terminals and Networks with QoS provisioning and Vertical Multi-Homing", XII International Conference ETAI 2015, Ohrid, Macedonia, September 24-26, 2015.

- [4] Tomislav Shuminoski, Toni Janevski, "5G mobile terminals with advanced QoS-based user-centric aggregation (AQUA) for heterogeneous wireless and mobile networks", *Wireless Networks*, (DOI) 10.1007/s11276-015-1047-4, published online: 25 August 2015. **Impact Factor: 0.961.**
- [5] Tomislav Shuminoski and Toni Janevski, "Advanced Mobile Terminal for Heterogeneous Wireless Networks", *International Journal of Grid and Distributed Computing (IJGDC)*, Vol.7, No.6 (2014), pp. 111-128.
- [6] Tomislav Shuminoski, Toni Janevski. "Radio Network Aggregation for 5G Mobile Terminals in Heterogeneous Wireless and Mobile Networks", *Wireless Personal Communications: Volume 78, Issue 2 (2014)*, (DOI) 10.1007/s11277-014-1813-0, Page 1211-1229, published online: 01 May 2014. **Impact Factor: 0.653.**
- [7] Tomislav Shuminoski, Toni Janevski, "Advanced Mobile Terminals with Radio Network Aggregation for Heterogeneous Wireless Networks", *XI International Conference ETAI 2013, Ohrid, Macedonia, September 26-28, 2013.*
- [8] Tomislav Shuminoski, Toni Janevski, "Radio Network Aggregation for 5G Mobile Terminals in Heterogeneous Wireless Networks", *XI International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services - TELSIS 2013, Nish, Serbia, October 16 - 19, 2013.*
- [9] Tomislav Shuminoski, Toni Janevski, "Novel Adaptive QoS Framework for Integrated UMTS/WLAN Environment", *TELFOR Journal*, Vol. 5, No.1, pp: 14-19, Belgrade, Serbia, 2013.

2. 5G развој и концепти

Сведоци сме на екстремно зголемениот волумен на мобилен сообраќај, на брзиот развој на мобилните широко-појасни мрежи, на појавата на интелигентни мобилни уреди. Според некои предвидувања, се очекува илјада пати да се зголеми волуменот на глобалниот мобилен сообраќај од 2010 до 2020 година. Самата потрага по зголемен сообраќај на мобилните и безжични мрежи, најмногу е водена од раширувањето на мобилните уреди, како и на зголемениот број на податочно-гладните мобилни уреди-особено паметните телефони (на англ. smart phones). Како додаток на претходното, друг важен фактор кој влијае врз зголемениот мобилен сообраќај е зголеменото побарување на напредни мултимедиски сервиси (апликации) како што се UHD (Ultra-High Definition) и 3D видео, како и проширена реалност и искусување. Во денешно време, волуменот на видео сервисите кои се пренесуваат преку мобилните уреди зафаќа 50 % од глобалниот мобилен податочен сообраќај, а се предвидува пораст на овој процент до 75 % до 2018 год. Освен тоа, социјалните мрежи допринесуваат кон порастот на глобалниот мобилен податочен сообраќај и стануваат еден од најважните сервиси за мобилните корисници, создавајќи ново потрошувачко однесување.

Несомнено, брзината на пораст на мобилниот податочен сообраќај е многу поголем од порастот на говорниот сообраќај. Глобалниот мобилен говорен сообраќај беше надминат од мобилниот податочен сообраќај во 2009 година, а се предвидува дека до крајот на 2016 година VoIP сообраќајот ќе зафати само 0,35 % од целиот мобилен сообраќај. Во 2013 година, бројот на мобилни претплати достигна 6,8 милијарди, што одговара на глобална мобилна пенетрација од 96 %.

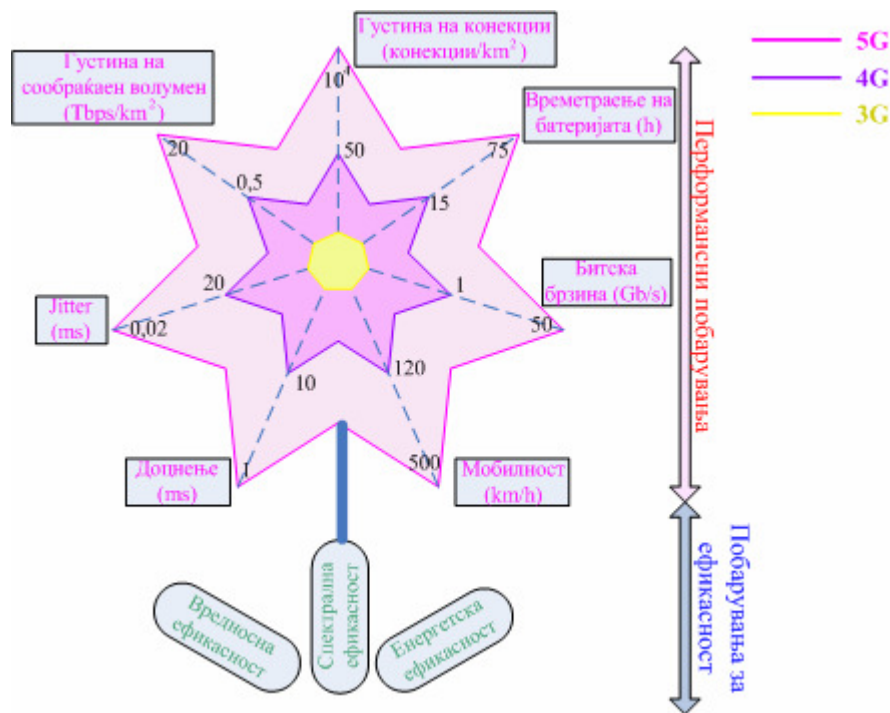
Настрана од тоа што порастот на сообраќај е илјадници пати, зголемениот број на поврзани уреди наметнува друг предизвик за идната генерација на мобилни и безжични мрежи. Се очекува дека, во идното поврзано општество, сите и сешто ќе бидат меѓусебно поврзани – под капата на Интернет на се, т.е. Internet of Everything (IoE) или Internet of Things (IoT), каде десетици до стотици уреди ќе му служат на секој човек. На тој начин, една таква 5G мрежна инфраструктура која треба да дојде, заедно со можноста истата да поддржува Big Data, ќе овозможи градовите да бидат попаметни, т.е. ќе доведе до појава на паметни градови (на англ. Smart cities). Податоците ќе бидат создавани и од луѓето и од машините, и ќе бидат анализирани во реално време, за да можат да обезбедат корисни информации, за навиките на луѓето, за состојбата на сообраќајот на улиците, за здравјето на набљудуваните пациенти, за чистотата на водата и воздухот во градовите, и за безброј

други неопходни работи. Мобилните и безжични комуникации ќе играат врвна улога во овозможувањето на ефикасен и безбеден транспорт, преку овозможување на сите возила да комуницираат меѓу себе, разменувајќи важни информации за состојбата на патиштата, па се до само-управувачки интелегентни возила. Овој тип на машина-со-машина (на англ. Machine-to-Machine (M2M)) комуникации побаруваат многу мало доцнење (под 1 ms), доверливи комуникации и предизвикуваат големи предизвици за следната генерација на мрежи.

Како и да е, едно прашање природно се наметнува, а тоа е: дали 5G ќе биде само една еволуција плус од 4G, или новите мобилни широко-појасни технологии ќе предизвикаат значајни расцепи кои ќе доведат до потполно рedefинирање на мобилните принципи?

Едно е јасно, дека концептот на 5G мобилните мрежи е кориснички-центриран концепт, за разлика од операторски-центрираниот кај 3G или сервисно-центрираниот концепт кај 4G [13]. На сликата 2.1 е дадена илустрација на перформансите очекувања и побарувања од 5G мрежите, споредени со перформансите на 4G и 3G мрежите. Се разбира, параметрите што се дадени за 5G се целни и се тежнее истите да бидат достигнати од страна на првите имплементации на 5G технологиите, кои се очекуваат во 2020 година. Во принцип, 5G мрежите би требало да имаат едновремен пристап до повеќе различни мобилни и безжични технологии (т.е. хетерогеност), и мобилните уреди треба да можат да ги комбинираат различните податочни потоци на интелегентен начин. При тоа, би постигнувале големи битски брзини (на пример, 10 пати поголеми брзини од 4G уредите, т.е. 1000 пати поголеми агрегирани битски брзини). Како што е прикажано на сликата 2.1, доцнењата на 4G мрежите (вклучувајќи го доцнењето во јадрото и во пристапниот дел) е во опсег до 10 ms, се очекува кај 5G мрежите, истото да биде минимизирано до 1 ms (што е основа за т.н. опиплив Интернет).

На тој начин, како и во претходните генерации на мобилни мрежи, 5G се очекува да биде множество на еволуирани мрежни технологии. Но, самите 5G мрежи целат да обезбедат врвен пристап на информации и способност да споделуваат податоци секаде, од било кое место, до било кој корисник или уред, со задоволително ниво на QoS, за доброто на човештвото, за напредокот на бизнисот, економијата и општеството.



Слика 2.1. Цветот на 5G.

Огромниот пораст на мобилниот сообраќај, заедно со милијардите поврзани уреди ги туркаат мобилните и безжични мрежи во една мобилна широко-појасна сеприсутна мрежа со екстреман капацитет и енергетска ефикасност, плус одлична QoS поддршка. Несомнено, следната петта генерација на мобилни и безжични мрежи (кратко 5G) ќе биде инстанца на вистинска конвергентна безжична, мобилна и фиксна мрежа од мрежи, обезбедувајќи широко-појасни битски брзини за мобилните корисници, сеприсутност и високо ниво на QoS за било кој сервис. Несомнено, конкретните нивоа на 5G перформансите и побарувањата кои 5G системите и уредите треба да ги имаат, треба дополнително да се дефинираат и стандардизираат. До 2020 година, како што беше и претходно споменато, целиот процес на стандардизација и спецификации за побарувањата од 5G ќе бидат завршени со новиот ITU-R препорака, наречена IMT-2020.

2.1 Историски развој и патот до 5G

Секоја нова генерација на мобилни и безжични мрежи, вообичаено се појавува на секој 10 години, носејќи понапредни и посупериорни перформанси (пред сè поголеми битски брзини во downlink и uplink) во споредба со претходните генерации. Тековната 4G генерација на мобилни и безжични системи е веќе воспоставена од 2011 година, па доколку се следи тој тренд, 5G мобилните и безжични мрежи ќе бидат стандардизирани и поставени во употреба до 2020 година. Глобалните стандарди се основни канони во истражувањето на сеприсутната поврзаност, обезбедувајќи интероперабилност на светско

ниво, овозможувајќи повеќе-вендорска хармонизација и економско скалирање. Така, секторот International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU - R) како одговорен за дефинирањето на International Mobile Telecommunications (IMT) спецификациите за секоја следна генерација на клеточни системи, покрај другото ги специфицира стандардите и дефинира крајните рокови за нивно исполнување. Претходно ITU - R во IMT - 2000 ги дефинирани 3G стандардите, во IMT - Advanced ги дефинира рамките на 4G стандарди, а следната генерација 5G ќе влезе во рамките на IMT-2020 спецификациите. На последната средба на World Radiocommunication Conference (WRC), во Женева, Швајцарија (2-27 Ноември 2015), ITU - R ги разгледа и ревидира радио регулациите, поставувајќи ги насоките, можностите и целите за идните IMT-2020 системи.

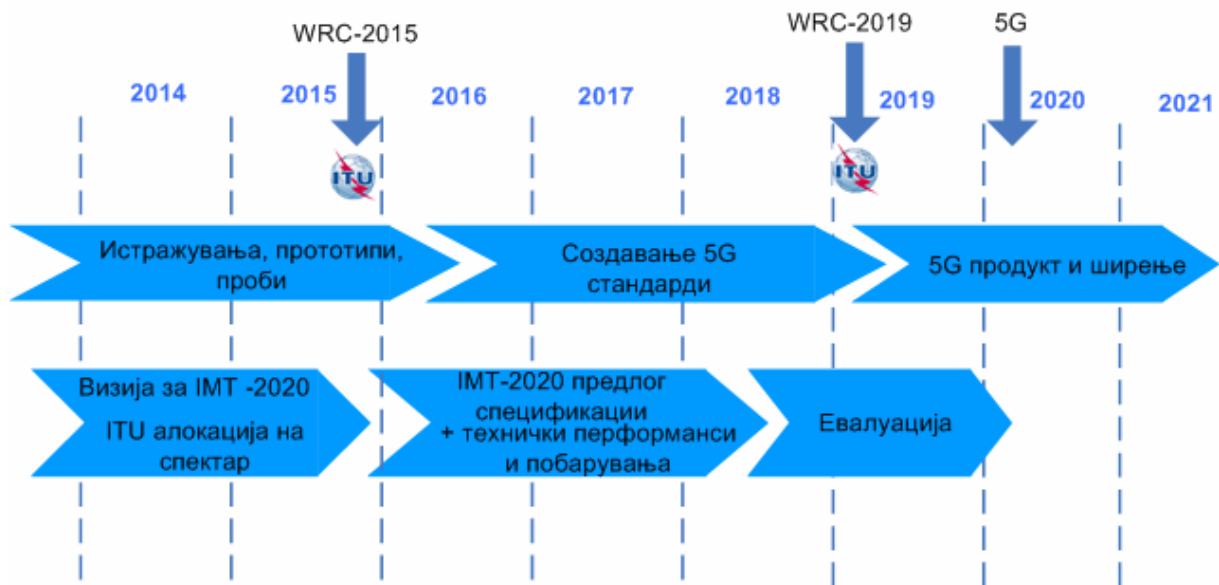
За да се разбере каде сакаме да бидеме во поглед на 5G, добро е да се погледне назад историски во различните генерации на мобилни и безжични системи, и да се означи каде сме сега. Подолу ги набројуваме сите генерации на мобилни и безжични системи, давајќи ја целата патека на еволуција до 5G системите:

- **Пред 1G** (<1983 год.): Сите мобилни и безжични комуникации биле говорно-центрирани и се користеле аналогни системи со Single-Side-Band (SSB) модулација.
- **1G** (1983-): Сите мобилни и безжични комуникации биле говорно-центрирани. Во САД претставник од овие клеточни системи бил AMPS (Advanced Mobile Phone Service), кој бил аналоген систем со FM радио пренос (бидејќи во тоа време дигиталните радио системи биле многу скапи).
- **2G** (1990-): И во овој период сите безжични и мобилни системи биле говорно-центрирани. Европскиот GSM и Северно Американскиот IS-54 биле дигитални системи кои користеле TDMA како повеќекратен пристап. Ова е периодот кога се случила миграцијата од аналогни во дигитални системи, токму на преминот помеѓу 1G и 2G системите.
- **2.5 G** (1995-): Сите безжични и мобилни системи биле говорно-центрирани, со ограничена можност за пренос на податочен сообраќај. CDMA (Code Division Multiple Access) системот кој користел 1,25 MHz опсег, бил пуштен во употреба во САД. Во исто време, во Европа GSM системот бил надграден и подобрен со GPRS и EDGE системите.
- **3G** (1999-): Во оваа генерација, безжичните и мобилни системи имале можност да пренесуваат и говор и податоци. Всушност, за разлика од сите претходни генерации, 3G е првиот меѓународен стандардизиран систем од страна на ITU. Самиот 3G ја користи WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access)

технолозијата, која има опсег од 5MHz. Оваа технологија работи и во FDD (Frequency Division Duplex) мод и во TDD (Time Division Duplex) мод на работа. Токму затоа, се вели дека со еволуцијата од 2G во 3G системите, имаме еволуција од говорно-центриран во податочно-центрирани системи, или генерално се преминало во операторски-центрирани системи.

- **4G** (2013-): 4G е систем со високи податочни брзини плус говорен сервис, кој е сервисно-центриран. Во овој период постојат два типа на 4G системи. Во САД се развил WiMAX системот кој користи OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), кој се развил од WLAN. Другиот тип на системи се LTE (Long-Term Evolution)/LTE-Advanced системите, кои се развиле после WiMAX системот. И двата видови на 4G системи користат опсег од 20 MHz и се доста слични. Сепак, најраспространет широм земјите во светот е LTE/ LTE-Advanced. Така, миграцијата од 3G во 4G значи скок од ниски податочни брзини во големи (широкопојасни) податочни брзини за мобилни сервиси и користење на сите Интернет сервиси преку мобилен.
- **5G** (2021-): 5G сеуште треба да биде додефинирана и стандардизирана од стандардизациските тела. Истата ќе биде кориснички-центрирана, со супер висок капацитет, со широкопојасни мобилни комуникации (високи битски брзини), со нови побарувања за архитектурата и дизајнот на системите, кои ќе доведат до енергетски ефикасни системи и ќе се намалат оперативните трошоци на операторите. Во тој поглед, 5G нема да подлегне само на една нова технологија, туку на цел еден технолошки екосистем од постојни и идни мобилни и безжични хетерогени мрежи кои ќе работаат во голема синергија, давајќи одличен квалитет на сервис (QoS) и највисоко ниво (до сега) на задоволни корисници. Овој премин од 4G во 5G се карактеризира како скок на дизајнерската парадигма од едно-дисциплински сервисно-центриран систем во мулти-дисциплинарен кориснички-центриран систем.

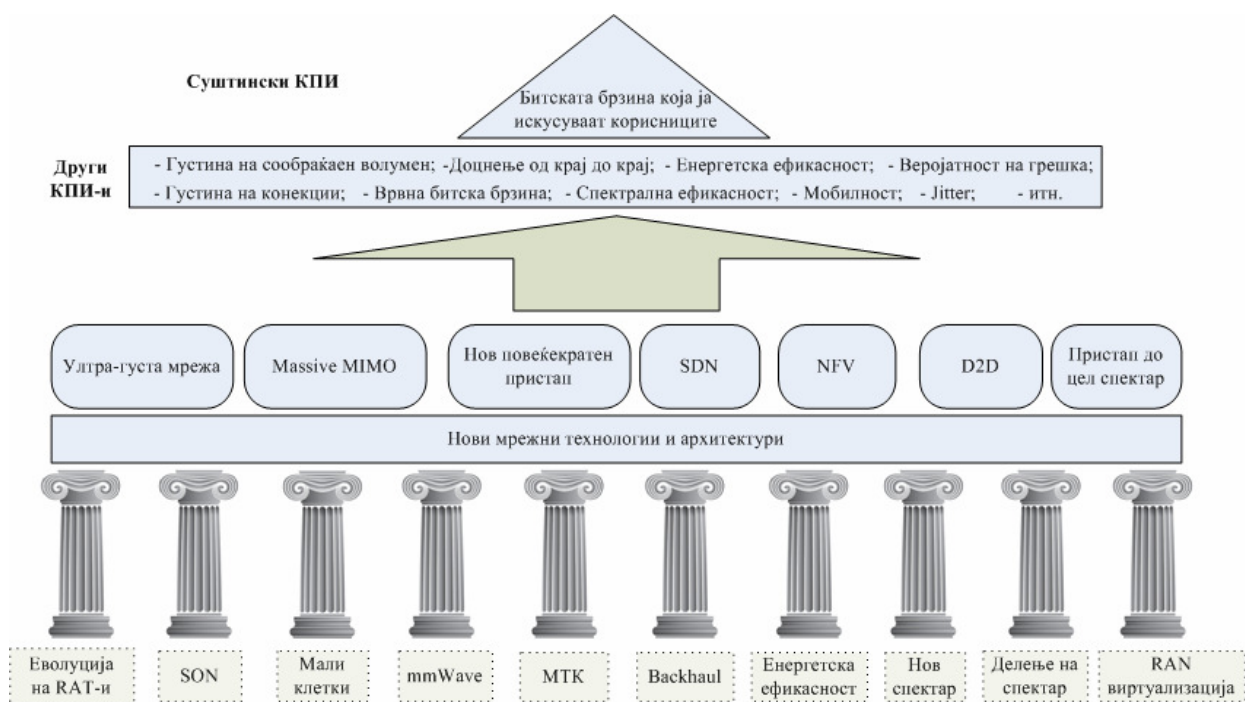
На Слика 2.2 е прикажана еволуциската патека до 5G (според ИМТ-2020). Сега се наоѓаме во фазата на привршување на прототиповите и истражувањата за 5G, како и доделувањето на нов спектар и имплементирањето на одредбите од WRC 2015, како и јасно дефинирање на 5G стандардите и побарувањата. Понатаму следува фазата на стандардизациските активности и развој на продуктите сè до 2020 год. Воедно, се очекува дека првиот бран на 5G мрежи да биде оперативен и активиран околу 2021 год.



Слика 2.2. Патот до 5G.

2.2 5G столбови

Во овој дел ги идентификуваме десетте носечки столбови на 5G мрежите, кои се прикажани сликовито на слика 2.3. Покрај тоа, на сликата 2.3 се прикажани и водечките технологии кои се двигатели кон 5G мобилните и безжични мрежи, како Massive MIMO, софтверски дефинирани мрежи (на англ. Software-defined networking (SDN)), Network functions virtualization (NFV), уред до уред комуникација, ултра густа мрежа и низа на нови технологии и нови мрежни архитектури. Истите ќе влијаат на подобрување на клучните перформансни индикатори (КПИ), како: густина на сообраќаен волумен, доцнењето, варијациите на доцнењето (т.н. jitter), веројатноста на пакетска грешка, веројатноста за испад, веројатноста за битска грешка, густината на конекциите, врвната и средната битска брзина, спектралната ефикасност итн. Клучните перформансни индикатори се всушност главните метрики од кои се извлекува нивото на QoS во телекомуникациските мрежи. И најгоре, како најзначаен перформансен индикатор за 5G мрежите ќе биде битската брзина која ја искусуваат крајните корисници, која се тежнее да биде до 1 Gb/s. Со тоа би имале мобилен широкопојасен сеприсутен комуникациски систем. Понатаму, ќе ги објасниме накратко сите основни столбови на 5G, при што ќе ја нагласиме нивната улога и важност во постигнувањето на целите кои треба да бидат достигнати со 5G мрежите.



Слика 2.3. 5G столбови и клучни перформансни индикатори.

Како што споменавме и претходно, во 5G тешко дека ќе бидат присутен еден специфичен RAT, место тоа, ќе има multi-RAT или збир на повеќе различни RAT-и во една структурна единица наречена Cloud-RAT или RAT во облак. Тој Cloud-RAT ќе може едновременно да користи повеќе различни мрежни технологии за да пренесува еден или повеќе мултимедиски сервиси до мобилниот уред, кој што ќе има повеќе RAT интерфејси во себе, и сето тоа да биде управувано на интелигентен начин, нудејќи највисоко ниво на QoS во 5G мрежите од крај-до-крај. Освен тоа, едно од очекуваните економски и оптимални решенија за идните еволуирани RAT-и е зголемување на неговиот капацитет за илјадници пати од постојните 4G RAT-и, преку зголемување на спектралната ефикасност, енергетската ефикасност и минимизирање на доцнењето, плус поддржувајќи присуство на флексибилни радио пристапни мрежи кои се споделуваат помеѓу различните вендори во рамките на Cloud-RAT-от. Во таа насока, развојот на LTE еволуира кон LTE-Advanced и понатаму, со поддршка на massive MIMO, агрегација на носители, поддршка на реле јазли, двократно зголемување на спектралната ефикасност кај LTE-Advanced (downlink - 30 bps/Hz; uplink - 15 bps/Hz) во споредба со LTE. И понатаму, LTE еволуцијата продолжува кон развој на напредни повеќе-кориснички beamforming техники, напредно поништување на интерференцијата и можности за координација на интерференцијата во хибридниот сценарија со присуство на мали клетки. Од друга страна, и WLAN (IEEE 802.11 групата на стандарди) еволуираат кон можноста подобро да го искористуваат слободниот нелиценциран спектар. Така, најновите WLAN стандарди: IEEE 802.11ac, IEEE 802.11ad и

IEEE 802.11af се првите 5G кандидати, бидејќи достигнуваат безжични широкопојасни комуникации со високи гигабитски податочни брзини. Така IEEE 802.11ac е познат како Very High Throughput (VHT) стандард кој нуди приближно 7 Gb/s, користи поширок опсег на каналите, со ширина 80 до 160 MHz, и работи на IMS опсегот: 5.8 GHz. Спектрална ефикасност на IEEE 802.11ac изнесува: 7.5 bps/Hz. Овој стандард употребува повеќе-корисничко MIMO со 4 и 8 просторни антени и подобрани шеми за модулација и кодирање (256 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)), надминувајќи го повеќекратно неговиот претходник IEEE 802.11n стандардот. Другиот WLAN стандард, IEEE 802.11ad е познат како MicroWave WLAN или WiGig стандард, бидејќи работи на големи фреквенции, т.е. работниот опсег му е 60 GHz-ниот IMS опсег со кратка покриеност (1 до 10 метри). Овој стандард нуди податочни брзини до 6 Gb/s, токму заради користењето на антена-beam управувањето (мали антени) и широкиот предавателен опсег. ITU-R за овој стандард препорачува користење на 4 канали, секој да е широк 2.16 GHz со централни фреквенции на 58.32, 60.48, 62.64, и 64.80 GHz. Последниот од групата на нови WLAN стандарди е IEEE 802.11af, познат како White-Fi, бидејќи го користи ослободениот ТВ бел опсег (470-710 MHz), постигнувајќи податочни брзини од 12 Mbps до 54 Mbps, со одлични пропагациски својства и ширина на каналите од: 6 MHz. Овој стандард користи когнитивни радио техники (да детектира одреден пренос и да се преместува на слободни канали).

Понатаму, можностите на Self-Organising Network (SON) се друг клучен составен дел од 5G системите. Самите SON земаат сè поголем замав, благодарение на имплементирањето на малите (пико и фемто) клетки. За да се носи генерираниот сообраќај од малите клетки, кој зафаќа некаде 80 % од целокупниот indoor и outdoor сообраќај, треба да се имплементира SON, за интелегентно да се адаптира тој сообраќај и да се минимизираат меѓу-клеточните интерференции.

Густа поставеност на малите клетки, се неопходни за да се постигнат големи вредности на капацитетот (илјадници пати поголеми од денешните постојни мобилни и безжични мрежи) и да се задоволат големи густини на приклучени уреди и корисници по километар квадратен. Веќе постојните HetNet можат да помогнат во значително подобрување на просторната спектрална ефикасност (b/s/Hz/m²). Генерално, постојат два различни начини за да се реализираат HetNet: првиот е покривање на клеточните системи со повеќе помали клетки (микро, пико или фемто клетки), во рамките на макро ќелијата, од истата технологија; вториот начин е исполнување на макро клетките со мали клетки од различни технологии. Вториот начин уште се нарекува multi-RAT HetNet.

Друг столб од 5G е поставување на mmWave базирани RAT-и, кои работаат на 60GHz или барем над 9 GHz спектар, нудејќи бескрајно море од подобности. Иако mmWave комуникациите имаат неколку слабости, како: лошата пропација на поголеми растојанија (имаат мала покриеност), работаат со директна оптичка видливост, имаат големи слабеења предизвикани од одбивање, прекршување и продирање на електромагнетните бранови, сепак имаат огромен широкопојасен работен спектар. Друга предност е што имаат мали антени (половина бранова должина), овозможувајќи десетици антенски елементи да бидат поставени во само еден квадратен сантиметар. Со тоа се овозможуваат големи добивки од beamforming-от на релативно мала област, што може да се имплементира и во мобилните уреди и во базните станици (пристапните точки). Преку примена на паметни фазирани низи од антени, може во целост да се искористат повеќето антени во безжичните канали, за да се зголеми системскиот капацитет.

Настрана од корисниците, поврзувањето на мобилни машини е друг фундаментален аспект од 5G. Машинскиот тип на комуникации (МТК) е доста популарен тип на комуникација, каде или едниот или и двата краја на комуникациската сесија вклучуваат машини. МТК има два главни предизвици во поглед на мрежите. Првиот е дека, бројот на уреди кои треба да се поврзат е незамисливо голем (тоа е споменатиот концепт на IoT). Вториот предизвик е во зголеменото побарување на мобилни уреди во реално време и поврзување на истите со далечинска контрола (како на пример возила) преку мрежата. Ова несомнено побарува „тактилен Интернет“, т.е. многу мали доцнења од неколку мили секунди.

Рedefинирањето на backhaul линковите е следната критична точка во 5G. Паралелно со подобрувањето и еволуцијата на радио пристапните мрежи, backhaul линковите треба исто така да бидат ревидирани и преорганизирани, така што, да можат да го носат огромното количество на кориснички сообраќај генериран од клетките. Во спротивен случај, токму backhaul-от ќе стане тесно грло во идните мобилни и безжични системи, деградирајќи ги перформансите на целиот систем. Особено овој проблем се зголемува, како што расте интересот за мали клетки. Овде може да помогне употребата на оптички кабли, микробранови системи и mmWave точка-точка линкови во backhaul делот.

Енергетската ефикасност останува главна цел во развивањето и имплементирањето на 5G. Денес, информатичко комуникациските технологии (ИКТ) користат скоро 5% од електричната енергија произведена ширум светот, и е одговорна апроксимативно 2 % за емисијата на гас на глобално ниво. Тоа е речиси еквивалентно на емисијата на гас и штетни материи создадени од авио индустријата. Тоа што најмногу влијае е фактот што,

доколку не се води сметка за енергетската ефикасност и намалување на емисијата на јаглерод диоксид во светот, горенаведените проценти до 2020 се проценети дека ќе се дуплираат. Така, неопходноста од енергетска ефикасност е неминовна, особено од енергетски ефикасниот дизајнерски пристап за радио пристапните мрежи и backhaul линковите, па сè до енергетската ефикасност на мобилните уреди (пред сè на поголемиот живот на батеријата).

Доделувањето на нов спектар во 5G е друг важен столб, бидејќи истиот е неопходен ресурс за мобилните и безжични комуникации. Илјада пати зголемениот сообраќај во споредба со 4G тешко дека може да биде управуван и опслужуван само со подобрувања на спектралната ефикасност или со поставување на многу мали клетки. Доделувањето на 100 MHz ширина на опсег на 700 MHz и други 400 MHz на околу 3,6 GHz, како и потенцијална алокација на неколку GHz-ен опсег во cm- или mmWave опсезите за 5G, беше во фокусот на WRC-2015 (организиран од ITU-R).

Регулацискиот процес за доделување на нов спектар, често знае да одзема многу време, така што, ефикасното користење на веќе достапниот спектар е од голема важност. Може да се применат иновативни модели за доделување на спектар (различни од веќе постојните традиционални лиценцирани или нелиценцирани спектрални доделувања) за поефикасно надминување на постојните регуларни ограничувања. Така на пример, постои огромен радио спектар доделен на воените радары, кој не се користи целиот, цело време (24/7), или во целиот географски регион. Од друга страна, ослободувањето на спектарот е многу комплициран процес, особено што, некои делови од спектарот не можат да се ослободат, или барем можат да се ослободат после многу долго време и не на сите локации (региони). Овде може да помогнат концептите од когнитивното радио, за да се искористат максимално и лиценцираните и нелиценцираните делови од спектарот. Како и да е, нови начини и модели на делење на спектарот ќе бидат добредојдени за идните 5G, како што повеќе-закупувачките мрежни операции се прошируваат.

Последниот 5G столб, од десетте наброени, е виртуализацијата на радио пристапните мрежи, т.е. RAN виртуализација која дозволува да се споделува мобилната и безжичната инфраструктура помеѓу повеќето различни оператори. Мрежната виртуализација треба да биде турната од жичната јадрена мрежа (на пр. комутатори и рутери) кон радио пристапната мрежа. За тоа е потребно соодветна интелигенција и алгоритми кои ќе се имплементираат во RAN хардверот и ќе се контролираат од една централна точка, користејќи софтверски мозок, кој може да биде направен на различни нивоа. Тоа може да доведе до безброј многу придобивки, како намалување на капиталните и оперативните

трошоци, енергетска ефикасност, флексибилно скалирање по барање на ресурсите, поедноставно управување и одржување на мрежата итн. Крајно, повеќе-модните радио пристапни мрежи кои поддржуваат 3G, 4G, WLAN итн, можат да бидат адаптирани, каде што повеќе радио интерфејси ќе бидат вклучени или исклучени преку централизирана софтверска контролна единица, со што би се постигнала енергетска ефикасност и зголемен QoS во 5G мрежите.

3. QoS во мобилни и безжични мрежи

Во рамките на ова поглавје ќе бидат разгледани и објаснети механизмите за обезбедување на квалитет на сервисот во денешните и дел од идните мобилни и безжични мрежи. За таа цел, ќе бидат прикажани QoS механизмите со кои се обезбедува задоволително ниво на понудените сервиси во WLAN (IEEE 802.11), 3G мрежите (UMTS), WiMAX (IEEE 802.16 WMAN), LTE/LTE-Advanced како и во безжичните мобилни ад-хок мрежи (MANET). Сепак, на почетокот, пред да продолжиме со објаснување на овие механизми, неопходно се наметнува потребата од објаснување на терминот квалитет на сервис (QoS). Имено, денес постојат низа на дефиниции за овој термин, во зависност од перспективата на гледање, рангирањето и проценувањето како од корисничката страна, така и од мрежна страна, на одредено множество од конекциски параметри кои треба да гарантираат задоволително ниво за даден сервис (апликација) што се нуди во мрежата.

Според ISO 8402 зборот QoS е дефиниран како: „збир на карактеристики на одреден ентитет кој во себе содржи способност да задоволи одредени конкретни потреби (барања)“. Од друга страна ISO 9000 квалитетот го дефинира како степен до кој одредени карактеристики ги исполнуваат однапред дадените барања за нив. Меѓународната телекомуникациска унија ITU-T (препорака ITU-T E.800) и ETSI (препорака ETSI-ETR003) го дефинира квалитетот на сервис (QoS) како: „колективен ефект од перформансите на сервисот, кои го одредуваат задоволителното ниво на корисникот за тој конкретен сервис“. Понатака, ETSI развила и друга дефиниција (според ETSI-TR102) каде QoS е претставен како способност за сегментација на сообраќајот или способност на диференцијација помеѓу типовите на сообраќај, со цел самата мрежа да може да го третира секој сообраќаен поток различно. Со ова дефиниција јасно се прецизира важноста од разликувањето на потоците во самата мрежа за да може да се употребат различни QoS механизми врз различните потоци и истите да се третираат различно (пример, за сервиси во реално време и вон реално време, кај едните се бара минимално доцнење и џитер, а кај другите беспрекорна точност при самиот пренос). И покрај сите овие дефиниции една е клучна, а тоа е дека, од гледна точка на мрежата, QoS претставува способност на мрежните елементи (рутери, мобилни јазли, хостови, сервери итн.) да имаат некое ниво на сигурност, дека можат истите да ги задоволат сите сообраќајни и сервисни побарувања. Да потенцирам, дека главната идеја не е беспрекорно ниво на QoS, туку некое задоволително ниво на обезбедување на квалитет на дадениот сервис во рамките на мрежата или на мрежите во кои се спроведува дадениот сервис.

Сосема е јасно дека самите QoS механизми во безжичните и мобилни системи имаат огромен предизвик, да се справат со огромен број на ограничувања, за разлика од механизмите кои се користат во фиксните мрежи. Така, QoS механизми во безжичните и мобилни системи се тесно поврзани со управувањето на опсегот (спектарот е еден од најскапите ресурси), пристапот, бројот на корисници, потрошувачката на енергија и мрежните управувачки подесувања во зависност од побарувањата на апликацијата (сервисот). При што повеќе од јасно е дека без исклучок сите апликации (било тоа да се во реално или вон реално време) побаруваат задоволување на одредени QoS параметри. Генерално земено, сите сервиси можат да се третираат во една од шест QoS класи дадени во Табела 3.1 (според ITU-T Y1541). Понатака во Табела 3.2 се дадени главните QoS побарувања на дадените 6 QoS класи од Табела 3.1. Како што може да се забележи, за секоја посебна класа на сервис има посебни специфични QoS параметри кои мора да се запазат, а од друга страна дел од параметрите дури не мора ни да бидат специфицирани за одредени апликации (сервиси).

Според горе-кажаното, генерално земено QoS значи промени, од аспект и на апликацијата и од научната област. Така генерално постојат три типови на QoS во хетерогените мултимедиски безжични и мобилни мрежи: **суштински QoS**, **воочени QoS** и **утврдени QoS**.

Табела 3.1. QoS класи според ITU-T Y1541.

QoS класа	Својства	Пример на сервис	Рутирачка техника	Приоритет
0	- во реално време, - осетливи на доцнење и jitter, - високо интерактивни	VoIP, Video conference со висок квалитет	Условено рутирање и растојанија	Највисок
1	- во реално време, - осетливи на jitter, - средно интерактивни	VoIP, Video conference	Полабаво условено рутирање и растојанија	Висок
2	-податочни, - високо интерактивни	Сигнализациски пораки/сообраќај	Условено рутирање и растојанија	Среден
3	-вон реално време, податочни, -средно/ниско интерактивни	Податочни сервиси (ftp, torrent и сл.)	Полабаво условено рутирање и растојанија	Низок
4	-кратки податочни, - мали податочни загуби	Video streaming, e-mail, web	Било која рутирачка патека	Најнизок
5	default	Best-Effort	Било која рутирачка патека	Нема

Табела 3.2. QoS параметри за дадените 6 класи според ITU-T Y1541.

QoS параметри	Класа 0	Класа 1	Класа 2	Класа 3	Класа 4	Класа 5
Доцнење	100 ms	400 ms	100 ms	400 ms	1s	НС
Цитер	50 ms	50 ms	НС ^{***}	НС	НС	НС
PLR [*]	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	НС
PER ^{**}	10 ⁻⁷		0.0001		10 ⁻⁶	НС
Пример на сервиси	VoIP, Видео конференција со висок квалитет	VoIP, Видео конференција со помала битска брзина	сигнализација	Пренос на податоци	Видео streaming, пренос на големи податоци	Традиционални best effort IP апликации

(* PLR=Packet Loss Ratio, ** PER=Packet Error Ratio, *** НС=не е специфицирано)

Суштинските QoS директно можат да се измерат и контролираат од страна на самата телекомуникациска мрежа и во голем број случаи да бидат опишани со објективни QoS параметри (како на пример, пакетски загуби, доцнење, варијации на доцнење и сл.). Вообичаениот QoS (Perceived QoS) тип на QoS уште се нарекува QoE (Quality of Experience) и претставува квалитет што го воочуваат корисниците. Се разбира дека QoE е тесно поврзан со мрежните перформанси, но истиот се мери со „средно мислење“ на корисниците, т.е. MOS (Mean Opinion Score). Оваа метода се користи сè со цел да се измери воочениот QoS од корисничка страна и истиот се претставува преку следните оценки: 1-лош квалитет, 2-сиромашен квалитет, 3-задоволителен квалитет, 4-добар квалитет и 5- одличен квалитет на сервисот. При тоа, MOS претставува аритметичка средна вредност од сите оценки кои ги дале анкетираниите корисници во опсег од 1 до 5. Сепак да нагласиме дека иако постои тесна поврзаност помеѓу објективната мрежна метрика и корисничката перспектива на квалитетот, сепак корисниците никогаш прецизно не можат да ги оценат суштинските QoS варијации предизвикани од објективните перформанси намалувања/зголемувања на квалитетот на сервисот. Иако, овие два термини QoE и QoS често во литературата се препокриваат и се со конфузно значење од сервисна гледна точка, сепак едно е јасно: QoE претставува целокупната мрежни спроведувања на квалитетот од корисничка гледна точка, а исто така е и субјективно мерење на од-крај-до-крај перформансите од корисничка перспектива. При тоа QoE е одличен индикатор за тоа колку мрежните можности се среќаваат со корисничките потреби и очекувања за квалитет на дадена услуга. Од друга страна QoS, како што потенциравме и претходно претставува мерење на перформансите на пакетско ниво од мрежна гледна точка, содржејќи во себе низа на механизми и објективните QoS параметри, кои му дозволуваат на мрежниот администратор да спроведе различен квалитет на сервис за различен сообраќае поток за даден корисник. На крај утврдени QoS параметри се токму на она место каде што се

среќаваат суштински QoS и воочени QoS, т.е. токму после тестирањата на посакуваните суштински QoS и споредување со добиените резултати од корисниците т.е. воочените QoS.

3.1 QoS во WLAN (IEEE 802.11)

Добро е познато дека самиот WLAN (IEEE 802.11 стандард) уште од самиот почеток бил наменет да обезбеди best-effort сервиси без никакви стриктни QoS побарувања. Имено, истиот е дефиниран на PHY (физичко) и MAC ниво и е базиран на CDMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) техниката, со два механизми на пристап до каналот: стандардно Distributed Coordination Function (DCF), и опционално Point Coordination Function (PCF) (за повеќе детали видете [14]). Во самата суштина подржува само номадска мобилност на корисникот со релативно краток радиус на покриеност од 100 до 150 метри, но сепак од друга страна обезбедува безжичен пристап на доста евтин и флексибилен начин, и во последната декада бележи широка распространетост. Во табелата 3.3 е даден преглед на основните карактеристики на основните IEEE 802.11 стандарди, вклучувајќи ги и најновите IEEE 802.11ac, IEEE 802.11ad и IEEE 802.11af стандарди, од аспект на максимална поддржана битска брзина, работен спектар, и технологијата која ја користат на физичко ниво. Како што спомнавме и претходно, обезбедувањето на QoS поддршка во IEEE 802.11 базираните мрежи е тешко изводливо, бидејќи првобитните 802.11 стандарди (IEEE 802.11, 802.11a, 802.11b, и 802.11g) во себе немаат имплементирани механизми за разликување на сообраќајни класи (секоја класа има различно QoS побарување), бидејќи се базирани на best-effort парадигмата. Имено, со помош на DCF, му се дава пристап до медиумот на пакетите од најпрво пристапениот корисник, кој го зафаќа медиумот и го држи зафатен сè додека не ги испрати тековните пакети од таа сесија. Ова предизвикува нерамноправен пристап до медиумот (некои од корисниците може да има за испраќање огромен број на пакети, а друг само неколку пакети за кои мора да чека долго време додека да ги испрати). Токму на тој начин се добива best-effort сервис, т.е. непостоење на сообраќајни класи, каде што секој сообраќаен поток и секој корисник има еднаков приоритет. Тоа предизвикува огромни проблеми во случаите кога сакаме да пренесеме мултимедиски сервиси (особено говорот и видео потоци и сл.) преку WLAN. Од друга страна, кога се користи PCF, иако се елиминираат колизиите и времето поминато во backoff и/или натпревар, сепак сеуште немаме начин да ги одвоиме различните типови на сообраќајните потоци и да им дадеме различен приоритет на пристап до безжичниот медиум. Значи во овие случаи немаме никаква можност корисникот да бара било какви QoS задоволувања од страна на WLAN

Access Point-от (AP). И уште повеќе, заедничко и за DCF и за PCF е тоа што 802.11 MAC нивото не содржи никакви пристапни контролни механизми во случаи на големи сообраќајни оптоварувања на мрежата (огромен број на корисници), па следствено и во двата случаи имаме деградација на условите и протокот во мрежата. Токму заради тоа, овие основни WLAN стандарди обезбедуваат под оптимални QoS перформанси на VoIP и видео апликациите, а тоа е неприфатливо, особено во денешно време кога имаме сензитивни мултимедиски апликации (VoIP, video-streaming, видео конференции итн.) во поглед на побарувањата на опсегот, загубите, доцнењата и сл.

Табела 3.3. Преглед на дел од 802.11 стандардите.

IEEE 802.11 PHY протокол	Година на појавување	Мак. податочна брзина	Фреквенциски опсег на работа	Технологија на физичко ниво
802.11 (првична)	1997	2 Mb/s	2.4 GHz	IR, FHSS, DSSS
802.11a	1999	54 Mb/s	5 GHz	OFDM
802.11b	1999	11 Mb/s	2,4 GHz	DSSS
802.11g	2003	54 Mb/s	2,4 GHz	OFDM
802.11n	2009	248 Mb/s (теоретски 600 Mb/s)	и на 2,4 GHz и на 5GHz	OFDM со MIMO (2 Tx, 2 Rx, или со 4 Tx, 4 Rx) и адаптивно каналско кодирање
802.11ac	2012	6933,3 Mb/s (доколку се користи 8x8 MIMO и ширина на канал од 160 MHz)	5,8 GHz IMS опсег	OFDM со MIMO (2 Tx, 2 Rx, или 4 Tx, 4 Rx, или со 8 Tx, 8 Rx) и адаптивно каналско кодирање, плус користи 256 QAM
802.11ad	2012	6 Gb/s	60 GHz IMS опсег	OFDM, модулација со ширење на спектар, Single carrier (SC) модулација; и Low Power Single Carrier PHY
802.11af	2013	од 26.7 Mbit/s (за 6 и 7 MHz сканали) до 35.6 Mbit/s (за 8 MHz), додека теоретски со 4x4 MIMO достигнува 568.9 Mb/s	TV white space спектарот на VHF и UHF опсезите помеѓу 54 и 790 MHz	OFDM со MIMO (2 Tx, 2 Rx, или со 4 Tx, 4 Rx), можност да користи 256 QAM

Токму од тие причини самиот WLAN стандард во последните неколку години значително еволуираше, преку имплементација на низа од QoS шеми за подобрување на QoS поддршката, што резултира до појава на IEEE 802.11e стандардот во 2005 година. Така овој стандард во себе содржи QoS механизми за приоритизација на сообраќајот врз база на нивниот тип, вметнува редови на чекање, можност корисникот да ги искомунуира своите QoS барања со AP, воведува контрола на пристап, сè со цел да обезбеди различен тип на сообраќај да се третира различно. Новитет во IEEE 802.11e [15], [16], е воведувањето на новата MAC пристапна техника наречена Hybrid Coordination Function (HCF), која ја заменува стариот DCF механизам на 802.11a/b/g.

Така HCF во себе ги содржи двата пристапни методи:

- Enhanced Distributed Channel Access (EDCA): contention-based механизам кој обезбедува QoS за податочниот сообраќај, преку креирање на 4 пристапни категории (на англ. Access Categories (AC)) користејќи 802.1p. Со ова може да се разликуваат 8 приоритети на сообраќај, кои се мапираат во овие 4 пристапни категории (види ја Табела 3.4).
- HCF Controlled Channel Access (HCCA): механизам базиран на полиси кој дава корисен QoS за видеото говорниот сообраќајот.

При што главна карактеристика на HCF е воведувањето на Transmission Opportunity (TXOP) и на Arbitration Inter-Frame Spacing (AIFS). TXOP е време во кое 802.11e станицата и е дозволено да праќа непрекинато рафал на податоци, додека AIFS е временски интервал од моментот кога безжичниот медиум е ослободен до моментот кога почнуваат преговорите за пристап до каналот (слично на DIFS кај DCF). Токму со различни сетирања на TXOP и AIFS, заедно со менување на големините на Minimum contention window size (CW_{min}) и Maximum contention window size (CW_{max}), се постигнуваат различни доцнења, протоци и сл. за различните AC [16]. На тој начин различни типови на сервиси се мапираат во различните пристапни категории и се обезбедуваат потребните QoS задоволувања за секоја сообраќајна класа поодделно. Да потенцираме дека алгоритмот за мапирање на сообраќајните класи во соодветен AC, не е стандардизиран и се разликува од една до друга имплементација.

Воедно, во рамките на ова подглавје за WLAN стандардите, можеме со сигурност да кажеме дека најновите WLAN стандарди: IEEE 802.11ac, IEEE 802.11ad и IEEE 802.11af, ќе бидат дел од идните 5G пристапни технологии, бидејќи достигнуваат безжични широкопојасни комуникации со високи гигабитски податочни брзини (што еден од

клучните перформансни индикатори за следната генерација на безжични и мобилни мрежи) и нудат одличен квалитет на услуга во рамките на нивните покриеност.

Табела 3.4. Нивоа на приоритет и пристапни категории кај 802.11е стандардот.

Приоритет	АС	Тип на сообраќај
0	0	Best-Effort
1	0	Best-Effort
2	0	Best-Effort
3	1	Видео проба
4	2	Видео
5	2	Видео
6	3	Говор
7	3	Говор

3.2 QoS во UMTS мрежите

Во рамките на ова подглава, накратко ќе биде објаснет QoS аспектот на UMTS мрежната технологија, како еден од релевантните претставници на 3G мобилната технологијата. Имено самиот UMTS воведува во себе релативно едноставни QoS механизми, бидејќи јасно е увидено дека имплементирањето на комплексот дефинирани QoS механизми води кон употреба на сложени механизми, поголемо процесирање, сложена мрежа (бидејќи секој мрежен елемент мора да примени голем број на QoS контролни функции), а со тоа и потежок QoS менаџмент. За таа цел, во UMTS постојат четири QoS сообраќајни класи и некои QoS атрибути за дефинирање на сообраќајните карактеристики за истите. Овие четири UMTS QoS класи се следните:

- Конверзациска,
- Проточна (streaming),
- Интерактивна,
- Позадинска (background).

Моментално, најпопуларниот конверзациски сервис е говорот, т.е. VoIP и/или видео конференцијата. Токму затоа оваа класа носи име конверзациски сервис, бидејќи се работи за сервис во реално време, каде што имаме разговор помеѓу двајца корисници (луѓе). Според тоа, ова класа бара најстриктни QoS побарувања од сите останати QoS класи, особено побарувањата се однесуваат за доцнењето (помало од 150 ms) и цитерот од крај-до-крај. Понатака, во проточната класа на сервис спаѓаат сервисите како аудио и видео проточен сообраќај, каде што содржината се дистрибуира во една насока, од серверот до корисникот, со многу мала интеракција во обратна насока (обично тоа е

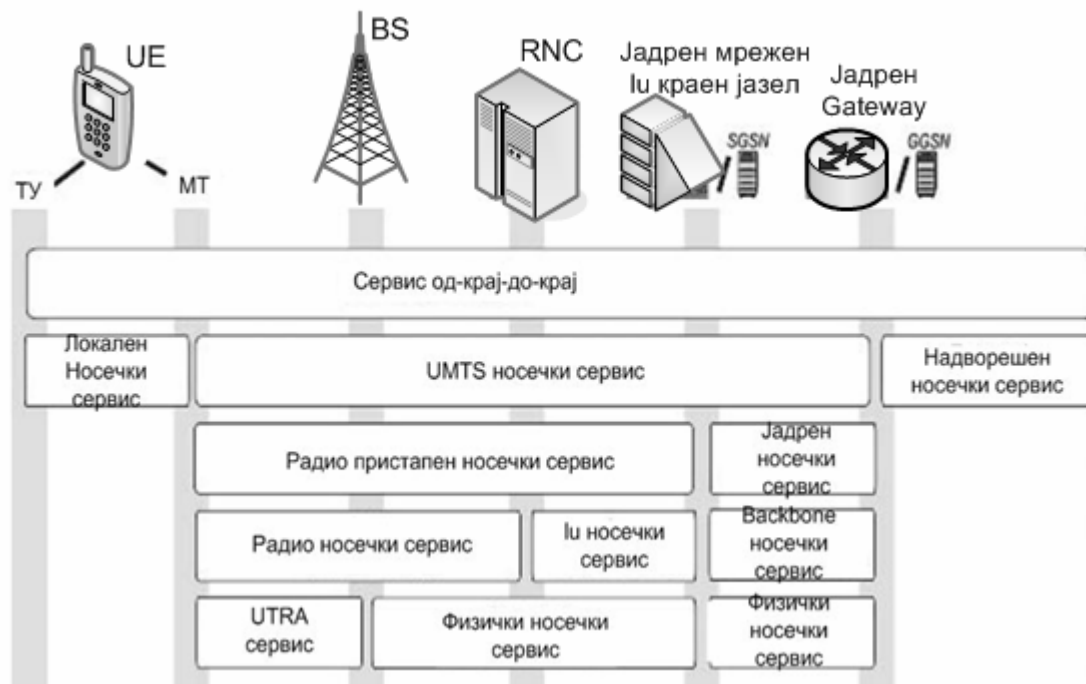
испраќање на контролни информации). Во овој тип на сервис клучен параметар е цитерот кој треба да се држи во одредени хистерезисни граници, и секако да се управува самото доцнење, но за разлика од конверзациската класа не се толку стриктни барањата и ограничувањата. Во интерактивната класа на сообраќај спаѓа класичната веб пребарувачка комуникација каде што имаме барање-одговор модел на комуникација од страна на крајниот корисник (клиент - сервер или сервер – сервер комуникација). Во оваа класа имаме стриктни побарувања во однос на точноста на доставувањето на информацијата, се разбира во разумно време (доцнења поголеми од неколку секунди не се прифатливи), така стриктни параметри се RTT (Round Trip Time), PER (Packet Error Ratio, која треба да биде што помала), BER (Bit Error Ratio, исто треба да биде што помала), FER (Frame Error Ratio, исто треба да биде што помала), PDR (Packet Delivery Ratio, треба да биде што поголема), и др. На крај, позадинската класа во себе ги содржи класичниот пренос на податоци, каде што немаме никакви побарувања за доцнење и цитер, туку само исправно и беспрекорно точно доставена информација до дестинацијата. Овде спаѓаат: e-mail, ftp трансфер и сл. Уште повеќе, оваа класа може да ја карактеризираме како best-effort.

Сите горенаведени сообраќајни класи во себе може да ги мапираат сите денешни можни кориснички сервиси. Во Табела 3.5 се прикажани некои карактеристични сервиси и нивното соодветно мапирање во овие четири UMTS QoS класи, со дополнително дефинирани клучни QoS атрибути. Има доста голем број на QoS параметри кои може да се нагодуваат и прилагодуваат за да се постигне саканиот квалитет на било кој сервис кои се нуди во UMTS. Некои од нив се: *тип на сообраќајна класа* (една од горенаведените четири типови на класи), *максимална битска брзина* (горната граница на битската брзина која може корисникот/апликација да ја достигне), *загарантирана битска брзина* (која може да му се пружи на корисникот, во рамките на која се загарантирани одредени UMTS носечки сервисни атрибути (доцнење, доверливост, цитер и сл.)), *максимална големина на Service Data Unit* (кратко SDU; максимална големина во октети за која се задоволени однапред договорените QoS побарувања, при што овој параметар се користи за контрола на пристап, оптимизиран транспорт итн.), *трансферско доцнење* (максималното доцнење на 95% од сите пристигнати SDU, од времето на побарување до времето на доставување), *SDU грешкен однос* (однос на згрешени SDU-и врз вкупно примени SDU-и), *остаточна битска грешка* (недетектиранта грешка од сите доставени SDU-и), и доста други параметри кои во повеќе детали може да се видат во [17]. Техничката реализација на комбинацијата од вредностите на QoS параметрите, која формира одредена сообраќајна класа со точно одредени карактеристики, се нарекува „носач“ (на англ. bearer).

Табела 3.5. Сообраќајни класи и нивни QoS карактеристики.

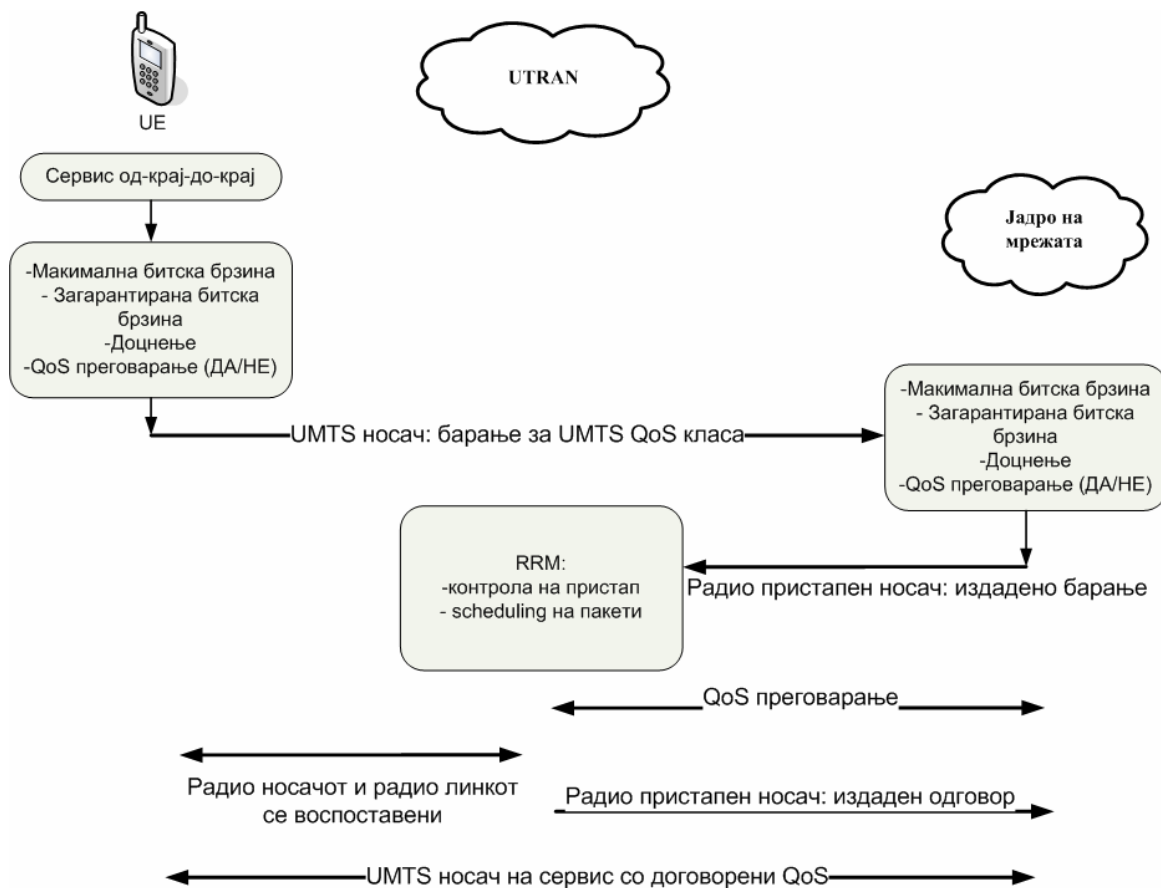
Сообраќајна класа	Конверзациска	Проточна	Интерактивна	Позадинска
Карактеристики	-мало доцнење (<150 ms, се преферира да е до 100ms) - мал цитер (< 1 ms) -мали грешки (<3% FER, некаде и <1% FER)	- умерено доцнење (<10 sec) - умерен цитер (< 1 ms) -мали грешки (<1% FER)	- RTT (до 8 секунди по web страна) - умерено доцнење на приоритетен интерактивен сообраќај (<250 ms) - умерен цитер (< 1 ms) -мали грешки (<3% FER)	-не се очекуваат никакви граници за доцнењето и цитерот -никакви грешки
Пример на сервис	VoIP, видео конференција	Проточно видео, проточно аудио	Web пребарување, е-комерцијала,	e-mail, симнување на фајл, ftp

Всушност, сервисниот носач е збир на алоцирани мрежни ресурси, кои формираат една „проточна цефка“ која ги исполнува QoS побарувањата и токму заради тоа е одговор за сервисните побарувања на крајниот корисник. Подетално, самиот начин на комбинација и користење на овие QoS параметри од страна на носачот се прикажана на слика 3.1 (ТУ претставува Терминален Уред, UE е User Equipment (кориснички уред), MT е мобилна терминална точка). На тој начин, самите побарувања за конкретниот сервис може да се видат на ниво на UMTS носач. Така, доколку сме лоцирани во мобилниот уред, локалниот носач се движи во рамките на горенаведената дефиниција, но доколку ја набљудуваме конекција позади мрежата, тогаш сервисните побарувања се среќаваат со дефиницијата за надворешен носач на сервисот. Надворешниот носач на сервисот не мора да ја има истата дефиниција како кај UMTS носачот, па токму заради тоа некогаш е тешко да се гарантира истото ниво на QoS надвор од UMTS мрежата. Затоа потребно е да се направи одредена портабилност и пресликување на тие QoS побарувања во другата мрежна технологија што е употребена позади UMTS мрежата.



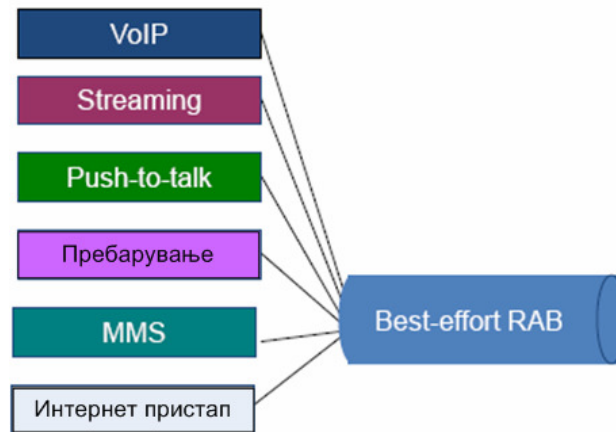
Слика 3.1. Приказ на носач/QoS архитектурата во UMTS.

Имено, бидејќи самиот UMTS систем содржи различни елементи, секој со свој специфични карактеристики, неопходно се наметнува потреба да постојат различни носачи кои ги покриваат потребите во различните системски делови. При што оние носачи коишто се најблиску до физичката конекција (до физичкото ниво според OSI моделот), секогаш имаат постриктни QoS побарувања (пример, доцнењето да биде под неколку милисекунди и сл.) заради исполнување на примарните QoS побарувања на сервисот. Самиот начин на кој што се управуваат носачите на сервисот е преставена на слика 3.2. Имено најголема централна улога за менаџирањето на носачите, управување и комбинацијата на QoS параметрите во UMTS мрежата има самиот RNC (Radio Network Controller). Како што може да се види од сликата 3.2, најголемите ограничувања на носачите се поставени и делигирани од страна на јадрото на мрежата, додека реално алоцираните носачи се дефинираат во RNC (врз база на постоечкиот капацитетот на радио интерфејсот, како и врз база на интерференцијата), заради фактот што радио интерфејсот е тесно грло во самиот сообраќаен поток.

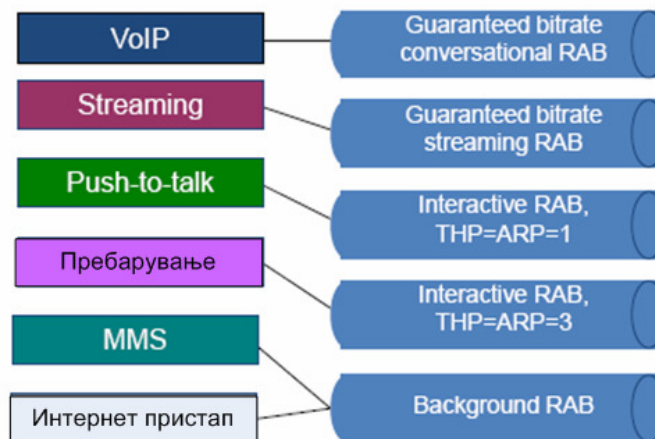


Слика 3.2. Принциписки дијаграм на управување со носачи.

Бидејќи од крај-до-крај патот се проширува низ различни системски нивоа, секое ниво си има свои сопствени QoS својства, самите QoS се поделени и управувани во различни делови, земајќи ги во предвид специјалната карактеристики на секоја компонента. Диференцирањето на QoS постанува многу корисно за мрежната ефикасност, за време на големо оптоварување на истата со сообраќај, особено кога постојат сервиси со различни побарувања за доцнењето. Во таа насока, на слика 3.3 е прикажан пример кога сервисите имаат исти QoS параметри и ист третман (ја добиваат истата битска брзина и го имаат истото доцнење). Од друга страна, на слика 3.4 е прикажан случај кога имаме различни цевки за сообраќај со различна QoS приоретизација во пакетскиот подредувач. Овој пристап, веќе применува QoS диференцирање.



Слика 3.3. Без QoS диференцијација – сите сервиси ги користат истите QoS параметри.



Слика 3.4. Со QoS диференцијација – со два загарантирани битски брзини и три класи за приоритизација вон реално време.

3.3 QoS во WiMAX

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) (или IEEE 802.16 фамилијата на стандарди, [18-21]) е доста распространет стандардот за широкопојасен безжичен пристап, кој во себе дефинирана широк опсег, со поддржани битски брзини од 40 Mb/s до 1 Gb/s по канал (делен помеѓу повеќе корисници), радиус на клетка до 10 km и поддржани брзини до 200 км/час (со 802.16m WG, но со помали битски брзини). Имено главната предност на оваа технологија е можноста за нејзина имплементација во средини и услови каде што е скапата инсталација на оптичка мрежа, и најатрактивно решение е да се оди токму со широкопојасен безжичен пристап до крајните корисници, со навистина широк радиус на покриеност со една базна станица и можност за употреба на MIMO антени (за поголем капацитет, диверзитет и доверлив пренос). Исто така, треба да се напомене дека Мобилниот WiMAX release 1 (т.е. IEEE 802.16e-2005), кој е познат и под

името 3G Mobile WiMAX, иницијално оперира на 2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.3 GHz, 3.4-3.8 GHz спектралните опсези. Поддршка на други дополнителни опсези ќе биде дадена врз база на побарувањата на пазарот и новите спектрални алокации. Mobile WiMAX release 1 (IEEE 802.16e) профилите ќе имаат 5, 7, 8.75, и 10 MHz опсези на канали, во горенаведените спектарни опсези. Од друга страна, Mobile WiMAX release 2 (IEEE 802.16m), или познат како 4G Mobile WiMAX, работи на 450-470, 698-960, 1710-2025, 2110-2200, 2300-2400, 2500-2690, 3400-3600 MHz спектралните опсези, користејќи ширини на канали како дадените за IEEE 802.16e, плус користи 20 MHz опсег на канали и можност со агрегација на канали да го прошири опсегот до 100 MHz. Постигливите битски брзини кај IEEE 802.16e се: 37 Mb/s (10 MHz TDD) во downlink и 17 Mb/s (10 MHz TDD) во uplink, со 2x2 MIMO. Од друга страна, IEEE 802.16m успева да постигне од 219 Mb/s (20 MHz TDD) до 365 Mb/s (2x20 MHz FDD) во downlink, или 140 Mb/s (20 MHz TDD) до 376 Mb/s (2x20 MHz FDD) во uplink со 4x4 MIMO, а во случај на мобилни корисници кои се движат со ниска брзина, може да понуди до 1 Gb/s во downlink.

Понатака во рамките на овој дел, подетално ќе се задржиме околу QoS моделот, QoS методите и сервисните класи, кои што се имплементирани и добро дефинирани на MAC и физичко ниво, при што доста голем дел е пресликан од ATM технологијата и од DOCSIS мрежите, со надградба и унапреденост за безжична комуникација. Имено, самиот WiMAX систем е базиран на конекциски-ориентирана архитектура [18], а не како кај WLAN и Ethernet, каде што е неконекциски базиран модел. На апликациско ниво, корисникот е поврзан со BS (Base Station), при тоа се алоцираат дел од ресурсите, со низа на QoS параметри и сообраќајни профили. При што, самото обезбојување на сообраќајот што доаѓа од погорното ниво, т.е. сегментацијата на IP/Ethernet/ATP пакети во 802.16 пакети е дефинирано попрецизно во рамките на [18-21]. Иако самиот QoS WiMAX модел е сличен со тој на ATM, сепак поради динамичката природа на безжичната средина, постојат следните разлики:

- Динамичка алокација на ресурсите: во WiMAX мрежите, алокацијата на ресурси може да се прави на ниво на рамка-по-рамка (т.е. за секоја рамка посебна алокација на ресурси). Со ова се постигнува адаптација на условите во безжичниот канал и задоволување на QoS барањата (особено на апликациите во-реално време).
- Адаптивна модулација и кодирање: WiMAX мрежата овозможува врз база на состојбата на безжичниот канал, да може да се избере најсоодветен рафален профил (burst profile) за тековниот пренос. Тука под рафален профил се

подразбира комбинацијата: модулација, кодирање и FEC (Forward-Error Correction) кои се користат при преносот. Така на пример, доколку состојбата на безжичниот канал е лоша, предавателот може да премине кон поробусна шема на модулација и кодирање, што би предизвикало намалување на битската брзина, но ќе резултира во исправен пренос (или многу малку грешки на приемна страна). За повеќе детали за овие шеми на рафален профил може да се види во [18] во делот за 802.16d. Главната идеја овде е зголемување на протокот и минимизирање на грешката во безжичниот медиум.

Освен горенаведените фундаментални карактеристики, постојат неколку клучни QoS карактеристики кои се вградени во WiMAX системите, па како најважни се издвојуваат: можноста да има флексибилно пакетизирање (урамување) и фрагментација, како и можноста да има симетричен висок-проток и во uplink и во downlink. Можноста за флексибилно пакетизирање и фрагментација е потребна за најоптимално искористување на безжичниот медиум, дозволувајќи му и на корисникот и/или на базната станица да можат да ги променат условите на пренос во зависност од квалитетот на безжичниот канал. Така на пример, може да се пакуваат податоците во големи пакети (доколку условите во каналот се добри), или да се фрагментираат во многу мали порции на информации (доколку условите во каналот се значително влошени), и тоа за секој пакет посебно, во зависност од сообраќајот и условите во каналот. Само да напоменеме дека релативниот однос на контролните податоци во однос на корисните исто така може да биде динамички променлив, во зависност од мрежното оптоварување, што доведува до уште поголемо ефикасно спектрално искористување.

Втората можност за симетричен опсег во двете насоки, се постигнува со вметнување на интелигентен scheduling модул и во корисничкиот уред и во базната станица, сè со цел да се овозможи корисникот да искомунцира со базната станица за неговите посакувани QoS побарувања за даден/и сервис/и.

Следно, се опишани трите методи во WiMAX стандардот за обезбедување на QoS поддршка на мултимедиските сервиси. Впрочем, овие три методи се следните:

- Класификација на сервисен поток;
- Динамичко воспоставување на сервис;
- Дво-фазен активациски модел.

Токму, класификацијата на сервисен поток го потенцира и издвојува самиот WiMAX стандард од останатите негови конкурентни стандарди (IEEE 802.11 и 3G), бидејќи со овој QoS метод се класифицира и маркира секој пакет со сервисен поток на кој му припаѓа.

Имено, самиот 802.16 стандард е содржински ориентиран на MAC ниво, каде што секоја конекција има свој уникатен конекторски идентификатор, т.е. Connection ID (CID) и уникатен идентификатор на сервисниот поток, т.е. Service Flow ID (SFID) со придружена QoS сервисна класа. Погорниот слој од ова WiMAX MAC ниво ги мапира податоците во QoS сервисни класи, при што било која екстерна апликација при процесот на регистрација со мрежата (ќе и се даде SFID), може да побара сервисен поток со посакувани QoS параметри, користејќи одредена сервисна класа. Во WiMAX (IEEE 802.16) дефинирани се четири QoS сервисни класи: Unsolicited Grant Service (UGS), Real-time Polling Service (rt-PS), Non-real-time Polling Service (nrt-PS), и Best-Effort (BE) сервис. Овие сервисни класи заедно со подетален опис за истите се претставени во Табела 3.6.

Самото QoS мапирање во форма на класификација на сообраќајот кој доаѓа од погорните нивоа, се обезбедува во горниот дел од MAC нивото. Така, кога некоја апликација сака да испрати пакет, нејзиниот сервисен поток се мапира за одредена конекција користејќи уникатен CID [19].

Табела 3.6. QoS Сервисни класи во WiMAX (IEEE 802.16).

QoS сервисна класа	Опис
Unsolicited Grant Service (UGS)	Поддржува CBR сервис, како T1/E1 емулација и VoIP вез потиснување на тивките моменти од говорот
Real-time Polling Service (rt-PS)	Поддржува сервиси во реално време, со променлива големина на податоци на одредени периоди, како Motion Picture Express Group (MPEG) и VoIP со потиснување на тивките моменти од говорот
Extended Real-time Polling Service (ert-PS)	Оваа класа често се споменува и по името Enhanced Real Time Variable Rate. Оваа WiMAX QoS се користи за сервиси каде што има користење на променлива големина на пакетите – често каде што се користи компресија на тивките периоди во VoIP
Non-real-time Polling Service (nrt-PS),	Поддржува сервиси во не реално време, со променлива големина на податоци и можност од појава на избувливост, како FTP
Best-Effort (BE)	За апликации кои не побаруваат стриктни QoS, како Веб пребарување, е-маил итн.

Сепак за да може да се воспостави динамички сервисниот поток и најсоодветно да се мапираат QoS побарувањата, самиот 802.16 стандард во себе воведува сигнализациски функции со следните три типа на контролни пораки (за сервисните потоци): Dynamic service activate (DSA, за активација на сервисниот поток), Dynamic service change (DSC, за промена на постоечкиот сервисен поток) и Dynamic service delete (DSD, за бришење на сервисниот поток).

Кога корисникот бара одредени промени за самиот сервис, може да се воспостават нови конекции со базната станица, при што промените може да се иницирани и од корисникот и од базната станица. Доколку Base Station (BS) ја иницира таа промена, иста испраќа контролна порака наречена DSA-REQ, која ги содржи во себе SFID, CID, и QoS параметрите за тој сервис. После тоа мобилниот уред испраќа DSA-RSP порака за да го прифати или одбие сервисниот поток кој му се доделува. Овој механизам и овозможува на апликацијата да побара повеќе ресурси доколку и се потребни. На тој начин повеќе сервисни потоци може да се доделат за една иста апликација, и уште повеќе, може да се додаде и дополнителен SFID доколку е потребно да се обезбеди подобар QoS за мултимедиските апликации.

Кога станува збор за самата активација на сервисниот поток (доделување на SFID) истата се случува во две фази: прво се одобрува, па после се активира. При што, овие две фази се извршуваат во авторизиран модул во рамките на BS, која го одобрува или го одбива конкретниот сервисен поток. Доколку се случи авторизираниот модул да се одобри сервисниот поток, тогаш истиот може да се активира веднаш или да се задоцни за определено време за подоцна. Како и да е, штом ќе се одобри одреден сервисен поток за дадена апликација, тогаш и BS и мобилниот уред може да резервираат ресурси за истиот (опсег, меморија и сл.). Од друга страна динамичките промени на QoS параметрите за дадениот прифатен сервис, исто така се одобруваат од авторизирачкиот модул во BS, преку размена на контролни динамички пораки за сервисниот поток. Методот според кој се одредува кои QoS параметри ќе бидат прифатени а кои неприфатени, зависи од самиот авторизирачки модул во BS. Во IEEE 802.16 се дефинирани два вида на модели за авторизацијата во авторизирачкиот модул: обезбедена и динамичка авторизација. Кај обезбедената авторизација сите QoS параметри се обезбедени и поддржани од страна на мрежниот управувачки систем уште при самата имплементација на истиот и остануваат статички (додека не бидат пресетирани). Од друга страна кај динамичката авторизација може динамички да се менуваат QoS параметрите, преку барање од BS или/и од SS, при што крајната одлука останува на авторизирачкиот модул во BS. Токму тука, се потенцира

флексибилното QoS обезбедување што го спроведува самиот IEEE 802.16. Секако дека обезбедувањето на флексибилно QoS обезбедување е тесно поврзано со типот на апликацијата. Имено, било која апликација може да си дефинира свое множество од QoS параметри кои треба да бидат задоволени за успешно функционирање и на истите да им додели сервисно име. Така, VoIP може да побарува сервисен поток во реално време со фиксен загарантиран опсег, а од друга страна FTP апликацијата може да побарува сервисен поток во реално време со променливо алоцирање на опсег (VBR). Па во зависност од достапните ресурси во мрежата, се одлучува дали може или не може да се исполнат бараните QoS параметри. Доколку може да се исполнат, QoS параметрите се предаваат надолу преку MAC нивото [19].

3.4 QoS во LTE/LTE-Advanced мрежите

Во рамките на ова подглава ќе стане збор за LTE (Long Term Evolution) и LTE-Advanced стандардите од 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Во самиот LTE влегуваат Releases 8 и 9 стандардите, кои понатаму продолжуваат и да се развиваат под името LTE-Advanced. Факт е дека 4G стандард од 3GPP е LTE-Advanced, кој е стандардизиран преку 3GPP Release 10 и тие Release-и кои следуваат потоа. Сепак, често може да се сретне дека LTE е забележан како 4G иако обезбедува битски брзини под побарувањата на IMT-Advanced спектарот на стандарди и побарувања за 4G при ITU. Од друга страна, LTE и LTE-Advanced го користат истиот радио интерфејс и имаат иста спектрална искористеност (во bit/s/Hz), со стандардизирана агрегација на носители во LTE-Advanced која обезбедува и задоволува потребни 4G битски брзини во downlink (1 Gb/s) и uplink (500 Mb/s).

LTE, кој почна со release 8 е наменет да обезбеди висок проток и мало доцнење, за да може да поддржи побогато QoE кон крајните корисници, како и можност да обезбеди софистицирани сервиси како Видео, VoIP, видео поток со висока резолуција (на англ. high-definition video streaming), мобилно играње и peer-to-peer размена на фајлови. Во LTE, QoS е обезбеден помеѓу UE и PDN Gateway и се придодава на Evolved Packet System (EPS) носачки пристап преку следните три главни носачи на сервис (bearers) (подетален приказ на слика 3.5):

- Радио носач (на LTE/LTE-Advanced радио интерфејсот);
- S1 носач (на S1 интерфејс, помеѓу eNodeB и S-GW);
- S5/S8 носач (на S5/S8 интерфејс, помеѓу S-GW и P-GW).
- EPS носачот, потоа се дели на уште два типови на носачи:

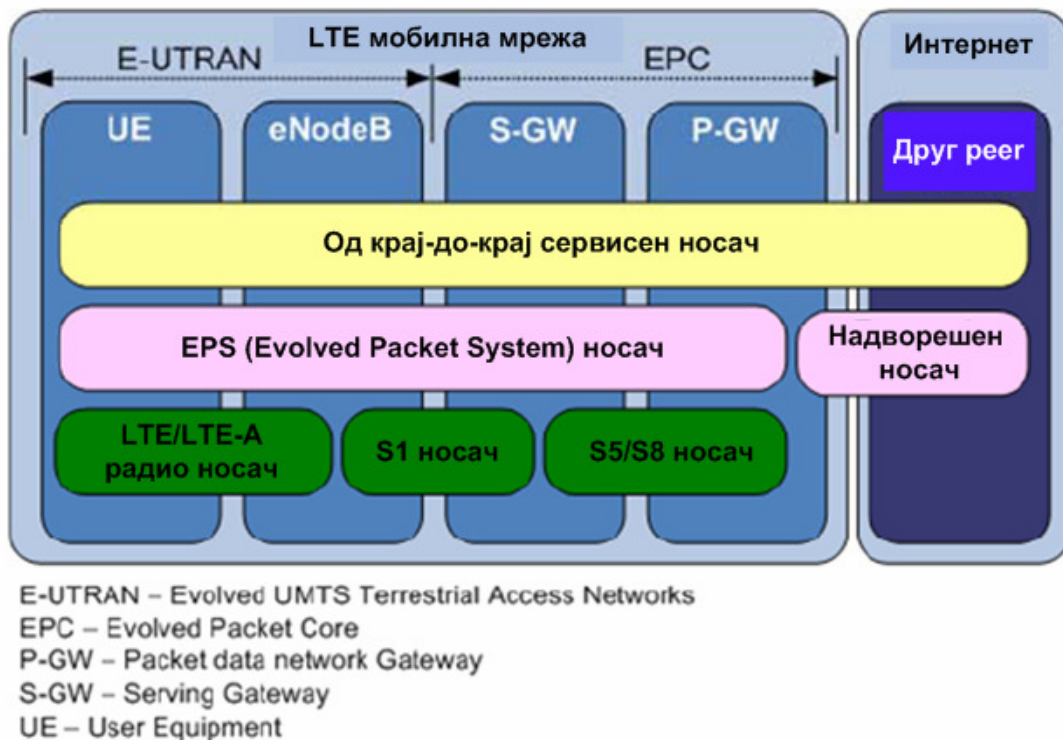
- Guaranteed Bit Rate (GBR);
- Non-Guaranteed Bit Rate (non-GBR) кој често се вика default bearer (3GPP-TS.36.300, 2010).

Еден носач доделува вредност која се нарекува QoS Class Identifier (QCI), која се однесува на множество од QoS атрибути (3GPP-TS.25.306, 2011b). Мапирањето на LTE стандардните QCI-и на QoS цели е прикажано во Табела 3.7.

На тој начин, еден EPS носач е окарактеризиран со следните параметри:

- Allocation Retention Priority (ARP) – овој параметар се однесува на приоритетот искористен за механизмите на доделување и задржување.
- Guaranteed Bit Rate (GBR) – апликабилен само на носачи кои побаруваат загарантиран QoS за тип на сервиси како говор или streaming.
- Maximum Bit Rate (MBR) – овој параметар помага да постави ограничување на податочната брзина која се очекува за некои сродни сервиси.
- QoS Class Identifier (QCI) – кој се користи како референца кон множество на QoS параметри кои се однесуваат на пристапните мрежи, за пренос на податоци помеѓу мобилниот терминал и eNodeB.

Во all-IP EPS светот, QoS претставата е многу едноставна, базирано само на неколку атрибути и поврзана со предефинирани лабели.



Слика 3.5. LTE архитектура заедно со носачите (bearers).

Табела 3.7. LTE/LTE-Advanced QoS Class Identifiers (QCI).

QCI	Тип	Приоритет	Доцнење	Рата загуби	на	Пример сервис
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}		VoIP
2		4	150 ms	10^{-3}		Видео повик
3		5	300 ms	10^{-6}		Видео streaming
4		3	50 ms	10^{-3}		Игри во реално време
5	Non- GBR	1	100 ms	10^{-6}		IMS сигнализација
6		7	100 ms	10^{-3}		Говор, видео пренос, интерактивни игри
7		6	300 ms	10^{-6}		Веб,
8		8				e-mail, p2p, chat,
9		9				баферирано видео

Така се ограничува огромниот број на можни комбинации и одржува доследност помеѓу мрежната имплементација од различни производители за одреден тип на сервис.

Секоја QoS класа е поврзана со следните параметри:

- Bearer Type – овој параметар покажува дали треба или не, ресурсите кои се поврзани и зафатени од носачот постојано да се алоцирани, за целокупно време на живот на носачот, што ја покажува разликата помеѓу GBR (Guaranteed Bit Rate) и non-GBR носачи.
- L2 Packet Delay Budget (L2PDB) – овој параметар го опишува максималното време кое еден пакет ќе го помине додека минува низ RLC и MAC нивоата низ мрежата и терминалот.
- L2 Packet Loss Rate (L2PLR) – овој параметар ги објаснува максималниот сооднос на L2 пакетите кои неуспешно биле доставени до одговарачкиот peer ентитет.

Сообраќајот кој е загарантиран од посебни сервиси, може да биде диференциран во посебни Service Data Flows (SDF-и) и мапирани на поединечен носач, врз база на специфични параметри, кој се обезбедуваат или во PCRF или се дефинирани од сигнализацијата на апликациско ниво. Од гледната точка на QoS, мапираните SDF-и на еден ист носач, се третираат исто.

Конечно, има најприоритетни корисници кои секогаш сакаат да имаат подобар кориснички QoE на нивниот LTE/LTE-Advanced уред. Овој тип на корисници ќе сака да плати повеќе за поголемиот опсег и за подобар мрежен пристап на нивниот уред. И не само посебните корисници, туку и некои сервиси си бараат подобар приоритет при управувањето во мрежата (на пр.: VoIP повик). За да може ова да се постигне, QoS игра клучна улога. Едноставно кажано, QoS дефинира приоритети за посебните корисници и/или сервиси, за време на високо ниво на сообраќајни задушувања на мобилната мрежа.

3.5 QoS во MANET

Атрактивната уникатна природа на мобилните ad-hoc мрежи (на англ. Mobile ad-hoc networks (MANETs)) привлекува доста голем интерес во сферата на модерните телекомуникации. Имено, MANET претставува засебен автономен систем, кој се состои од мобилни јазли (рутери и пристапни хостови) безжично поврзани меѓу себе, слободни да се движат по случаен редослед, кој многу лесно и непредвидливо ја менува својата топологија. Токму заради тоа има низ на предности, така, некои од нив се: споделување на заеднички безжичен медиум, мобилност, немање конкретна инфраструктура, само-конфигурабилни, мрежата се формира речиси инстантно (било каде, било кога), голем степен на слобода при дистрибуцијата на информации при multi-hop комуникацијата, релативно мала потрошувачка на моќност. Токму затоа MANET мрежите се широко распространети и се користат како засебен систем, а исто така може да се поврзе на друга безжична мрежа и/или на Интернет.

Сепак сите претходно наведени предности би биле апсурдни без имплементација на ефективна QoS поддршка за сервисите. Така на пример сервисите во реално време, кои побаруваат мали доцнења (до 100 ms) и мали варијации на доцнења (до 1 ms), доколку не се води грижа за нивните ограничувања, истите би биле неупотребливи во овој тип на безжични мрежи. Како и да е, целиот овој процес на обезбедување на QoS поддршка во MANET мрежите е доста макотрпен, бидејќи безжичниот медиум воведува низа на проблеми, како: ограничен опсег за пренос, зголемена веројатност на грешки при пропација на сигналите, каналски фединг, мала скалабилност, интерференција од други уреди, а исто така врз сево ова може да се додадат огромниот спектар на MANET алгоритми за рутирање и ограничени процесирачки способности (заради малиот габарит и малата потрошувачка на енергија) на уредите, динамичноста итн. По сево ова несомнено се јавува заклучокот дека имплементацијата на QoS поддршка е навистина врвно дело.

Факт е дека обезбедувањето на различно ново на квалитет на сервис за различни апликациски побарувања константно се развива и се менува, сè со цел да се достигнат што

попрецизно и поконкретно QoS интелегентно однесување (поекономично користење на ресурсите, со попрецизно обезбедување на бараните QoS параметри) на страната на мрежата. Поконкретно, за да се обезбедат потребните QoS побарување самата MANET мора прво да ги прими корисничките барања, па да пронајде најоптимална патека од изворот до дестинацијата и да употреби најсоодветен алгоритам за рутирање, употребувајќи ги ресурсите што се на располагање најдобро што може. Сево ова, е познато како QoS рутирање. После наоѓањето на најоптималниот пат, мора да се употреби протокол за резервација на ресурси, за да може да се обезбеди цело време бараниот QoS, користејќи низа на резервирачки механизми кои ги вклучува самиот алгоритам за резервација на ресурси. Факт е дека, постојат навистина огромен број на QoS модели и алгоритми во MANET чие подетално опишување би ги надминало рамките на овој магистерски труд. Затоа истите овде само накратко се опишани и групирани во три најглавни групи. Така имаме (земајќи го IP протоколот на мрежно ниво):

- QoS во интегрирани сервиси (скратено IntServ, каде што се обезбедува QoS експлицитно од крај-до-крај, со помош на резервација);
- QoS во диференцирани сервиси (кратко DiffServ, каде се постигнува задоволувачки QoS преку диференцирање на различните апликациски пакети во различни сообраќајни групи и третирање на истите различно hop-by-hop);
- и Флексибилен QoS модел во MANET.

Филозофијата позади IntServ е слична на таа од PSTN (Public Switched Telephone Network) мрежата, значи самите попатни јазли мора да резервираат ресурси за да можат да задоволат специфични QoS параметри во текот на целото време на преносот, за конкретниот кориснички пакетски поток. Самиот IntServ модел потекнува уште од 1994 [22] и ги интегрира во себе двете различни парадигми: податочните мрежи и мрежите базирани на комутација на кола. Овој модел ги користи предностите на RSVP (Resource Reservation Protocol), кој е дизајниран како сигнализациски протокол за воспоставување и одржување на виртуелни конекции. Со помош на RSVP протоколот, рутерите ги резервираат ресурсите кои им се на располагање, сè со цел да се обезбеди потребниот QoS од изворот до дестинацијата. На тој начин самиот IntServ во MANET обезбедува QoS по поток на сообраќај, со помош на четири главни компоненти: со сигнализацискиот протокол RSVP, контрола на пристап (на сите јазли кои се наоѓаат на самата рута меѓу изворот, или дестинацијата), класификатор и пакетски опслужувач. IntServ исто така се базира и на рутирачкиот протокол и управувачкиот агент, кои се имплементирани во секој

јазел во MANET мрежата. Сепак првенствено IntServ не е креиран за мобилни и безжични средини, како MANET, туку за фиксни мрежи, токму заради следните ограничувања:

- Чувањето на состојбата на секој поток во секој јазел од MANET мрежата побарува огромни процесирачки моќи, меморија и други ресурси, во зависност од бројот на јазли и траењето на конекцијата.
- Користењето на RSVP сигнални пакети троши голем дел од радио опсегот на MANET. Исто така како што мрежата станува подинамичка така заглавјата на RSVP се зголемуваат експоненцијално.
- Секој јазел мора да прави контрола на пристап, класификација, scheduling и рутирање. Сите овие процеси бараат многу од една ресурсно лимитирана мрежа како MANET.

Настрана од сите овие ограничувања, главната идеја на IntServ пристапот може да биде земен и модифициран да работи оптимално во MANET мрежите. На тој начин, би обезбедиле навистина големо ниво на QoS задоволувања (бидејќи овој тип на сервис е првенствено креиран баш со таква цел) преку имплементација на оптимални QoS рутирачки алгоритми за MANET, без потреба да се одделува сигналниот протокол (како RSVP).

Од друга страна, кај DiffServ (диференцираните сервиси [23] и [24]) QoS се обезбедува преку диференцирање и класификација на пакетите во различни типови на потоци со заеднички QoS параметри, а не само со една резервација за еден поток. Овој тип на сервис се употребува во глобалните мрежи како Интернетот, бидејќи токму со негова помош се отстрануваат низа на проблеми кои се јавуваат во хетерогените мрежи и во самото јадро на безжичните мрежи. Така додека IntServ спроведуваат по поток QoS гаранции DiffServ ја следат филозофијата на мапирање на повеќе потоци во неколку QoS сервисни нивоа (класи). Самата архитектура на диференцираните сервиси во било кои мрежи е базирана на многу едноставен модел, каде што сообраќајот кој влегува во мрежата се класифицира и доколку е тоа можно се условува на самата граница од конкретниот DiffServ домен (тоа е збир од DiffServ рутери кои припаѓаат во еден автономен систем, на пример една MANET). Самата класификација и условување се прави со маркирање на специјалното DS (Differentiated Services) поле во IPv4 заглавјето на податочните пакети. При тоа секоја засебна класа на пакети се идентификува со еден уникатен диференцирачки сервисен codepoint и во самото јадро на мрежата пакетите се препраќаат според per-hop behavior (PHB) во зависност од DSCP (Differentiated Service Code Point).

На крај, според горе-дадената класификација, последниот модел на QoS во MANET е флексибилниот QoS модел, кој воедно е и првиот експлицитно даден QoS модел во MANET. Самата идеја на алгоритмот во овој модел е пресликан од веќе постоечкото знаење од жичаните мрежи: резервација по поток (IntServ) и диференцијација на сервисот (DiffServ), како и надграден со знаења за MANET. Со други зборови кажано, за они услуги кои имаат висок приоритет (првенствено сервисите во реално време), се обезбедува QoS гаранција по поток, т.е. се зема IntServ. Од друга страна, за сервисите со ниски QoS побарувања се применува диференцирање по класи, т.е. DiffServ. Овој флексибилен QoS модел е базиран на претпоставката дека не сите пакети во мрежата се со висок приоритет, бидејќи во тој случај овој модел би деградирал во QoS моделот за IntServ (обезбедување на QoS за сите пакети по поток). На тој начин флексибилниот QoS модел за MANET обезбедува хибриден QoS само во случај кога се употребуваат и двете шеми: IntServ и DiffServ. И во овој модел, слично како во DiffServ имаме три типови на јазли: влезни јазли, внатрешни јазли, излезни јазли. Влезните јазли се оние јазли кои испраќаат податоци во MANET мрежата, т.е. поинаку кажано се извори на сообраќај. Внатрешните јазли го рутираат и препраќаат тој сообраќај до другите јазли, и излезните јазли се всушност дестинациските јазли во MANET мрежата. Повеќе од јасно е дека секој јазел може да има повеќе улоги во различни или во исти временски интервали.

4. Напреден QoS-базиран корисничко-центриран модел за 5G со RAT-агрегација на IP ниво

Новите научни истражувања и развои несомнено се одвиваат доста брзо и со еден огромен чекор водат кон напредни и многу значајни промени во дизајнот, архитектурата, механизмите на управување и напредниот QoS во 5G мобилните и безжични мрежи. При тоа, наоѓајќи се на прагот од 5G, доколку погледнеме назад еден чекор, ќе забележиме дека мрежната имплементација, напредците и транзицијата од 4G на 5G ја повлекуваат неопходност од појавата на по pamетни уреди, кои се способни да обезбедат широкопојасни мултимедиски сервиси до мобилните и безжични корисници (со битски брзини околу 50 Gb/s за ниска мобилност, па сè до 10 Gb/s за висока мобилност, и 1Gb/s секаде и со било која брзина), со сеподдржана мобилност (од 0 до 500 км/ч), огромни процесирачки моќи на мобилните уреди и мрежи, M2M комуникација, massive MIMO, подобрена мрежна искористеност на закупениот спектар, напредни QoS механизми, поголем мемориски простор, мобилни пресметки во облак, поголем живот на батеријата на мобилните уреди и низа на други напредни способности кои допрва следат. Во таа насока, секоја мобилна и безжична мрежа ќе биде одговорна да се справува со корисничката мобилност, додека мобилниот уред ќе ја донесува конечната одлука на кои сè радио мрежни пристапи да се поврзе едновременно и за било кој сообраќаен поток. Така, обезбедувањето на QoS во идните мобилни и безжични мрежи станува една од најважните цели и задачи, бидејќи побарува огромна внимателност, скалабилност, мудрост и сеопсежни анализи. Бидејќи радио опсегот (спектарот) е еден од најскапоцените ресурси во мобилните и безжични телекомуникациски системи, ефективната и одлична QoS рамка-водилка е многу важна за да може истата да гарантира (преку имплементираниите механизми) задоволително ниво на QoS во истите.

Во таа насока, оваа глава обезбедува една нова 5G мобилна и безжична рамка-водилка, која користи радио мрежна агрегациска техника за максимизирање на средниот битски проток и води кон високи перформанси на мрежите, голема мрежна искористеност, и високо ниво на QoS за било кој даден мултимедиски сервис. Воедно, се преставени и напредни QoS рутирачки алгоритми за оптимизација во multi-RAT мобилни уреди (во кои има повеќе радио интерфејси) со вертикален multi-homing и multi-streaming способности, кои можат да се користат во било која постојна и идна хетерогена мобилна и безжична IP мрежа. Затоа што заедничкото, обединувачко нешто за било која радио пристапна мрежа е токму IP протоколот, не се врзавме за ни една постојна или идна RAT, туку промените и

имплементацијата на напредни 5G QoS механизми се направени во мрежното ниво на мобилните и фиксните уреди. Освен тоа, 5G мобилниот уред нема да работи само со еден RAT интерфејс во единица време, туку едновремено ќе работи со повеќе RAT интерфејси, т.е. е multi-RAT ориентиран, со можност оптимално да ги комбинира сите достапни мобилни и безжични мрежи и да ги распредели интелегентно сообраќајните потоци да можат да одат по различните достапни радио мрежи.

Денес, smartphone-ите имаат WLAN и Bluetooth интерфејси, а исто така неколку интерфејси до 3G и 4G мобилните мрежи (на пр., UMTS, LTE, LTE-Advanced). Сепак, smartphone-ите и другите мобилни уреди користат само еден RAT во дадено време, за даден сообраќаен поток (сервис). Но, кога имаме повеќе различни хетерогени мобилни и безжични мрежи од една страна, и еден мобилен уред на другата страна, следствено корисникот на мобилниот уред треба да има можност, едновремено да ги користи сите достапни мобилни и безжични мрежи (во местото каде што се наоѓа), користејќи при тоа кориснички персонализирани поставености во мобилниот уред. Исто така, еден мобилен корисник, треба да има можност да одбере само подмножество од RAT во даден момент, за даден сервис/и (на пр., само две RAT-и, само три RAT-и итн.). За таа цел, се предлага на податочното ниво да имаме Open Wireless Architecture (OWA) [6], за да се овозможи отворени мобилни и безжични процесирачки модули со отворени интерфејсни параметри за поддршка на различни мобилни и безжични комуникациски стандарди. Главната концептуална мотивација за еден ваков уред со вакви протоколни нивоа може да се најде во трудот [5].

4.1 Преглед на слични QoS механизми и концепти

Истражувањата во оваа глава од докторската дисертација, е поврзани со дизајнот на нов 5G мобилен уред, кој е следен исчекор од претходни истражувања (од магистерската теза) поврзани со адаптивна QoS поддршка во хетерогени безжични и мобилни IP мрежи [26-34]. Овие трудови и истражувања прикажуваат еден адаптивен QoS обезбедувачки модул, кој обезбедува најдобар QoS и најниска цена на чинење за даден мултимедијален сервис преку користење на една или повеќе безжични мобилни технологии, во даден момент. Перформансите на нашиот адаптивен QoS кориснички-ориентиран алгоритам, во горенаведените трудови, беше евалуиран преку користење на симулации со dual-RAT UMTS/WLAN мобилни уреди. Анализата на овој концепт и симулациските резултати за клучните QoS параметри покажаа генерално задоволителни резултати и перформанси, како и високо ниво на QoS задоволување за различни мултимедијални сервиси под

различни мрежни услови и во различни хетерогени безжични и мобилни средини. Како и да е, недостатокот во еден ваков адаптивен QoS систем лежи во неговата применливост, да може да се поврзе само на една радио пристапна технологија во даден момент, па дури и таа радио пристапна технологија да обезбедува најдобра конекција за даден сервисен сообраќај. Во таа насока, еден чекор напред е направен со едновременото користење на сите достапни радио пристапни технологии, преку комбинирање на различните сообраќајни потоци од дадени сервиси (или од даден сервис) преку различни, најпогодни радио пристапни технологии, користејќи вертикален multi-homing и multi-streaming и различни оптимизациски техники. Дополнително, новите истражувања за 5G мобилните уреди и мрежи, би создале нов напреден QoS-базиран рутирачки алгоритам, кој би изнаоѓал (користејќи различни оптимизирачки алгоритми, за различни влезни параметри, критериуми и оптимизирачки зависности) најоптимална конекција/конекции за даден сервис. Генерално, почетна точка од каде тргнаа истражувањата кон 5G мрежите и QoS механизмите кои понатаму следат во рамките на оваа глава, може да се најдат во [5-8] и [35-37]. Во [38] е презентираан еден друг ефикасно QoS обезбедување за безжични адаптивни мултимедиски базирани мрежи, кој користи вид на учење базирано на засилена награда, наречено Q-learning. Предложената шема ги опфаќа веројатностите за отфрлање на повик при хендовер и ограничувањата од просечното алоцирање на опсег, со цел да се постигне оптимална CAC (Call Admission Control, т.е. контрола на пристап до медиумот) и полиси за алоцирање на опсег, кои можат да ги максимизираат мрежните приходи и загарантирани QoS ограничувања. Сепак, исчекор е направен во трудот [39], каде што е предложен генерички адаптивен QoS модел базиран на резервација за интегрирани целуларни и WLAN мрежи. При тоа, се користи адаптивен механизам за поддршка на QoS од-крај-до-крај. Прикажаните резултати и својства во трудот [39] откриваат дека дадената адаптивна QoS управувачка шема може значително да ги подобри системските ресурсни искористености и да ги намали веројатностите од блокирање на повик, заедно со веројатностите од загуби при хендовер во интегрираните безжични мрежи, и воедно да одржува прифатливи QoS до крајните корисници. Сепак, може да се увиди дека адаптивната QoS управувачка шема дадена во [39] врши промена само во MAC нивото (поточно, во CAC процедурата) со соодветен алгоритам за адаптирање на опсегот и задоволува многу ограничен број на QoS параметри, како што се: сообраќајниот товар, веројатноста за блокирање на повик и веројатноста за загуби при хендовер.

Понатаму, во [40] е претставен адаптивен алгоритам за одлучување со повеќе-својствен вертикален хендовер, кој обезбедува избирање на безжична пристапна мрежа од

страна на мобилниот уред, користејќи fuzzy logic концепти и генетички алгоритам. Слични концепти се користеле и во нашиот напреден QoS модул за одлучување, кој може да се имплементира во 5G мобилните уреди, но во случајот кога одбираме едновремено повеќе различни безжични и мобилни мрежи, едновремено, за дадена група од користени мултимедиски сервиси. На тој начин би добиле агрегиран проток од сите користени радио пристапни технологии. Презентираното истражување [40] предлага RAT селективен алгоритам со користење на интегриран безжична средина која се состои од wireless wide area networks (WWAN-и) и WLAN-и. Алгоритмот што се предлага користи одлуки за вертикалниот хендовер кој може да одреди кога е потребен хендовер, и при тоа, избира најдобра RAT врз база на моменталните мрежни услови, QoS побарувањата, состојбата на мобилниот уред, корисничките приоритети и цената на сервисот преку различните RAT-и.

Здружена радио-ресурсно управувачка стратегија, базирана на механизмите за учење со зајакнување (на англ. Reinforcement learning) е претставен во [41]. Ваквите механизми управуваат fuzzy-neural алгоритам за да обезбедат дадени QoS побарувања. Се разгледуваат само три RAT-и, главно UMTS, GERAN и WLAN, како потполно достапни за селекција. Фази логиката обезбедува многу едноставно управување со здружениот радио ресурсен менаџер, едноставно преку поставување и достигнување на множество од правила. Исто така, членските функции искористени во [41] се адаптивни, така што можат да бидат гарантирани посакуваните перформанси, во смисла на зголемена веројатност за задоволително ниво на QoE за крајните корисници.

Во еден друг труд [42] се зборува за алгоритам за селекција на мрежа базиран на т.н. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making. Овој алгоритам ги согледува факторите на јачината на приемниот сигнал (Received Signal Strength), цената на чинење, опсегот, брзината и корисничките перформанси. При тоа е дефинирана функција за избор на мрежа, која ја мери ефикасноста во искористеноста на радио ресурсите за дадена мрежа. Сепак и овде се избира само една мрежа.

Покрај погоре дискутираните алгоритми, постојат многу други истражувања кои се базирани на други напредни и понови механизми за селекција и пристап до одредена радио пристапна технологија. Еден таков напреден механизам е прикажан во [43], кој механизам е наменет за автоматска селекција на радио пристапна мрежа. Овој механизам им овозможува на мобилните уреди да изградат листа со приоритетни целни пристапни мрежи, независно за сите нивни активни конекции, и истовремено истиот тежнее да ги задоволи корисничките побарувања. Истиот оперира во две точки на одлука (мобилниот

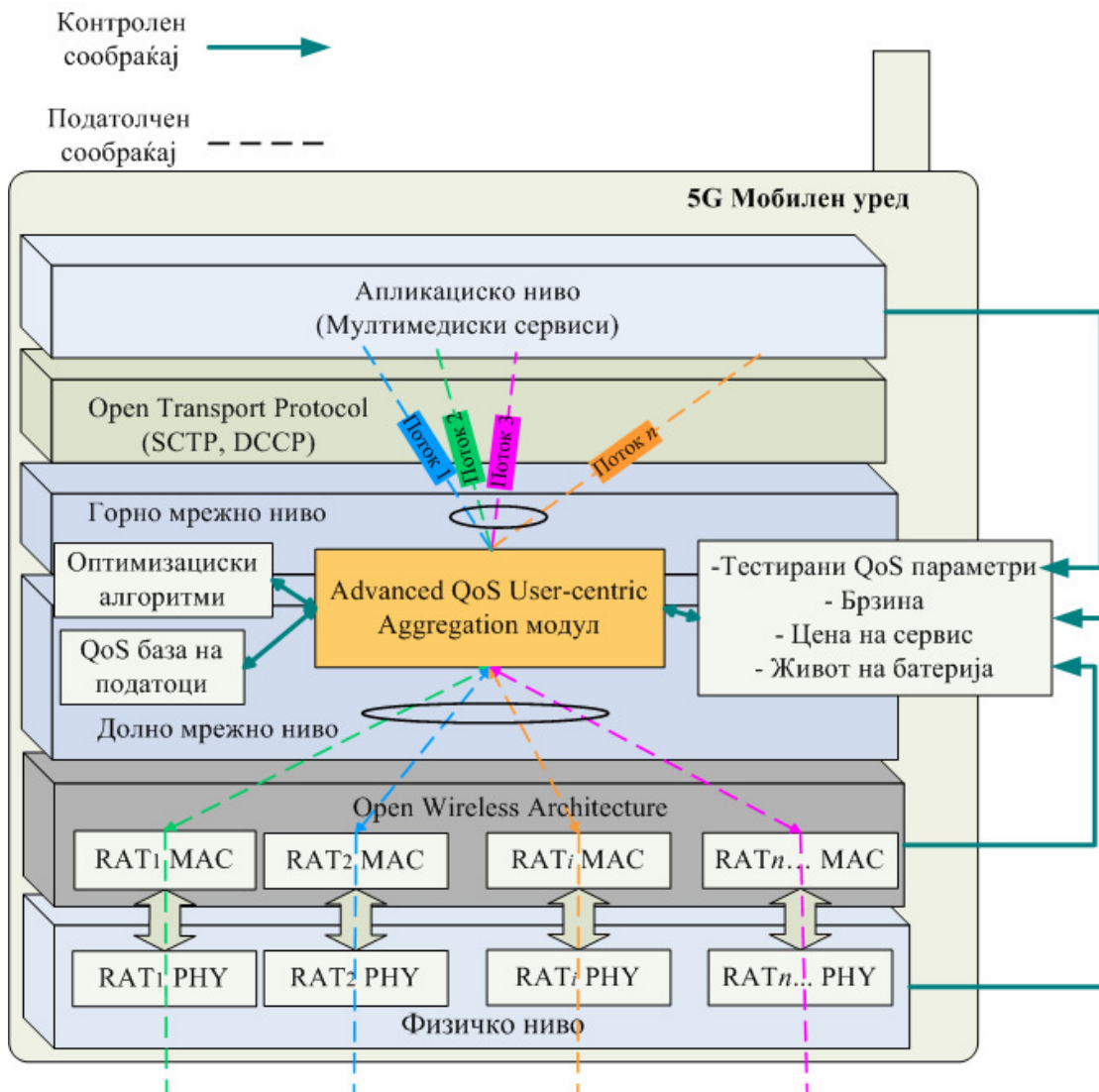
уред и јадрото на мрежата), делејќи ја комплексноста на целиот процес и полесно пристапувајќи до пожелната радио пристапна технологија.

Главната водечка идеја за развојот и одлуката кој оптимизациски алгоритми да се употребат во нашиот напреден корисничко-ориентиран QoS модул кој би се наоѓал во напреден мобилен терминал (5G мобилен уред) може да се најде во [44], додека за својствата поврзани со вертикалниот multi-homing и вертикалниот multi-streaming може да се најде во [11] и [12]. Предложената генерална шема во [44] се труди да ги реши проблемите со избирање на радио пристапна мрежа во сценарио со хетерогени безжични и мобилни мрежи, и се користи за генерална повеќе-критериумска софтверска асистенција која може да ги зема во предвид корисникот, операторот и/или QoS барањата. Се користи комбинација од fuzzy logic и генетички алгоритми, за да се добие шема со дадена скалабилност, флексибилност и едноставност.

Сепак, за разлика горенаведениот преглед на научни трудови и истражувања, мора да се потенцира дека нашиот нов QoS интелигентен модул со вклучени вертикални multi-homing и multi-streaming својства, кој е развиен и симулиран во рамките на оваа глава од дисертацијата, е поставен на IP ниво. Уште повеќе, предложениот 5G мобилен уред кој може едновремено да комбинира повеќе различни мултимедиски сервиси да одат по повеќе достапни радио пристапни технологии, е значаен исчекор во достигнувањата во оваа област, давајќи значителни подобрувања и резултати за QoS обезбедувањето во постоечките и идни 5G мобилни и безжични мрежи. Понатаму, во следната подглава го образложуваме начинот на функционирање на напредниот 5G мобилен уред, дизајнот и напредниот QoS модул во истиот.

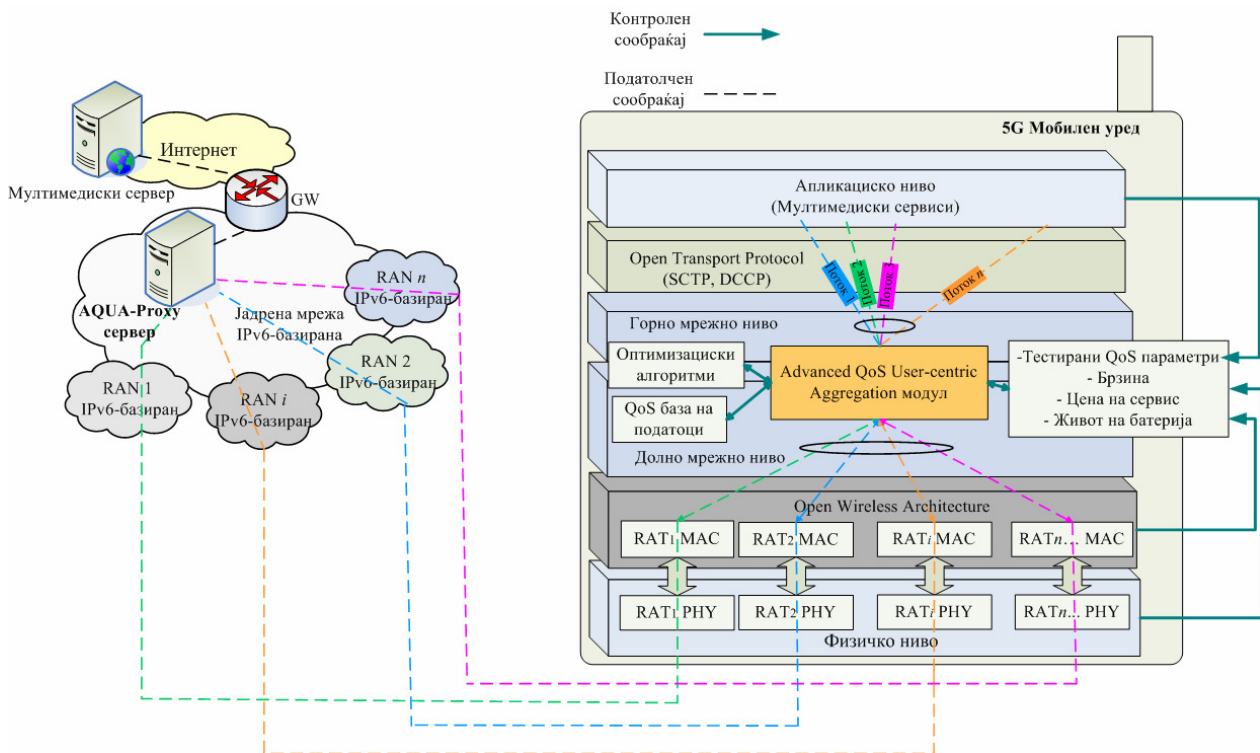
4.2 Системски модел со напредни QoS механизми за 5G мрежи

Главните карактеристики и изгледот на нашиот нов мобилен уред со напредни QoS механизми, кој би се користел во 5G мрежите е претставен на слика 4.1, додека целиот системски модел, со сите вклучени ентитети од крај-до-крај е претставен на слика 4.2. Како што може да се забележи, новиот 5G корисничко-центриран мобилен уред е мулти-моделен јазел, со повеќе интерфејси, по еден за секоја различна радио пристапна технологија. Напредниот QoS механизам е поставен во Advanced QoS-based User-centric (RAT-) Aggregation (AQUA) модулот на мрежно (IP) ниво. Според [5] и [5] физичкото и OWA нивото ја дефинираат мобилната безжична технологија (т.е. RAT). Без сомнеж, мрежното ниво ќе е IP, но делењето на ова ниво, во две под-нивоа ќе биде неопходно, првенствено заради вертикалниот multi-homing.



Слика 4.1. Изглед на 5G мобилниот уред со AQUA модулот.

Може и да се нагласи дека OWA нивото може да биде додадено од било која постојна и/или идна RAT со соодветни дефинирани: MAC (Media Access Control) ниво и Физичко ниво (сите од нив, на мрежно ниво го имаат IP како обединувачки протокол, над MAC нивото, т.е., OSI-2 нивото). Како и да е, главниот фокус овде е поставен на IP (мрежно) ниво и нагоре, преку користење на различни мобилни и безжични пристапни технологии (RAT) на подолните две нивоа. Преку all-IP концептот кој е присутен во сите IEEE стандарди за мрежи, а истиот концепт е адаптиран и во 3GPP 4G мобилните мрежи и после нив (5G), мрежното ниво секаде ќе биде IP. Сепак, како што спомнавме претходно, неговата поделба на две под-нивоа: Горно и Долно мрежно ниво; ќе биде повеќе од потребна. Горното IP мрежно ниво има една унифицирана IPv6 (а некаде може да биде и IPv4) адреса, и е назначено за рутирање на сообраќајот кон Долното IP мрежно ниво, и за создавање на socket-и кон погорните нивоа, т.е. кон Open transport layer (Отвореното транспортно ниво) и апликациското ниво.



Слика 4.2. 5G мобилниот уред, AQUA-Proxy серверот и системската архитектура со напреден QoS и вертикален multi-homing.

Другото под-ниво, Долното IP мрежно ниво може да има неколку различни IPv4 (или IPv6) адреси, по една IP адреса за секој различен RAT интерфејс, додека секоја од овие IP адреси ќе се мапира со уникатната, една IP адреса на Горното IP мрежно ниво. Во средината, помеѓу Горното и Долното IP мрежно ниво ќе биде модул за превод на адресите и врзување на адресниот простор на двете мрежни нивоа (кој е вклучен во AQUA модулот, или би работел посебно во координација со AQUA модулот). Овој модул би работел на тој начин, што би ги одржувал и преведувал IP адресата од Горното IP мрежно ниво (една IPv4 или IPv6) во различни адреси на Долното IP мрежно ниво (IPv4 и/или IPv6), и обратно.

Овде мора да потенцираме дека постојат и други слични протоколи кои ги прават горенаведените функции, како на пример Host Identity Protocol (HIP) [45-47], но истиот наметнува само нов именски простор, трудејќи се да го заобиколи умешно IP и да создаде мимикрија на дел од ова што погоре е презентирano. Самиот HIP е насочен повеќе кон обезбедување сигурносно мобилно процесирање и сигурносен multi-homing, воведувајќи уникатно Host Identity (HI) име. Воедно, понекогаш покажува низа на проблеми при интегрирано функционирање со NAT (Network Address Translation), преку firewall-и или во комбинација со IPSec. Освен тоа, за разлика од тоа каде ние ги имплементираме промените и механизмите, HIP повеќе би дошол дека работи на транспортно ниво или

надвор од IP нивото, бидејќи се обидува да се наметне како нов протокол кој има тенденција да го замени IP. Понатаму, во [48] е специфициран сличен протокол на HIP, наречен Shim6, и на прв поглед, доста близок на функционалностите како нашиот предложен мрежен модел. Но, овој протокол не се обидува да обезбеди ново мрежно ниво или транспортно ниво, ниту идентификатори за истите. Освен тоа Shim6 предлог протоколот, потполно не ги раздвојува идентификациските функции и функциите за лоцирање, кои традиционално се натрупуваат во IP адресата. Над сè, Shim6 користи само IPv6 адреси, додека ние ги користиме и IPv4 и IPv6 адресите.

Доколку се вратиме на нашиот модел на 5G мобилен уред, доста добро би било да имаме Open Transport Protocol (OTP), кој би имал можност да се симне од Интернет и да се инсталира. Бидејќи денес имаме класичен транспортен протокол според класичниот OSI модел, овие можности не се дадени. Така, доколку се дозволи отворено Транспортно ниво (OTP), мобилниот корисник, на својот уред би можел да симне модификации и адаптации на TCP за мобилни и безжични мрежи (различни TCP верзии), RTP, Multipath-TCP [49], Stream Control Transmission Protocol (SCTP) [50], Datagram Congestion Control Protocol (DCCP) [51], или некои други идни транспортни протоколи кои се однесуваат на точно определени спецификации за мобилни и безжични мрежни технологии, достапни на базната станица, преку поддршка на multi-homing и multi-streaming.

Од сите погоре споменати протоколи на транспортно ниво, најпогодни се SCTP и DCCP, бидејќи покажуваат одлични перформанси во поглед на вертикални multi-homing multi-streaming и агрегација на мрежен сообраќај. Овие два транспортни протоколи иницијално биле создадени за пренос на сигнализационски податоци преку IP мрежите. Така SCTP моментално се користи во јадрениот дел од мрежата на 3G и 4G all-IP мобилните мрежи (на пр.: помеѓу eNodeB и гејтвеите во 4G). Причината за имплементирање на SCTP и DCCP на OTP ниво во предложениот мобилен уред (и во AQUA-Proxy серверот од другиот крај) лежи во привлечните карактеристики како што се можноста за вертикален multi-streaming и multi-homing, како и во перспективата за програмирање на TCP/IP socket-и, плус самите TCP и UDP не се релевантни за поддршката на вертикален multi-homing на транспортно ниво. Освен тоа, SCTP ги надминува ограничувањата на TCP за транспорт на сигнални пораки преку IP, three-way ракувањето за време на воспоставувањето на конекцијата (во SCTP постои four-way ракување), и низа други предности. Воглавно, во нашиот случај ние користиме SCTP/DCCP за поддршка на multi-homing-от на транспортно ниво, т.е. за доставување на различни мултимедиски сервиси преку различни RAT едновременно, откако ќе биде избран најпогодниот (или најпогодните во вертикалниот

multi-steaming) RAT кој е оптимален според мрежните услови (достапност), QoS побарувањата, условите на мобилниот уред (животот на батеријата), корисничките перформанси, и цената на чинење на сервисот преку тој избран RAT. Преку ова, ние секако имаме балансирање на товар, оптимално опслужување и се обидуваме да постигнеме најдобро QoS обезбедување и највисок проток (битска брзина) за секој корисник. Како и да е, како што може да се види и од слика 4.2, на другата страна од конекцијата (во јадрениот дел од хетерогената мобилна мрежа, проху контролниот сервер, наречен AQUA-Proху) мора да биде на сличен начин инсталиран SCTP/DCCP на транспортно ниво, заедно со AQUA модулот внатре, сè со цел да имаме успешно воспоставување на SCTP/DCCP сесија. Исто така, имаме peer-to-peer протоколна комуникација помеѓу мобилниот уред и Proху серверот, и балансирање на сообраќајниот товар: за да се подобри искористеноста на целиот достапен радио опсег кој му е доделен на мобилниот уред од сите RAT заедно. Апликациското ниво на 5G мобилниот уред е исто како и тоа во класичниот OSI модел, збогатено на цела лепеза од нови и постојни апликации. Повеќе детали за OSI нивото во идните 5G мобилни уреди е дадено во [5] и [7]. Понатаму, го претставуваме функционирањето на напредниот QoS механизам имплементиран на мрежно ниво во 5G уредите.

Во срцето на нашата работа, лежи нов напреден QoS модул со напреден QoS корисничко-центриран RAT агрегирачки алгоритам, кои има вертикални multi-homing и multi-streaming карактеристики, т.е. кратко го нарековме AQUA модул. Тој е дефиниран независно од било која мобилна и безжична технологија, користејќи Multi-RAT интерфејси (на пр.: UMTS, WLAN, Mobile WiMAX, LTE, LTE-Advanced, итн.). Како што се гледа од слика 4.1, имплементиран е помеѓу Горно и Долно IP мрежно ниво, обезбедувајќи интелегентно QoS управување и рутирање преку различни RAT-и. Исто така, AQUA модулот може да комбинира едновремено неколку различни сообраќајни потоци од различни мултимедиски сервиси, пренесувани преку исти или различни RAT интерфејси досегнувајќи високо ниво на проток, висок однос на веројатност за пристап и оптимално користење на хетерогените RAT ресурси. За успешно да функционира AQUA, мобилниот уред си има свои внатрешни механизми (кои се надвор од фокусот на дискусија овде) за прибирање на низа од QoS параметри од сите протоколни нивоа, како: информација за корисничката брзина, животот на батеријата, цената на сервисот преку било кој пристапен RAT, и низа на други QoS параметри. Процедурата за прибирање на информации се извршува периодично, на даден временски интервал (се додека се одвива преносот на мултимедиски податоци). Како што се собираат податоците за QoS

параметрите, така истите се чуваат во QoS база на податоци во мулти-димензионална матрица од табели, поврзана со AQUA модулот преку одлична координација и комуникациска врска. Од друга страна AQUA модулот е поврзан со друга база на податоци, која чува оптимизирачки алгоритми (линеарни програмирачки и биолошко инспирирани генетски алгоритми) кои се користат во AQUA процесирањето и процесот на оптимизација. Повеќе информации за функционирањето на целиот AQUA процес и алгоритам е образложен во поголеми детали во следната подглава.

Понатаму, откако AQUA модулот ќе ги изврши оптимизациите и ги добие оптималните рути, го препраќа пакетот кој доаѓа од Горното IP мрежно ниво, надолу кон Долното IP мрежно ниво, и понатаму само продолжува со препраќање до избраниот RATT/LL/MAC модул за тој сервис или ги отфрла во случај кога нема пристап до ни една RATT во хетерогената средина. Како и да е, секој пакет најпрво оди преку приоритетно опслужување и распределување, пред да помине низ погоре споменатата downlink процедура. Оваа е конкретна процедура за само еден пакет за даден сервис, но едновремено пристигнуваат огромен број на пакети кои доаѓаат од неколку различни сервиси и кои се едновремено процесирани низ AQUA модулот.

Овие процеси побаруваат поголема процесорска моќ, паралелно процесирање, капацитет на меморија, живот на батеријата итн. Од друга страна, според Moore-овиот закон за развој на компјутерски уреди, процесорската моќ се зголемува околу двојно на секој две години во минатата декада. Според тоа, мобилните уреди како компјутерски уреди (со хардвер и софтвер) го следат Moore-овиот закон. Згора на тоа, мобилните уреди се зависни од животот на батеријата. Сепак, следејќи го скоро поставениот закон на Koomey [52], врз база на анализата за енергетска ефикасност од пресметките во последните шест месеци, севкупниот излез од анализите е дека моќноста потребна да се изврши некоја работа која бара фиксен број на пресметки ќе паѓа на половина секоја една и пол година, овозможувајќи му на мобилните уреди да изведуваат посложени задачи и да постануваат сè помали и помали. Така би заштедувале при користењето на електрична енергија и би ги правеле мобилните пресметковни апликации возможни. Од прилика, зборувајќи за период од шест години (на пример од 2016 до 2022), пресметковните процесирања во мобилните уреди би се зголемил за 16 пати ($2^4=16$, е 4 годишен период од 1.5 години во 6 годишниот период) со истиот живот на батерија, овозможувајќи едновремено да се користат повеќе различни мрежни интерфејси од страна на повеќе мултимедиски сервиси. Па, се очекува дека иницијалната информација и комуникациската филозофија на чување на мрежата што поедноставна, колку што е тоа можно, и давајќи му

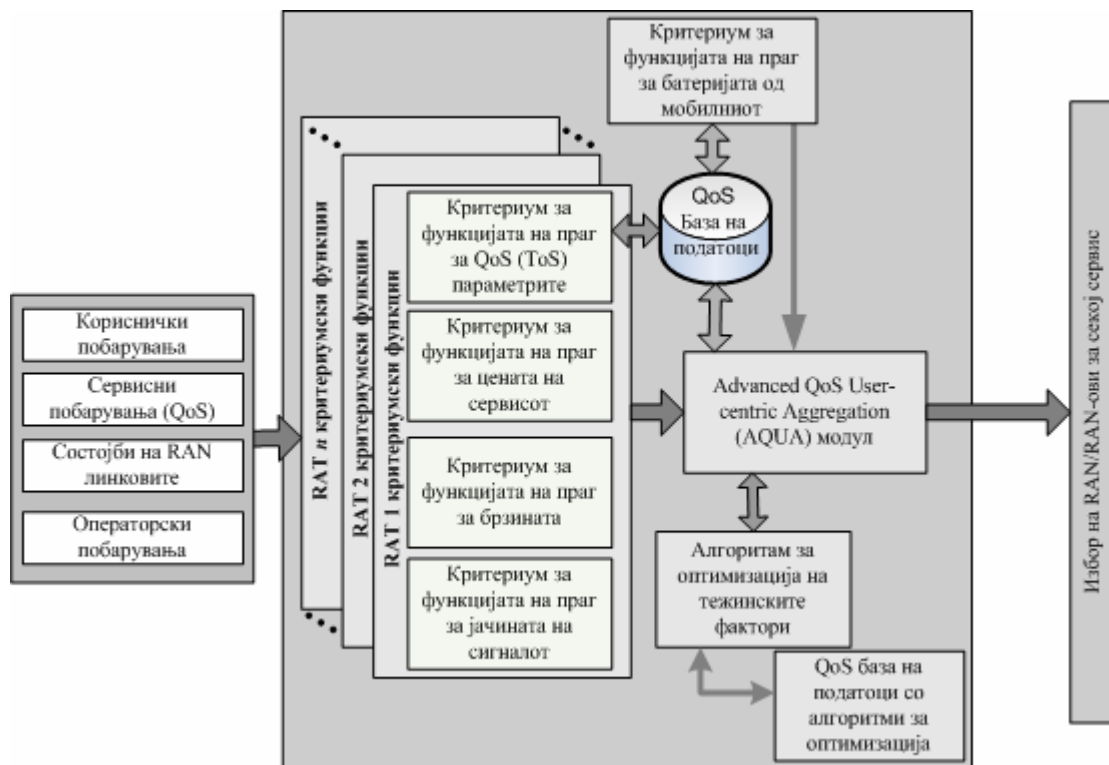
повеќе функционалности на крајниот јазел, ќе постане реалност во идните генерации на мобилни мрежи, овде референцирани како 5G.

Сето ова, обезбедува можност за едновремено користење на повеќе радио мрежни интерфејси за различни сервиси, користејќи сегашни и идни RAT.

Од другата страна, во uplink, сите пакети кои доаѓаат од RAT интерфејсите се препраќаат нагоре, па Долното IP мрежно ниво, со помош на AQUA модулот се рутираат на Горното IP мрежно ниво, па се испраќаат на Open Transport Layer (на пр., SCTP и DCCP). Финално, сите пакети се доставени до одговарачката апликација. Се подразбира дека имаме користење на редови на чекање на секое ниво, но се знае кој пакет за која апликација одговара, па препраќањето е брзо, а доцнењето во попатните нивовски редови на чекање е незначително мало. Во downlink насока, Горното IP мрежно ниво испраќа апликациски податоци (примени од апликацијата преку транспортниот протокол) до најсоодветниот RAT интерфејс, одреден со помош на AQUA модулот и вертикален multi-homing логика. Всушност, постојат низа на тунели (види слика 4.2) од 5G мобилниот уред до AQUA Proxy серверот, кој е суштински дел во јадрото на мрежата, а кои тунели може да ги собираат и агрегираат сите потоци од 5G мобилните уреди, и да вршат рутирање базирано на дадени полиси. Самиот AQUA Proxy сервер поддржува вертикален multi-homing и multi-streaming, со истата комбинација на Open Transport Layer (SCTP и/или DCCP) како и во транспортното ниво на 5G мобилниот уред. Да нагласиме, дека парот 5G мобилен уред и AQUA Proxy сервер, дава одлични предности, при што имаме одлична сообраќајна контрола и поголеми агрегирани битски брзини, плус одличен QoS.

4.3 AQUA алгоритам

Во рамките на оваа подглава ќе стане збор за AQUA алгоритмот за радио мрежна селекција и QoS поддршка во хетерогени безжични и мобилни мрежи, кој што при оптимизацијата користи линеарни или биолошки инспирирани алгоритми (генетски алгоритми). Градбените компоненти од нашиот QoS RAT агрегациски алгоритам (AQUA) за радио мрежна селекција со вертикален multi-homing карактеристики се дадени на слика 4.3. Измерените податоци за различните избрани критериуми, вклучувајќи кориснички побарувања, сервисни (QoS) побарувања, операторски побарувања, и исто така и радио линковски состојби на различните присутни RAT-и се влез во n множества од паралелни критериумски функции, по едно множество за секој RAT (од RAT 1 па сè до RAT n).



Слика 4.3. Напредно QoS избирање на рута и модул за избор на RAN.

Еден RAT критериум за функција го обликува и филтрира излезот од претходните четири компоненти во четири внатрешни прагови функции: првиот ги обликува QoS параметрите. Вториот ги обликува цените за сервисот, доколку истиот би одел по тој RAT (што зависи од SLA (Service Level Agreement)), помеѓу корисникот и секоја од присутните радио пристапни мрежи. Третиот RAT критериум за функција ја обликува поддржаната брзина на мобилниот уред и последниот (четвртиот) го обликува јачината на сигналот детектиран во мобилниот уред од RAT базната станица(и). Секој од овие четири прагови на критериумски функции даваат на излез, само една вредност (како постоен број со граници [0, 1]). Пресметковните, филтерските и обликувачките процеси можат исто така да се направат, во базната станица или мобилниот уред, во зависност од достапноста на измерената вредност, местото на мерењата и пресметковната сложеност. На пример, внатрешната нивовска функција за батеријата на мобилниот уред, која обликува и филтрира параметар за нивото на батеријата, може да се смести во мобилниот уред. А од друга страна, нивовските граници на функции за сервисната цена и за брзината, кои ги обликуваат и филтрираат параметрите за сервисната цена и брзината, можат да се наоѓаат на базната станица (или пристапната точка).

Централна компонента е Advanced QoS User-centric Aggregation модулот со можност да селектира еден оптимизирачки алгоритам, каде што за влез користи: излезот од n множества од паралелни функции на критериумот, по четири вредности за секој

RAT ($4*n$ севкупно) и излезот од критериумот за функцијата за поддршка на батеријата на мобилниот. Критериумската функција за поддршка на батеријата (една вредност) го обликува и филтрира нивото на корисничката мобилна батерија. Друга главна компонента на AQUA алгоритмот е: QoS базата на податоци, која ги чува сите измерени QoS параметри (за секој сервис). Оваа база е поврзана и постојано комуницира со критериумските функции, критериумот за нивото на живот за батеријата, и индиректно со базата на податоци за QoS оптимизациските алгоритми, преку AQUA модулот.

AQUA модулот за избор на оптимизациски алгоритам (Generic Algorithm (GA), Linear Programming (LP) или други оптимизирачки алгоритми) за оптимизација на тежинските фактори прави најоптимален избор за алгоритам за оптимизација од QoS базата на податоци со оптимизациските алгоритми, во зависност од различните влезни критериуми за секој RAT и за секој мултимедиски сервис, во координација со AQUA модулот. Тоа значи дека секој критериум може да има различни тежини, што зависат од претпоставките (и одлуките) за нивното влијание врз процесот на најдобро селектираниот RAT. Постојат низа причини за користење GA или LP во изборот на пристапната мрежна технологија, а постојат и недостатоци. На пример, GA е докажано дека обезбедува задоволителни резултати (т.е. има подобри QoS параметри) за помал број мобилни корисници (до над стотина), но е многу робусна во споредба со random-based селектирачкиот алгоритми и други истражени трудови од сличната проблематика [44] за помало ниво на сообраќаен поток во мрежата (мал број на мобилни корисници по клетка). GA е моќна алатка за поедноставни проблеми и функции со мала сложеност, во поглед на пресметковната големина. Од друга страна LP алгоритмите (кои исто така се употребуваат заради едноставноста и линеарноста на оптимизацискиот проблем (види (4.1)) се доста ефикасни и брзи, при што полесно се справуваат со процесирачките проблеми и загушувањата на сообраќај при голема густина на корисници по клетка во споредба со GA. Генерално, комплексноста во нашата рамка-водилка е доволно редуцирана на предложените два алгоритми (GA и LP); заради користењето на едноставна излезна рангирачка функција на оптимизација (види ја равенката (4.1)).

На крајот, AQUA модулот, покрај горенаведените функции, е наменет да избере една (или повеќе кај multi-streaming) RAT од хетерогената мобилна и безжична средина, која за даден сервис ќе биде најдобра RAT (помеѓу сите достапни RAT-и во даден момент, и даден корисник), откако ќе ги подреди сите RAT-и според даден редослед. Тој подреден редослед произлегува од подредувањето на секоја т.н. RAT рангирачка функција. Така, доколку ги пресметаме влезовите од праговите на критериумските функции како реални

броеви во интервалот $[0, 1]$, тогаш i -тата RAT рангирачка функција може да се пресмета според следната равенка:

$$RF_{RAT_i} = \frac{QoS_i * W_{QoS} + Ct_i * W_C + Vt_i * W_V + SS_i * W_{SS} + Bt_i * W_B}{W_{QoS} + W_C + W_V + W_{SS} + W_B} \quad (4.1)$$

$$\text{при што } 1 \leq i \leq n \quad \text{и} \quad W_{QoS} + W_C + W_V + W_{SS} + W_B = 1 \quad (4.2)$$

каде $W_{QoS}, W_C, W_V, W_{SS}, W_B$ се доделени тежински функции за критериумските функции на:

QoS параметарот, цената на сервисот, брзината на мобилниот уред, јачината на сигналот и нивото на батеријата кај мобилниот уред, соодветно. Овие вредности на тежинските фактори се доделуваат преку користење на соодветен метод на оптимизација, на пример LP или GA, каде нивните вредности се добиваат преку процес кој го движи оптимизацискиот алгоритам до пре-специфицирана цел.

Од друга страна, после поминувањето на четирите внатрешни критериуми за функции на праговите за i -тата RAT критериумска функција (види слика 4.3), излезите (споделените вредности) од QoS параметрите се QoS_i , од цената на сервисот се Ct_i , за поддржаната брзина на мобилниот уред Vt_i , и за детектираната јачина на приемна моќност се SS_i . Обработената вредност од критериумот за функцијата со прагот за поддршката на батеријата е Bt_i .

Така, крајниот чекор на AQUA модулот е да одбере најдобра RAT, на тој начин што ќе избере RAT (од сите достапни RAT-и) кој има највисоко ниво за неговата рангирачка функција (4.1), за даден сервис:

$$\max_{service_j} \{Optimal(RF_{RAT_i})\} \quad (4.3)$$

$$\text{според } W_{QoS} \leq 1, W_C \leq 1, W_V \leq 1, W_{SS} \leq 1, W_B \leq 1 \quad \text{и} \quad (4.4)$$

$$W_{QoS} + W_C + W_V + W_{SS} + W_B = 1, \quad \text{за } 1 \leq i \leq n \quad (4.5)$$

$$\text{каде } 1 \leq j \leq 3 \quad (4.6)$$

Погоре го имаме дефинирано оптимизацискиот проблем. Каде со $service_j$ е даден мултимедискиот сервис (т.е. $j=1$, видео, $j=2$, аудио и $j=3$ податоци), и $Optimal(RF_{RAT_i})$ е оптималната функционална вредност за i -тата RAT рангирачка функција, која се пресметува или со GA (кој достигнува глобален оптимум) или со друг оптимизациски алгоритам, како LP (кој достигнува локален оптимум). Да сумираме, ја избираме таа RAT i технологија со максимална вредност, за нејзината оптимална RAT рангирачка функција ($Optimal(RF_{RAT_i})$). Се разбира, нема ограничувања една RAT да опслужува повеќе различни мултимедиски сервиси за еден мобилен уред (multi-homing), или еден сервис да оди преку повеќе различни RAT-и (multi-streaming).

4.4 Симулациски резултати и анализи

Во рамките на ова подпоглавје ќе ги презентираме симулациските резултати и анализи за различни типови на сценарија, со различни мрежни околности и сервиси, при што ќе ги покажеме перформансите (особено QoS) можности на предложениот 5G мобилен уред со вклучен AQUA модул во себе. Понатаму се дадени различни сценарија, почнувајќи од сценарио 1, каде што е вклучен само GA како единствен оптимизациски алгоритам во AQUA модулот, па продолжувајќи со сценарио 2, па сè до сценарио 4, во кои сценарија се вклучени и GA и LP како оптимизирачки алгоритми.

4.4.1 Симулациски резултати и анализи од Сценарио 1

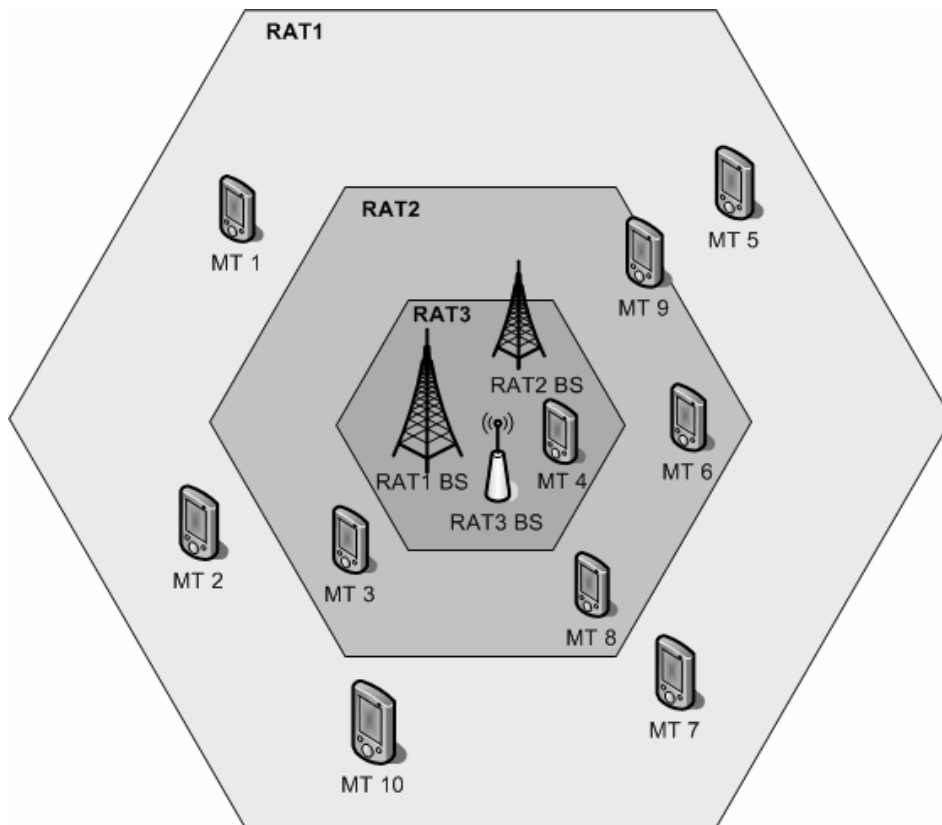
Со помош на сценарио 1 (дадено на слика 4.4) ги добиваме симулациските резултати за средниот системски проток (агрегирана битска брзина) и вредностите за мултимедиската пристапна веројатност при различни мрежни услови. Овие се едни од најзначајните QoS параметри, според кои се надзира целокупното однесување и целокупниот QoS во сегашните и идни RAT-и, бидејќи битската брзина (како што беше и претходно споменато) е основен двигател кон новите генерации на мобилни и безжични мрежи и концепти. На слика 4.4 е прикажано симулациското сценарио бр. 1, кое се состои од една макро RAT клетка и две помали RAT клетки, при што сите три се концентрично наредени со заеднички центар со координати (0, 0). Секоја RAT е претставена со една базна станица и со различен радиус на мрежна покриеност (клетка). RAT1 има радиус од 1 км, RAT2 клетката има радиус 540 м и RAT3 има радиус од 300 м. Мрежниот капацитет за трите RAT-и е следниот: RAT1_C = 15040 kb/s, RAT2_C = 16128 kb/s, and RAT3_C = 17088 kb/s. Вредностите се избрани произволно и не се однесуваат до ни една стандардизирана RAT, со цел да се добијат генерални заклучоци од предложеното решение. На почетокот од симулацијата, мобилните терминали (кратко MT-и, или мобилни уреди) се случајно распространети во област со плоштина 500x500 м². За физичката мобилност на MT-и, применивме Gauss-Markov модел на мобилност [53] земајќи средна брзина на движење во границите 30-120 км/ч (v_{cp}), и обезбедивме високо ниво на случајност за корисничката мобилност. Во дво-димензионалната имплементација на Gauss-Markov моделот, на секој MT му се доделува иницијална брзина и насока на движење, како и средна брзина, насока и правец. Постојат временски интервални множества, кога се пресметуваат нови брзини и насоки за секој MT, кои следат друга насока, правец и интензитет на брзината во следниот временски слот. Овој циклус се

повторува до крајот на симулациското време. Новите параметри за брзина и насоката се пресметуваат според следните равенки:

$$v_i = \mu \cdot v_{i-1} + (1 - \mu) \cdot v_{cp} + \eta_{v_{i-1}} \cdot \sqrt{1 - \mu^2} \quad (4.7)$$

$$d_i = \mu \cdot d_{i-1} + (1 - \mu) \cdot d_{mean} + 2\pi\eta_{d_{i-1}} \cdot \sqrt{1 - \mu^2} \quad (4.8)$$

каде v_i е брзината на МТ (метри/секунда) а d_i е параметар за насока на движење за МТ (во радиани). Понатаму, μ е приспособувачки параметар (доколку $\mu=0$ моделот постанува без меморија и потполно случаен следејќи ја Гаусовата распределба, а доколку $\mu=1$ моделот постанува предвидлив, т.е. линеарен, и во овој случај ја губиме целата случајност на процесот), додека $\eta_{v_{i-1}}$ and $\eta_{d_{i-1}}$ се случајни променливи со Гаусова (нормална) распределба, кои додаваат одредена случајност во новата брзина и параметарот за насока на движење.



Слика 4.4. Симулациско сценарио бр. 1.

Ова симулациско сценарио обезбедува потполна мрежна покриеност за сите мобилни корисници (RAT1, RAT2 и RAT3 покриеност, или минимум RAT1 покриеност). Мултимедискиот сообраќаен поток (Constant Bit Ratio и Variable Bit Ratio сообраќај) го дефинира типот на сервисот и неговата претстава на корисниците во системот. Мултимедискиот сервисен модел во предложената форма ги предвидува постоење на три типа на сервиси кои се дефинирани со побарани загарантирани битски брзини (опсези) и

нивните почетни и завршни времиња (т.е. времетраење). Првиот сервисен тип е дефиниран со ниска битска брзина (64 kb/s) и мало пропагациско време (Round Trip Time), многу осетливо на доцнење и цитер. Овој сервисен тип се користи за справување со говорни сервиси (на пр.: VoIP кој го користи G.711 кодекот). Вториот сервис е карактеристичен по тоа што побарува средна битска брзина и ниско пропагациско време (доцнење), осетлив е на варијации на доцнење и користи сервиси како video-streaming (256 kb/s). Третиот сервисен тип е дефиниран со високи битски брзини и може да се справи со поголемо време на пропација (доцнење), но побарува да нема пакетска грешка (веројатноста на битска грешка да е сведена на минимум) и се користи за податочни сервиси (web и e-mail сервисите со битски брзини од: 512 kb/s). За полесно да се следи симулациското сценарио, сите три сервисни типови се дефинирани со следните триплети од вредности: [битска брзина, време на стартување, траење], соодветно дадени во табела 4.1.

Табела 4.1 Параметарски вредности за различните типови на сервиси.

	Битска брзина [kb/s]	Време кога е стартуван [сек]	Времетраење [сек]
VoIP сервис	64	Poisson-ово распределено со средна вредност 7 секунди	Крај на симулацијата
Video-streaming сервис	256	Poisson-ово распределено со средна вредност 6 секунди	Poisson-ово распределено со средна вредност 50 сек*
Податочен сервис	512	Poisson-ово распределено со средна вредност 6,5 секунди	Крај на симулацијата

* Средното времетраење на video-streaming е 50 секунди, врз база на компаративни мерења.

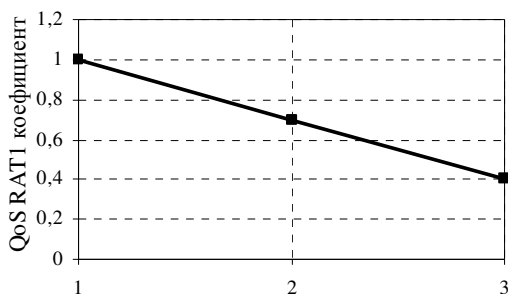
Воедно се креирани и: сообраќајни модели за погоре споменатите типови на сервиси, модели за мобилноста на корисникот, RAT QoS контролни механизми, и скрипта за комуникациското сценарио написана во MATLAB R2007b.

За време на симулацијата, на секој активен мобилен корисник (од вкупно N мобилни корисници) му се доделува случајно еден од сите три типа на сервиси дефинирани погоре. Од друга страна, кога корисниците имаат 5G MT со AQUA модул во истите, во ова сценарио (сценарио 1) користиме како оптимизациски алгоритам само GA, и за секој корисник се доделени сите три типа на мултимедиски сервиси (минимум два, максимум сите три типа на сервиси). Сообраќајниот модел го рефлектира процесот на

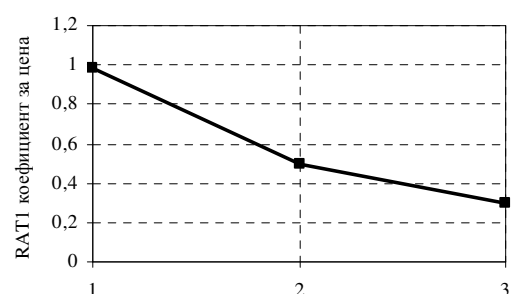
креирање и времетраење на корисничкиот сервис. Негова цел е да даде реалистична слика за мобилниот сообраќаен поток и мултимедиската пристапна веројатност во симулацијата. Во првиот случај, сите МТ се опремени со AQUA модул кој во себе има само GA како оптимизациски алгоритам (овој случај го нарекуваме и обележуваме кратко со 5GAMT).

Пожелно е да се потенцира дека симулацијата на AQUA модулот, имајќи Genetic Algorithm за оптимизација на тежинските коефициенти и равенката (4.1) тежнее да ја постигне врвната QoS за секој тип на сервис и оптимално да ги користи RAT-ите. Во оваа анализа и симулација во MATLAB функцијата за GA користевме 100 итерации, што во повеќето случаи, е базирано на фактот дека нема некои посебни подобрувања после 50-тата генерација. Според симулациските резултати во [44], мутациската брзина ја поставивме на 0.1, како најпогодна, и популациската големина одбрана со GA-и е поставена на 20. Во нашиот случај, бројот на индивидуи кои се загарантирани дека ќе преживеат во следната генерација е поставен на 5 индивидуи (заради петте тежински фактори). Во оваа наше сценарио, критериуми за функцијата на праг (КФП), кои ги обликуваат влезовите за вредностите за измерените податоци, за сите RAT-и е дадено на слика 4.5. На сликите 4.5 а), б), г), д), е) и ж) за ToS поставено е: 1 за VoIP сервисот, 2 за video-streaming сервисот и 3 за податочниот сервис.

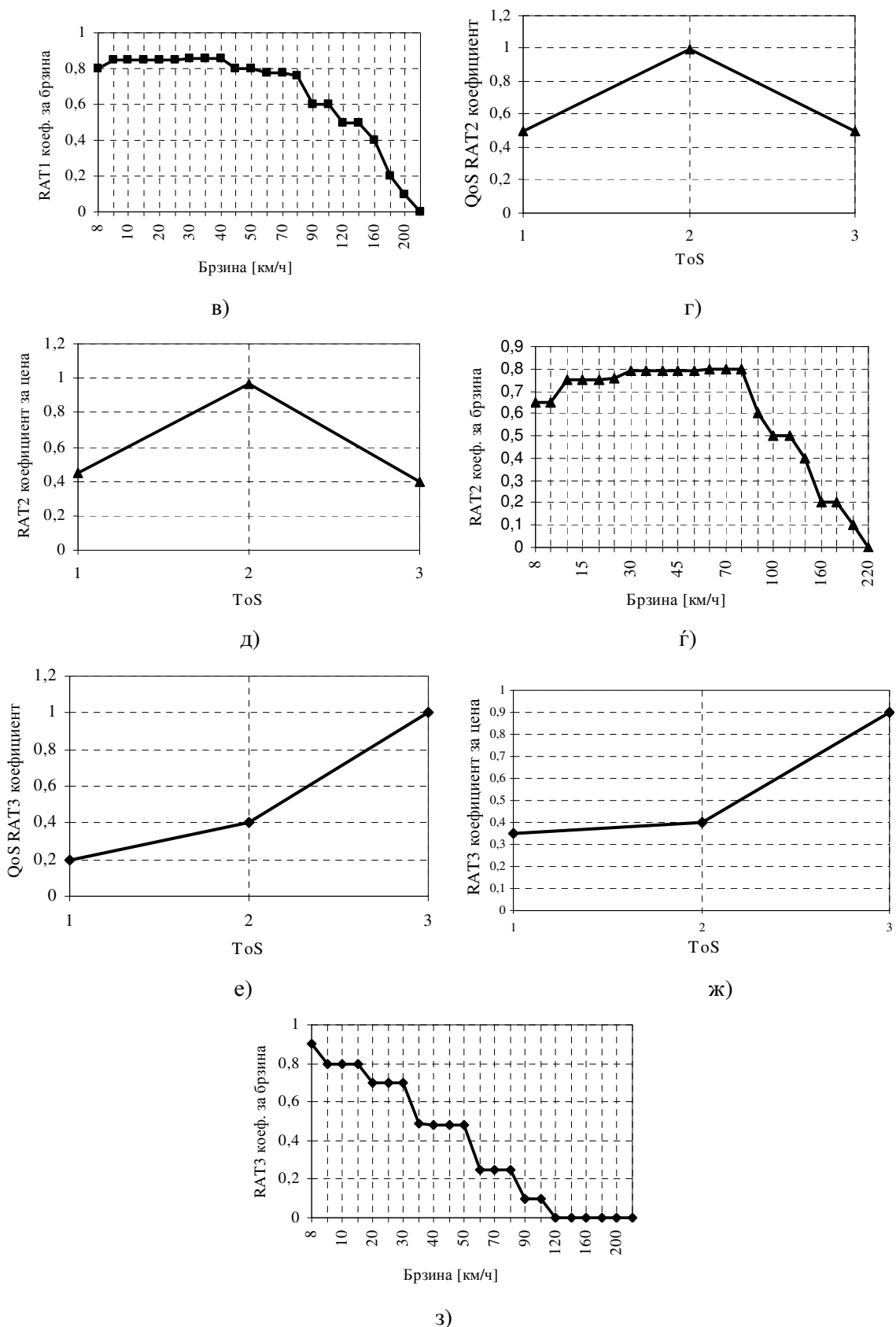
Понатаму, на слика 4.6 се дадени две критериумски функции на праг за детектираната приемна моќност на сигналот во МТ (SSi) и коефициент за нивото на батеријата на МТ (Bti) кои се исти за сите различни RAT-и, бидејќи истите зависам од МТ и од позицијата во симулациската област. Понатаму е дадена компаративна анализа на симулациските резултати за постигливите агрегирани битски брзини кои се илустрирани на слика 4.7, која ги претставува симулациските резултати за средниот агрегиран проток, наспроти бројот на МТ-и. Просечната брзина на МТ-и е поставена на 40 км/ч и вкупното симулациско време е 50 сек.



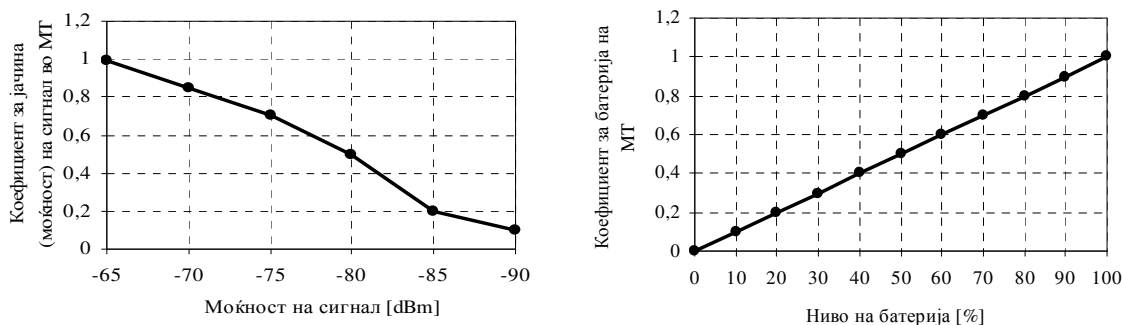
а)



б)



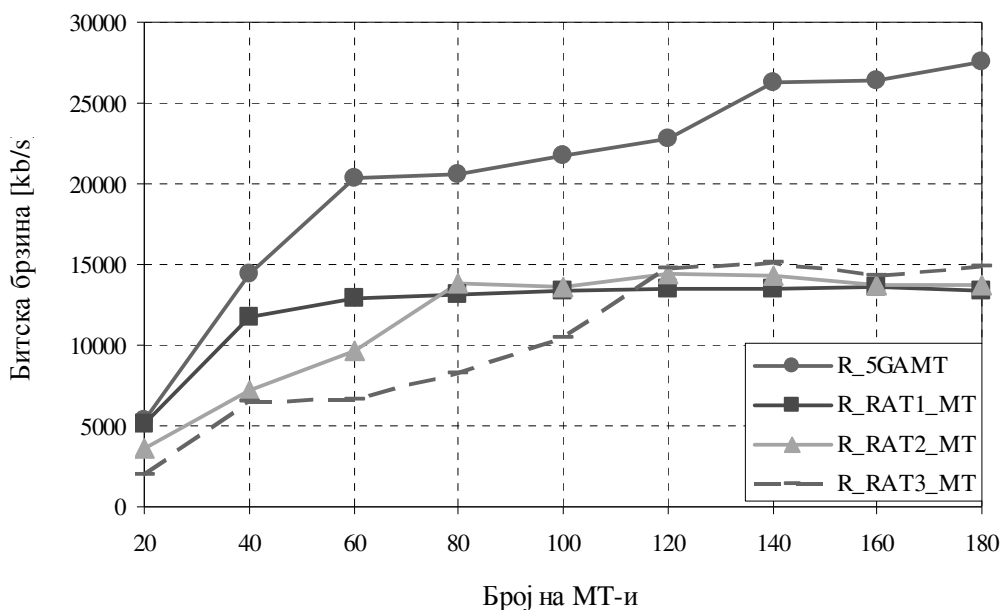
Слика 4.5. Критериумски функции на праг за: а) RAT1 QoS коэффициент КФП, б) RAT1 Коэффициент за цена КФП, в) RAT1 Коэффициент за брзина КФП, г) RAT2 QoS коэффициент КФП, д) RAT2 коэффициент за цена КФП, е) RAT2 коэффициент за брзината КФП, ж) RAT3 QoS коэффициент КФП, з) RAT3 коэффициент за цена КФП и и) RAT3 коэффициент за брзина КФП.



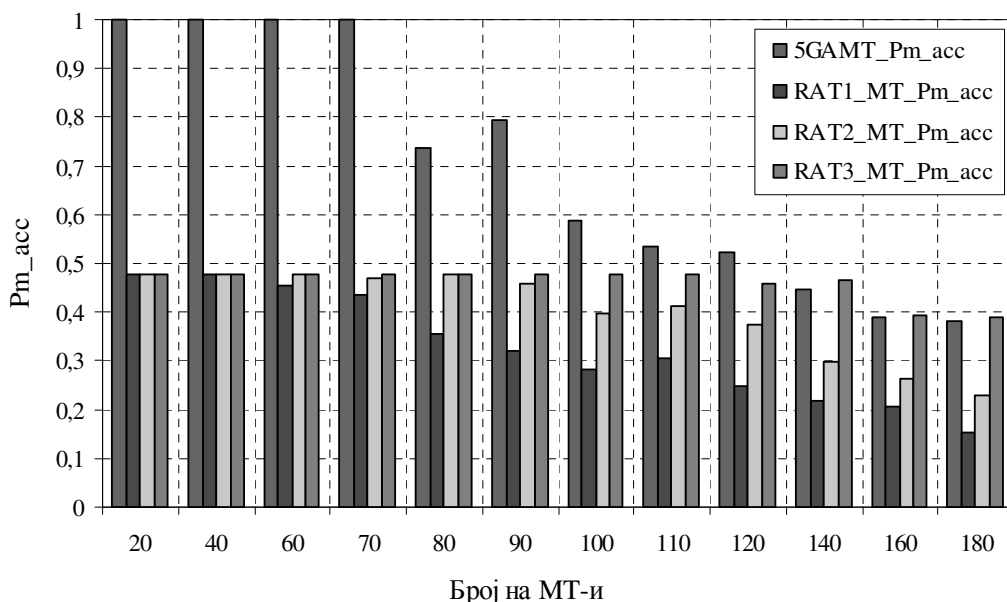
а) Коефициент за приемна моќност кај МТ б) Коефициент за МТ батерија

Слика 4.6 Критериуми за функции на праг за SSt_i и за Bt_i .

Како што може да се забележи од слика 4.7, средната битска брзина за нашиот предложен 5G МТ (кривата означена со R_5GAMT), кој има AQUA со GA модул, за било кој број на МТ-и, покажува највисока вредност во споредба со случаите кога имаме МТ-и кои имаат само RAT1 интерфејс (можат да се приклучат само на RAT1, т.е. кривата R_RAT1_MТ), или во случајот кога МТ-и имаат пристап само до RAT2 (R_RAT2_MТ) или RAT3 (R_RAT3_MТ). Така, се додека не се постигне сатурацијата за сите RAT-и, протокот за 5G МТ се зголемува. На пример, кога RAT1 и RAT2 се заситени со 80 корисници, RAT3 има сеуште капацитет да прифати уште корисници, и тогаш 5GAMT протокот продолжува да се зголемува заедно со порастот на RAT3 протокот. Кога сите RAT-и се сатурирани, тогаш се достигнува максималниот проток за 5GAMT (со 140 корисници во ова симулирано сценарио). Резултатите се повеќе или помалку очекувани, заради фактот дека кога користиме само мал број на корисници (т.е. број на МТ-и) со просечна брзина од 40 км/ч, тогаш има доволно капацитет во сите три RAT-и и проблемите со загушување, презафатеност, загуба и прекинување на сервис за корисниците е видлив после покачување на бројот на МТ-и над 80. Како и да е, за нашиот случај со 5GAMT-и, загушувањето се избегнува во многу ситуации, и веројатноста за неостварување на повик или прекин на повик е многу мала, дури и за поголем број на корисници, заради фактот дека 5GAMT ги користи оптимално сите RAT-и во исто време (паралелно користење на две или три RATи). Следствено, МТ-и кои користат само еден сервис по корисник, и имаат само еден RAT интерфејс, се ограничени само со капацитетот на конкретниот RAT (кој го користат). Така, користејќи ја радио мрежната агрегација во 5GAMT-и, добиваме агрегиран проток (битска брзина) во мобилниот, кој го вклучува протокот од сите достапни RAT-и за мобилниот уред.



Слика 4.7 Средна агрегирана битска брзина наспроти број на МТ.



Слика 4.8 Средна мултимедиска пристапна веројатност наспроти бројот на МТ-и.

Понатаму, на слика 4.8 се претставени вредностите за средната мултимедиска пристапна рата (веројатност, овде означена со Pm_acc) за погоре дефинираните четири случаи. Овде, времетраењето на симулацијата е поставена да биде 50 секунди, додека МТ се движат со просечна брзина од 40 км/ч. Мултимедиската пристапна веројатност за МТ се одредува според следната равенка:

$$Pm_acc = \gamma P_{acc_VoIP} + \kappa P_{acc_Video} + \delta P_{acc_Data} \quad (4.9)$$

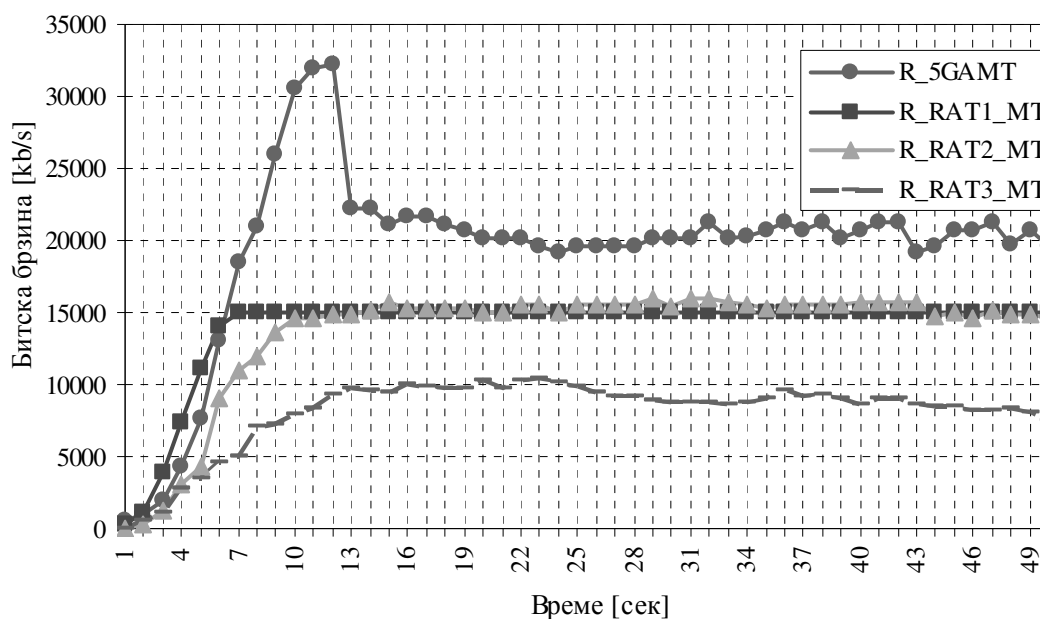
каде γ , κ и δ се мултимедиски обликувачки фактори за пристап на VoIP, Video-streaming и податочните сервиси, соодветно. Тие се реални броеви во интервалот $[0, 1]$ за

мултимедиските корисници со 5GAMT уреди, а за обични мобилни корисници (кои користат само една RAT) овие се 0 доколку не се користи дадениот сервис, или 1 доколку сервисот е стартуван (значи имаме само еден сервис по обичен мобилен корисник). Секоја од сервисните пристапни веројатности е дефинирана со стандардната дефиниција:

$$P_{acc_service_i} = \frac{N_{user_accessed_service_i}}{N_{user_accessed_service_i} + N_{user_not_accessed_service_i}} . \quad (4.10)$$

За првиот случај, кога користиме 5GAMT-и со AQUA модул во себе, просечната мултимедиска пристапна веројатност е со највисока вредност и го држи тоа највисоко ниво, се додека мрежата не постане загушена (со голем број на активни МТ-и, каде бројот на МТ-и се движи над 140). Така, добивката со користење на 5GAMT е лесно приметлива со користење на истите во непреполнета безжична и мобилна мрежа. Во случај на преполни (загушени) мрежи, со огромен број на мобилни корисници, добивката од радио мрежната агрегација со AQUA модул кој користи GA, во поглед на мултимедиската пристапна веројатно е минимална и значително намалена. За голем број на МТ-и се зголемува загушеноста на сообраќај, ратата на одбиени пристапи до сервис и загубите растат и стануваат се поголеми и поголеми. Вредностите за мултимедиската пристапна веројатност за другите МТ-и (кои користат само еден тип на RAT) за релативно мал број на мобилни корисници (<100) е речиси двојно помала од случајот кога користиме 5GAMT, токму заради малиот капацитет кој е достапен на мобилните корисници. Причината за постигнување на малку поголеми вредности (од сите останати случаи) за мултимедиската пристапна веројатност од МТ-и кај последниот случај, кога се МТ се опремени со RAT3 интерфејс, лежи во фактот што повеќето од МТ-и во сценариото се централно поставени, или многу често се движат низ RAT3 макро-клетката и плус истата има највисок достапен капацитет (во споредба со капацитетите од RAT1 и RAT2). Како и да е, вредностите за мултимедиската пристапна веројатност за 5GAMT се супериорни во споредба со сите други вредности за мултимедиската пристапна веројатност од останатите RAT случаи, што понатаму резултира со помала битска и пакетска веројатност на грешка, а исто така и во поголема битска брзина и поголема доверливост.

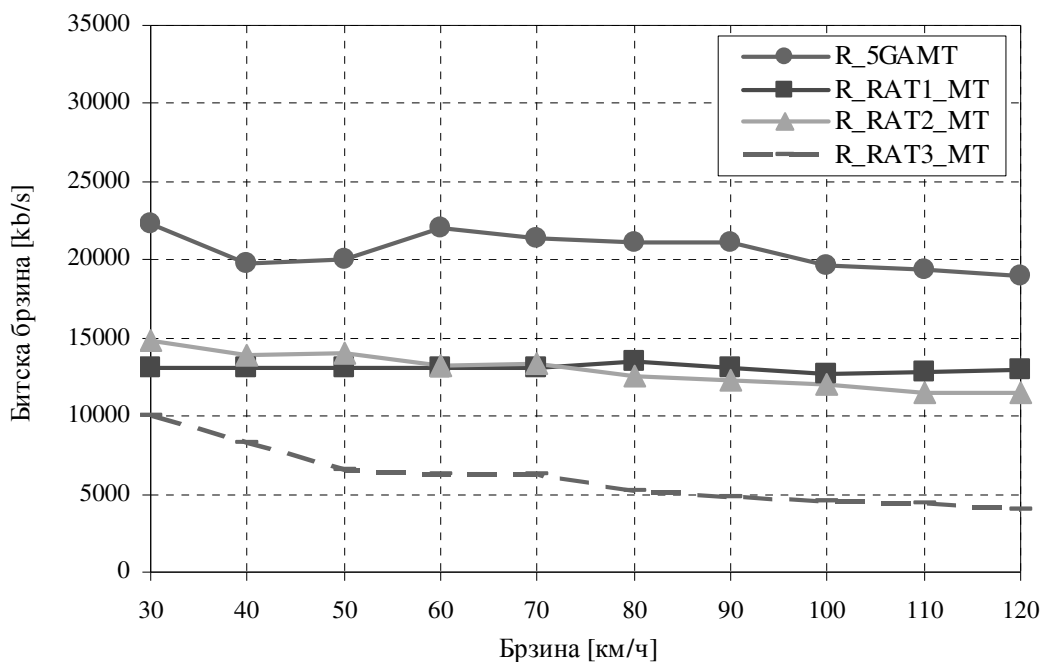
На слика 4.9, е прикажан трендот на битската брзина во текот на времето. Просечната битската брзина за време на целата симулација, за нашиот предложен 5GAMT случај со AQUA модул во себе, постигнува највисоки вредности, во споредба со останатите битски брзини од другите три случаи. Како што може да се забележи, на почетокот од симулацијата (сè до секунда 7), добиваме речиси еднакви просечни протоци за случаите кога употребуваме 5GAMT и RAT1 МТ-и, па потоа се одделуваат вредностите за 5GAMT.



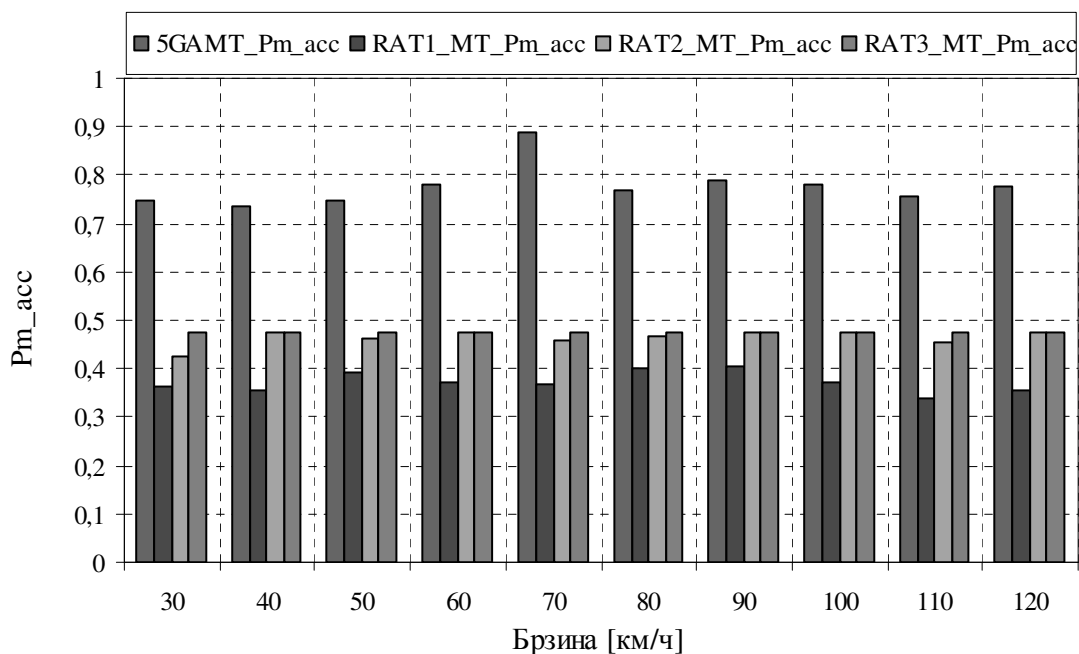
Слика 4.9 Проток наспроти симулациското време за 80 МТ-и.

Тоа е резултат токму на тоа што, кога користиме среден број на МТ-и (овде користиме само 80) со средна брзина на движење од 40 км/ч, веројатноста за пристап до RAT1 е многу голема на почетокот на симулацијата, бидејќи RAT1 покрива најголема област (тоа е RAT на макро-клетката) и нашиот предложен 5GAMT има достапност до сите RAT, па преку користење на GA, пристапува како на најоптимална RAT за почеток – до RAT1. На тој начин има само некои незабележливи загуби во веројатноста за пристап. Но, после иницијалниот временски период од симулацијата, резултатите конвергираат до доминантните просечни протоци за сите случаи. Така 5GAMT протокот е речиси три пати поголем од вредностите на протокот кај RAT3_MT случајот, а речиси за половина е поголем од протоците за случаите кога МТ користат само RAT1 или RAT2.

Понатаму, на слика 4.10 се прикажани просечните протоци за различни брзини (30-120 км/ч) на мобилните терминали, кога имаме вкупно 80 МТ-и во сценариото. Најпрво, јасно може да се заклучи дека во случајот каде имаме употребено 5GAMT (кривата означена со R_5GAMT) просечниот проток, за било која брзина на движење на МТ, покажува супериорни вредности, споредено со останатите три случаи (кога МТ имаат само RAT1, RAT2 или RAT3 интерфејси). Како и да е, сите криви за просечниот проток имаат опаѓачки тренд (негативен нагиб на кривите), бидејќи колку што растат брзините на движење за МТ-и, расте и бројот на хендови, кој предизвикува поголеми пакетски загуби и поголеми препраќачки рати. Со тоа ефективната битска брзина се намалува. На крајот, слика 4.11 ги прикажува вредностите за мултимедиската пристапна веројатност наспроти просечната брзина на движење на МТ, за сите четири случаи на МТ-и.



Слика 4.10 Просечен проток наспроти просечна брзина на МТ-и.



Слика 4.11 Просечна мултимедиска веројатност наспроти просечна брзина на МТ-и.

Во овој случај бројот на МТ-и е поставен на 80. Како што е прикажано, вредностите за просечната мултимедиска пристапна веројатност (P_{m_acc}) за нашиот предложен 5GAMT случај, за било која брзина на движење, се највисоки, во споредба со останатите вредности за мултимедиската пристапна веројатност за другите три случаи (RAT1, RAT2 и RAT3 МТ-и). Највисоките вредности за P_{m_acc} за нашиот предложен тип на МТ со AQUA модул во себе, заедно со одличните својства и вредности за протокот на слика 4.10,

ги докажуваат одличните перформанси на истиот, особено при различни брзини на движење и различни мрежни услови.

4.4.2 Симулациски резултати и анализи од Сценарио 2

Во овој дел, ќе ги видиме симулациските резултати и анализи за сценарио 2, кое е доста блиско со сценарио 1, бидејќи се користат истите критериумски функции на праг (слика 4.5 и слика 4.6), истиот тип на 5G модел на мобилен уред со AQUA модул во себе, но за разлика од сценарио 1, овде имаме вклучено и LP оптимизациски алгоритам во AQUA модулот и се разбира имаме друго сценарио и други влезни симулациски параметри. Со помош на сценарио 2 кое се состои од три RAT-и, ги добиваме симулациските резултати за средниот системски проток и вредностите за мултимедиската пристапна веројатност. Секој RAT е претставен со една базна станица со различен радиус за мрежната покриеност. И во овој случај, како и при сценарио 1, сите три базни станици се поставени концентрично со еден заеднички центар со координати (0,0) во симулациската област. Мрежните покриености и можностите за различните RAT-и се дадени во табела 4.2.

Табела 4.2 Симулациски параметарски вредности за различните RAT-и.

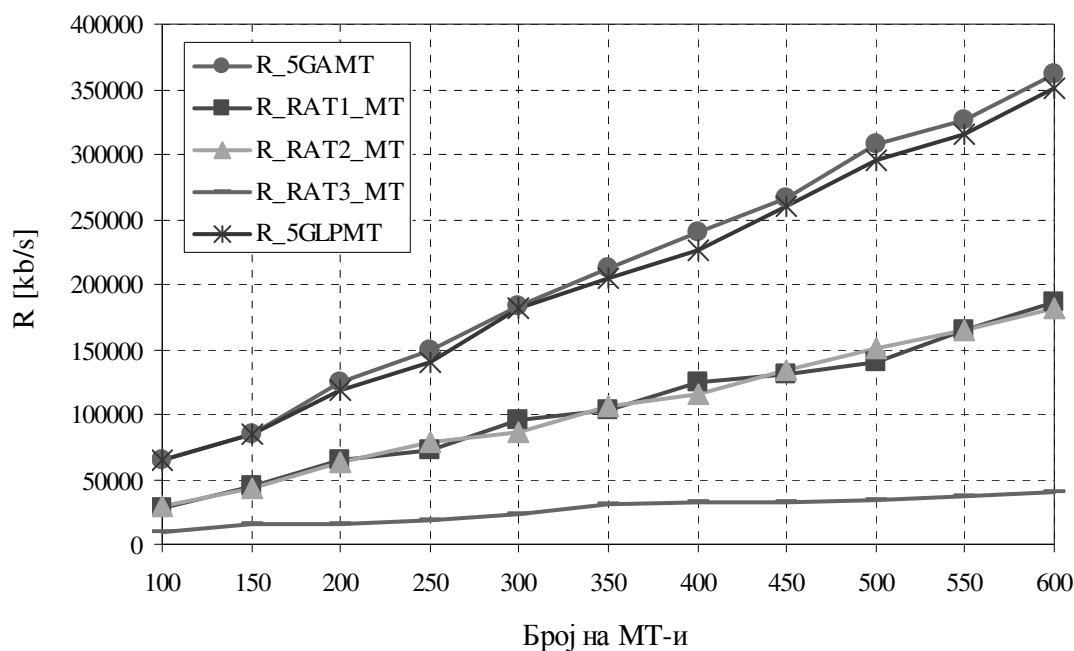
	Мрежен радиус (м)	Максимален мрежен капацитет [kb/s]
RAT1	5000	307200
RAT2	2500	1048576
RAT3	250	614400

Вредностите се внимателно одбрани, со намера да соодветствуваат со конкретни стандардизирани (максимално можни) капацитети за следните RAT-и: LTE, IEEE 802.16m и IEEE 802.11n. Целта е да се добијат генерално пореалистични заклучоци од предложеното решени и сценарио. На почетокот на симулацијата, МТ-и се случајно распрскани во област $5 \times 5 \text{ km}^2$. За физичката мобилност на МТ-и е адаптиран истиот модел на 2-димензионална имплементација на Gauss-Markov моделот за мобилност, прикажана во делот 4.4.1. Просечните брзини на МТ-и се движат од 30 до 120 км/ч, и е обезбедено високо ниво на случајност за мобилноста. И ова симулациско сценарио нуди потполна мрежна покриеност за сите МТ-и (RAT1, RAT2 и RAT3 покриеност, или минимум RAT1 покриеност). Мултимедискиот сервисен поточен модел во предложената форма нуди постоење на три сервиси. Првиот тип на сервис е видео конференција, дефиниран со ниска битска брзина (128 kb/s) и мало време на пропација (мало доцнење). Вториот тип на сервис кој се користи во ова сценарио е video-streaming (256 kb/s) дефиниран со средна битска брзина, мал jitter и мало доцнење, но е потолерантен во однос на првиот сервис.

Третиот сервисен тип е дефиниран со висока битска брзина и може да толерира поголеми доцнења и варијации на доцнења, но побарува нулта рата на пакетска грешка и затоа овој сервис е податочен со 512 kb/s. За време на симулацијата, за даден број (N) на активни мобилни корисници, секој корисник случајно добива еден од горенаведените три типа на сервиси. Од друга страна, во случај кога користиме 5GMT со AQUA модул во себе (во кој сега се присутни и LP и GA алгоритмите за оптимизација), за секој корисник му се доделуваат сите три типа на сервиси.

Во првиот случај, сите МТ-и се опремени со AQUA модул со вклучена GA оптимизација во нашиот multi-RAT 5GMT (т.е. за секоја RAT постои посебен интерфејс). Истиот го референцираме како 5GAMT. Во вториот случај multi-RAT 5GMT со AQUA модул во себе, користи Linear Programming (LP) оптимизација за тежинските коефициенти за различните влезни критериуми (за секоја присутна RAT и за секој мултимедиски сервис). Овој вид на МТ го означуваме како 5GLPMT. Во останатите три случаи, користени се МТ без AQUA модули и без multi-RAT интерфејси, а само со еден RAT интерфејс во себе. Така, во третиот случај користиме МТ-и кои имаат само RAT1 интерфејс, во четвртиот случај МТ-и кои имаат само RAT2 интерфејси и во последниот (петтиот) случај МТ-и имаат само RAT3 интерфејси.

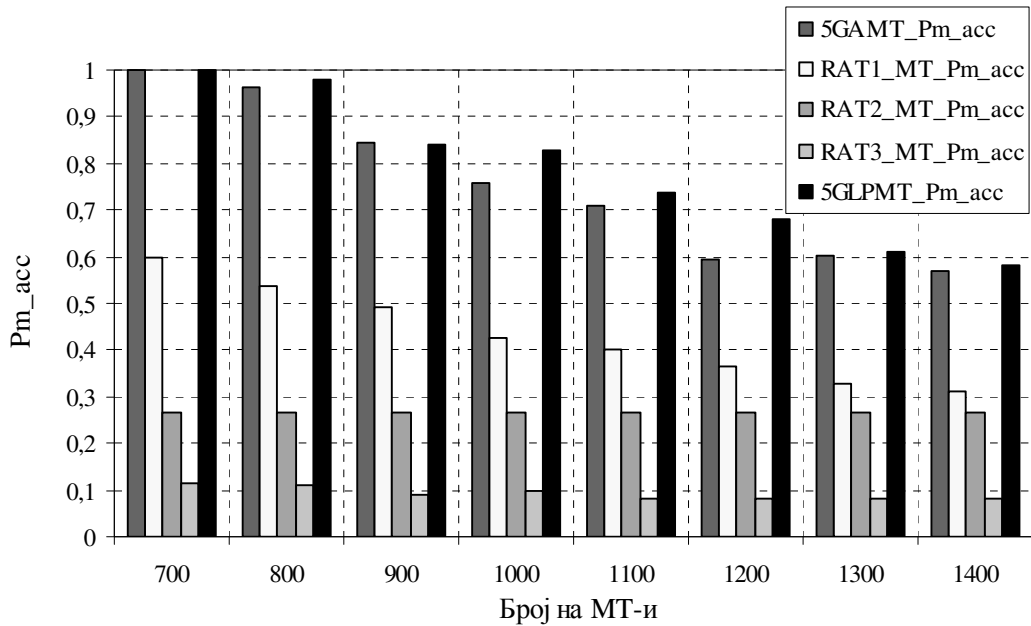
Сликата 4.12 ги покажува резултатите за средниот агрегиран проток наспроти бројот на МТ-и за сите пет случаи во рамките на оваа сценарио. Просечната брзина на движење на МТ-и е поставена на 40 км/ч и вкупното траење на симулацијата е 120 секунди. Како што може да се забележи, протокот за нашиот 5G МТ, со вклучен AQUA модул во себе, за било кој број на МТ-и, е значително поголем од протокот на останатите три случаи, кога се користат МТ-и кои можат да имаат пристап само до една RAT, т.е. само до RAT1 (R_RAT1_MТ), или само пристап до RAT2 (R_RAT2_MТ) или RAT3 (R_RAT3_MТ). Од друга страна, кога ги споредуваме двата 5GMT протоци: едниот проток (кривата R_5GAMT) кога имаме GA како оптимизациски алгоритам во AQUA и другиот проток (кривата R_5GLPMT) кога имаме LP како оптимизациски алгоритам во AQUA модулот од МТ, истите се речиси еднакви за помал број на МТ-и (до 150), и потоа, за оваа сценарио 5GAMT со GA постигнува највисок проток за било кој број на МТ (поголем од 150). Разликата во вредностите за просечниот агрегиран проток помеѓу овие два случаи (R_5GAMT и R_5GLPMT) е со големина 1000 kb/s за помал број на МТ-и и достигнува до 10000 kb/s за висок број на активни МТ-и (над 450 во даденото сценарио). Така, заклучуваме дека GA алгоритмот дава подобро однесување кога го споредуваме истиот со LP алгоритмот за оптимизацијата, давајќи подобри резултати за оптималната одлука.



Слика 4.12 Просечен проток (R) за различен број на МТ-и, за сценарио 2.

Сепак, од друга страна треба да се внимава на фактот дека GA се доста покомплицирани и бараат подолго време на извршување, па често се прави трговија помеѓу добивката во просечниот проток и времето на процесирање и ресурсите потрошени за да се добие најоптималното решение. Како и да е, за овие два случаи на МТ-и со GA и со LP, загушувањето и заситувањето се надминува многу лесно, и веројатноста за отфрлање е помала, дури и за голем број на присутни мобилни корисници во сценариото, заради оптималното користење на сите RAT-и едновремено (агрегација на сообраќај преку различни RAT-и, направен на мрежно ниво) за сите користени сервиси. Според тоа, другите случаи, кога се користат МТ-и само со по еден RAT интерфејс и по еден сервис по корисник, се ограничени само со капацитетот обезбеден од соодветната (само една) RAT. Така, користејќи вертикален multi-homing во 5G МТ-и, истите можат да добијат агрегирани битски брзини, кои ги вклучуваат протоците од сите достапни RAT-и.

Понатаму, на слика 4.13 се прикажани вредностите за просечната пристапна мултимедиска веројатност (P_{m_acc}) за различен број на МТ-и со просечна брзина од 40 км/ч. Вредноста P_{m_acc} се пресметува како однос од бројот на сите успешни пристапи до било кој даден мултимедиски сервис, врз вкупниот број на обиди за пристап до сервис (види ги равенките 4.9 и 4.10). За првиот случај, кога имаме 5GAMT-и со AQUA модули, опремени со GA оптимизацискиот алгоритам, просечната мултимедиска пристапна веројатност е највисока, сè додека не стане заситена мрежата (со голем број на МТ-и, над 1000), после што 5G МТ-и со LP оптимизациски алгоритам во AQUA е подобар случај.

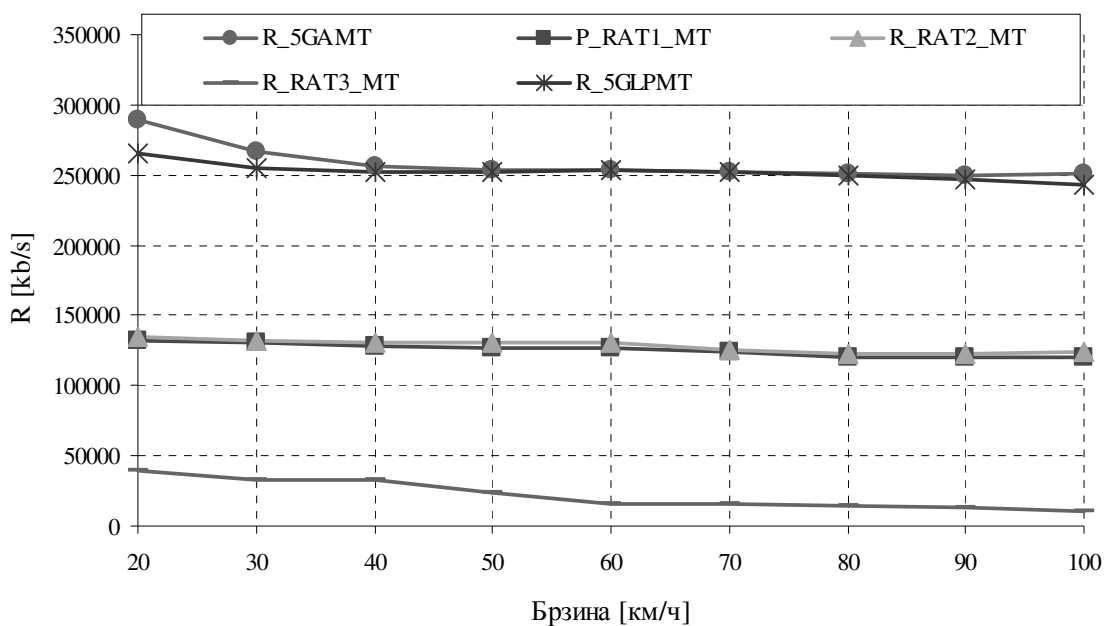


Слика 4.13 Просечна мултимедиска пристапна веројатност за различен број на МТ-и.

Така, гледајќи ја слика 4.13 МТ-и со AQUA модул опремен со LP алгоритам дава највисоко ниво на просечна пристапна мултимедиска веројатност (P_{m_acc}). На тој начин, добивката од користење 5GAMT е евидентна кога немаме загушен сообраќај (зголемен број на мобилни уреди). Додека, во случај на загушени и оптоварени мрежи (на пример, кога бројот на МТ-и во одредена област е поголема од 1000), МТ може да користи LP оптимизациски алгоритам во AQUA модулот. Пред сè, 5G МТ-и со AQUA модул во себе, и вклучени својства за вертикален multi-homing покажуваат супериорни резултати во споредба со сите останати три случаи, кога се користат МТ-и со еден интерфејс. На пример, вредностите за просечната пристапна мултимедиска веројатност за случајот со МТ-и кои користат само RAT1, за било кој број на корисници е скоро два пати помала од таа добиена за 5GAMT и 5GLPMT случаите. Тоа се должи токму на малиот достапен капацитет за мобилните корисници кои користат само еден мрежен интерфејс во единица време, т.е. само една достапна RAT. Генерално, големата вредност за пристапната мултимедиска веројатност, понатаму резултира во ниска вредност за битска и пакетска веројатност на грешка, а исто така и добивање на поголеми битски брзини заради вертикалниот multi-homing за multi-RAT МТ-и со AQUA модул.

Понатаму, на слика 4.14 се претставени просечните протоци за различни брзини (20-100 км/ч) на МТ-и, кога имаме вкупно 450 МТ-и во сценариото и времетраење на симулацијата од 60 секунди. Најпрво, јасно може да се заклучи дека во случајот каде имаме употребено 5G МТ-и (кривите означени со R_5GAMT и R_5LPMT) просечниот

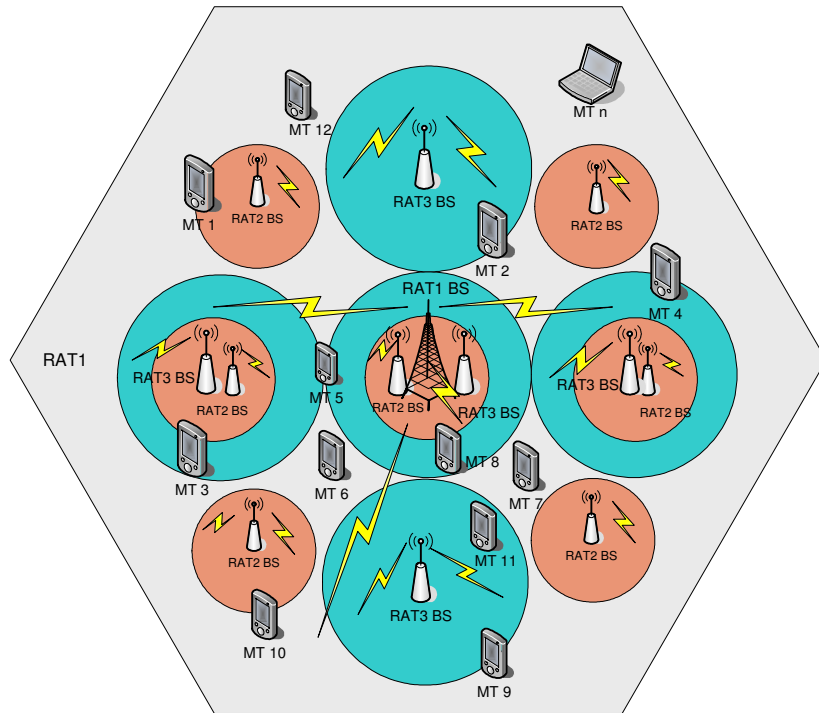
проток, за било која брзина на движење на МТ, покажува супериорни вредности, споредено со останатите три случаи (кога МТ имаат само RAT1, RAT2 или RAT3 интерфејси). Како и да е, сите криви за просечниот проток имаат опаѓачки тренд (негативен нагиб на кривите), бидејќи колку што растат брзините на движење за МТ-и, расте и бројот на хендовери, кој предизвикува поголеми пакетски загуби, поголеми доцнења и варијации на доцнења. Со тоа ефективната битска брзина се намалува. На крајот, може да се забележи дека, иако за помали брзини 5GMT со AQUA модул и GA во истиот, покажува најголема вредност за просечниот проток, сепак после 50 км/ч конвергира со вредностите за протокот од 5GMT со AQUA модул и LP во истиот. Другите два случаи кога имаме RAT1 и RAT2 покажуваат доста стабилна вредност (константна и со многу благ пад) за различните брзини на движење на МТ-и, бидејќи истите се LTE и IEEE 802.16m клеточни радио пристапни технологии кои поддржуваат мобилности и до 200 км/ч. Последниот случај, кога имаме МТ-и со RAT3 интерфејс (IEEE 802.11n) забележува најголем пад на протокот со порастот на брзината на МТ-и, што е очекувано.



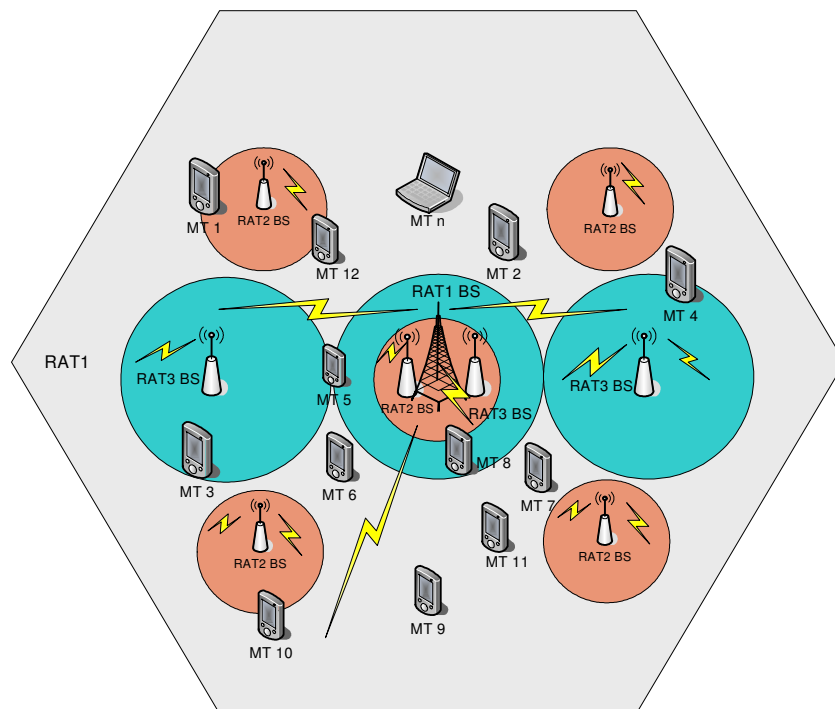
Слика 4.14 Просечна битска брзина наспроти брзина на МТ-и (кога имаме 450 МТ-и).

4.4.3 Симулациски резултати и анализи од Сценарио 3

Во овој дел, ќе ги видиме симулациските резултати и анализи за сценарио 3, за системскиот просечен проток и за мултимедиската пристапна веројатност. Имено во ова сценарио 3 имаме две подсценарија со различни мрежни услови (различен број на пристапни точки). Овие две подсценарија се прикажани на слика 4.15 и 4.16. Иако се различни по содржина, сепак и двете се состојат од три основни типа на РАТ-и.



Слика 4.15 Симулациско сценарио 3-А.



Слика 4.16 Симулациско сценарио 3-Б.

Со двете подсценарија (сценарио 3-А и 3-Б), главната поента е да се испитаат влијанијата на бројот на RAT-и врз перформансите на нашиот предложен 5G MT со AQUA модул во себе. Мрежните покриености и капацитети (врвни поддржани битски брзини во downlink) за различните RAT-и се дадени во табела 4.3. Вредностите се внимателно одбрани, со цел да одговараат со постоечки стандардизирани капацитети од

следните RAT-и: LTE, IEEE 802.11ad и од IEEE 802.11ac, и да се добијат генерално пореалистички резултати и заклучоци за предложеното решение.

Табела 4.3 Симулациски параметарски вредности за различните RAT-и за сценарио 3.

	Мрежен радиус (м)	Максимален мрежен капацитет [kb/s]
RAT1	2500	307200
RAT2	5	6144000
RAT3	20	7099699.2

Воедно, се употребува и тука истиот тип на 5G модел на МТ со AQUA модул во себе, заедно со GA и LP оптимизациските алгоритми во AQUA модулот. На почетокот на симулацијата, сите МТ-и се распределени случајно во област од 2500x2500 м². За физичката мобилност на МТ-и, и овде применивме Gauss-Markov модел на мобилност [53] земајќи средна брзина на движење во границите 30-120 км/ч (v_{cp}), и обезбедивме високо ниво на случајност за корисничката мобилност. Симулациските сценарија обезбедуваат потполна мрежна покриеност, бидејќи се состојат од една макро клетка RAT1 и повеќе помали микро-клетки од RAT2 и RAT3 покриености. Мултимедискиот сервисен модел во предложената форма нуди постоење на три сервиси, секој дефиниран со минимална загарантирана битска брзина (опсег) и времетраење на сервисот. Првиот тип на сервис е видео конференција (едновремен двонасочен видео и аудио пренос), дефиниран со ниска битска брзина (128 kb/s) и мало време на пропација (многу осетлив на доцнење и jitter). Вториот тип на сервис кој се користи во двете подсценарија е video-streaming (256 kb/s) дефиниран со средна битска брзина, мал jitter и мало доцнење, но е потолерантен во однос на првиот сервис. Третиот сервисен тип е дефиниран со висока битска брзина и може да се справи со поголеми доцнења и варијации на доцнења, но побарува да нема пакетски веројатности на грешка и затоа овој сервис вклучува податочни сервиси (веб пребарување, e-mail сервиси, ftp и сл. со битска брзина од 512 kb/s). За време на симулацијата, за даден број (N) на активни мобилни корисници, секој корисник случајно добива еден од горенаведените три типа на сервиси. Од друга страна, во случај кога користиме 5GMT со AQUA модул во себе (во кој сега се присутни и LP и GA алгоритмите за оптимизација), за секој корисник му се доделуваат сите три типа на сервиси (минимум два, а максимум сите три сервиси по корисник).

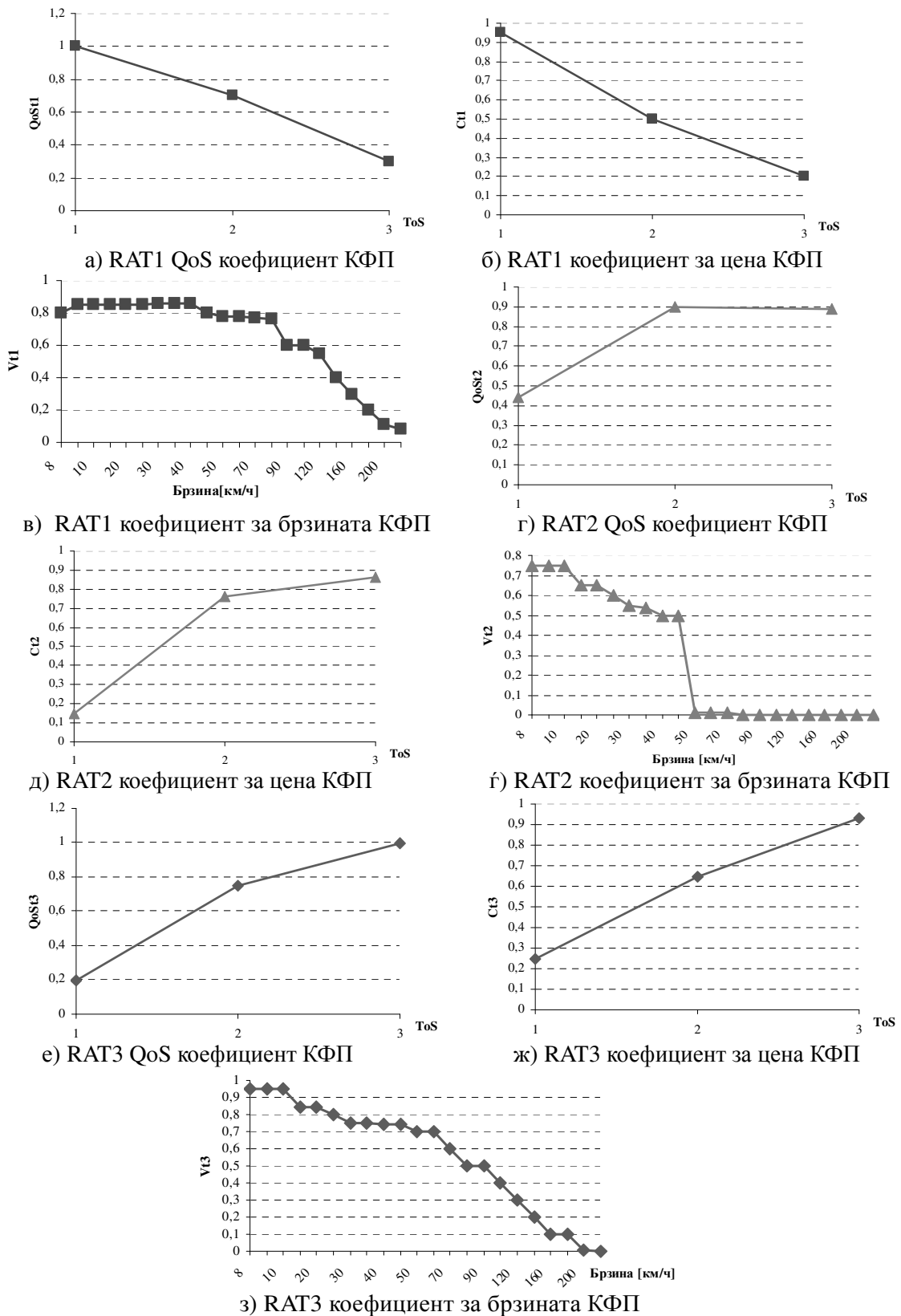
Понатаму, имплементирани се по пет различни случаи за двете подсценарија (сценарио 3-А и сценарио 3-Б). Во првиот случај сите МТ-и се опремени со AQUA модул во себе со GA оптимизација во three-RAT МТ (со три радио интерфејси, по еден за секоја достапна RAT). Овој прв тип на МТ (употребен во првиот случај) го нарекуваме 5GAMT.

Во вториот случај МТ-и се three-RAT МТ, опремени со AQUA модул во себе, но за разлика од првиот случај, овде во вториот имаме Linear Programming оптимизација во AQUA модулот (во делот за оптимизација на тежинските коефициенти за различните критериуми за секој RAT за даден мултимедиски сервис (за оптимизацискиот проблем за секоја i -та RAT рангирачка функција)), на местото од GA. Овој тип на МТ го нарекуваме МТ со LP модул (т.е. 5GLP_MТ). Мора да потенцираме дека, токму во овие два случаи, каде имаме 5G рамки-водилки на мобилни уреди, промената на бројот на радио пристапните точки, очекуваме да има големо влијание врз нивните перформанси (во поглед на системскиот проток и мултимедиската пристапна веројатност). Понатаму, во останатите три случаи, користиме МТ без AQUA модули и без multi-RAT интерфејси, но само со по еден RAT интерфејс (активен во дадено време). Така, во третиот случај имаме МТ-и кои користат само RAT1 технологија (т.е. само LTE интерфејс). Во четвртиот и петтиот случај имаме МТ-и кои користат само RAT2 и RAT3 технологија, соодветно (т.е. само IEEE 802.11ad или само IEEE 802.11ac интерфејс).

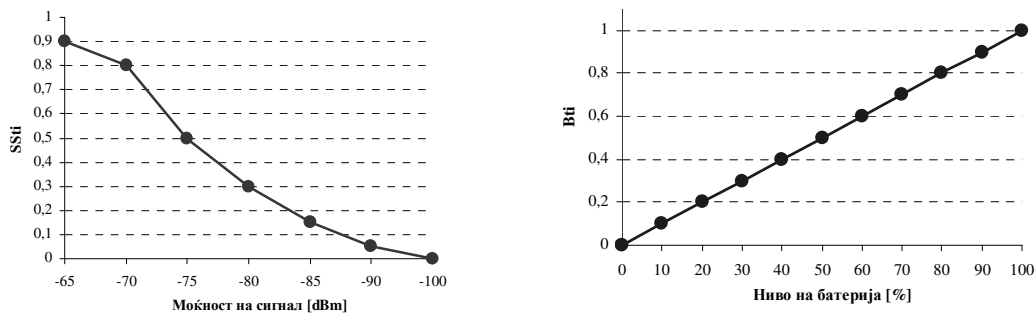
Исто така, за двете подсценарија се креирани: сообраќајни модели за сервисите споменати погоре, модели за мобилност (физичка) на корисниците, RAT QoS контролен пристапен механизам, и скрипта за комуникациското сценарио. Повеќе од јасно е дека, во симулацијата на AQUA за Genetic Algorithm и за Linear Programming оптимизациските алгоритми, кои се користат во целната функција за доделување на тежинските коефициенти, за да обезбедат врвна QoS поддршка и оптимален RAT избор/и за сите мултимедиски сервис, ги користиме MATLAB функциите GA и LP, соодветно. Понатаму, во нашата имплементација, конкретните Критериумски функции на праговите (Criteria Threshold Functions) или скратено КФП, кои ги обликуваат влезовите со вредности од измерените податоци, за сите три RAT-и се дадени на слика 4.17 и слика 4.18. На овие слики се презентирани следните доделени тежински фактори за критериумските функции на:

- QoS RAT коефициент, т.е. QoS параметар ($QoS_{i,}$),
- Коефициент за цената на RAT, т.е. параметар за цената на сервисот преку дадениот RAT ($C_{i,}$),
- Коефициент на брзината на МТ во одреден RAT, т.е. тежински фактор за брзината на МТ ($V_{i,}$).

Имаме дефинирано излезни вредности за овие КФП-и со цел да ги репрезентираат реалните RAT перформанси за секој употребен RAT, после поминувањето на дадените внатрешни праговни функции (т.е., филтрирањето) за секој RAT параметар.



Слика 4.17. Критериумски функции на праг за: RAT1, RAT2 и RAT3.



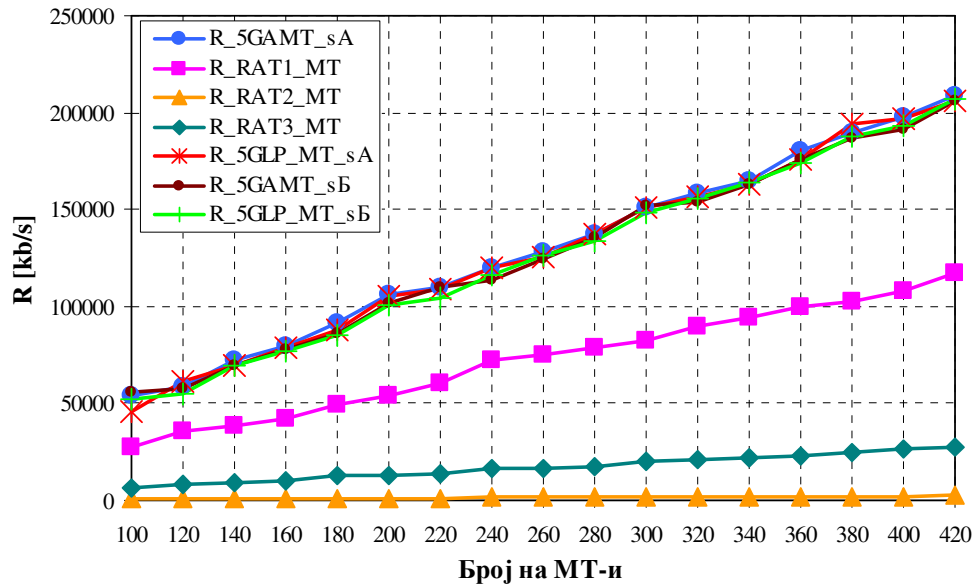
а) Коэффициент за приемна моќност кај МТ б) Коэффициент за батеријата на МТ

Слика 4.18 Критериум за функции на праг за детектираната приемна моќност на сигналот и за нивото на батеријата.

Така, го форсираме сервисот видео конференцијата за RAT1 (LTE) како прв избор (IEEE 802.11ac доаѓа како втора RAT покоја би одел овој сервис, и 802.11ad е трета опција) со цел да добие врвен QoS (слика 4.17a). Слично е и со коэффициентот за цената на овој сервис (види слика 4.17б), при што треба да се забележи дека, доколку вредноста на Ct_i е висока – тоа значи дека имаме реално пониска цена за тој сервис доколку оди по даден избран RAT и обратно (Слика 4.17б прикажува дека LTE е најскап за овој сервис, IEEE 802.11ad има скромна цена, и IEEE 802.11ac е најевтин за дадениот сервис). Исто така имаме висока поддршка за мобилноста за RAT1 во широк опсег од вредност (од 0 до 150 км/ч) и затоа вредноста за Vt_i е многу висока за овие брзини (види слика 4.17в). Понатаму, за RAT2 (IEEE 802.11ad) го форсираме video-streaming сервисот и податочните сервиси, за да можат да добијат највисок QoS (Слика 4.17г) и видео конференцијата да има пониска QoS поддршка. Сличното е и со коэффициентот за цената, тесно зависи од видот на сервисот кој оди преку овој RAT (види слика 4.17д). Исто така, имаме многу сиромашна поддршка за мобилноста (ниски вредности за Vt_i на слика 4.17г) за RAT2. Следствено, вредноста на Vt_i е многу висока за опсегот од 0 до 50 км/ч, т.е., само за номадска мобилност. За RAT3 (IEEE 802.11ac) ги форсираме податочните сервиси да добијат врвна QoS поддршка (Слика 4.17е) а другите да имаат пониска QoS поддршка, слично е и со зависноста на коефициентите за цената од сервисите за овој RAT (види слика 4.17ж), бидејќи податочниот сервис најдобро се вклопува за WLAN заради неговата карактеристика на сервис вон реално време. Исто така, имаме подобра поддршка за мобилноста кај RAT3, отколку RAT2 (високи вредности за Vt_i values на сликата 4.17з) ограничувајќи ја мобилноста во опсегот од 0 до 100 км/ч.

На слика 4.17 (вклучувајќи ги сите графици) за ToS (Type of Service) имаме поставено 1 за видео конференција, 2 за video-streaming и 3 за податочните сервиси. Понатаму, на слика 4.18 се дадени двете КФП за детектираната моќност на сигналот (SSi) и коефициентот за нивото на батеријата (Bi) кои се исти за било кој RAT, бидејќи зависта

од МТ и од позицијата на МТ во симулациската област. Доколку моќноста на сигналот е висока, на пример -65 dBm како што е прикажано тоа на слика 4.18а), тогаш добиваме повисока вредност (до 1) за КФП вредноста SS_{t_i} . Од друга страна, доколку јачината на сигналот е многу ниска (т.е., -90 dBm), тогаш вредноста за SS_{t_i} е блиску до 0. На слика 4.18б) поставивме линеарна зависност помеѓу нивото на батеријата и КФП вредноста за V_{t_i} . Понатаму, на слика 4.19 компаративна симулациска анализа е дадена за постигливите просечни битски брзини, наспроти бројот на МТ-и за сите пет случаи (и за двете сценарија 3-А и 3-Б, дадени на сликите 4.15 и 4.16, соодветно). Просечната брзина на МТ-и е поставена да биде 30 км/ч, додека времетраењето на симулацијата е 60 секунди. Како што може да се забележи, протокот за нашиот 5G МТ и за двете сценарија (3-А и 3-Б), со вклучен AQUA модул, за било кој број на активни МТ-и, е значително поголем од протокот за случаите кога имаме МТ-и кои имаат пристап само на RAT1 (R_RAT1_MТ), или кога ги имаме случаите за МТ-и кои имаат пристап само на RAT2 (R_RAT2_MТ) или RAT3 (R_RAT3_MТ). Од друга страна, доколку го споредиме средниот проток за 5GAMТ (R_5GAMТ), каде користиме GA во AQUA модулот како оптимизациски алгоритам (понатаму 5GAMТ за сценариото 3-А и сценариото 3-Б се именувани како: 5GAMТ_sА и 5GAMТ_sБ, соодветно) и протокот во случајот кога имаме МТ со LP во AQUA модулот како оптимизациски алгоритам (понатаму 5GLP_MТ за сценарио 3-А и сценарио 3-Б се именувани како R_5GLP_MТ_sА и R_5GLP_MТ_sБ, соодветно), 5GAMТ постигнува поголем среден проток за било кој број на МТ-и (од 0 до 420 МТ-и), и за двете подсценарија. Тоа повлекува дека 5GAMТ со GA за оптимизациски алгоритам, може да се користи за ниски и средни густини на сообраќај (до 420 МТ-и). Во просек, R_5GAMТ вредностите за протокот се поголеми од R_5GLP_MТ вредностите за 2300 kb/s за сценариото 3-А и 1200 kb/s за сценариото 3-Б. Воедно, просечната разлика на протокот за истиот случај кога користиме 5GAMТ, а различните сценарија, т.е. 5GAMТ_sА и 5GAMТ_sБ изнесува околу 3200 kb/s повеќе во сценариото 3-А, кога имаме повеќе радио пристапни точки, во споредба со сценариото 3-Б, каде имаме помал број на радио пристапни точки. За случајот кога употребуваме LP како оптимизирачки алгоритам во AQUA модулот, кога ги разгледуваме сценаријата 3-А и 3-Б, разликата помеѓу просечните протоци на R_5GLP_MТ_sА и R_5GLP_MТ_sБ изнесува 2800 kb/s. Со што, уште еднаш се докажуваат придобивките од користењето на повеќе RAT-и во исто време, кога имаме 5G со AQUA модул во себе, кој може оптимално да ги користи сите достапни RAT-и и да извлече максимум преку поседување на својствата за вертикален multi-homing, multi-streaming и агрегација на мрежата.



Слика 4.19 Просечен проток наспроти бројот на МТ-и.

Самиот LP оптимизациски алгоритам може да биде активиран во AQUA кога има висока концентрација на МТ-и, т.е. кога има густ сообраќај (т.е. повеќе од 450 МТ-и). Така, доколку имаме напредни 5G МТ-и со AQUA модул во нив, кои имаат можност да поседуваат две опции за избор на оптимизациските алгоритми: LP или GA, за помала густина на сообраќај ќе се вклучува GA, а кога ќе се детектираме погуст сообраќај може да се префрли на користење на LP. Како и да е, секогаш е добро да се има резервна варијанта и споделени QoS оптимизирачки алгоритми за различни сценарија и мрежни околности. Особено што резултатите и за двата различни оптимизирачки алгоритми во 5G МТ-и со AQUA модул се многу блиски по вредност.

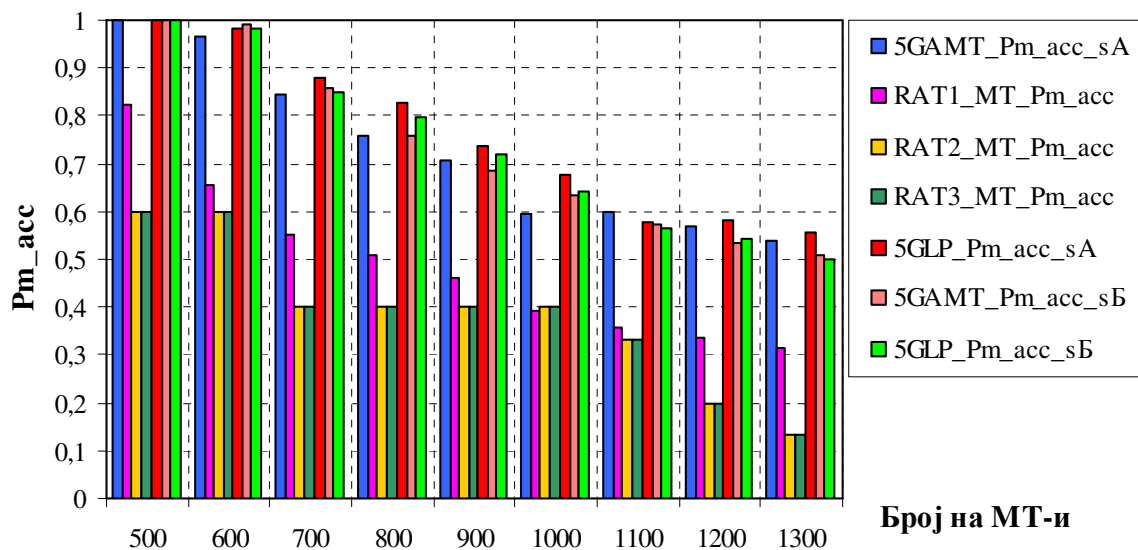
Факт е дека вертикалниот multi-homing и multi-RAT МТ-и постигнуваат супериорни резултати во поглед на агрегираниот среден проток по сервис, оптимални RAT одлуки и оптимални користења на расположливите ресурси и технологии. Оттука, другите три случаи на МТ-и кои користат само еден сервис по корисник, и само еден RAT, се ограничени од капацитетот, протокот и од перформансите обезбедени од дадениот RAT.

Понатаму, на слика 4.20 се презентирани средните мултимедиски пристапни рати (веројатностите P_{m_acc}) за различен број на МТ-и, кои се движат со средна брзина од 50 км/ч и симулациско време од 120 секунди. Мултимедиската пристапна веројатност (рата) се пресметува според следната равенка (слично на (4.9) и (4.10)):

$$P_{m_acc} = \frac{N_{user_accessed_services}}{N_{user_accessed_services} + N_{user_not_accessed_services}}, \quad (4.11)$$

каде што $N_{user_accessed_services}$ е вкупниот број на сите успешни обиди за пристап до мултимедиски сервис од страна на МТ-и, а $N_{user_not_accessed_services}$ е вкупниот број на сите неуспешни обиди за пристап до мултимедиски сервис (кои биле одбиени од мрежата).

За првиот случај, за сценаријата 3-А и 3-Б, кога користиме 5GAMT-и со AQUA модул опремен со GA алгоритам за оптимизација (на слика 4.20 овие резултати означени се: за сценариото 3-А со 5GAMT_Pm_acc_sA и за сценарио 3-Б со 5GAMT_Pm_acc_sB), вредностите за просечната мултимедиска пристапна веројатност се блиски со вредностите за случајот кога имаме 5GMT-и со AQUA модул опремен со LP алгоритам за оптимизација (на сликата 4.20 овие резултати се означени со 5GLP_Pm_acc_sA за сценариото 3-А и 5GLP_Pm_acc_sB за сценариото 3-Б) за било кој број на присутни МТ-и (освен за 500 МТ-и, каде овие четири вредности се исти и максимални). Разликата во првите два случаи, за мултимедиската пристапна рата и за двете сценарија е само 0.1 во просек во полза на 5G мобилните со AQUA и вклучен LP алгоритам. Така, како што може да се забележи, случајот кога имаме AQUA модул со LP оптимизациски алгоритам во МТ-и е подобар и покажува највисоко ниво за мултимедиската пристапна веројатност. Во случај на загушен и густ сообраќај (со голем број на корисници, т.е. над 600 по макро-клетка), може да користиме LP оптимизациски алгоритам во AQUA модулот, доколку овој QoS параметар (Pm_acc) е круцијален за апликациите, а доколку може да толерираме одредена веројатност на грешка и побавна работа на МТ-и, тогаш може да се користи GA оптимизацискиот алгоритам, бидејќи разликата не е толку драстична, а за возврат (види слика 4.19) добиваме поголем достапен проток (поголем пристапен капацитет по сервис).

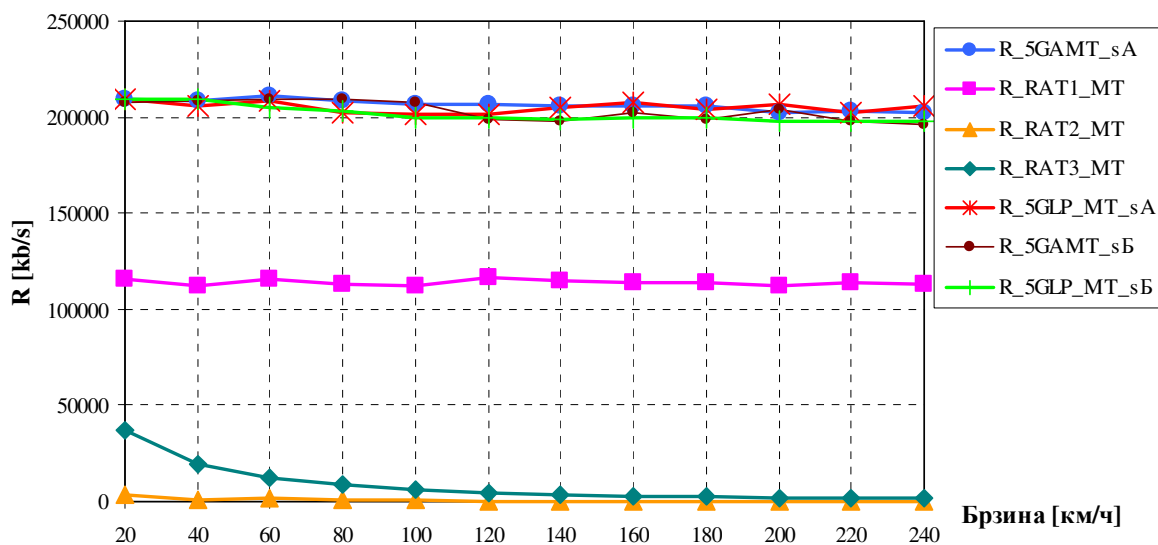


Слика 4.20 Просечна мултимедиска пристапна веројатност за различен број на МТ-и.

Воедно, се потврдува уште еднаш дека колку повеќе пристапни точки имаме (колку повеќе достапни RAT) во сценариото, толку подобри се перформансите за нашиот предложен 5G модел со AQUA модул, бидејќи за сценариото 3-А (и за двата случаи, и со GA и со LP алгоритам во AQUA модулот) добиваме поголема мултимедиска пристапна веројатност, во споредба со таа од сценариото 3-Б, каде имаме помал број на пристапни RAT. Разликата меѓу мултимедиските пристапни веројатности за истоимените случаи (ако ги споредуваме само 5GLP или само 5GAMT) е во просек 0.1 до 0.2 поголема за сценарио 3-А во споредба со сценариото 3-Б.

Несомнено, 5GMT-и со AQUA модул и вертикален multi-homing карактеристики покажуваат најдобри резултати во поглед на мултимедиската пристапна веројатност (рата), во споредба со другите три случаи кога имаме MT-и без овие предности, само со по еден RAT интерфејс. На пример, вредностите за мултимедиската пристапна веројатност за случајот со MT-и кои користат само RAT1 или RAT2, за било кој број на корисници е скоро два пати помала отколку вредностите за 5GAMT и/или 5GLP_MT случаите, токму заради помалиот капацитет оставен на располагање за мобилните корисници. Генерално, повисоките вредности за мултимедиската пристапната веројатност, понатаму резултираат во ниска пакетска веројатност на грешка, високо ниво на сервисна достапност и доверливост, како и високи битски брзини, заради вертикалниот multi-homing и multi-RAT интерфејсите во MT-и, плус останатите предности што ги нуди AQUA модулот.

Понатаму, на слика 4.21 се прикажани вредностите за просечниот агрегиран проток за различни брзини на MT-и (од 20 км/ч, па сè до 240 км/ч), кога имаме 420 MT-и и симулацијата има времетраење од 60 секунди.



Слика 4.21 Просечен агрегиран проток за различен средни брзини на MT-и.

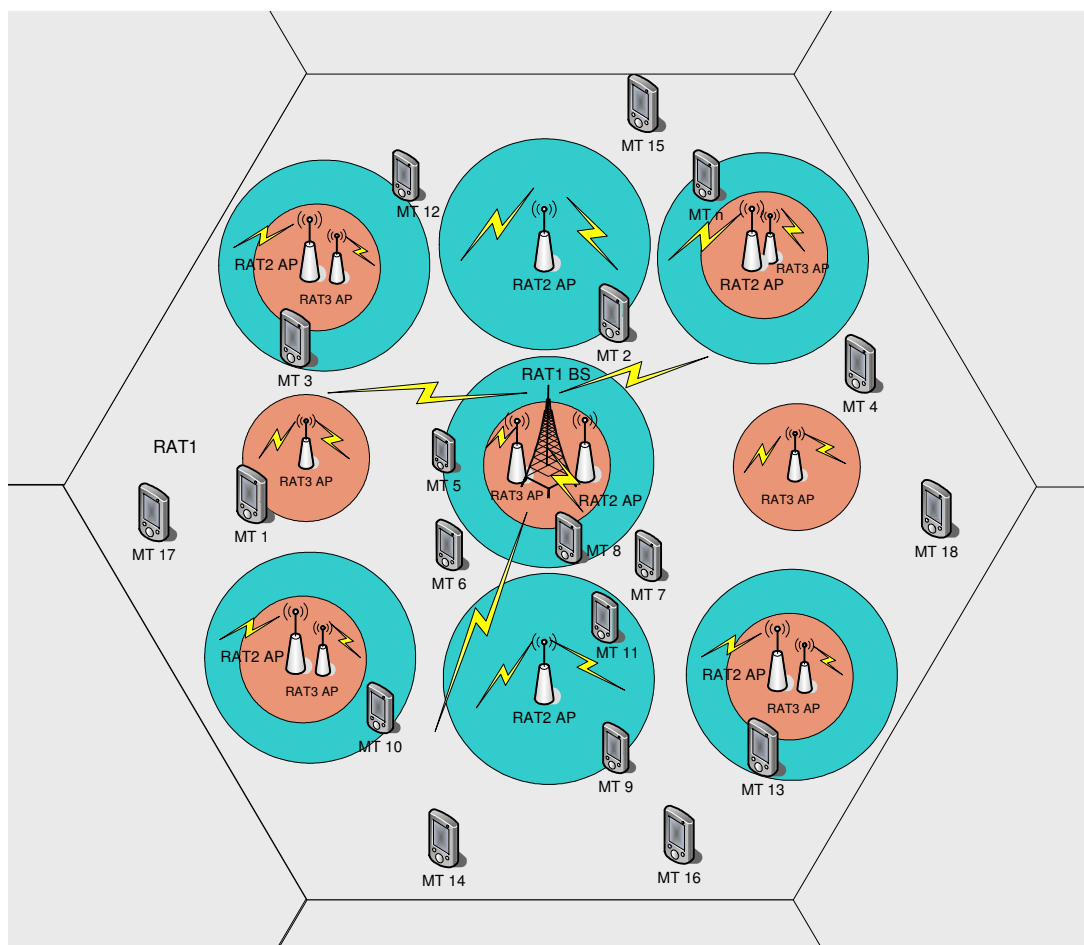
Пред сè, може јасно да се заклучи дека просечниот проток за нашиот прв случај (R_5GAMT за сценаријата 3-А и 3-Б) кога користиме мултимедиски сообраќај, за било која дадена средна брзина на движење на МТ-и, покажува одлични резултати во споредба со агрегираниот проток од останатите три случаи на МТ-и кои имаат достапност само до еден RAT (т.е. R_RAT1_MТ, R_RAT2_MТ и R_RAT3_MТ). Дури и за случајот кога имаме МТ-и со AQUA модул со LP (R_5GLP_MТ за сценарио 3-А и 3-Б) оптимизациски алгоритам, покажува многу блиски вредности со првиот случај за помала брзина на движење на МТ-и (до 50 км/ч) и нешто помала вредност над 60 км/ч, во споредба со првиот случај (кривата R_5GAMT). Во просек, вредностите за кривата R_5GAMT се повисоки за 2000 kb/s од вредностите за кривата R_5GLP_MТ, и за сценарио 3-А и за сценарио 3-Б. Ова се должи на подобрите перформанси на GA аи достигнувањето на оптималните глобални вредности за протоколот, за брзини над 60 км/ч. Од друга страна, вредностите R_5GAMT за сценарио 3-А се поголеми за 3300 kb/s (во просек) од вредностите за R_5GAMT во сценарио 3-Б. Сличните статистики можеме да ги забележиме и за вредностите на R_5GLP_MТ за сценарио 3-А, кои се за 3600 kb/s (во просек) поголеми од вредностите на R_5GLP_MТ за сценарио 3-Б.

Заклучокот и овде е неминовен, истиот како за резултатите погоре, претставени на сликите 4.19 и 4.20, т.е. дека резултатите за нашиот предложен 5G МТ со AQUA модул на мрежно ниво, покажува одлични перформанси за поголем број на присутни радио пристапни точки.

Како и да е, сите криви за просечниот агрегиран проток имаат опаѓачки тренд (т.е., негативен наклон), што е и очекувано, бидејќи брзините на МТ-и стануваат сè поголеми, настануваат сè повеќе проблеми со хендоверите при такви високи брзини на МТ-и и тенденција да се пролетуваат помалите клетки, па и да се излегува надвор од макро-клетката од RAT1 покриеноста. Згора на тоа, RAT1 оди со поедноставни модулациски и кодни шеми за МТ-и кои се на работ од клетката – што повлекува помали битски брзини за истите и полоша QoS поддршка. Вредностите за RAT1 за средниот проток се скоро слични и доста стабилни (осцилираат околу средната вредност) и со многу благ пад т.е. наклон, токму заради поддршката на ниска и висока мобилност од страна на оваа RAT. Во последните два случаи, кога имаме користење само на RAT2 или RAT3 интерфејси, кривите за протоколот имаат најбрз опаѓачки тренд, заради отсуство за поддршка на висока мобилност, пократок домен на покривање од страна на овие RAT-и (види ги коефициентите за брзина КФП за RAT2 на слика 4.17f) и за RAT3 на сликата 4.17з).

4.4.4 Симулациски резултати и анализи од Сценарио 4

Во овој дел, ќе ги видиме симулациските резултати и анализи за сценарио 4, за системскиот просечен проток и за вредностите на мултимедиската пристапна веројатност, за различни мрежни околности, заедно со соодветни интервали на доверба. Имено ова сценарио 4 е мулти-клеточно, поставено во густа урбана област, со случајно избрани иницијални локации на мобилните терминали, униформно распределени во целата урбана област. На слика 4.22 е претставен изгледот на една клетка од мулти-клеточното сценарио, која многу лесно може да биде проширена на случајот со мулти-клетки. Како што е прикажано, симулациското сценарио 4 се состои од три различни видови на RAT-и. Сите базни станици (од сите RAT-и) се позиционирани на различни локации во рамките на симулациската област, при што поголеми детали за поставеностите и карактеристиките (областа на покривање и капацитетите) на истите може да видите во табела 4.4. Само позицијата на макро клетката (RAT1) е со координати (0,0). Вредностите се внимателно одбрани, со цел да соодветствуваат на конкретни постојни RAT и RAT капацитети, плус да се добијат што пореалистични резултати од симулацијата. Така пристапните технологии кои се избрани се: LTE, IEEE 802.11n и IEEE 802.11ac.



Слика 4.22 Изглед на симулациско сценарио 4.

Табела 4.4 Параметарски вредности за употребените RAT-и во симулациското сценарио 4.

	Позиции (m, m)	Радиус на клетка [m]	Мрежен капацитет [kb/s]
RAT1	(0,0)	2000	300000
RAT2	(0,0); (120,120); (-120,120); (120,-120); (-120,-120); (0,255); (0,-255);	70	600000
RAT3	(0,0); (120,0); (-120,0); (120,-120); (-120,-120); (120,120); (-120,120);	40	7000000

Освен тоа, во RAT1 (LTE) имаме адаптивна модулација и кодирање (на англ. adaptive modulation and coding (AMC)), т.е во различни локациски точки, на различно растојание од RAT1 (LTE) базната станица; користиме различни шеми за модулација и кодирање (според LTE стандардот). На пример, доколку МТ се наоѓа блиску до базната станица (доколку максимално растојание помеѓу МТ и базната станица биде до 400 m) користиме 64 QAM (3/4) или 4.5 бити/симбол, доколку растојанието е од 400 до 950 m, во downlink базната станица користи 16QAM (3/4) со 3 бити/симбол и на растојание поголемо од 950 m, т.е. блиску до работ на клетката, RAT1 користи QPSK (1/2) со 1 бит/симбол. На почетокот од симулацијата, МТ-и се случајно поставени во областа на макро-клетката RAT1, секој со различна стартувачка точка и различна почетна брзина на движење. За физичката мобилност на МТ-и, применивме Gauss-Markov модел на мобилност [53] земајќи средна брзина на движење во границите 30-180 км/ч (v_{cp}), и обезбедивме високо ниво на случајност за корисничката мобилност. Во 2-димензионалната имплементација на Gauss-Markov моделот, на секој МТ му се доделува иницијална брзина и насока на движење, како и средна брзина, насока и правец. Постојат временски интервални множества, кога се пресметуваат нови брзини и насоки за секој МТ, кои следат друга насока, правец и интензитет на брзината во следниот временски слот. Овој циклус се повторува до крајот на симулациското време.

Воедно, кога група од МТ-и ќе напушти една RAT1 (макро) клетка, се претпоставува дека исто толку МТ-и (во група) влегува во набљудуваната RAT1 (макро) клетка, така бројот на МТ-и по макро-клетка останува константен. На тој начин, за целото време на симулацијата, сообраќајниот модел и просечниот проток по клетка се во рамнотежа. Покрај тоа, ова симулациско сценарио обезбедува потполна мрежна покриеност за сите МТ-и и не може да се случи некој МТ да биде надвор од мрежната покриеност, бидејќи се работи за мулти-клеточно сценарио во кое има RAT1, RAT2 и RAT3 покриеност (или минимум RAT1 покриеност). Сообраќајниот мултимедиски модел поддржува постоење на три сервиси, кои се дефинирани со потребни битски брзини,

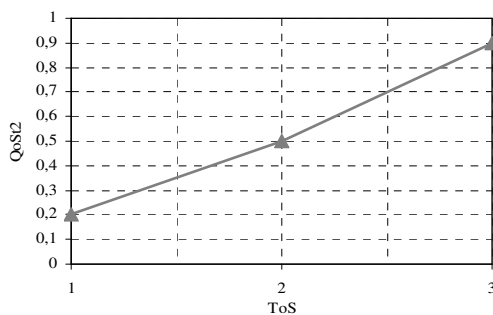
почетно и крајно време. Првиот тип на сервис е видео конференција (едновремен двонасочен видео и аудио сообраќаен проток), дефиниран со ниска битска брзина (128 kb/s) и мало време на пропација (многу осетлив на доцнење и jitter). Вториот тип на сервис кој се користи во двете подсценарија е video-streaming (256 kb/s) дефиниран со средна битска брзина, мал jitter и мало доцнење, но е потолерантен во однос на првиот сервис. Третиот сервисен тип е дефиниран со висока битска брзина и може да се справи со поголеми доцнења и jitter, но побарува да нема пакетски веројатности на грешка и затоа овој сервис вклучува податочни сервиси (веб пребарување, e-mail сервиси, ftp и сл. со битска брзина од 512 kb/s). За време на симулацијата, за даден број (N) на активни мобилни корисници, секој корисник случајно добива еден од споменатите три типа на сервиси. Од друга страна, во случај кога користиме 5GMM со AQUA модул во себе (во кој сега се присутни и LP и GA алгоритмите за оптимизација), за секој корисник му се доделуваат сите три типа на сервиси (минимум два, а максимум сите три сервиси по корисник). Имплементирани се пет различни случаи за ова сценарио 4. Во првиот случај сите MM-и се опремени со AQUA модул во себе со GA оптимизација во multi-RAT MM (со три радио интерфејси, по еден за секоја достапна RAT). Овој прв тип на MM го нарекуваме 5GMM_GA. Во вториот случај MM-и се исто така multi-RAT MM, опремени со AQUA модул во себе, но за разлика од првиот случај каде употребуваме GA, овде во вториот имаме Linear Programming оптимизација во AQUA модулот (во оптимизацијата на тежинските коефициенти за различните влезни критериуми за секој RAT за даден мултимедиски сервис), на местото од GA. Овој тип на MM го нарекуваме MM со LP модул (т.е. 5GMM_LP). Исто така, за ова сценарио се креирани: сообраќајни модели за сервисите споменати погоре, модели за (физичка) мобилност на корисниците, RAT QoS контролен пристапен механизам, и скрипта за комуникациското сценарио. Повеќе од јасно е дека, во симулацијата на AQUA за Genetic Algorithm и за Linear Programming оптимизациските алгоритми, кои се користат во целната функција за доделување на тежинските коефициенти, за да обезбедат врвна QoS поддршка и оптимален RAT избор/и за сите мултимедиски сервис, ги користиме MATLAB функциите GA и LP, соодветно. Функцијата GA имплементира генетски алгоритам од командната линија (со соодветни влезови), додека LP функцијата имплементира линеарно програмирање. За функцијата GA користиме 100 итерации, што се базира на фактот дека, во најголем број случаи, нема некои посебни подобрувања после сукцесивни 50 генерации. Според симулациските резултати дадени во [44], како најсоодветна вредност за мутациската рата ја избравме вредноста 0.1, и избравме големина на популацијата за GA-и да биде 20. Во нашиот

случај, бројот на индивидуи кои се гарантира дека ќе преживеат за следната генерација е поставен да биде 5 индивидуи (заради петте на број тежински фактори).

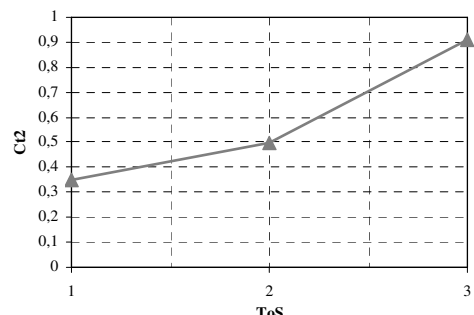
Понатаму, во нашата имплементација, конкретните Критериумски функции на праговите (КФП-и), кои ги обликуваат влезовите со вредности од измерените податоци, за RAT1 и RAT3 можат да се видат на слика 4.17 (под а),б) и в) се за RAT1 (LTE), додека под е),ж) и з) се за RAT3 (IEEE 802.11ac)), бидејќи се употребуваат истите RAT-и како и во претходното сценарио 3, а RAT2 (IEEE 802.11n) КФП-ите се додефинирани на слика 4.23. На сликата 4.23 се презентирани следните доделени тежински фактори за критериумските функции на:

- QoS RAT коефициент, т.е. QoS параметар ($QoS_{i,j}$),
- Коефициент за цената на RAT, т.е. параметар за цената на сервисот преку дадениот RAT ($C_{i,j}$),
- Коефициент на брзината на МТ во одреден RAT, т.е. тежински фактор за брзината на МТ ($V_{i,j}$).

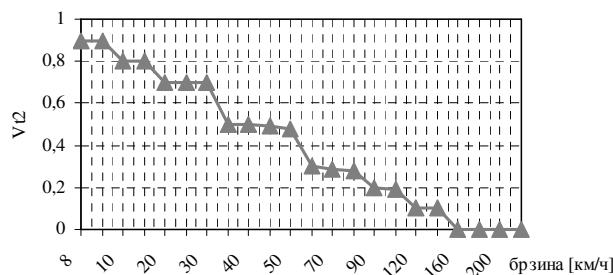
Имаме дефинирано излезни вредности за овие КФП-и со цел да ги репрезентираат реалните RAT перформанси за секој употребен RAT, после поминувањето на филтрирањето за секој RAT параметар од интерес. Како што може да се види од сликата 4.23, за RAT2 (IEEE 802.11n) го форсираме да оди преку неа податочниот сервис, па затоа има највисока вредност за QoS коефициентот (слика 4.23а) и другите сервиси се со ниска QoS поддршка. Истото е и со коефициентот за цената на сервисот за оваа RAT (види слика 4.23б).



а) RAT2 QoS коефициент КФП

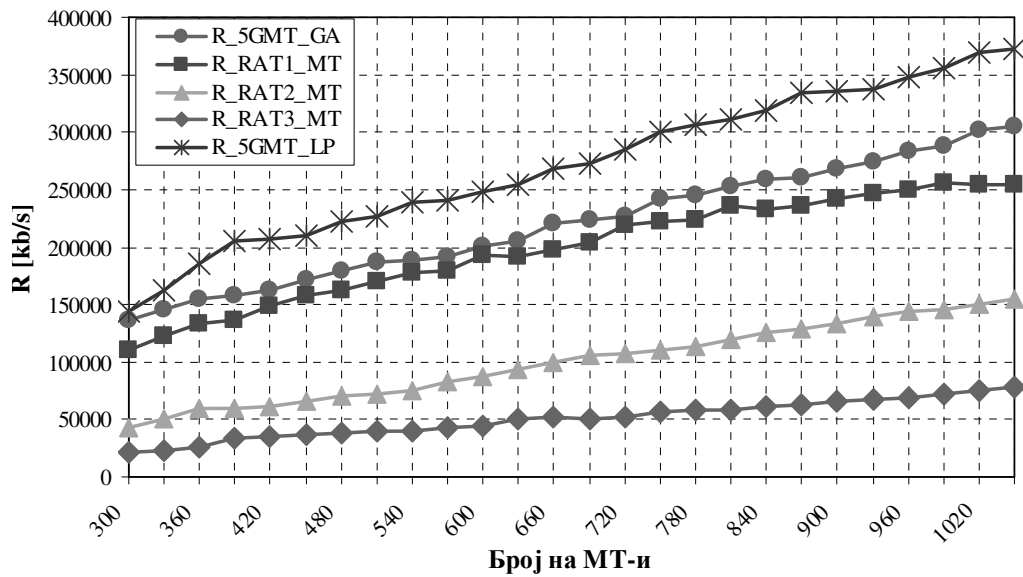


б) RAT2 коефициент за цена КФП



в) RAT2 коефициент за брзината КФП

Слика 4.23. Критериумски функции на праг за RAT2.



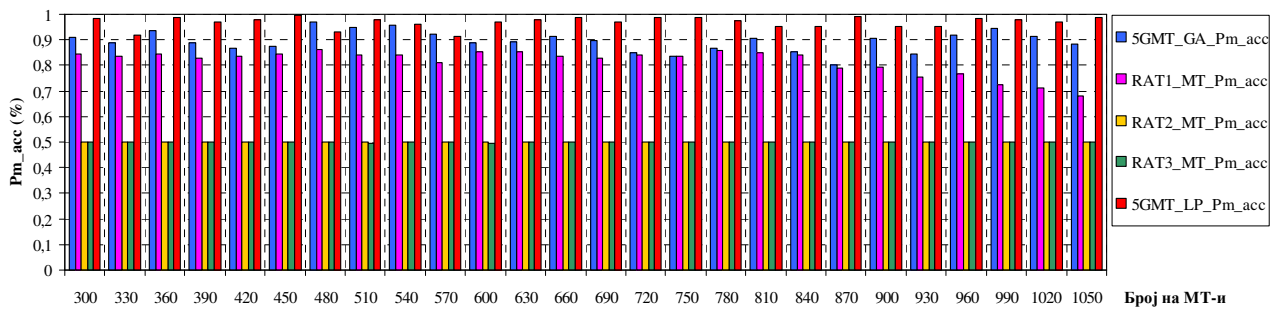
Слика 4.24. Просечна битска брзина по клетка за различен број на МТ-и.

Исто така имаме многу мала поддршка на мобилност за RAT2, која ги ограничува брзините на движење на МТ од 0 до 55 км/ч. Соодветно, вредноста за V_{ti} е навистина голема за овие брзини (види слика 4.23 в). Критериумите за функции на праг за детектираната приемна моќност на сигналот и за нивото на батеријата остануваат исти како претходното сценарио, т.е. може да се видат на слика 4.18.

Понатаму, компаративна симулациска анализа во поглед на постигливите средни системски битски брзини по клетка (R) се дадени на слика 4.24, каде јасно се гледаат протоците по клетка за различен број на МТ-и, за сите пет случаи. Просечната брзина на движење за МТ-и изнесува 40 км/ч и вкупното симулациско време изнесува 120 секунди (според [54] тоа е предефинираното времетраење за добивање на значаен статистички резултат од QoS мерењата за секој од присутните сервиси). Како што може да се забележи, протокот за нашиот предложен 5G МТ, со AQUA модул, за било кој број на МТ-и, е многу поголем од останатите средни протоци за случаите кога користиме МТ-и кои имаат само еден мрежен интерфејс, т.е. само RAT1 интерфејс (R_RAT1_MT), само RAT2 интерфејс (R_RAT2_MT) или само RAT3 интерфејс (R_RAT3_MT). Од друга страна, доколку го споредиме протокот за 5GMT каде што се користи LP како оптимизирачки алгоритам (т.е. кривата означена со R_5GMT_LP) и протокот во случајот кога користиме GA како оптимизирачки алгоритам во AQUA модулот од МТ (кривата означена со R_5GMT_GA), 5GMT со LP во себе постигнува највисоко може проток за било кој број на присутни МТ-и (на слика 4.24 прикажани вредности до 1020). Само за мал број на МТ-и (300 и помал број на МТ-и по клетка), двата случаи со 5G МТ покажуваат приближно исти вредности за

средниот агрегиран проток по клетка. Ова повлекува дека 5G-MT со LP алгоритам во AQUA можат да се употребуваат за сценарија средна и висока густина со сообраќај (кога бројот на MT-и е еднаков и поголем од 360), а GA оптимизацискиот алгоритам може да се користи во AQUA за сценарија со ниска концентрација на сообраќај (мал број на MT-и, т.е. не повеќе од 300). На тој начин, доколку имаме 5G мобилни уреди со две опции за изборот на оптимизациски алгоритам во AQUA модулот; LP или GA, многу почесто ќе го користиме оптимизацискиот алгоритам LP, а многу малку би го користеле GA. Се разбира дека секогаш е добро да се има резервна варијанта и повеќе можности за избор на QoS оптимизациски алгоритми за различни сценарија, мрежни околности и услови. Несомнено, вертикалниот multi-homing и multi-RAT MT-и достигнуваат супериорни резултати во поглед на агрегираната средна битска брзина по сервис, како и оптимален и интелигентен начин на користење на сите достапни RAT-и. Па, како што се очекуваше, другите три случаи, кога имаме MT-и кои користат само еден сервис во единица време и само една RAT, се ограничени во своите можности и перформанси, врзани само за QoS механизмите што ги нуди конкретна RAT, на која се поврзани.

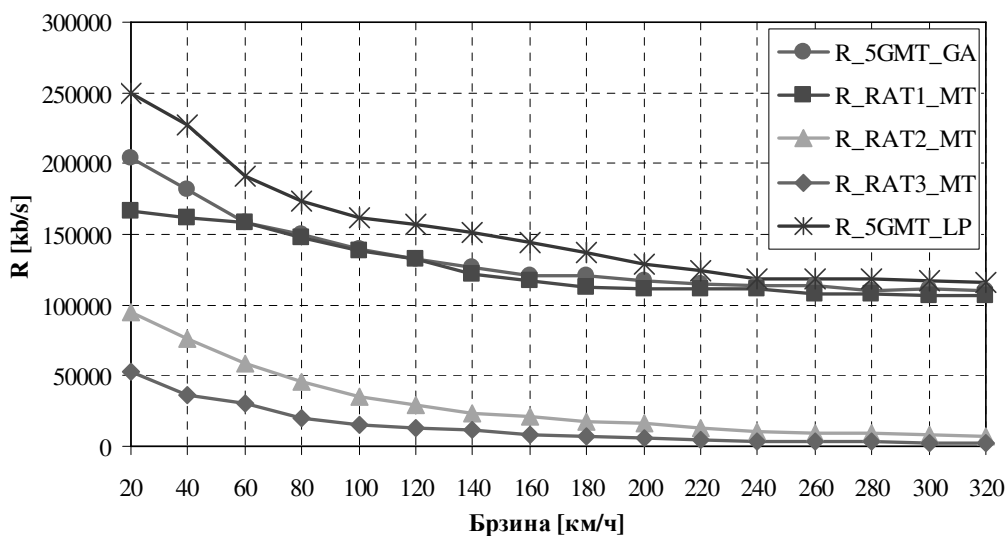
Понатаму, на слика 4.25 се презентирани просечните мултимедиски пристапни веројатности (рати) по клетка (Pm_{acc}) за различен број на MT-и, кои се движат со просечна брзина од 50 км/ч и симулациско време од 120 секунди. Мултимедиската пристапна веројатност се пресметува според равенката (4.11). За првиот случај, кога се користат 5G-MT-и со AQUA модули опремени со GA алгоритам во истите, просечната мултимедиска пристапна рата се помали од 5G-MT-и со AQUA модули опремени со LP алгоритам ($5G-MT_LP_Pm_{acc}$), за било кој број на MT-и по клетка, но се значително повисоки од другите три случаи, како на пример од случајот кога имаме MT-и со RAT1 интерфејс ($RAT1_MT_Pacc$). Разликите во вредностите за мултимедиската пристапна веројатност по клетка, помеѓу случаите со 5G-MT-и со AQUA модул кој има GA за оптимизациски алгоритам и кој има LP оптимизациски алгоритам е 0.1 или помала. Како што може да се види, случајот со AQUA модул опремен со LP алгоритам покажува најдобра мултимедиска пристапна рата и високо ниво за пристап до било кој сервис за било кој број на употребени MT-и. Во случај на густе мрежи (кога бројот на мобилни уреди е над 500), без никакво двоумење може да се употреби AQUA со LP оптимизација во MT, доколку овој QoS параметар (Pm_{acc}) е од суштинско значење за сервисот. Несомнено, перформансите за предложениот 5G MT со AQUA во себе, уште еднаш доаѓаат до израз и постигнуваат одлични резултати и за мултимедиската пристапна веројатност.



Слика 4.25. Просечна мултимедиска пристапна веројатност за различен број на МТ-и.

Освен гореспоменатото, вредностите за пристапната мултимедиска веројатност за случаите со МТ-и кои користат само RAT2 или RAT3, за било кој број на мобилни уреди, се речиси два пати помали од првите два случаи со 5GMT, токму заради малата покриена област и дострели на овие RAT-и, плус заради номадската поддршка на мобилност. Вредностите за случајот со МТ-и кои имаат само RAT1 интерфејси, заради поголемата област на покриеност и подобрата поддршка на мобилност, се со најдобри вредности за просечната мултимедиска пристапна рата, во споредба со другите два случаи на МТ-и кои имаат пристап само на RAT2 и само на RAT3.

Понатаму, на слика 4.26 е претставен средниот проток по клетка, за различни просечни брзини на мобилните уреди (од 20 км/ч до 320 км/ч), кога имаме 500 МТ-и и симулациско време од 120 секунди. Пред сè, може сосема јасно да се заклучи дека просечниот проток по клетка, за случајот кога користиме 5GMT со LP оптимизација во AQUA модулот (кривата R_5GMT_LP) кога имаме мултимедиски сервиси, за било која просечна брзина на движење, покажува супериорни резултати во споредба со сите останати четири случаи.



Слика 4.26. Просечен проток за различни брзини на МТ-и (при 500 присутни МТ-и).

Дури и случајот кога имаме МТ-и со AQUA и со вклучен GA оптимизациски алгоритам, и во највисоките вредности за протокот, при мала мобилност (до 70 км/ч) не го надминувам 5GMT кој има AQUA модул со LP алгоритам, но истиот е подобар во споредба со останатите три случаи, кога користиме само една RAT (т.е. кривите означени со R_RAT1_MT, R_RAT2_MT и R_RAT3_MT). За средни и високи брзини на движење на МТ-и (над 70 км/ч) случајот кога користиме 5GMT-и со GA алгоритам во нив, и случајот кога имаме МТ-и опремени само со RAT1 интерфејси, покажуваат многу блиски вредности за средниот проток, со просечна разлика од само 7800 kb/s. Ова е токму заради подобрите перформанси на 5G МТ со GA и достигнување на оптималните вредности за средниот проток за брзини до 70 км/ч (кога споредуваме со случајот кога употребуваме МТ-и само со RAT1 интерфејси), а за другите повисоки вредности за мобилноста, покажува блиски протоци со тие од RAT1 технологијата. Генерално, сите криви на протокот имаат опаѓачки тренд (т.е., негативен нагиб) бидејќи како што растат брзините на движење на МТ-и, расте и бројот на хендови (меѓу системски и меѓу-клеточен), што предизвикува поголеми доцнења, размена на поголем контролен сообраќај, поголеми пакетски загуби, и тенденција МТ-и да преминуваат во други макро-клетки. Дополнително на ова, при високи брзини на движење радио пристапните технологии (пред сè RAT1) одат со поедноставни модулациски и кодни шеми, кои поддржуваат помали битски брзини. И покрај сè, просечниот проток по клетка, за случајот со 5GMT-и со LP оптимизациски алгоритам во AQUA модулот, дури и за највисоките вредности за физичката брзина на МТ-и (до 320 км/ч), покажува највисоки и стабилни вредности во споредба со сите останати случаи. Вредностите за просечниот проток за случаите кога имаме МТ-и со RAT2 и RAT3 интерфејси имаат доста побрз опаѓачки тренд, во споредба со сите останати случаи, токму заради малата поддршка на мобилноста (т.е. имаат поддршка само на номадско движење, види ги коефициентите за брзина КФП, за овие RAT-и на слика 4.23 в и слика 4.17г, соодветно).

Понатаму, за разлика од точкастите естиматори или приказот на средни вредности, каде што се користи само еден број за да ги сумира измерените податоци, овде дополнително ќе претставиме и интервали на доверба (на англ. Confidence intervals (или скратено CIs)), за средните вредности од проток по клетка и средната мултимедиска пристапна веројатност (рата) по клетка. Интервалот на доверба дава опис на интервал кој покрива вистинска параметарска вредност со соодветна веројатност (за наоѓање на конкретната вредност). Вообичаено, измерените веројатности се во 90 процентен опсег.

На пример, интервал на доверба дава приказ на интервал во кој средната вредност на основната распределба лежи со веројатност (β) од 95 %.

Во нормалната (Гаусова) распределба, изразите за доверба зависат од составувањето на познати и непознати параметри. Ова значи дека треба да се применат различни пресметки, доколку средната вредност и/или варијансата на распределбата се познати или непознати. Бидејќи параметрите за средната вредност и варијансата не се познати однапред во нашиот случај, истите се естимирани преку користење на емпириските вредности на начин кој е прикажан подолу.

$$\text{Емпириската средна вредност: } \bar{X}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i) \quad (4.12)$$

каде X_i (за $i=1,2,3,\dots,N$) се вредностите на примероците кои се измерени (пример на битската брзина во текот на времето). Емпириската вредност на варијансата изнесува:

$$\bar{S}_N = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_N)^2} \quad (4.13)$$

Понатаму, интервалите на доверба и декларацијата можат да бидат направени и пресметани врз база на: очекуваните вредности, варијансата и стандардната девијација. На тој начин, доколку степенот на слобода е β , параметарот b може да биде пресметан според равенката:

$$\int_{-b}^b \frac{\Gamma(N/2)}{\Gamma((N-1)/2)} \frac{1}{\sqrt{\pi(N-1)}} \frac{1}{(1+z^2/(N-1))^{N/2}} dz = \beta. \quad (4.14)$$

Ова повлекува дека β и аргументот b често се претставени во специјални табели во литературата за вакви потреби. Според тоа, интервалите на доверба за нормална (Гаусова) распределба може да се пресметаат како [54]:

$$h_{1,\beta} = \bar{X}_N - \frac{b\bar{S}_N}{\sqrt{N-1}}; \quad h_{2,\beta} = \bar{X}_N + \frac{b\bar{S}_N}{\sqrt{N-1}}. \quad (4.15)$$

Во MATLAB постои функција $tinvc(\cdot, \cdot)$, позната како инверзна функција за Студентова t_{N-1} (кумулативна) распределба (на англ. Student t_{N-1} (cumulative) distribution) [54], која за дадена распределба и даден степен на слобода β , го пресметува аргументот b за Студентовата t_{N-1} (кумулативна) распределба. Кратко кажано, тоа значи следно:

$$b = tinvc\left(\frac{1+\beta}{2}, N-1\right). \quad (4.16)$$

Интервалите на доверба се всушност статистички тестови, во смисла дека интервалите на доверба се даваат со дадено ниво на доверба [54]. Според правилото на

палец (на англ. rule of thumb), бројот на примероци во измерената операција е во тесна корелација со доверливоста на резултатите. Со други зборови, колку е поголем бројот на измерени примероци, толку попрецизни и поверодостојни се резултатите.

Од друга страна, пресметките на интервалите на доверба многу зависат од претпоставениот вид на распределба. Понатаму (во табела 4.5, табела 4.6 и табела 4.7), се дадени пресметките за интервалите на доверба (CIs) за мултимедиската пристапна веројатност (биномна распределба) и просечните битски брзини по клетка (нормална (Гаусова) распределба), според равенките (4.15) и (4.16) и равенките за интервалите на доверба дадени во [54] (од страна 330 до 332) за нивните одговарачки густини на распределби. Мора да потенцираме дека за интервалите на доверба за мултимедиската пристапна веројатност (табела 4.6) се користи биномната распределба, бидејќи ако K е бројот на неуспешни пристапи од вкупен број на пристапи N , тогаш е докажано дека K ја следи биномната распределба, дадена со следната густина на распределба:

$$\Pr\{k = K\} = \binom{N}{K} P_e^K (1 - P_e)^{N-K}, \quad (4.17)$$

каде P_e е веројатноста за грешка за време на преносот на информации, или во нашиот случај тоа е веројатноста за одбиен (или недозволен) пристап до некоја RAN. Според [54], ако е исполнет условот $n \cdot p \cdot q > 7$ или бројот $n > 1000$, биномната распределба може да биде апроксимирана со нормална (Гаусова) распределба, со што би се поедноставиле пресметките за интервалите на доверба (како што тоа е дадено во [54] (страна 330)). Интервалот на доверба опишува интервал кој покрива точно наоѓање на некој параметар со соодветна веројатност. Вообичаено тие веројатности се мерат во интервалот [80, 99] изразено во проценти (β). На тој начин ги имаме одбрано најчесто употребуваниите степени на слобода во нашите статистички резултати дадени во табелите 4.5, 4.6 и 4.7.

Така, табела 4.5 ги дава интервалите на доверба (означени со CIs и претставени во единица kb/s) за просечниот проток по клетка за различен број на МТ-и за четири различни степени на слобода ($\beta = \{0.8, 0.9, 0.95, 0.99\}$), за сите пет симулирани случаи. Просечните вредности за протокот се дадени на слика 4.24. Воедно, во табела 4.6, се претставени интервалите на доверба за просечната мултимедиска пристапна веројатност по клетка (презентирана на слика 4.25) за различен број на МТ-и, за истите четири степени на слобода како претходно, за сите пет различни случаи. Параметарските вредности за RAT-и кои се користат во ова симулациско сценарио се: просечна брзина на мобилните уреди од 50 км/ч и вкупно времетраење на симулацијата од 120 секунди.

На крај, во табела 4.7 се презентирани интервалите на слобода за средните вредности на протоците по клетка за различни брзини на МТ-и, за четири различни степени на слобода и за сите пет симулациски случаи. Во овој случај просечните вредности за протокот се оние што се прикажани на сликата 4.26, за вкупен број на МТ-и 500 и времетраење на симулацијата од 120 секунди. На сите три табели (табела 4.5, 4.6 и 4.7), се забележува следното: како што степенот на слобода расте, така интервалите на слобода се прошируваат околу средната вредност, што е очекувано.

Табела 4.5 Интервали на доверба (CI) изразени во kb/s за средниот проток по клетка за различен број на МТ-и со четири различни степени на слобода (β), за сите пет симулациски случаи.

R_5GMT_GA [kb/s; kb/s]

β	CI за N=300	CI за N=360	CI за N=420	CI за N=480	CI за N=540	CI за N=600	CI за N=660
0.8	(134140; 137720)	(154180; 156900)	(153750; 169910)	(176750; 180530)	(185830; 189790)	(198320; 203460)	(218100; 223480)
0.9	(133630; 138230)	(153800; 157280)	(151450; 172210)	(176210; 181070)	(185260; 190360)	(197580; 204200)	(217330; 224250)
0.95	(133180; 138680)	(153460; 157620)	(149450; 174210)	(175740; 181540)	(184770; 190850)	(196950; 204830)	(216660; 224920)
0.99	(132310; 139550)	(152800; 158280)	(145510; 178150)	(174810; 182470)	(183800; 191820)	(195690; 206090)	(215350; 226230)
β	CI for N=720	CI for N=780	CI for N=840	CI for N=900	CI for N=960	CI for N=1020	CI for N=1050
0.8	(223720; 229340)	(242210; 248500)	(255720; 262760)	(263850; 272370)	(278920; 287620)	(296780; 306280)	(300730; 310690)
0.9	(222920; 230140)	(241310; 249400)	(254720; 263760)	(262630; 273590)	(277690; 288850)	(295430; 307630)	(299310; 312110)
0.95	(222230; 230830)	(240530; 250180)	(253840; 264640)	(261580; 274640)	(276610; 289930)	(294250; 308810)	(298070; 313350)
0.99	(220860; 232200)	(239000; 251710)	(252130; 266350)	(259500; 276720)	(274490; 292050)	(291940; 311120)	(295640; 315780)

R_5GMT_LP [kb/s; kb/s]

β	CI за N=300	CI за N=360	CI за N=420	CI за N=480	CI за N=540	CI за N=600	CI за N=660
0.8	(142400; 144460)	(183580; 186420)	(206210; 209090)	(221390; 224230)	(238160; 241340)	(246220; 249060)	(267200; 270380)
0.9	(142110; 144750)	(183170; 186830)	(205800; 209500)	(220990; 224630)	(237700; 241800)	(245820; 249460)	(266750; 270830)
0.95	(141860; 145000)	(182820; 187180)	(205440; 209860)	(220640; 224980)	(237310; 242190)	(245470; 249810)	(266360; 271220)
0.99	(141360; 145500)	(182120; 187880)	(204740; 210560)	(219940; 225680)	(236530; 242970)	(244770; 250510)	(265580; 272000)
β	CI за N=720	CI за N=780	CI за N=840	CI за N=900	CI за N=960	CI за N=1020	CI за N=1050
0.8	(284360; 287210)	(304600; 308250)	(316330; 320130)	(332900; 337000)	(345930; 349950)	(367080; 371700)	(370580; 374880)
0.9	(283950; 287620)	(304080; 308770)	(315790; 320670)	(332310; 337590)	(345350; 350530)	(366420; 372360)	(369960; 375500)
0.95	(283600; 287970)	(303630; 309220)	(315310; 321150)	(331800; 338100)	(344850; 351030)	(365850; 372930)	(369430; 376030)
0.99	(282900; 288670)	(302740; 310110)	(314390; 322070)	(330800; 339100)	(343870; 352010)	(364730; 374050)	(368380; 377080)

R_RAT1_MT [kb/s; kb/s]

β	CI за N=300	CI за N=360	CI за N=420	CI за N=480	CI за N=540	CI за N=600	CI за N=660
0.8	(109010; 111090)	(132380; 135510)	(146590; 150480)	(159720; 163680)	(174960; 179570)	(190210; 195310)	(195870; 200780)
0.9	(108720; 111380)	(131930; 135960)	(146030; 151030)	(159160; 164240)	(174300; 180230)	(189480; 196030)	(195170; 201480)
0.95	(108460; 111640)	(131550; 136350)	(145550; 151520)	(158670; 164740)	(173730; 180800)	(188850; 196670)	(194560; 202090)
0.99	(107960; 112140)	(130780; 137110)	(144600; 152460)	(157700; 165700)	(172610; 181920)	(187610; 197910)	(193360; 203280)
β	CI за N=720	CI за N=780	CI за N=840	CI за N=900	CI за N=960	CI за N=1020	CI за N=1050
0.8	(215730; 221740)	(221210; 226160)	(230780; 236280)	(239480; 246320)	(246100; 253860)	(249810; 257490)	(247780; 259900)
0.9	(214870; 222600)	(220500; 226870)	(230000; 237060)	(238510; 247290)	(244990; 254970)	(248710; 258590)	(246050; 261630)
0.95	(214120; 223340)	(219880; 227490)	(229320; 237740)	(237660; 248140)	(244030; 255930)	(247760; 259540)	(244550; 263140)
0.99	(212660; 224810)	(218670; 228700)	(227980; 239080)	(235990; 249810)	(242130; 257830)	(245880; 261420)	(241590; 266090)

R_RAT2_MT [kb/s; kb/s]

β	CI за N=300	CI за N=360	CI за N=420	CI за N=480	CI за N=540	CI за N=600	CI за N=660
0.8	(42592; 43700)	(58916; 60016)	(61012; 62548)	(70389; 71959)	(73761; 75765)	(85901; 88093)	(98423; 100400)
0.9	(42434; 43858)	(58760; 60172)	(60793; 62767)	(70166; 72182)	(73476; 76050)	(85588; 88406)	(98142; 100680)
0.95	(42296; 43996)	(58624; 60308)	(60602; 62958)	(69971; 72377)	(73227; 76299)	(85316; 88678)	(97896; 100930)
0.99	(42026; 44266)	(58355; 60577)	(60227; 63333)	(69588; 72760)	(72738; 76788)	(84781; 89213)	(97414; 101410)

β	CI за N=720	CI за N=780	CI за N=840	CI за N=900	CI за N=960	CI за N=1020	CI за N=1050
0.8	(106830; 108780)	(111790; 114540)	(123710; 126330)	(132690; 132690)	(141920; 144890)	(149220; 152220)	(153840; 157140)
0.9	(106550; 109060)	(111400; 114930)	(123330; 126710)	(132310; 135670)	(141500; 145310)	(148800; 152640)	(153370; 157610)
0.95	(106310; 109300)	(111060; 115270)	(123010; 127030)	(131990; 136000)	(141130; 145680)	(148430; 153010)	(152960; 158020)
0.99	(105830; 109780)	(110390; 115940)	(122360; 127670)	(131350; 136640)	(140410; 146400)	(147700; 153740)	(152160; 158820)

R_RAT3_MT [kb/s; kb/s]

β	CI за N=300	CI за N=360	CI за N=420	CI за N=480	CI за N=540	CI за N=600	CI за N=660
0.8	(21398; 22006)	(25244; 25994)	(34708; 35644)	(38293; 39131)	(40035; 41097)	(44140; 45186)	(51275; 52399)
0.9	(21312; 22092)	(25137; 26101)	(34575; 35777)	(38174; 39250)	(39884; 41248)	(43991; 45335)	(51115; 52559)
0.95	(21237; 22167)	(25044; 26194)	(34459; 35893)	(38070; 39354)	(39752; 41380)	(43861; 45465)	(50975; 52699)
0.99	(21089; 22315)	(24861; 26377)	(34231; 36121)	(37866; 39558)	(39493; 41639)	(43605; 45721)	(50701; 52973)
β	CI за N=720	CI за N=780	CI за N=840	CI за N=900	CI за N=960	CI за N=1020	CI за N=1050
0.8	(51642; 52890)	(57147; 58431)	(60787; 62095)	(64982; 66404)	(68746; 70256)	(74468; 76106)	(77717; 79283)
0.9	(51465; 53067)	(56964; 58614)	(60601; 62281)	(64779; 66607)	(68531; 70471)	(74235; 76339)	(77493; 79507)
0.95	(51310; 53222)	(56804; 58773)	(60439; 62443)	(64602; 66784)	(68344; 70658)	(74032; 76542)	(77299; 79701)
0.99	(51006; 53526)	(56491; 59087)	(60120; 62762)	(64255; 67131)	(67976; 71026)	(73633; 76941)	(76917; 80083)

Табела 4.6 Интервали на доверба (CI) за средната мултимедиска пристапна веројатност (ρ) за различен број на MT-и со четири различни степени на слобода (β), за сите пет симулациски случаи.

5GMT_GA_Pm_acc

β	CI за N=300	CI за N=360	CI за N=420	CI за N=480	CI за N=540	CI за N=600
0.8	(0.8958; 0.9232)	(0.9211; 0.945)	(0.8511; 0.8836)	(0.9582; 0.9753)	(0.944; 0.964)	(0.8721; 0.9023)
0.9	(0.8913; 0.9265)	(0.9171; 0.9478)	(0.8459; 0.8876)	(0.9551; 0.977)	(0.9405; 0.9662)	(0.8672; 0.9061)
0.95	(0.8873; 0.9293)	(0.9134; 0.9501)	(0.8413; 0.891)	(0.9522; 0.9785)	(0.9372; 0.968)	(0.8629; 0.9092)
0.99	(0.8791; 0.9343)	(0.9059; 0.9542)	(0.8321; 0.8974)	(0.9461; 0.981)	(0.9305; 0.9712)	(0.8541; 0.915)
β	CI за N=660	CI за N=720	CI за N=780	CI за N=840	CI за N=900	CI за N=960
0.8	(0.9003; 0.9271)	(0.8325; 0.8666)	(0.8515; 0.8839)	(0.8371; 0.8708)	(0.8914; 0.9193)	(0.9062; 0.9322)
0.9	(0.8959; 0.9303)	(0.8271; 0.871)	(0.8463; 0.8879)	(0.8318; 0.8751)	(0.8868; 0.9227)	(0.9019; 0.9353)
0.95	(0.8919; 0.933)	(0.8223; 0.8746)	(0.8418; 0.8913)	(0.827; 0.8787)	(0.8827; 0.9255)	(0.898; 0.9379)
0.99	(0.8838; 0.9379)	(0.8128; 0.8815)	(0.8326; 0.8977)	(0.8176; 0.8854)	(0.8744; 0.9307)	(0.89; 0.9426)

5GMT_LP_Pm_acc

β	CI за N=300	CI за N=360	CI за N=420	CI за N=480	CI за N=540	CI за N=600
0.8	(0.9758; 0.9883)	(0.9825; 0.9928)	(0.9693; 0.9837)	(0.9199; 0.9439)	(0.9504; 0.9691)	(0.9598; 0.9765)
0.9	(0.9733; 0.9895)	(0.9803; 0.9937)	(0.9665; 0.9851)	(0.9158; 0.9467)	(0.9471; 0.9711)	(0.9567; 0.9782)
0.95	(0.9709; 0.9904)	(0.9781; 0.9943)	(0.9639; 0.9862)	(0.9121; 0.949)	(0.944; 0.9728)	(0.9539; 0.9796)
0.99	(0.9656; 0.9919)	(0.9733; 0.9954)	(0.9583; 0.9881)	(0.9046; 0.9532)	(0.9375; 0.9757)	(0.9478; 0.982)
β	CI за N=660	CI за N=720	CI за N=780	CI за N=840	CI за N=900	CI за N=960
0.8	0.9825; 0.9928	(0.9809; 0.9918)	(0.9662; 0.9813)	(0.9413; 0.9617)	(0.9411; 0.9616)	(0.9759; 0.9884)
0.9	0.9803; 0.9937	(0.9785; 0.9927)	(0.9633; 0.9828)	(0.9377; 0.964)	(0.9375; 0.9639)	(0.9734; 0.9895)
0.95	0.9781; 0.9943	(0.9763; 0.9934)	(0.9606; 0.984)	(0.9344; 0.9658)	(0.9342; 0.9657)	(0.971; 0.9904)
0.99	0.9733; 0.9954	(0.9714; 0.9945)	(0.9548; 0.9861)	(0.9276; 0.9692)	(0.9274; 0.9691)	(0.9658; 0.9919)

RAT1_MT_Pm_acc

β	CI за N=300	CI за N=360	CI за N=420	CI за N=480	CI за N=540	CI за N=600
0.8	(0.8121; 0.8691)	(0.8161; 0.8726)	(0.8041; 0.8622)	(0.8321; 0.8863)	(0.8141; 0.8706)	(0.8201; 0.876)
0.9	(0.8026; 0.8759)	(0.8067; 0.8792)	(0.7945; 0.8692)	(0.823; 0.8926)	(0.8048; 0.8773)	(0.8108; 0.8826)
0.95	(0.7942; 0.8815)	(0.7983; 0.8847)	(0.786; 0.8749)	(0.8148; 0.8978)	(0.7964; 0.8828)	(0.8024; 0.888)
0.99	(0.7771; 0.8917)	(0.7813; 0.8948)	(0.7687; 0.8854)	(0.7982; 0.9072)	(0.7794; 0.8929)	(0.7855; 0.8979)
β	CI за N=660	CI за N=720	CI за N=780	CI за N=840	CI за N=900	CI за N=960
0.8	(0.8023; 0.8604)	(0.8088; 0.8662)	(0.8266; 0.8813)	(0.8102; 0.8672)	(0.761; 0.8237)	(0.7341; 0.8)
0.9	(0.7928; 0.8673)	(0.7993; 0.873)	(0.8175; 0.8876)	(0.8008; 0.874)	(0.751; 0.8315)	(0.7237; 0.8082)
0.95	(0.7843; 0.873)	(0.7909; 0.8786)	(0.8093; 0.8929)	(0.7924; 0.8796)	(0.7421; 0.8379)	(0.7146; 0.8151)
0.99	(0.7671; 0.8836)	(0.7737; 0.889)	(0.7927; 0.9025)	(0.7753; 0.8898)	(0.7243; 0.8499)	(0.6963; 0.828)

RAT2_MT_Pm_acc

β	CI за N=300	CI за N=360	CI за N=420	CI за N=480	CI за N=540	CI за N=600
0.8	(0.4697; 0.5282)	(0.4694; 0.5279)	(0.4687; 0.5272)	(0.4694; 0.5279)	(0.4694; 0.5278)	(0.4695; 0.5279)
0.9	(0.4615; 0.5364)	(0.4611; 0.5361)	(0.4604; 0.5354)	(0.4611; 0.5361)	(0.4611; 0.5361)	(0.4612; 0.5362)
0.95	(0.4544; 0.5436)	(0.454; 0.5432)	(0.4533; 0.5426)	(0.454; 0.5432)	(0.454; 0.5432)	(0.4541; 0.5433)
0.99	(0.4405; 0.5574)	(0.4402; 0.5571)	(0.4394; 0.5564)	(0.4402; 0.5571)	(0.4402; 0.5571)	(0.4403; 0.5572)
β	CI за N=660	CI за N=720	CI за N=780	CI за N=840	CI за N=900	CI за N=960
0.8	(0.4699; 0.5284)	(0.4697; 0.5282)	(0.4697; 0.5282)	(0.4697; 0.5282)	(0.4704; 0.5288)	(0.4704; 0.5289)
0.9	(0.4617; 0.5366)	(0.4615; 0.5364)	(0.4615; 0.5364)	(0.4615; 0.5364)	(0.4621; 0.537)	(0.4622; 0.5371)
0.95	(0.4546; 0.5438)	(0.4544; 0.5436)	(0.4544; 0.5436)	(0.4544; 0.5436)	(0.455; 0.5442)	(0.4551; 0.5442)
0.99	(0.4407; 0.5576)	(0.4405; 0.5574)	(0.4405; 0.5574)	(0.4405; 0.5574)	(0.4412; 0.558)	(0.4413; 0.5581)

RAT3_MT_Pm_acc

β	CI за N=300	CI за N=360	CI за N=420	CI за N=480	CI за N=540	CI за N=600
0.8	(0.4689; 0.5274)	(0.4687; 0.5272)	(0.4694; 0.5278)	(0.4687; 0.5272)	(0.4687; 0.5272)	(0.4684; 0.5269)
0.9	(0.4606; 0.5356)	(0.4604; 0.5354)	(0.4611; 0.5361)	(0.4604; 0.5354)	(0.4604; 0.5354)	(0.4601; 0.5352)
0.95	(0.4535; 0.5428)	(0.4533; 0.5426)	(0.454; 0.5432)	(0.4533; 0.5426)	(0.4533; 0.5426)	(0.453; 0.5423)
0.99	(0.4397; 0.5566)	(0.4394; 0.5564)	(0.4402; 0.5571)	(0.4394; 0.5564)	(0.4394; 0.5564)	(0.4392; 0.5562)
β	CI за N=660	CI за N=720	CI за N=780	CI за N=840	CI за N=900	CI за N=960
0.8	(0.4693; 0.5278)	(0.4692; 0.5277)	(0.469; 0.5275)	(0.4691; 0.5276)	(0.4697; 0.5282)	(0.4694; 0.5278)
0.9	(0.4611; 0.5361)	(0.461; 0.5359)	(0.4608; 0.5358)	(0.4608; 0.5358)	(0.4615; 0.5364)	(0.4611; 0.5361)
0.95	(0.454; 0.5432)	(0.4538; 0.5431)	(0.4536; 0.5429)	(0.4537; 0.543)	(0.4544; 0.5436)	(0.454; 0.5432)
0.99	(0.4401; 0.557)	(0.44; 0.5569)	(0.4398; 0.5568)	(0.4399; 0.5568)	(0.4405; 0.5574)	(0.4402; 0.5571)

Табела 4.7 Интервали на доверба (CI) изразени во kb/s за средниот проток по клетка за различна брзина (v) на MT-и со четири различни степени на слобода (β), за сите пет симулациски случаи.

R_5GMT_GA [kb/s; kb/s]

β	CI за v=40km/h	CI за v=60km/h	CI за v=80km/h	CI за v=100km/h	CI за v=120km/h	CI за v=140km/h	CI за v=160km/h
0.8	(180170; 183910)	(155400; 160120)	(148200; 152440)	(136610; 141390)	(130590; 135350)	(123830; 128330)	(119100; 122620)
0.9	(179640; 184440)	(154730; 160790)	(147600; 153040)	(135930; 142070)	(129910; 136030)	(123190; 128970)	(118600; 123120)
0.95	(179170; 184910)	(154150; 161370)	(147070; 153570)	(135340; 142660)	(129320; 136620)	(122630; 129530)	(118170; 123550)
0.99	(178260; 185820)	(153000; 162520)	(146040; 154600)	(134170; 143830)	(128160; 137780)	(121530; 130630)	(117310; 124410)
beta	CI за v=180km/h	CI за v=200km/h	CI за v=220km/h	CI за v=240km/h	CI за v=260km/h	CI за v=280km/h	CI за v=300km/h
0.8	(118430; 122610)	(115500; 118860)	(112950; 116330)	(112370; 115490)	(111820; 114820)	(108900; 111370)	(109920; 112630)
0.9	(117840; 123200)	(115020; 119340)	(112470; 116810)	(111930; 115930)	(111400; 115240)	(108550; 111720)	(109540; 113020)
0.95	(117320; 123720)	(114610; 119750)	(112050; 117230)	(111540; 116320)	(111020; 115620)	(108250; 112020)	(109200; 113360)
0.99	(116300; 124740)	(113790; 120570)	(111220; 118060)	(110780; 117080)	(110290; 116350)	(107640; 112630)	(108540; 114020)

R_5GMT_LP [kb/s; kb/s]

β	CI за v=40km/h	CI за v=60km/h	CI за v=80km/h	CI за v=100km/h	CI за v=120km/h	CI за v=140km/h	CI за v=160km/h
0.8	(225150; 228770)	(190310; 192800)	(171930; 174390)	(160160; 162430)	(156360; 158800)	(150260; 153140)	(142860; 145680)
0.9	(224630; 229290)	(189960; 193150)	(171580; 174740)	(159830; 162750)	(156020; 159140)	(149840; 153550)	(142450; 146080)
0.95	(224180; 229740)	(189650; 193460)	(171270; 175050)	(159550; 163040)	(155720; 159440)	(149490; 153910)	(142100; 146430)
0.99	(223300; 230620)	(189050; 194060)	(170670; 175650)	(158990; 163590)	(155120; 160040)	(148780; 154610)	(141420; 147120)
beta	CI за v=180km/h	CI за v=200km/h	CI за v=220km/h	CI за v=240km/h	CI за v=260km/h	CI за v=280km/h	CI за v=300km/h
0.8	(135630; 137730)	(127720; 129700)	(122760; 124950)	(117590; 119630)	(117340; 119250)	(117090; 118630)	(116250; 117820)
0.9	(135320; 138040)	(127440; 129980)	(122450; 125260)	(117300; 119920)	(117070; 119520)	(116880; 118850)	(116020; 118040)
0.95	(135060; 138300)	(127190; 130230)	(122180; 125530)	(117050; 120170)	(116840; 119760)	(116680; 119040)	(115830; 118240)
0.99	(134550; 138810)	(126710; 130710)	(121640; 126060)	(116550; 120670)	(116370; 120230)	(116310; 119420)	(115440; 118620)

R_RAT1_MT [kb/s; kb/s]

β	CI за v=40km/h	CI за v=60km/h	CI за v=80km/h	CI за v=100km/h	CI за v=120km/h	CI за v=140km/h	CI за v=160km/h
0.8	(160150; 163680)	(155640; 159720)	(146280; 149340)	(136890; 139070)	(131510; 133990)	(120770; 122450)	(116450; 117730)
0.9	(159650; 164180)	(155060; 160300)	(145850; 149770)	(136580; 139380)	(131150; 134340)	(120530; 122690)	(116260; 117910)
0.95	(159210; 164610)	(154550; 160810)	(145470; 150150)	(136300; 139660)	(130840; 134650)	(120320; 122900)	(116100; 118070)
0.99	(158350; 165470)	(153550; 161810)	(144730; 150890)	(135770; 140190)	(130240; 135260)	(119910; 123310)	(115790; 118380)
β	CI за v=180km/h	CI за v=200km/h	CI за v=220km/h	CI за v=240km/h	CI за v=260km/h	CI за v=280km/h	CI за v=300km/h
0.8	(112510; 113550)	(111070; 112170)	(110800; 111960)	(110300; 111460)	(107120; 108070)	(107880; 108800)	(105910; 106860)
0.9	(112360; 113700)	(110910; 112330)	(110640; 112130)	(110140; 111630)	(106990; 108210)	(107750; 108930)	(105770; 106990)
0.95	(112240; 113830)	(110780; 112470)	(110490; 112270)	(110000; 111770)	(106870; 108320)	(107640; 109050)	(105660; 107110)
0.99	(111980; 114080)	(110510; 112740)	(110210; 112560)	(109710; 112050)	(106640; 108550)	(107410; 109270)	(105420; 107340)

R_RAT2_MT [kb/s; kb/s]

β	CI за v=40km/h	CI за v=60km/h	CI за v=80km/h	CI за v=100km/h	CI за v=120km/h	CI за v=140km/h	CI за v=160km/h
0.8	(74905; 76563)	(57184; 59195)	(44725; 47416)	(33338; 36439)	(28306; 31144)	(22257; 25236)	(20168; 22902)
0.9	(74669; 76799)	(56898; 59481)	(44342; 47799)	(32896; 36881)	(27902; 31548)	(21833; 25660)	(19779; 23291)
0.95	(74463; 77005)	(56649; 59730)	(44008; 48133)	(32511; 37266)	(27550; 31900)	(21464; 26029)	(19440; 23630)
0.99	(74059; 77410)	(56158; 60221)	(43352; 48789)	(31754; 38022)	(26858; 32592)	(20737; 26756)	(18773; 24297)
β	CI за v=180km/h	CI за v=200km/h	CI за v=220km/h	CI за v=240km/h	CI за v=260km/h	CI за v=280km/h	CI за v=300km/h
0.8	(16642; 19156)	(14968; 17324)	(12147; 14452)	(9473; 11694)	(8713; 10786)	(8231; 10134)	(7010; 8793)
0.9	(16284; 19515)	(14632; 17659)	(11818; 14780)	(9156; 12011)	(8418; 11081)	(7961; 10405)	(6756; 9047)
0.95	(15972; 19826)	(14340; 17951)	(11532; 15066)	(8881; 12287)	(8161; 11338)	(7725; 10641)	(6535; 9268)
0.99	(15359; 20440)	(13765; 18526)	(10970; 15629)	(8339; 12829)	(7655; 11844)	(7260; 11105)	(6099; 9703)

R_RAT3_MT [kb/s; kb/s]

β	CI за v=40km/h	CI за v=60km/h	CI за v=80km/h	CI за v=100km/h	CI за v=120km/h	CI за v=140km/h	CI за v=160km/h
0.8	(36428; 37332)	(29763; 30707)	(19662; 20913)	(14556; 15810)	(12701; 13837)	(10882; 11972)	(7875; 8998)
0.9	(36300; 37460)	(29629; 30841)	(19484; 21092)	(14377; 15989)	(12539; 13999)	(10727; 12127)	(7714; 9158)
0.95	(36188; 37572)	(29511; 30959)	(19329; 21247)	(14221; 16144)	(12398; 14140)	(10591; 12262)	(7575; 9298)
0.99	(35967; 37793)	(29281; 31189)	(19023; 21552)	(13915; 16450)	(12121; 14418)	(10326; 12528)	(7301; 9572)
β	CI за v=180km/h	CI за v=200km/h	CI за v=220km/h	CI за v=240km/h	CI за v=260km/h	CI за v=280km/h	CI за v=300km/h
0.8	(5975; 7069)	(4809; 5805)	(4150; 5035)	(3489; 4367)	(3072; 3911)	(2583; 3338)	(2543; 3197)
0.9	(5819; 7225)	(4667; 5947)	(4024; 5161)	(3364; 4492)	(2953; 4030)	(2476; 3446)	(2450; 3290)
0.95	(5684; 7361)	(4544; 6071)	(3914; 5271)	(3256; 4600)	(2850; 4134)	(2382; 3539)	(2369; 3371)
0.99	(5417; 7628)	(4301; 6314)	(3699; 5487)	(3042; 4814)	(2645; 4339)	(2198; 3723)	(2210; 3531)

4.5 Заклучок за симулациските резултати и анализи

Во оваа глава беше претставен еден нов концепт на 5G јазел (мобилен и фиксен (проху)), наменет да ги искористи идните 5G мрежи на најоптимален начин, преку multi-RAT способностите и во кој има напреден модул за QoS поддршка и RAT агрегација со вертикален multi-homing и multi-streaming карактеристики. Презентираната 5G рамка водилка беше евалуирана и потврдена преку симулациски резултати и анализи за клучни QoS параметри, како просечниот агрегиран проток и мултимедиската пристапна веројатност (рата), заедно интервали за доверба за истите. Беа испитани четири различни сценарија со вклучени хетерогени мобилни и безжични мрежи со различен број на пристапни точки и различни мрежни околности. Според симулациските резултати и анализи дадени во претходната подглава, предложениот 5G мобилен уред со AQUA модул во себе и со вертикален multi-homing, покажува одлични перформанси.

Доследно на тоа, нашиот 5G јазел обезбедува највисоко ниво на пристапна веројатност до било кој мултимедиски сервис, широкопојасни битски брзини, најголем процент на задоволни корисници, поддршка на мобилност, минимална цена на чинење по сервис и оптимално искористување на ресурсите од сите достапни RAT, заради интелигентното рутирање и опслужување на сообраќајот. Освен тоа, симулациските резултати и анализи покажаа дека перформансната добивка со користењето на AQUA модулот во 5GMT е поголема доколку имаме повеќе достапни радио пристапни точки (базни станици, WLAN пристапни точки). Исто така, предложениот 5GMT може лесно да биде генерализиран и употребен во multi-RAT хетерогени 5G мобилни и безжични мрежи, вклучувајќи било која постоечка или идна RAT. Воедно, дадената рамка-водилка за 5G мобилен уред и 5G мрежи е едно од изводливите решенија за употреба во идните 5G multi-RAT мрежни архитектури.

5. QoS модул за 5G терминали со Љапунова оптимизација

Во рамките на оваа глава ќе го претставиме надграден AQUA модул за 5G јазлите кои користат Љапунова drift-plus-penalty (ток-плус-казна) оптимизациска техника за разрешување на оптимизацискиот проблем, која обезбедува методологија за дизајнирање на алгоритам кој го максимизира средниот временски проток – постигнувајќи ги мобилните широкопојасни можности и стабилизирајќи ги редовите на чекање, во поглед на минимизирање на доцнењата во редот на чекање и минимизирање на бројот на пакети кои се заостанати (чекаат) во редот. Перформансите на нашите предложени 5G терминали со вертикален multi-homing и multi-streaming карактеристики и со напреден QoS модул со Љапунова оптимизациска техника се евалуирани и потврдени користејќи симулациски и перформансни анализи за повеќе различни хетерогени мобилни и безжични сценарија и околности. Понатаму се објаснети поважните теореми и дефиниции, како и суштината на математички апарат, за потоа да преминеме на системскиот модел за 5G рамката водилка со вклучена Љапунова оптимизација. На крај се дадени аналитичките и симулациски перформанси на оваа 5G нова рамка-водилка, заедно со генерален заклучок за истиот. Решенијата и примените вклучуваат максимизација на мрежниот проток, со вклучени ограничувања за средната моќност на мрежните јазли, минимизирање на средните големини на редовите на чекање, што повлекува минимално доцнење во редовите и едновремено достигнување на системска стабилност.

5.1 Поважни дефиниции, леми и теореми за Љапуновата оптимизација

Постојат низа на различни типови стабилност за решенија на диференцијални равенки кои ги опишуваат динамичките системи. Сепак, најважниот тип на стабилност е стабилноста која ги зема во предвид решенијата блиску до точките на рамнотежа (на англ. equilibrium points). Токму оваа стабилност може да биде дискутирана со теоријата на Љапунов и стабилноста според Љапунов (Lyapunov stability). Љапуновата стабилност (Lyapunov stability) е именувана според рускиот математичар, механичар и физичар Александр Михајлович Љапунов (на рус. Алекса́ндр Миха́йлович Ляпуно́в, 6.6.1857 - 3.11.1918), кој во својата докторска дисертација именувана како „Генерален проблем на стабилноста на движење“ ([58] одбранет на Московскиот универзитет во 1892 г.) ја формулирал оваа оптимизација, заедно со целокупната теоретска основа за неа. Воедно, тој е првиот кој ги земал во предвид неопходните промени во не-линеарните динамички

системи, и разрешување на истите со линеарна теорија на стабилност, базирана на линеаризација блиска до точките на рамнотежа. Методите за стабилност според Љапунов имаат огромна и недогледна примена во разни области од техниката и науката, а во рамките на оваа докторска дисертација ги разгледуваме нивните примени во изнаоѓање на стабилност и рамнотежни решенија во сообраќајниот инженеринг и редовите на чекање во телекомуникациските системи. Љапунов во својата докторска дисертација од 1892 г. [58] и [59] предложил два методи за демонстрација на стабилност. Првиот метод развива решенија во редови, кои тогаш биле докажани дека конвергираат во одредени граници. Вториот метод, кој сега е познат како Љапунов критериум за стабилност, користи Љапунови функции $V(x)$ кои имаат аналогија со потенцијални функции за класични динамички системи [60] и [61]. Затоа, пред да преминеме на дефинирање на стабилноста според Љапунов, следува дефиниција за Љапунова функција.

Дефиниција 5.1 Ако постои непрекинато диференцијабилна реална потенцијална функција $V(x)$ таква што $V(x) > 0$ за сите $x \neq x_0$ и $V(x_0) = 0$ (т.е. V е позитивно дефинитна), тогаш $V(x)$ се нарекува функција на Љапунов (Lyapunov function).

Еден пример за Љапунова функција (која понатаму ќе ја користиме) е функцијата:

$$V(x, y) = \frac{1}{2}(x^2 + y^2).$$

Понатаму следува значајната теорема за стабилноста според Љапунов.

Теорема 5.1 (Теорема на Љапунов за стабилност) Нека D е отворено подмножество од \mathfrak{R}^n кое содржи изолирана критична точка x_0 . Нека $f(x)$ е непрекината и диференцијабилна и нека постои непрекинато диференцијабилна функција $V(x)$ која ги задоволува следниве услови:

- $V(x_0) = 0$;
- $V(x) > 0$ ако $x \neq x_0$,

каде $x \in \mathfrak{R}^n$. Тогаш доколку го разгледаме $\dot{V}(x) = \frac{d}{dt}V(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} f_i(x) \leq 0$ за сите

вредности на $x \neq 0$, имаме:

1. Ако $\dot{V}(x) \leq 0$ за сите $x \in D$, x_0 е стабилна;
2. Ако $\dot{V}(x) < 0$ за сите $x \in D$, x_0 е асимптотски стабилна;
3. Ако $\dot{V}(x) > 0$ за сите $x \in D$, x_0 е нестабилна.

Доказ за Теорема 5.1:

1. Нека $\dot{V}(x) \leq 0$ за сите $x \in D$. Избираме ε -околина O_ε на критичната точка x_0 . Во оваа околина $\dot{V}(x) \leq 0$, па позитивната полуорбита која започнува внатре во O_ε останува таму

засекогаш, независно од изборот на ε . Според тоа добиваме дека критичната точка е стабилна.

2. Нека $\dot{V}(x) < 0$ за сите $x \in D$. Тогаш значи дека Љапуновата функција монотонно расте на секоја позитивна полуорбита $x(t)$. Нека ψ_t дефинира поток за $\dot{x} = f(x), x \in \mathfrak{R}^2$. Тогаш или $V(\psi_t) \rightarrow x_0$ кога $t \rightarrow \infty$ или постои позитивна полуорбита $x(t)$ таква што:

$$V(\psi_t) \geq n > 0 \text{ за сите } t \geq t_0, \quad (5.1)$$

за некое $n > 0$. Бидејќи x_0 е стабилна, постои прстен P дефиниран со $n \leq V(x) \leq c$, кој ја содржи оваа полуорбита. Да претпоставиме дека $\dot{V}(x)$ ја достигнува својата горна граница $-N$ во P , па $\dot{V}(x \leq -N < 0), x \in P, N > 0$. Со интеграција се добива дека:

$$V(x(t)) - V(x_0(t)) \leq -N(t - t_0) < 0, \quad (5.2)$$

каде $t > t_0$ што е контрадикција со (5.1). Значи, критичната точка е асимптотски стабилна.

3. Бидејќи $\dot{V}(x) > 0$, $V(x)$ строго расте по траекториите на $\dot{x} = f(x), x \in \mathfrak{R}^2$. Ако ψ_t претставува поток за $\dot{x} = f(x), x \in \mathfrak{R}^2$ тогаш имаме дека $V(\psi_t) > V(x_0) > 0$ за $t \geq t_0$, во околина O_ε на x_0 . Според тоа,

$$V(\psi_t) - V(x_0) \geq kt \quad (5.3)$$

за некоја константа k и $t \geq 0$. Од овде, за доволно големо t , $V(\psi_t) > kt > K$, каде K е максимумот на непрекинатата функција $V(x)$ на компактно множество O_ε^c . Затоа ψ_t лежи надвор од затвореното множество O_ε и x_0 е нестабилна.

Понатаму ќе ја објаснеме Љапуновата drift-plus-penalty (ток (тенденција) -плус-казна) оптимизациска техника и теорија позади неа, заедно со сите поважни теореми, леми и дефиниции поврзани за истата.

Нека земаме стохастичен вектор со реални компоненти $\mathbf{Q}(t) = (Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_M(t))$, и нека $p(t)$ претставува реално-проценет стохастичен процес на истиот веројатносен процес како и $\mathbf{Q}(t)$. Процесот се одвива во реално време, во дискретни временски интервали (слотови) $t \in \{0, 1, 2, \dots\}$. Векторот $\mathbf{Q}(t)$ нека го претставува големината на редот на чекање (колку пакети останале во редот што не биле опслужени или на англ. queue backlogs) во мрежа од M редови. Процесот $p(t)$ нека го претставува процес на пеналот (казната), која е некоја функција чија временска средна вредност сакаме да ја ограничине до одредена целна вредност p^* , или во најмала рака да ја минимизираме, преку некое задолжување од некоја контролна акција превземена во временскиот слот t . Пример за $p(t)$ е потрошувачката на моќност, проток на сообраќај итн. Иако, претежно $\mathbf{Q}(t)$ и $p(t)$ се не-негативни функции, сепак заради генералноста на решението дозволуваме можност истите

да примаат и негативни вредности. За секој временски слот t , дефинираме $\mathbf{H}(t)$ како историја од минати $\mathbf{Q}(t)$ и $p(t)$ вредности, при што важи дека $\mathbf{H}(0) = \{ \mathbf{Q}(0) \}$ и општо за $t > 0$:

$$\mathbf{H}(t) \triangleq \{ \mathbf{Q}(0), \mathbf{Q}(1), \dots, \mathbf{Q}(t), p(0), p(1), \dots, p(t-1) \}. \quad (5.4)$$

Понатаму, ја дефинираме следната квадратна Љапунова функција:

$$L(\mathbf{Q}(t)) \triangleq \frac{1}{2} \left[\sum_{m=1}^M w_m Q_m^2(t) \right], \quad (5.5)$$

каде ограничувањата w_m се позитивни тежински фактори. Следно го дефинираме условниот Љапунов drift (ток или тенденција) на следен начин:

$$\Delta(\mathbf{H}(t)) \triangleq \mathbf{E} \{ L(\mathbf{Q}(t+1)) - L(\mathbf{Q}(t)) | \mathbf{H}(t) \}. \quad (5.6)$$

Треба да се забележи дека, $\mathbf{H}(t)$ ги содржи $\mathbf{Q}(t)$ и така, условните очекувања дадени во (5.6) се однесуваат на распределбата на $\mathbf{Q}(t+1)$. Дополнително на ова, доколку стриктно зборуваме, Љапуновиот drift е дефиниран само на условноста од $\mathbf{Q}(t)$, а не на цела историја $\mathbf{H}(t)$. Сепак ние ја вклучуваме и историјата овде, затоа што понатаму ќе ни е потребна една погенерална дефиниција која опфаќа и примена на Колмогоров закон за големи броеви. Така, Љапуновиот drift-plus-penalty алгоритам (техника) тежнее да го минимизира drift-от (5.6) и да ја минимизира средната вредност од пеналот $p(t)$, со цел да постигне стабилност. Така според Љапуновиот drift-plus-penalty алгоритмот имаме дека секој слот t мрежата контрола (QoS модулот) треба да ја набљудува моменталната историја $\mathbf{H}(t)$ и да избере контролна полиса (акција) која ќе ги минимизира границите на следното очекување:

$$\Delta(\mathbf{H}(t)) + V \cdot \mathbf{E} \{ p(t) | \mathbf{H}(t) \} \quad (5.7)$$

каде параметарот V е не-негативен контролен параметар кој се избира да има влијание врз посакуваната трговија помеѓу средната вредност на пеналот и средната вредност на големината на редот на чекање. Исто така, мораме да потенцираме дека (5.6) и (5.7) се тесно поврзана со Љапуновата стабилноста на систем дадена со Теорема 5.1, бидејќи доколку го разгледаме дефинирањето на изводот според Лајбниц, ја имаме следната нотација:

$$\dot{L}(x) = \frac{d}{dt} L(x) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta L(x)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{L(x(t + \Delta t)) - L(x(t))}{\Delta t}, \quad (5.8)$$

каде именителот под лимесот, всушност е Љапуновиот drift (ток) кој тежнееме да е што помал или еднаков на нула, за да може системот да е стабилен.

Ваква една контролна техника и алгоритам често дава пораст на стохастичните процеси $\mathbf{Q}(t)$ и $p(t)$, кои ја исполнуваат следната теорема (теорема 5.2).

Теорема 5.2 (Теорема за Љапунова оптимизација [62-66]) Нека $L(\mathbf{Q}(t))$ е дефинирано со (5.5), при што важи дека $\mathbf{E} \{ L(\mathbf{Q}(0)) \} < \infty$, и дефинираме $\mathbf{E} \{ p(t) \} \geq p_{\min}$. Нека постојат

константите $B \geq 0$, $V \geq 0$, $\varepsilon \geq 0$, и p^* , такви што за сите слотови $\tau \in \{0,1,2,\dots\}$ и сите можни вредности за $Q(\tau)$, имаме:

$$\Delta(Q(\tau)) + V \cdot \mathbf{E}\{p(\tau)|Q(\tau)\} \leq B + V \cdot p^* - \varepsilon \sum_{m=1}^M |Q_m(\tau)|. \quad (5.9)$$

Тогаш сите редови на чекање $Q_m(t)$ се стабилни по средна брзина. Покрај тоа, доколку $V > 0$ и $\varepsilon > 0$, тогаш средното временско очекување од пеналот и големината на редот на чекање задоволуваат:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbf{E}\{p(\tau)\} \leq p^* + \frac{B}{V} \quad (5.10)$$

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{|Q_m(\tau)|\} \leq \frac{B + V(p^* - p_{\min})}{\varepsilon}. \quad (5.11)$$

На крај, доколку $V=0$ тогаш (5.11) сеуште важи и доколку $\varepsilon = 0$ (5.10) сеуште важи.

Доказ за Теорема 5.2: Постави фиксен било кој слот τ . Бидејќи, за тој слот важи (5.9), може да усреднеме (да побараме математичко очекување) од двете страни на (5.9) и да го искористиме законот на итерирани средни вредности од каде добиваме:

$$\mathbf{E}\{L(Q(\tau+1))\} - \mathbf{E}\{L(Q(\tau))\} + V \cdot \mathbf{E}\{p(\tau)\} \leq B + V \cdot p^* - \varepsilon \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{|Q_m(\tau)|\} \quad (5.12)$$

Доколку сумираме по сите $\tau \in \{0,1,2,\dots,t-1\}$ за некое фиксно $t > 0$ и доколку го користиме законот за телескопски суми, тогаш имаме:

$$\mathbf{E}\{L(Q(t))\} - \mathbf{E}\{L(Q(0))\} + V \cdot \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbf{E}\{p(\tau)\} \leq (B + V \cdot p^*) \cdot t - \varepsilon \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{|Q_m(\tau)|\} \quad (5.13)$$

Доколку малку го средиме горниот израз (5.13) и земајќи ги во предвид не-негативните услови (таму каде што можат да се применат), многу е лесно да се докаже дека изразот (5.13) директно влијае врз добивањето на следните два изрази за $t > 0$:

$$\frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbf{E}\{p(\tau)\} \leq p^* + \frac{B}{V} + \frac{\mathbf{E}\{L(Q(0))\}}{V \cdot t} \quad (5.14)$$

$$\frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{|Q_m(\tau)|\} \leq \frac{B + V(p^* - p_{\min})}{\varepsilon} + \frac{\mathbf{E}\{L(Q(0))\}}{t \cdot \varepsilon} \quad (5.15)$$

од каде (5.14) се добива доколку изразот (5.13) се подели со Vt и изразот (5.15) се добива доколку (5.13) се подели со εt . Следно, доколку се земаат лимеси на (5.14) и (5.15) такви што $t \rightarrow \infty$, се добиваат (5.10) и (5.11) соодветно.

Понатаму, со следната лема се доближуваме до дефиницијата што е тоа стабилност на редот. Воедно лемата што следува (лема 5.1) произлегува од неравенството на Чебјишев

(на англ. Chebyshev inequality, на рус. Неравенство Чебышёва) за реален стохастички процес $Y(t)$ дефиниран за $t \in \{0,1,2,\dots\}$, константа $\alpha \in \mathfrak{R}$ и параметар $\varsigma > 0$, кое вели:

$$\Pr[|Y(t) - \alpha| \geq \varsigma] \leq \frac{\mathbf{E}\{(Y(t) - \alpha)^2\}}{\varsigma^2}. \quad (5.16)$$

Лема 5.1: Доколку $Y(t)$ го задоволува следното:

$$\sum_{t=1}^{\infty} \mathbf{E}\{(Y(t) - \alpha)^2\} < \infty \quad (5.17)$$

тогаш важи дека $\lim_{t \rightarrow \infty} Y(t) = \alpha$ (со вер.1), т.е. променливите $Y(t)$ конвергираат кон α со веројатност 1.

Последица 1 од Лема 5.1: (Стабилност на брзина на редови со конечна варијанса [62] и [66]) Доколку $Q(t)$ е реален стохастичен процес дефиниран преку временски слотови $t \in \{0,1,2,\dots\}$, тогаш тој задоволува:

$$\sum_{t=1}^{\infty} \frac{\mathbf{E}\{Q^2(t)\}}{t^2} < \infty \quad (5.18)$$

и тогаш:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{Q(t)}{t} = 0 \quad (\text{со веројатност } 1). \quad (5.19)$$

Особено, ова важи секогаш кога има конечна константа $C > 0$ таква што $\mathbf{E}\{Q^2(t)\} \leq C$ за сите t .

Доказ за Последицата 1 од Лема 5.1: Оваа последица следува директно од Лема 5.1 преку дефинирање на како $Y(t) = Q^2(t)/t^2$ и $\alpha = 0$. Специјалниот случај кога $\mathbf{E}\{Q^2(t)\} \leq C$ следува бидејќи важи $\sum_{t=1}^{\infty} \frac{C}{t^2} < \infty$.

Доколку редот на чекање го означиме со $Q(t)$, тогаш стабилноста дефинирана со (5.19) често се нарекува стабилност за брзина (rate stability) на редот на чекање. Понатаму, доколку побараме средна вредност на $Q(t)$ и важи: $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mathbf{E}\{Q(t)\}}{t} = 0$, тоа се нарекува средна стабилност за брзината (mean rate stability) на редот на чекање. Постојат низа на стабилности за редот на чекање, но овие два се најважни за овој дел од истражувањата.

Следно во овој дел е теоремата за големи броеви од Колмогоров (на англ. Kolmogorov law of large numbers) или наречена силен закон за верижните разлики (на англ. martingale differences), чии последици се особено важни за понатамошните Љапунски оптимизации.

Теорема 5.3: (Колмогоров силен закон за верижните разлики [62], [66], [67-69])

Претпоставиме постоење на стохастичен процес $X(t)$ за $t \in \{0,1,2,\dots\}$ таков што:

- $\mathbf{E}\{X(t)|H_x(t)\}=0$ за сите $t \in \{0,1,2,\dots\}$ и сите $H_x(t)$, дефинирани како истории на $X(t)$, т.е. $H_x(t)=\{X(0), X(1), \dots, X(t-1)\}$.
- Вторите моменти $\mathbf{E}\{X^2(t)\}$ се конечни за сите t и е задоволено:

$$\sum_{t=1}^{\infty} \frac{\mathbf{E}\{X^2(t)\}}{t^2} < \infty \quad (5.20)$$

Тогаш:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^{t-1} X(\tau) = 0 \quad (\text{со веројатност } 1). \quad (5.21)$$

Доказите за ова теорема се дадени во [62], [67-69] како едноставна апликација на Колмогоровиот закон за големи броеви за верижна разлика. Воедно оваа теорема ни треба за последиците што следат, како и за варијанти од Љапуновата оптимизациска теорема кога се докажуваат тврдења кои важат со веројатност 1.

Од горната теорема следуваат следната Последица 2 од Теорема 5.3: Претпоставиме постоење на стохастичен процес $X(t)$ за $t \in \{0,1,2,\dots\}$ таков што:

- Постои конечна константа B таква што $\mathbf{E}\{X(t)|H_x(t)\} \leq B$ за сите $t \in \{0,1,2,\dots\}$ и сите $H_x(t)$, дефинирани како $H_x(t)=\{X(0), X(1), \dots, X(t-1)\}$.
- Вторите моменти $\mathbf{E}\{X^2(t)\}$ се конечни за сите t и е задоволено (5.20).

Тогаш имаме:
$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^{t-1} X(\tau) \leq B \quad (\text{со веројатност } 1). \quad (5.22)$$

Доказот за оваа последица е покажан во [62], а самата идеја во него е воведување на нов процес $\hat{X}(t) = X(t) - \mathbf{E}\{X(t) | H_x(t)\}$ и потоа применување на резултатите од Теорема 5.3 на процесот $\hat{X}(t)$.

5.2 Преглед на слични примени на Љапуновата оптимизација

Анализите и дизајнерските методологии и техники за 5G рамката-водилка претставена во оваа глава е базирана на адаптирање на редовите за чекање со Љапуновите оптимизациски техники, поконкретно со Љапуновиот drift-plus-penalty алгоритмот. Љапуновите оптимизациски техники се многу моќна алатка за оптимизација на средните вредности на редовите на чекање (и цели мрежи од редови на чекање), при што даваат здружена стабилност, ефикасност и перформансна оптимизација на целиот динамички систем (мобилната и безжична мрежа). Така една едноставна верзија од Љапуновиот drift-

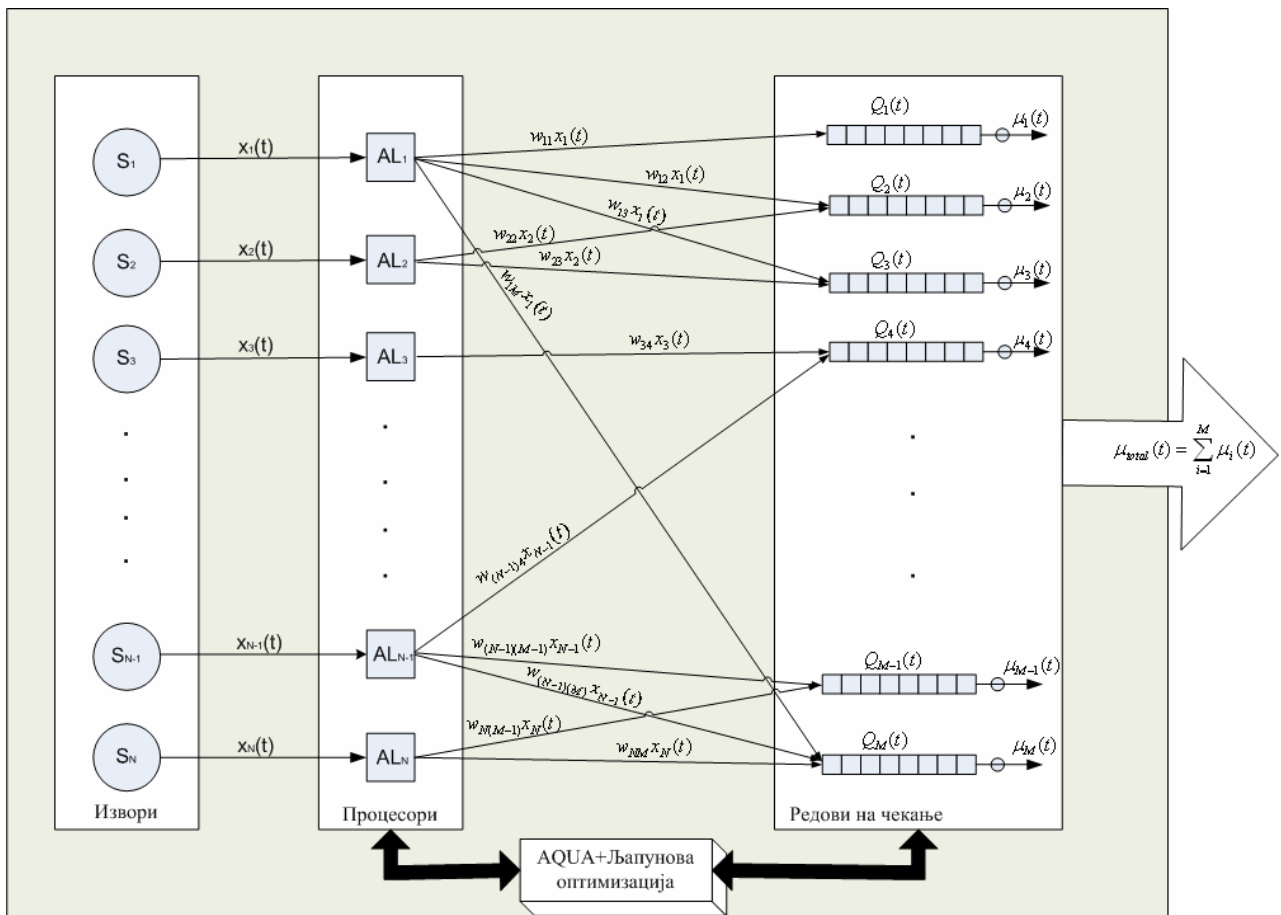
plus-penalty алгоритмот е имплементиран и во [64] за максимизирање на протокот и искористеноста, во поглед на стабилноста, додека поедноставни модификации се претставени и во други контексти [63] и [65]. Навистина овој алгоритам има голема примена во телесообраќајниот инженеринг и во стабилноста на телекомуникациските системи.

Сепак, веројатно за прв пат една ваква Љапунова drift-plus-penalty техника во литературата прв пат била применета за безжични мрежи во [70] од страна на Tassiulas и Ephremides, каде е употребен стохастичен Љапунов drift за да се развие алгоритам за здружено оптимално рутирање и опслужување за телекомуникациските мрежи. Понатаму, Tassiulas и Ephremides во [71] претставуваат single-hop радио мрежа со случајна променлива конективност, со својства на стабилност, и полиса која го минимизира доцнењето од редот на чекање, но истите не го проучуваат проблемот на алокација на ресурси под претпоставка на повеќе-вредносни конективности. Сепак, од тогаш Љапуновиот drift постанал една од најмоќните техники за обезбедување на стабилни опслужувачки стратегии за мобилни и безжични системи и мрежи [72-85], компјутерски мрежи и комутатори [86], ad-hoc мобилни мрежи [87], безжични сензорски мрежи [88] и безжични mesh мрежи [89]. Исто така, се развиени многу други методи за здружена стабилност и оптимизација на искористување преку Љапуновиот drift за стохастички мрежи, како во [63] и [65] за примена на контрола на поток и минимизација на енергија. Подруг пристап е развиен во [79], користејќи стохастична градиентска теорија и трансформации на флуидни модели. Освен тоа, пример на сервиси кои користат максимизација на средниот мрежен проток со ограничувања за средната моќност, минимизирајќи ја средната потрошувачка на моќност и постигнувајќи мрежна стабилност се дадени во [63], [65], [75], [89] и [90].

За разлика од сите горе споменати блиски трудови и истражувања, во рамките на оваа глава од докторската дисертација, применуваме верзија на Љапунов drift-plus-penalty техника за идните 5G мобилни и фиксни терминали, понатака во текстот наречени со заедничко име 5G терминали (5GT-и), постигнувајќи висока искористеност на мрежните ресурси, спектрална ефикасност, оптимално користење на RAT-ите, мрежна и системска стабилност и високо ниво на QoS (максимизирање на просечниот проток по корисник, минимизирање на доцнењето во редовите на чекање итн.) за било кој сервис. Освен тоа, сите промени и подобрувања се имплементирани на мрежно ниво (IP ниво) на 5GT, бидејќи заедничкото нешто за сите постојни и идни RAT-и, што ги обединува сите како технологија, несомнено е IP и мрежното ниво.

5.3 Системски модел со Љапунова оптимизација за 5GT со оптимално опслужување на мултимедиски пакети и максимизација на проток

Системскиот модел за предложениот 5G јазел со Љапунова оптимизација во себе е прикажан на слика 5.1. Самиот 5GT е јазел со вклучени повеќе интерфејси, т.е. има (M) интерфејси, по еден за секоја различна радио пристапна технологија. Освен тоа, мобилниот 5G јазел може да се движи со различна брзина, или доколку е фиксен, тогаш тој е 5G проху сервер кој се наоѓа во јадрото на 5G мрежата. Во самиот 5GT постои Advanced QoS-based User-centric Aggregation plus Lyapunov optimization (AQUAplus) алгоритам. Треба да напоменеме дека овој алгоритам е следен чекор напред од AQUA алгоритмот (дефиниран и објаснет во глава 4) кој е поставен во 5G мобилен уред и AQUA проху серверите, каде иницијално AQUA алгоритмот воведува високо ниво на QoS и вертикален multi-homing (избира RAT/и за даден сервис) со оптимизациски проблем решен или со линеарно програмирање (LP) или со генетски алгоритми (GA), но без Љапунова оптимизација (презентирана во оваа глава 5). Како што се гледа од слика 5.1, системскиот модел се состои од три главни дела: Извори на информации, процесори и редови на чекање (цела мрежа од редови на чекање, по еден ред на чекање за секој мрежен интерфејс).



Слика 5.1. Системски модел на 5GT со Љапунова оптимизација.

Табела 5.1 Листа со променливи, процеси и вектори за 5GT системскиот модел

w_{ij}	Доделени тежински фактори, избрани во интервалот $[0,1]$, со ограничување: $\sum_{j=1}^M w_{ij} = 1$
$x_i(t)$	Изворни процеси на доаѓање на пакети
$i=1, 2, \dots, N$	Индекси на изворот или процесорот AL
$\mathbf{Q}(t)=(Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_M(t))$	Реален ред на чекање кој се развива во слотовите $t \in \{0,1,2,3,\dots\}$
$A_m(t) = \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t)$	Променлива за брзината на доаѓање за m -тиот ред на чекање
$\mu_m(t)$	Променлива за излезната брзина на опслужување на m -тиот ред на чекање, каде $m \in \{1,2,3,\dots,M\}$
$\psi(t) \triangleq (\mu_1(t), \dots, \mu_M(t); A_1(t), \dots, A_M(t))$	Состојбен процес на случајната мрежа со редови на чекање, кој е независен и идентично распределен преку секој временски слот
$\alpha_L(t)$	Променлива за акцијата на контролната полисна
p_m^{av}	Потребна просечна (временска) потрошувачка на моќност
$A_{\psi(t)}$	Множество што ги содржи сите можни контролни акции
$\theta(\bar{\mathbf{x}}) \triangleq \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,m} \bar{x}_i(t)$	Раздвојна функција на искористување за вектор, која е објектна функција
$\bar{\mathbf{p}} \triangleq (\bar{p}_1(t), \bar{p}_2(t), \dots, \bar{p}_M(t))$	Вектор со временските средни вредности на моќностите за секој RAT интерфејс
$\bar{\mathbf{x}} \triangleq (\bar{x}_1(t), \bar{x}_2(t), \dots, \bar{x}_N(t))$	Вектор со временските средни вредности на процесите на доаѓање

Разгледуваме N апликациски извори, кои се стационарни независни процеси со интензитет (брзина) на доаѓање на пакети $x_i(t)$ во временскиот слот t . Секој изворен дојдовен процес $x_i(t)$ влегува во соодветен процесор AL_i во делот со Процесорите. Во овој дел, според AQUAplus оптимизацијата во AL процесорите се прави вертикален multi-streaming (и multi-homing доколку целиот сообраќаен поток оди само низ една избрана RAT, т.е. еден избран ред $Q_i(t)$) процеси на делење на еден поток, со цел да оди преку повеќе различни редови на чекање (во делот Редови на чекање на слика 5.1). Сите искористени променливи, процеси и вектори, заради полесна прегледност се дадени во табела 5.1. После секој ред на чекање, се обидуваме да постигнеме максимална излезна опслужувачка брзина (рата) $\mu_j(t)$ на секој мрежен интерфејс $j=1,2,\dots,M$, така што сумата на сите излезни опслужувачки брзини, во текот на времето ќе биде со максимална вредност. Доколку ја земаме во предвид контролната акција $\alpha_L(t)$ која се прави секој слот t со знаење на моменталната состојба (овде именувана $\psi(t)$), истата се избира од одредено апстрактно множество на акции $A_{\psi(t)}$. За секој 5G јазел применуваме стохастична рамка-водилка за максимизирање на полесноста од секој поединечен сообраќаен поток (stream) врз база на мрежниот и системскиот модел, така што го земаме во предвид следниот оптимизациски проблем во uplink во мобилниот 5GT (или доколку гледаме од страната на 5G ргоху серверот (фиксниот 5G јазел), тоа е во downlink насока):

Максимизирај: $\overline{\theta(\mathbf{x})}$

Во зависност од: 1. Средната временска брзина на потокот (stream-от) низ m -тиот ред на чекање, е помал или еднаков на средната временска вредност од максималната излезна опслужувачка брзина на интерфејсот m , т.е.:

$$\sum_{i=1}^N w_{i,m} \overline{x_i(t)} \leq \mu_m^{\max}, \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (5.23)$$

2. Сите редови на чекање $Q_m(t)$ имаат средна стабилност на брзина, т.е. важи:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mathbf{E}\{|Q_m(t)|\}}{t} = 0, \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (5.24)$$

3. Посакуваните временски средни вредности за ограничувањата на моќноста се исполнети [65], i.e.:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \overline{p_m(t)} \leq p_m^{av}, \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (5.25)$$

4. За акцијата на контролната полиса имаме дека: $\alpha_L(t) \in A_{\psi(t)}$.

За $t > 0$, горните променливи ја имаат следната временска средна вредност низ првите t слотови, дефинирани за $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$, со:

$$\overline{x_m(t)} \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbf{E}\{x_m(\tau)\}; \quad \overline{p_m(t)} \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbf{E}\{p_m(\tau)\}. \quad (5.26)$$

5.3.1 Љапунова drift-plus-penalty оптимизација и AQUAplus алгоритам

За решавање на погоре дефинираниот оптимизациски проблем користиме Љапунова drift-plus-penalty метода за оптимизација (користејќи фиксен контролен параметар за пеналот (казната) V) објаснета во продглава 5.1 [66]. Така, ги обезбедуваме ограничувањата 1, 2 и 3 на оптимизацискиот проблем со конкретниот ред на чекање:

$$Q_m(t+1) = \max[Q_m(t) + A_m(t) - \mu_m(t), 0] \quad (5.27)$$

и виртуелен ред на чекање за секој m интерфејс:

$$Z_m(t+1) = \max[Z_m(t) + \xi_m(t), 0], \quad (5.28)$$

За кои е лесно да се покаже дека имаат средна стабилност за брзината [66] (истите се со конечна големина на баферите). Ги воведуваме виртуелните редови на чекање, со цел да обезбедиме задоволување на посакуваните генерални временски средни вредности на еднаквост и нееднаквост од ограничувањето (5.25). Во (5.28) променливите $\xi_m(t)$ се помошни променливи за $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$, дефинирани како $\xi_m(t) \triangleq p_m(t) - p_m^{av}$. Освен тоа, ако го искористиме законот за телескопски суми над (5.28), тогаш за секое $t > 0$ имаме:

$$Z_m(t) - Z_m(0) \geq \sum_{\tau=0}^{t-1} \xi_m(\tau), \quad (5.29)$$

па затоа, доколку поделиме со t и побараме лимес кога $t \rightarrow \infty$ добиваме:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{Z_m(t)}{t} - \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{Z_m(0)}{t} \geq \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \xi_m(\tau), \quad (5.30)$$

од каде следува дека $Z_m(t)$ е стабилен по брзина за секое m , бидејќи лимесот $Z_m(t)/t \rightarrow 0$ со веројатност 1, кога $t \rightarrow \infty$, според тоа ограничувањето (5.25) е исполнето со веројатност 1.

Понатаму, дефинираме комбинирачки вектор од редовите на чекање $\mathbf{S}(t) \triangleq [\mathbf{Q}(t), \mathbf{Z}(t)]$ и Љапунова функција:

$$L(\mathbf{S}(t)) \triangleq \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^M (Q_i^2(t) + Z_i^2(t)) \right]. \quad (5.31)$$

Доколку дефинираме условен Љапунов drift за еден чекор како: $\Delta(\mathbf{S}(t)) \triangleq \mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(t+1)) - L(\mathbf{S}(t)) | \mathbf{S}(t)\}$, Тогаш Љапуновиот drift-plus-penalty израз е дефиниран со:

$$\Delta(\mathbf{S}(t)) + V \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{u}(\alpha_L(t), t) | \mathbf{S}(t)\} \quad (5.32)$$

Погоре, дефинираме “казнен” (penalty) вектор со процеси како $\mathbf{u}(\alpha_L(t), t) = (u_0^1(t), u_0^2(t), \dots, u_0^M(t))$, каде што $u_0^m(t) = -\sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t)$, за $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$. Средната временска вредност за овие казнени (пеналски) процеси сакаме да ја направиме помала од (или еднаква на) некоја целна вредност u_0 . Овие казни ги претставуваат износите за влезните сообраќајни доаѓања во редовите на чекање, кои се предизвикани од контролната полисна акција $\alpha_L(t)$ во временскиот слот t . Нашиот AQUAplus алгоритам тежнее да ја максимизира горната граница на (5.32) за сите t , и сите можни вредности на $\mathbf{S}(t)$, и за сите контролни параметри $V \geq 0$. Да претпоставиме дека $u_{0\min}^m$ е детерминистична долна граница на $u_0^m(t)$ за сите m интерфејси во секој временски слот t , згора на тоа, да земаме дека имаме конечна константа $K > 0$, таква што за било кој избор на контролната акција $\alpha_L(t)$ во слот t имаме:

$$\mathbf{E}\{A_m(\alpha_L(t), \psi(t))^4\} \leq K \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (5.33)$$

$$\mathbf{E}\{\mu_m(\alpha_L(t), \psi(t))^4\} \leq K \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (5.34)$$

$$\mathbf{E}\{u_m(\alpha_L(t), \psi(t))^4\} \leq K \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (5.35)$$

каде што очекувањата се земени во поглед на распределбата на независниот случаен процес $\psi(t)$, и можни случајни одлуки за $\alpha_L(t) \in A_{\psi(t)}$. Доколку ги квадрираме (5.27) и (5.28); тогаш доколку ги собереме според (5.31) и го применеме (5.32), преку додавањето на “казната” $V \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{u}(\alpha_L(t), t) | \mathbf{S}(t)\}$ на двете страни, воопшто не е тешко да се покаже дека

изразот (5.32) ја има следната горна граница за сите слотови t (повеќе детали види во подглава 5.1 и [66]):

$$\begin{aligned} \Delta(\mathbf{S}(t)) + V \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{u}(\alpha_L(t), t) | \mathbf{S}(t)\} \leq B - V \mathbf{E}\left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t) | \mathbf{S}(t) \right\} \\ + \sum_{m=1}^M Q_m(t) \mathbf{E}\left\{ \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t) - \mu_m(t) | \mathbf{S}(t) \right\} \quad (5.36) \\ + \sum_{l=1}^M Z_l(t) \mathbf{E}\{\xi_l(t) | \mathbf{S}(t)\}. \end{aligned}$$

Овде B е константа која се однесува на најголемите вредности (најлошиот случај) на вторите моменти за процесите $A_m(t)$, $\xi_m(t)$, и $\mu_m(t)$, т.е.:

$$\begin{aligned} B \triangleq \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^M \mathbf{E}\left\{ \sum_{i=1}^N \left((w_{i,m} x_i(t))^2 + \mu_m^2(t) \right) | \mathbf{S}(t) \right\} \right) + \\ + \frac{1}{2} \left(\sum_{l=1}^M \mathbf{E}\{\xi_m^2(t) | \mathbf{S}(t)\} \right). \quad (5.37) \end{aligned}$$

Понатаму, целта на нашиот AQUAplus алгоритам е: да ги минимизира десните вредности на неравенството (5.36), преку избор на најсоодветна акција за контролната полиса, при што $\alpha_L(t) \in A_{\psi(t)}$ секој слот t , набљудувајќи го реалните и виртуелните вектори со редови на чекање $\mathbf{Q}(t)$, $\mathbf{Z}(t)$ и моменталната мрежна состојба $\psi(t)$. На овој начин, AQUAplus алгоритмот го решава погоре дискутираниот оптимизациски проблем, преку разбирање (анализа) и скратување на истиот во посебни алгоритми за оптимизација, на следниот начин:

1) Поточна (или stream) контрола и QoS сообраќајно рутирање преку различни RAT интерфејси во 5GT (вертикален multi-homing и multi-streaming својства): Секој слот t , за секој ред на чекање $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ набљудувај ги $x_m(t)$, конкретните редови на чекање $Q_m(t)$ (5.27) и виртуелните редови на чекање $Z_m(t)$ (5.28) и избори $x_m(t)$ да оди преку тој ред на чекање, така што ќе се минимизира:

$$\sum_{m=1}^M Q_m(t) \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t) - V \cdot \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,j} x_i(t), \quad (5.38)$$

$$\text{во зависност од: } 0 \leq \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t) \leq \mu_m^{\max}, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \text{ и } \sum_{j=1}^M w_{i,j} = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (5.39)$$

2) Средна алокација на моќност: Секој слот t , набљудувај го виртуелниот ред на чекање $Z_m(t)$ (5.28) за $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ и додели вектор со моќности $\mathbf{p}(t)$ за секој интерфејс (за да има опслужување за uplink/downlink преносот, кое е свесно за моќноста), како решение за помошните променливи $\xi_m(t)$ така што:

минимизирај: $\sum_{l=1}^M Z_l(t) \xi_l(t)$

во зависност од: $-p_m^{av} \leq \xi_m(t) \leq \xi_m^{\max}, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}$

3) Ажурирање на редовите на чекање: За $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ ажурирај ги реалните редови на чекање $Q_m(t)$ и виртуелните редови на чекање $Z_m(t)$ според (5.27) и (5.28), соодветно.

4) Downlink пакетско рутирање во мобилниот 5GT: Пакетите кои доаѓаат од сите RAT интерфејси (од пристапните базни станици и пристапни точки) и имаат насока кон апликациското ниво, се примаат во приемни редови на чекање (различни од погоре дефинираните $Q_m(t)$ и $Z_m(t)$ редови), при што само се испраќаат од страна на AQUAplus модулот до Горното IP мрежно ниво. Таму истите се синтетизираат (се обединуваат во еден поток (stream) $x_m(t)$) и се упатуваат кон апликациското ниво до соодветниот одговарачки сервис.

5.3.2 Перформансни граници на AQUAplus алгоритмот

Да земеме дека имаме константа $C \geq 0$ таква што нашиот AQUAplus алгоритам избира најсоодветни контролни полисни акции $\alpha_L(t) \in A_{\psi(t)}$ секој слот t , врз база на реалните и виртуелни редови $Q(t)$, $Z(t)$, т.е. со комбинираниот вектор за редовите на чекање $S(t)$, и ја минимизира десната страна од неравенството (5.36). Тогаш, ако е така, ја имаме следната теорема:

Теорема 5.4 (Перформансни граници за AQUAplus): Доколку претпоставиме дека процесот на надоаѓање на пакети и информациите за состојбата на каналот за секој временски слот е стохастичен независен и идентичен процес (на англ. i.i.d.) за сите слотови со веројатности $\pi(\psi)$, проблемот со максимизирање на $\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,m} \overline{x_i(t)}$ и (5.23-5.25) е изводлив, па доколку фиксираме некоја променлива за константата $C \geq 0$, користејќи C-додавачка апроксимација за AQUAplus алгоритмот секој слот t , и имајќи соодветна контролна полисна акција ($\alpha_L(t)$), имаме:

1) Очекуваните вредности за временски усреднувања задоволуваат:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E} \{ u_0^m(\tau) \} \geq X_{\Sigma}^{\text{optim}} - \frac{B+C}{V} \quad (5.40)$$

каде $X_{\Sigma}^{\text{optim}}$ е оптималниот infimum за средната вредност на тежинската сума со понудените брзини во мрежата со редови на чекање, достиглива со било која полиса која го стабилизира редот и задоволува ограничувања на средната моќност за секој интерфејс и низа други потребни ограничувања. Исто така, B е дефинирана со (5.37).

2) Доколку претпоставиме дека има константи $K>0$, $\rho \geq 0$ и $d>0$ за сите (по можност случајни) избори на контролна полисна акција $\alpha_L(t)$ каде (5.33)-(5.35) е задоволено и следните ограничувања се задоволени:

$$\mathbf{E}\{\xi_m(\alpha_L(t), t)\} \leq -d + \rho \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (5.41)$$

$$\mathbf{E}\{A_m(\alpha_L(t), t) - \mu_m(\alpha_L(t), t)\} \leq -d + \rho, \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (5.42)$$

$$\mathbf{E}\left\{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(\alpha_L(t), t)\right\} \leq X_\Sigma^{optim} + \rho. \quad (5.43)$$

$$\text{Тогаш важи: } \limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{Q_m(\tau) + Z_m(\tau)\} \leq \frac{B+C - V(X_\Sigma^{optim} + u^{\min})}{d} \quad (5.44)$$

каде $u^{\min} \leq \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\alpha_L(\tau), \tau)\} \leq u^{\max}, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, t-1\}$.

3) Реалните и виртуелните редови на чекање $Q(t)$ и $Z(t)$ имаат средна стабилност на брзините, и сите потребни услови за оптимизацискиот проблем (5.33)-(5.35) се задоволени.

Доказ за Теорема 5.4:

Заради изборот на најсоодветната контролна полисна акција $\alpha_L(t) \in A_{\psi(t)}$ во секој слот t , од страна на AQUAplus алгоритмот, набљудувајќи го здружениот вектор на редовите на чекање $\mathbf{S}(t)$, конечната константа $C \geq 0$, и добивање на минимум за изразот од десната страна на (5.36), за сите слотови t и за сите можни вектори $\mathbf{S}(t)$ имаме:

$$\begin{aligned} \Delta(\mathbf{S}(t)) + V \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{u}^*(\alpha_L(t), t) | \mathbf{S}(t)\} &\leq B+C - \\ &- V \mathbf{E}\left\{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(\alpha_L^e(t), t) | \mathbf{S}(t)\right\} + \\ &+ \sum_{m=1}^M Q_m(t) \mathbf{E}\left\{\sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(\alpha_L^e(t), t) - \mu_m(\alpha_L^e(t), t) | \mathbf{S}(t)\right\} + \\ &+ \sum_{l=1}^M Z_l(t) \mathbf{E}\{\xi_l(\alpha_L^e(t), t) | \mathbf{S}(t)\} \end{aligned} \quad (5.45)$$

каде $\alpha_L^e(t)$ е друга одлука за акцијата, која може да се имплементира на слотот t . Доколку го фиксираме d во интервалот $(0, d_{\max}]$, и $\rho > 0$, плус доколку ја користиме контролната полисна акција $\alpha_L^e(t)$ дизајнирана да постигне (5.41)-(5.43), може да се забележи дека оваа полисна акција прави независни одлуки од $\mathbf{S}(t)$ (вредностите $x_i(\alpha_L(t), t)$, $\mu_m(\alpha_L(t), t)$, и $\xi_m(\alpha_L(t), t)$ се независни од конкретната големина на редот на чекање и состојбата $\mathbf{S}(t)$), па имаме дека:

$$\begin{aligned}
\Delta(\mathbf{S}(t)) + V \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{u}^*(\alpha_L(t), t) | \mathbf{S}(t)\} \leq \\
B + C - V(X_\Sigma^{optim} + \rho) + \\
+ (\rho - d) \sum_{m=1}^M Q_m(t) + (\rho - d) \sum_{l=1}^M Z_l(t).
\end{aligned} \tag{5.46}$$

Исто така, (5.46) задоволува за сите $\rho > 0$. Сега, доколку го побараме лимесот кога $\rho \rightarrow 0$ имаме:

$$\begin{aligned}
\Delta(\mathbf{S}(t)) + V \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{u}^*(\alpha_L(t), t) | \mathbf{S}(t)\} \leq \\
B + C - V(X_\Sigma^{optim}) - \\
-d \sum_{m=1}^M (Q_m(t) + Z_m(t)).
\end{aligned} \tag{5.47}$$

Понатаму, нека границите на моментите (5.33)-(5.35) се задоволени и применувајќи ја Теорема 5.2 (Теорема за Љапунова оптимизација [62-66]), така што ограничувањата (5.23)-(5.25) се задоволени, преку користењето на законот за телескопски суми над слотовите $\tau \in \{0, 1, 2, \dots, t-1\}$ за $t > 0$, изразот (5.47) преминува во:

$$\begin{aligned}
\mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(t))\} - \mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(0))\} + V \cdot \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\tau)\} \leq \\
(B + C - V \cdot X_\Sigma^{optim}) \cdot t - \\
-d \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M (Q_m(\tau) + Z_m(\tau)).
\end{aligned} \tag{5.48}$$

Следно, подсредувајќи ги изразите и занемарувањето на не-негативните изрази, каде што е тоа дозволено, лесно е да се покаже дека неравенството (5.48) директно влијае во добивањето на следните две неравенства за сите $t > 0$:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{t} \cdot \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\tau)\} \leq \left(\frac{B+C}{V} - X_\Sigma^{optim} \right) - \\
-\frac{d}{V \cdot t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M (Q_m(\tau) + Z_m(\tau)) \\
+ \frac{\mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(0))\} - \mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(t))\}}{V \cdot t}.
\end{aligned} \tag{5.49}$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M (Q_m(\tau) + Z_m(\tau)) &\leq \frac{B+C}{d} \\
&- \frac{V}{d} \left(X_{\Sigma}^{optim} + \frac{1}{t} \cdot \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\tau)\} \right) + \\
&+ \frac{\mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(0))\} - \mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(t))\}}{d \cdot t}.
\end{aligned} \tag{5.50}$$

При тоа, (5.49) следи од (5.48) кога истиот ќе го поделиме со V и со t , а (5.50) следува од (5.48), кога изразот (5.48) ќе го поделиме со d и t . Сега, доколку повикаме дека средните временски очекувања за сумата од пеналите за сите $u_0^m(\alpha_L(t), t)$ е детерминистички ограничена од долу со u^{\min} (по можност негативна вредност) и земајќи лимес на (5.50) така што $t \rightarrow \infty$, го докажува (5.44). Конечно, со барање на лимес од (5.49) така што $t \rightarrow \infty$ плус множење на резултантното неравенство со -1 го докажува (5.40).

Според ова, овој AQUAplus алгоритам ги задоволува посакуваните средни временски ограничувања за казните (пеналите), ги стабилизира сите редови на чекање, достигнува максимална излезна брзина на опслужување (uplink и downlink проток), и дава средни временски казни за $u_0^m(t)$ кои се $-B/V$ од оптималната вредност X_{Σ}^{optim} . Перформансната дупка $-B/V$ може да се направи незначително мала, преку избор на соодветни V контролни параметри доволно големи (види (5.40)). Од друга страна, трговијата за временските средни вредности за големините на редовите на чекање се $O(-V)$ (види (5.44)) и треба да се внимава да не се зголемуваат овие контролни параметри премногу, при што секогаш да се води сметка и за големините на редовите на чекање, бидејќи истите директно влијаат врз просечното доцнење на редот (според законот на Литл [96] и [97]).

5.3.3 Потрошена моќност и времетраење на батеријата за 5GT со AQUAplus алгоритам

Нека земеме дека $Z_m(t) \leq Z_m^{\max}$ каде што горната граница на виртуелниот ред на чекање $Z_m(t)$ ја дефинираме како:

$$Z_m^{\max} \triangleq Q_m^{\max} + (p_m^{\max} - p_m^{av}) \text{ за секое } m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$$

каде што Q_m^{\max} е максималната големина на реалниот ред $Q_m(t)$, при што важи: $Q_m(t) \leq Q_m^{\max}$. Од друга страна p_m^{\max} е максималната моќност која може да се развие на интерфејсот m , а p_m^{av} е средната моќност за дадениот интерфејс m , како што е дефинирано и претходно.

Следно ќе покажеме дека: за секој позитивен број T , кој број е времетраењето на еден временски интервал (временски слот T), вкупната потрошена моќност на секој мрежен интерфејс m , за време на било кој временски слот T , е одредена со горната граница на изразот $T p_m^{av} + Z_m^{max}$, т.е. важи следното неравенство:

$$\sum_{\tau=t_0}^{t_0+T-1} p_m(\tau) \leq T \cdot p_m^{av} + Z_m^{max}, \quad \forall t_0 \in \{0,1,2,\dots\} \text{ и } \forall T \in \{1,2,3,\dots\} \quad (5.51)$$

За да го докажеме горенаведеното, тргнуваме од равенката (5.28), доколку замениме дека $\xi_m(t) \triangleq p_m(t) - p_m^{av}$. Па според тоа, го имаме следното:

$$Z_m(t+1) = \max[Z_m(t) + p_m(t) - p_m^{av}, 0], \quad (5.52)$$

Применувајќи ја погоре дадената горна граница на овој виртуелен ред, т.е. земајќи дека $Z_m(t+1) \leq Z_m^{max}$ го имаме следното неравенство:

$$\max[Z_m(t) + p_m(t) - p_m^{av}, 0] \leq Z_m^{max}. \quad (5.53)$$

Нека тргнеме од динамичката равенка (5.52), и знаејќи дека за секој временски слот $\tau \geq 0$ важи следното:

$$Z_m(\tau+1) - Z_m(\tau) \geq p_m(\tau) - p_m^{av}. \quad (5.54)$$

Доколку се собере горната равенка (5.54) по $\tau \in \{t_1, \dots, t_2-1\}$ и користејќи го законот за телескопски суми (метод на разлики, т.е. диференцијали) имаме:

$$Z_m(t_2) - Z_m(t_1) \geq \sum_{\tau=t_1}^{t_2-1} p_m(\tau) - \sum_{\tau=t_1}^{t_2-1} p_m^{av}. \quad (5.55)$$

Следно, заменуваме за $t_1=t_0$, $t_2= t_0+T-1$, плус земаме во предвид дека p_m^{av} е константа, па изразот (5.55) се трансформира во:

$$Z_m(t_0 + T - 1) - Z_m(t_0) \geq \sum_{\tau=t_0}^{t_0+T-1} p_m(\tau) - T \cdot p_m^{av}. \quad (5.56)$$

И бидејќи она што е на левата страна од неравенството (5.55) сигурно е помало или еднакво на Z_m^{max} па од таму, со мало преуредување, следува дека важи (5.51).

Со тоа, тврдењето за вкупната потрошена моќност за овој модел е докажана, и е помала или еднаква на $T p_m^{av} + Z_m^{max}$, т.е. зависи пропорционално од времето на употреба на интерфејсите, средната дозволена моќност и од максималната големина на мрежните бафери. Колку овие наведени параметри се помали, толку моќноста може да биде помала и да се троши помалку електрична енергија за напојување на батеријата на уредот, а со тоа се зголемува животниот век (времметраењето) на батеријата.

Понатаму, доколку го набљудуваме мрежниот интерфејс m , кој е безжичен предавател и приемник, истиот нека користи одредена иницијална енергија E_m од батеријата со вкупна енергија E (каде што $E = \sum_{m=1}^M E_m$). Тогаш, гарантираниот животен век (t_{bat}) на батеријата од еден ваков јазол може да се изведе од зависноста помеѓу енергијата и моќноста, т.е. од следната појдовна точка:

$$P_{vкупна}(t) = \frac{E}{t_{bat}} \quad (5.57)$$

и од фактот дека само за еден интерфејс, вкупната енергија на m -тиот интерфејс е:

$$E_m = t_{bat} \sum_{\tau=t_0}^{t_0+T-1} p_m(\tau), \quad m \in \{1,2,3,\dots,M\} . \quad (5.58)$$

Со собирање на (5.58) по сите интерфејси, се добива вкупната енергија E , па бараното време на живот на батеријата од мобилниот уред е:

$$t_{bat} = \frac{E}{\sum_{m=1}^M \sum_{\tau=t_0}^{t_0+T-1} p_m(\tau)}, \quad m \in \{1,2,3,\dots,M\} . \quad (5.59)$$

Доколку на последнава равенка (5.59) се примени (5.51) за вкупната потрошена моќност за интерфејсот m , тогаш времето на живот на батеријата е одредено со следното неравенство:

$$t_{bat} \geq \frac{E}{\sum_{m=1}^M (T \cdot p_m^{av} + Z_k^{\max})} = \frac{E}{M \cdot Z_k^{\max} + T \sum_{m=1}^M p_m^{av}} . \quad (5.60)$$

Доколку сите интерфејси имаат иста просечна моќност, тогаш ја добиваме специјализираната равенка за времетраењето на батеријата:

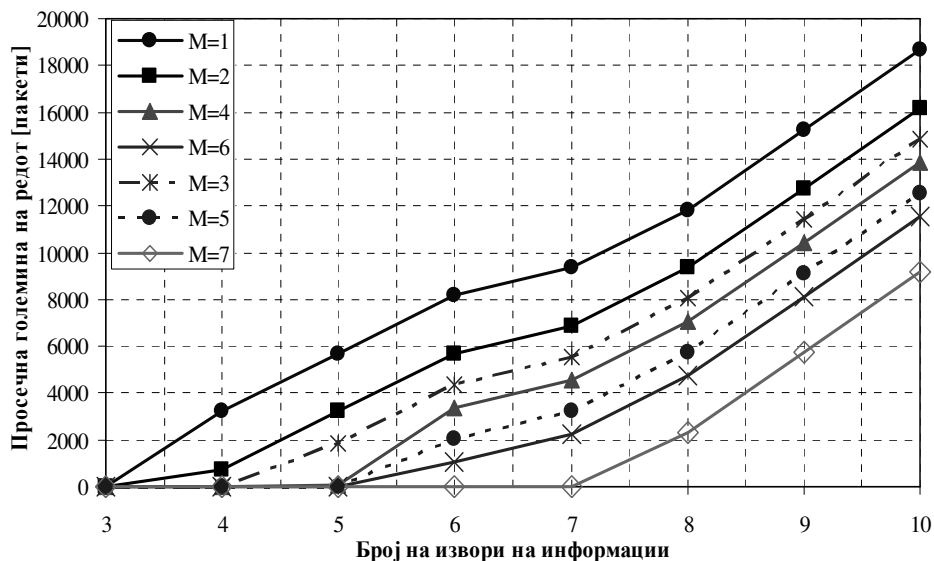
$$t_{bat} \geq \frac{E}{M \cdot (Z_k^{\max} + T p^{av})} . \quad (5.61)$$

Според тоа, времетраењето на батеријата кај мобилниот уред е одредено со постоењето на долната граница дадена со десниот дел од неравенствата (5.60) и (5.61). Така, батеријата на уредот би траела подолго доколку достапната енергијата по интерфејс се зголеми, а обратно пропорционално дејствуваат: бројот на интерфејси (M), максималната големина на редовите на чекање, големината на временскиот слот T , како и вредноста за средната моќност (p^{av}) по интерфејс. Се разбира оние интерфејси кои не се вклучени во даден временски момент, не треба да се земаат во предвид, така ќе добиеме уште подолго време на живот на батеријата. Изведувањето погоре (во равенката 5.61) е

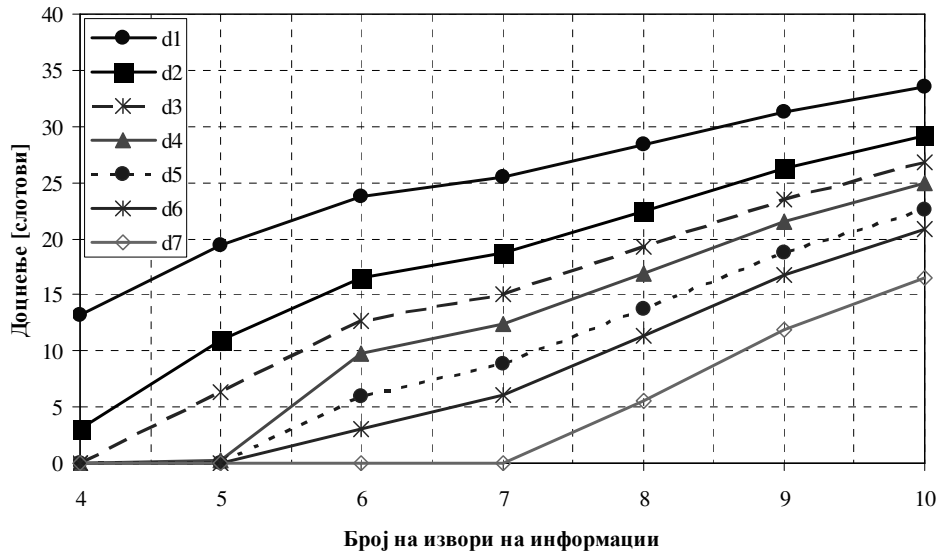
направено под претпоставка дека сите мрежни интерфејси се вклучени и дека сите имаат исто просечно ниво на зрачна моќност (p_m^{av}).

5.3.4 Симулациски резултати и анализи за 5GT со AQUAplus алгоритам

За да ги покажеме перформансите можности и преку симулација, AQUAplus алгоритмот е симулиран за сценарија со потполна безжична и мобилна покриеност, за 250 5GT, кои користат повеќе RAT-и (M на број). Контролниот параметар е поставен на $V=10$. Самото поставување на контролниот параметар на $V=10$ (задоволува $V > 0$), допринесува со лесно влијание (многу мало влијание) на тежинскиот израз за казна (пенал) во контролната одлука и дозволува глатка трговија помеѓу намалувањето на големината на редот на чекање и минимизирање на казната (пеналот). Сите постојни стохастички извори на информации (апликации) се независни Поасоновии процеси. Слика 5.2 ги покажува симулациските резултати за 10^7 слотови за просечната сумирана големина на редовите на чекање (во единица пакети), наспроти бројот на активни извори на информации. Комплетниот вектор со брзините (интензитетите) на доаѓање на пакети за $N=10$ број на извори е даден во табела 5.2. Доколку бројот на извори на информации е i , тогаш во векторот со интензитет на доаѓање на пакети ќе останат само првите i вредности од комплетниот вектор λ (даден во табела 5.2). Доколку го употребиме законот (теоремата) на Литл (Little's Theorem [96] и [97]), кој вели дека просечната големина на редот на чекање е пропорционална со просечното доцнење на редот, (доколку просечната големина на редот се подели со просечниот интензитет (брзина) на доаѓање, се добива просечното доцнење) се добиваат перформансите на доцнењето за нашиот 5GT со AQUAplus. Така, на слика 5.3 се прикажани средните доцнења (изразени во број на слотови) наспроти бројот на извори.



Слика 5.2. Просечна големина на редот на чекање наспроти бројот на извори.



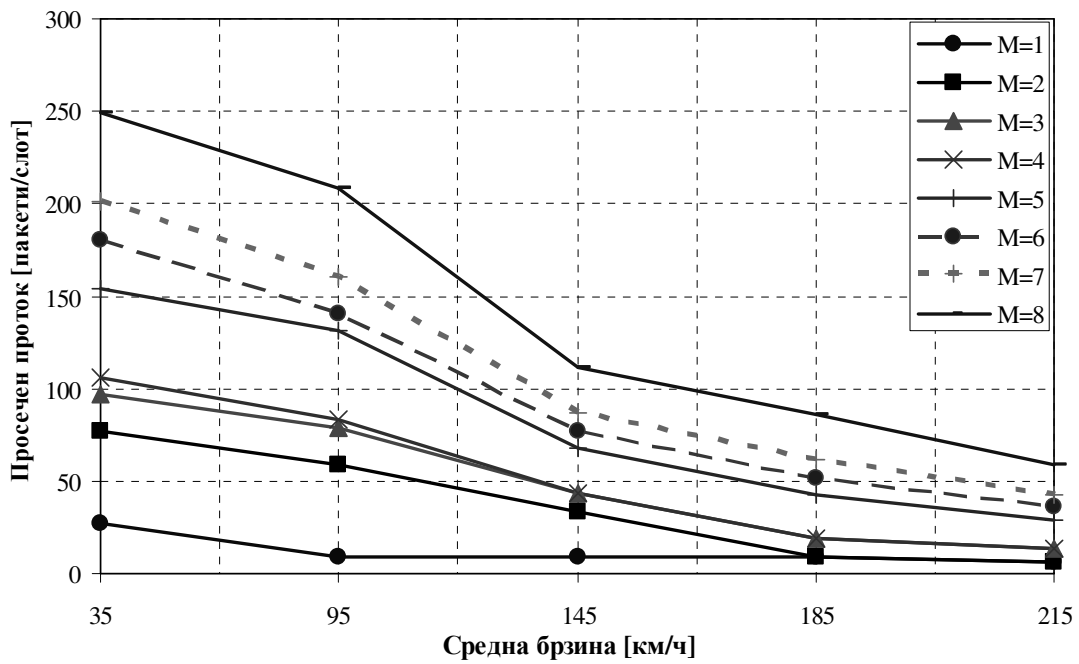
Слика 5.3. Просечно доцнење на редот на чекање наспроти бројот на извори.

Несомнено, според сликите 5.2 и 5.3, како што расте бројот на искористени интерфејси (M) во 5G јазлите, така се подобруваат и перформансите на истиот, т.е. просечната големина на редот на чекање се намалува, а со тоа и просечното доцнење во редот забележува помали вредности. Случајот кога имаме 7 интерфејси во 5GT од сите симулирани резултати, покажува најсупериорни вредности за било кој број на извори на податоци наспроти останатите шест случаи (особено е изразена разликата од случајот кога се користи само еден мрежен интерфејс, т.е. без AQUAplus модул за оптимизација). Да нагласиме дека излезните опслужувачки брзини кај интерфејсите се внимателно одбрани, со цел да соодветствуваат на максималните uplink сервисни брзини (доколку се поделат максималните uplink битски брзини со бројот на бити по пакет) за LTE/LTE-Advanced, IEEE 802.11n, IEEE 802.16e, IEEE 802.16m и IEEE 802.11ac RAT-и, споделени помеѓу 250 мобилни уреди по клетка. Забележливо е од слика 5.2 и слика 5.3 дека големините на редовите и просечното доцнење од редовите расте, како што расте и бројот на извори на информации, а почнува со растот токму кога бројот на интерфејси е ист со бројот на извори на информации. Сепак, случаите со поголем број на вклучени интерфејси во 5GT со AQUAplus алгоритам во себе, ќе предизвикаат минимални можни доцнења од крај-до-крај. Понатаму, на слика 5.4 е претставен просечниот проток во uplink (гледано од мобилниот 5GT) наспроти просечните физички брзини на мобилните 5GT, кога бројот на извори на информации е 3: Видео-конференција, VoIP и податоци. Очигледно е дека, како што бројот на RAT интерфејси е поголем (т.е. за $M=8$) агрегираниот просечен протокот за било која брзина е значително висок, и покрај тоа што има опаѓачки тренд (како што расте брзината).

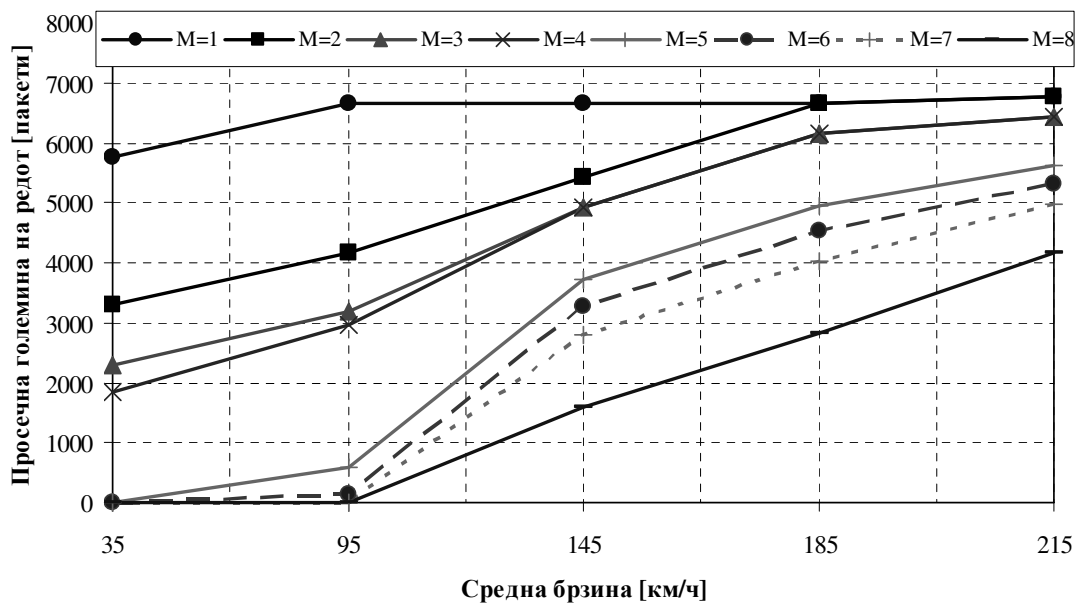
Табела 5.2 Симулациски параметри за двете сценарија

	Параметар	Вредност
Влезови за резултатите на сликите 5.2 и 5.3	Просечна брзина (км/ч)	40
	Комплетен вектор со интензитетите на доаѓање (пакети/секунда)	$\lambda=[68.9655; 50; 24.316; 100; 50; 50; 24.316; 50; 68.9655; 68.9655]$
	Вектор со максимални излезни опслужувачки брзини μ_m (пакети/секунда)	$\mu_1=(1/250)*[44643];$ $\mu_2=(1/250)*[44643\ 12500];$ $\mu_3=(1/250)*[6694.4\ 12500\ 6694.4];$ $\mu_4=(1/250)*[6694.4\ 12500\ 5000\ 4643];$ $\mu_5=(1/250)*[6694.4\ 12500\ 5000\ 44643\ 6694.4];$ $\mu_6=(1/250)*[6694.4\ 12500\ 5000\ 44643\ 5000\ 6694.4];$ $\mu_7=(1/250)*[6694.4\ 12500\ 5000\ 44643\ 5000\ 6694.4\ 12053.57]$
	Средна моќност по секој интерфејс (W)	0.7
Влезови за резултатите на сликите 5.4 и 5.5	Вектор со интензитетите на доаѓање (пакети/секунда)	$\lambda=[24.316; 50; 68.9655]$
	Средна моќност по секој интерфејс (W)	0.7
	Вектори со максималните излезни опслужувачки брзини μ_m (пакети/секунда)	$\mu_1=(1/250)*[6694.4];$ $\mu_2=(1/250)*[6694.4\ 12500];$ $\mu_3=(1/250)*[6694.4\ 12500\ 5000];$ $\mu_4=(1/250)*[6694.4\ 12500\ 5000\ 2250];$ $\mu_5=(1/250)*[6694.4\ 12500\ 5000\ 2250\ 12053.57];$ $\mu_6=(1/250)*[6694.4\ 12500\ 5000\ 2250\ 12053.57\ 6694.4];$ $\mu_7=(1/250)*[6694.4\ 12500\ 5000\ 2250\ 12053.57\ 6694.4\ 5000];$ $\mu_8=(1/250)*[6694.4\ 12500\ 5000\ 2250\ 12053.57\ 6694.4\ 5000\ 12053.57]$

Исто така, со помал број на радио интерфејси, просечниот проток станува сè помал и ги поддржува само оние RAT интерфејси кои припаѓаат на RAT со најдобра поддршка за мобилноста (што некогаш се сведува само на една RAT). На слика 5.5 е дадена просечната големина на редовите на чекање, во зависност од просечната брзина на движење на 250-те 5G мобилни јазли. Ова е практично истото сценарио (со истите влезни параметри) како и претходно прикажаното на слика 5.4. Очекувано, со порастот на брзината на движење на 5G мобилните јазли, расте и големината на редовите на чекање, а со тоа и просечното доцнење од редовите, бидејќи се намалува бројот на RAT интерфејси кои нудат одлична поддршка за мобилноста (на пример, остануваат само RAT од LTE, LTE-Advanced, Mobile WiMax 2.0 и сл., а се губат тие од WLAN). Затоа застојот во опслужувањето и големините на редовите на чекање кај 5G мобилните јазли со повеќе интерфејси е помал и бележи благ пораст со порастот на брзината, во споредба со случаите кога бројот на интерфејси е еден или два (за случаите $d=1$ и $d=2$ на слика 5.5).



Слика 5.4. Просечен проток за различни брзини на 5G мобилните јазли.



Слика 5.5. Просечна големина на редот на чекање наспроти брзината на 5G мобилните јазли.

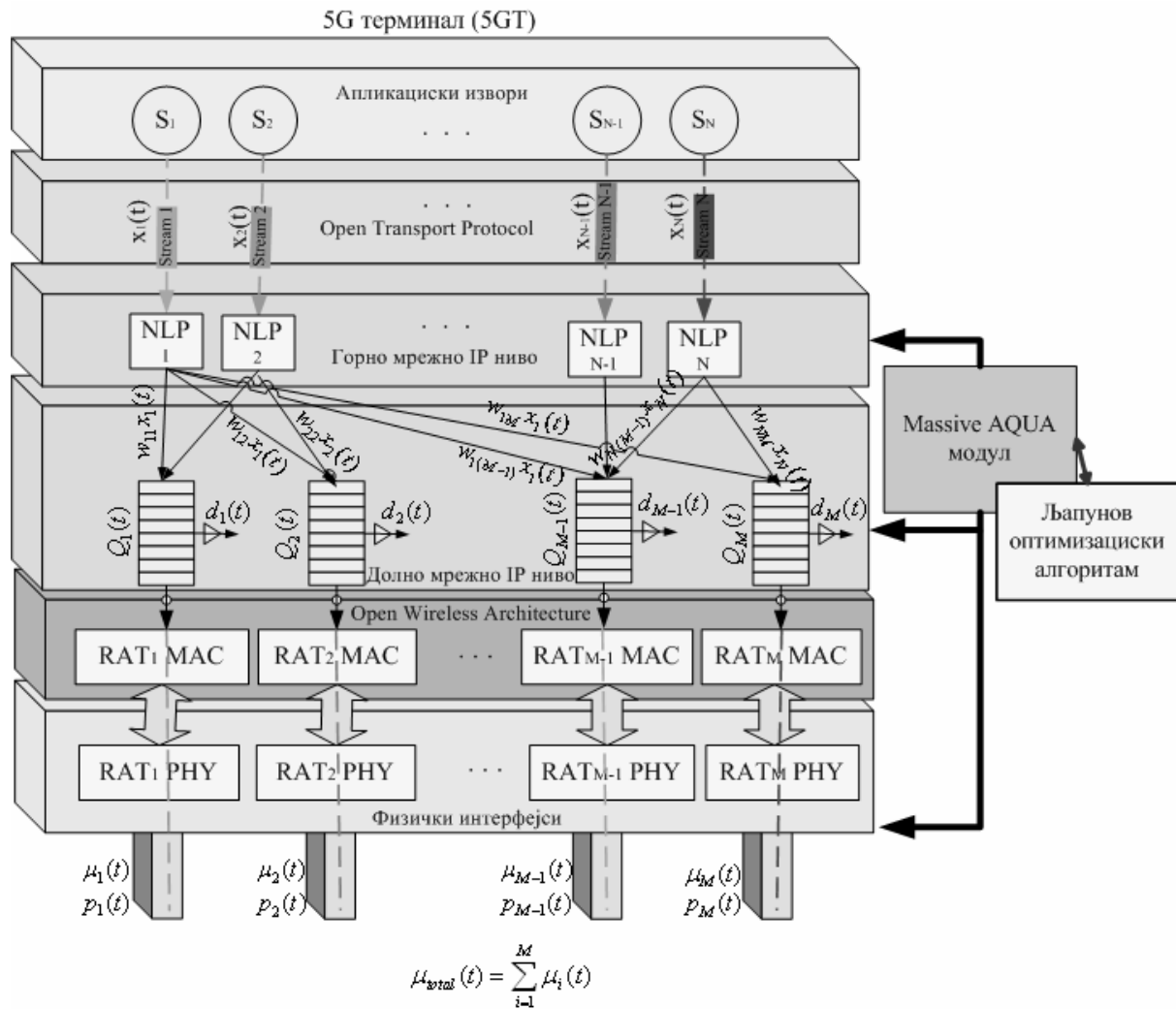
Сепак, клучна опсервација за погоре презентираниот алгоритам и 5G јазел е дека истиот прави оптимални контролни одлуки и едновремено ги користи сите редови на чекање на најоптимален начин, постигнувајќи значителни перформанси во поглед на минимално доцнење од редовите на чекање, максимален проток и високо ниво на стабилност. Како што може да се види, со порастот на бројот на достапните RAT-и – се вклучуваат повеќе RAT интерфејси, и се постигнуваат супериорни перформанси како за 5G мобилните уреди, така и за целата 5G мрежа.

5.4 Системски модел со Љапунова оптимизација за 5GT со минимално доцнење и максимизација на проток

Во оваа подглава, ќе претставиме еден друг системскиот модел за 5G јазел со Љапунова оптимизација во себе, и можност за воведување на минимално доцнење од редовите на чекање, преку механизам за отфрлање на пакети од редовите на чекање. Овој системски модел е прикажан на слика 5.6. Самиот 5GT е јазел со вклучени повеќе интерфејси, т.е. има (M) интерфејси, по еден за секоја различна радио пристапна технологија. Освен тоа, мобилниот 5G јазел може да се движи со различна брзина, или доколку е фиксен, тогаш тој е 5G проху сервер кој се наоѓа во јадрото на 5G мрежата. Повторно, напредниот оптимизациски и рутирачки QoS алгоритам е поставен на мрежно IP ниво. Овде, употребениот QoS алгоритам со Љапунова drift-plus-penalty оптимизација, за разлика од претходната подглава, го нарекуваме Massive throughput Advanced QoS-based User-centric Aggregation (кратко MassiveAQUA) алгоритам, бидејќи нуди оптимално опслужување на пакети, постигнува широкопојасни мобилни битски брзини и вклучува механизам за постигнување на минимално доцнење (особено погоден за сервиси во реално време). Како што се гледа од слика 5.6 системскиот модел за 5GT на апликациско ниво има N извори на информации, кои се стационарни независни процеси со пакетски пристигнувачки брзини (интензитет на дојдовен сообраќај) $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$ за секој временски слот t . Секој изворен дојдовен процес $x_i(t)$ после поминувањето низ Транспортното ниво, влегува во доделен процесор на Горното мрежно IP ниво (т.е. на англ. Network Layer Processor) NLP_i , во процесорскиот дел. Во овој дел, во зависност од Љапуновата оптимизација која ја извршува MassiveAQUA алгоритмот, самите NLP процесори прават оптимален вертикален multi-streaming и multi-homing процеси на распределба на дел (или цел) сообраќаен поток во соодветни редови на чекање на Долното мрежно IP ниво. Процесите на multi-streaming се процеси на делење на еден поток (stream, т.е. сообраќај кој доаѓа од еден ист извор на информации - сервис), со цел да оди преку различни редови на чекање на Долното мрежно IP ниво, каде што имаме цела една мрежа од редови на чекање. Доделените тежински фактори (w_{ij}) за секој дојдовен процес $x_i(t)$ се избрани во интервалот $[0,1]$, со следното ограничување:

$$\sum_{j=1}^M w_{ij} = 1 \text{ за } i=1, 2, \dots, N. \quad (5.62)$$

Процесот на multi-homing е специјален тип на multi-streaming процес, кога цел поток (stream) оди само преку еден избран ред на чекање, кој е најсоодветен за тој сообраќај. Во овој случај, еден тежински коефициент ќе има вредност 1, а сите други се 0.



Слика 5.6. Системски модел на 5GT со MassiveAQUA модул.

Понатаму, разгледуваме M редови на чекање (цела мрежа од редови на чекање) со вектор на чекање $\mathbf{Q}(t) = (Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_M(t))$ кој се менува во временски слотови $t \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ преку ажурирачка равенка:

$$Q_m(t+1) = \max[Q_m(t) + A_m(t) - \mu_m(t) - d_m(t), 0], \quad (5.63)$$

каде $A_m(t) = \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t)$ е променлива за дојдовниот интензитет на сообраќај во m -тиот ред на чекање, а параметарот $\mu_m(t)$ е променлива за излезната брзина на опслужување за m -тиот ред на чекање, каде $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$. После секој ред на чекање, се обидуваме да достигнеме максимална излезна опслужувачка (сервирачка) брзина $\mu_j(t)$ за секој RAT интерфејс $j=1, 2, \dots, M$, така што сумата на сите излезни сервирачки брзини, во текот на времето ќе биде исто така максимална. За секој ред на чекање, воведуваме новитет – вектор со одлуки за отфрлање на пакет(и) $\mathbf{d}(t) = (d_1(t), d_2(t), \dots, d_M(t))$ и на него соодветен

вектор со средни вредности: $\bar{\mathbf{d}} \triangleq (\overline{d_1(t)}, \overline{d_2(t)}, \dots, \overline{d_M(t)})$. Одлуката за отфрлање на пакети $d_m(t)$, за m -тиот ред на чекање, овозможува пакети кои веќе им бил дозволен влез во редовите на чекање на мрежно ниво (на пример пакети веќе присутни во редот $Q_m(t)$), да можат да се отфрлат, доколку нивното доцнење е премногу големо. Ова е одличен модел за опслужување на пакети кои потекнуваат од сервис во реално-време, нетолерантен на доцнење, но и за било кој друг тип на сервис. Одлуките за отфрлање $d_m(t)$ се избира во согласност со ограничувањето:

$$0 \leq d_m(t) \leq A_{\max}, \text{ за } m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}, \quad (5.64)$$

каде A_{\max} е конечна константа, избрана да биде максималната вредност од сите променливи на дојдовниот процес $A_m(t)$ за даден временски слот t (кој го ограничува количеството на сообраќај кое можеме да го пуштиме на Долното мрежно IP ниво). Понатаму, доколку земеме случаја состојба на мрежните редови на чекање и ја дефинираме како: $\psi(t) \triangleq [(\mu_1(t), \dots, \mu_M(t)); (A_1(t), \dots, A_M(t))]$, и контролна полисна акција $\alpha_{NL}(t)$ која се прави секој слот t со знаење на конкретната состојба на процесот $\psi(t)$ и припаѓа во некое апстрактно множество со акции $A_\psi(t)$ – множество кое ги содржи сите можни контролни акции. За поедноставноста на решенијата, земаме дека овој процес $\psi(t)$ е независен и идентичен во текот на времето. Понатаму, земаме вектор со средните вредности на моќностите за секој радио интерфејс како $\bar{\mathbf{p}} \triangleq (\overline{p_1(t)}, \overline{p_2(t)}, \dots, \overline{p_M(t)})$. Нека $\bar{\mathbf{x}} \triangleq (\overline{x_1(t)}, \overline{x_2(t)}, \dots, \overline{x_N(t)})$ биде вектор на временските средни вредности за брзините (интензитетите) на доаѓање на пакетите ($x_i(t)$). Ги разгледуваме двете одделни функции на полезност за погоре дефинираните вектори:

$$\theta(\bar{\mathbf{x}}) \triangleq \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,m} \overline{x_i(t)}, \text{ и } \Gamma(\bar{\mathbf{p}}, \bar{\mathbf{d}}) \triangleq \sum_{m=1}^M \left(\log \left(1 + \frac{\overline{p_m(t)}}{n_m} \right) - \beta \overline{d_m(t)} \right), \quad (5.65)$$

каде $\log(\cdot)$ означува природен логаритам, и функцијата $\log \left(1 + \frac{\overline{p_m(t)}}{n_m} \right)$ има максимален извод $1/n_m$, и е 0 кога $p_m=0$. Вредноста n_m е константа и земаме дека $1/n_m < \infty$. Исто така, β константа која задоволува $1 \leq \beta < \infty$. Тогаш, за секој 5GT систем (фиксен или мобилен во рамките на 5G мрежата) применуваме стохастична рамка-водилка на полезност за максимизирање на нашиот поточно базиран динамички системски модел, и посакувано решение на следниот оптимизациски проблем во uplink (ако се гледа од мобилниот 5GT) и downlink (ако се гледа од 5GT проху серверот во јадрото на 5G мрежата):

$$\text{Максимизирај: } \theta(\bar{\mathbf{x}}) + \Gamma(\bar{\mathbf{p}}, \bar{\mathbf{d}}) \quad (5.66)$$

Во зависност од: 1. Средната временска брзина на потокот (stream-от) низ m -тиот ред на

чекање $Q_m(t)$, е помал или еднаков на средната временска вредност од максималната излезна опслужувачка брзина μ_m^{\max} на интерфејсот m , т.е.:

$$\sum_{i=1}^N w_{i,m} \overline{x_i(t)} \leq \mu_m^{\max}, \forall m \in \{1,2,\dots,M\} \quad (5.67)$$

2. Сите редови на чекање $Q_m(t)$ се средно стабилни по брзина, т.е.:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mathbf{E}\{Q_m(t)\}}{t} = 0, \forall m \in \{1,2,\dots,M\} \quad (5.68)$$

3. Посакуваните ограничувања за средни вредности за моќностите на секој радио интерфејс се исполнети [65] ($p_m(t)$ е моќноста која се зрачи на m -тиот интерфејс, за време на слотот t , и p_m^{av} е посакуваната средна вредност на моќноста која се троши за истиот):

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \overline{p_m(t)} \leq p_m^{\text{av}}, \forall m \in \{1,2,\dots,M\} \quad (5.69)$$

4. За контролната плисна акција важи: $\alpha_{NL}(t) \in A_{\psi(t)}$.

5. За конечниот параметар $\mu_{\min} > 0$, просечната брзина на излезно опслужување за m -тиот ред на чекање, задоволува:

$$\overline{\mu_m(t)} \geq \mu_{\min}, \forall m \in \{1,2,3,\dots,M\} \quad (5.70)$$

Ограничувањето 5 (неравенство 5.70) бара секој ред на чекање $Q_m(t)$ да опслужува со средна брзина на излезно опслужување најмалку μ_{\min} , со што се обезбедува дека сите редови добиваат барем минимална брзина на опслужување μ_{\min} за сервис. Како и да е, ова ограничување нема да го форсираме, бидејќи доколку влезната брзина во m -тиот ред е помала од μ_{\min} , тогаш овој услов е залуден. Понатаму, за $t > 0$, променливите за временските средни вредности низ првите t слотови за $m \in \{1,2,3,\dots,M\}$, ги дефинираме со:

$$\begin{aligned} \overline{x_m(t)} \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbf{E}\{x_m(\tau)\}; \quad \overline{p_m(t)} \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbf{E}\{p_m(\tau)\}. \\ \overline{\mu_m(t)} \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbf{E}\{\mu_m(\tau)\}; \quad \overline{d_m(t)} \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbf{E}\{d_m(\tau)\}. \end{aligned} \quad (5.71)$$

5.4.1 Љапунова drift-plus-penalty оптимизација со MassiveAQUA алгоритмот

За решавање на горниот оптимизациски проблем, повторно користиме Љапунова drift-plus-penalty техника (користејќи два фиксни позитивни казнени контролни параметри V_1 и V_2). Ги исполнуваме горенаведените први три услови (5.67)-(5.69) на оптимизацискиот проблем (5.66) преку конкретен ред на чекање $Q_m(t)$ (5.63) и третиот услов (5.69) со помош на истиот виртуелен ред на чекање $Z_m(t)$ како во подглава 5.3, т.е. со равенка (5.28) за даден m интерфејс. Исто така, да обезбедиме граници за доцнењето во најлош случај, како

и условот (5.70), дефинираме μ_{\min} -перзистентен сервисен ред на чекање, да биде виртуелниот ред $U_m(t)$ за секој $m \in \{1, \dots, M\}$, при што $U_m(0) = 0$ и со ажурирачка равенка:

$$U_m(t+1) = \max[U_m(t) - \mu_m(t) - d_m(t) + \mu_{\min}], \text{ доколку } Q_m(t) > \mu_m(t) + d_m(t) \\ \text{и } U_m(t+1) = 0, \text{ ако } Q_m(t) \leq \mu_m(t) + d_m(t). \quad (5.72)$$

Претпоставуваме среден проток за кој важи дека $\mu_{\min} \leq A_{\max}$. Условот $Q_m(t) \leq \mu_m(t) + d_m(t)$ е задоволен секогаш кога големината на редот $Q_m(t)$ е нула (т.е. кога нема пакети во редот, заради опслужувањето и/или отфрлањето) во слотот t . Доколку не го вклучиме овој услов, $U_m(t)$ има процес на опслужување, истиот како $Q_m(t)$, но има процеси на доаѓања со интензитет μ_{\min} секој слот t .

Понатаму, дефинираме комбиниран вектор на ред на чекање $\mathbf{S}(t) \triangleq [\mathbf{Q}(t), \mathbf{Z}(t), \mathbf{U}(t)]$ и Љапунова функција како:

$$L(\mathbf{S}(t)) \triangleq \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^M (Q_i^2(t) + Z_i^2(t) + U_i^2(t)) \right]. \quad (5.73)$$

Доколку, дефинираме условен Љапунов drift во еден-чекор како: $\Delta(\mathbf{S}(t)) \triangleq \mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(t+1)) - L(\mathbf{S}(t)) | \mathbf{S}(t)\}$, тогаш Љапуновиот drift-plus-penalty израз е дефиниран:

$$\Delta(\mathbf{S}(t)) + V_1 \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{u}(\mathbf{x}(t), \alpha_{NL}(t), t) | \mathbf{S}(t)\} + \\ + V_2 \cdot \mathbf{E}\{g(\mathbf{p}(t), \mathbf{d}(t), \alpha_{NL}(t), t) | \mathbf{S}(t)\}. \quad (5.74)$$

Така, овде предложениот MassiveAQUA алгоритам тежнее да ја минимизира горната граница на (5.74) за: сите слотови t , сите можни вредности на $\mathbf{S}(t)$, и сите контролни параметри $V_1 \geq 0$ и $V_2 \geq 0$.

Во (5.74) ние внесуваме вектор со „казни“ (“penalty”) даден како: $\mathbf{u}(\mathbf{x}(t), \alpha_{NL}(t), t) = (u_0^1(t), u_0^2(t), \dots, u_0^M(t))$, каде:

$$u_0^m(t) = - \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t), \text{ за } m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}, \quad (5.75)$$

и друг “казнен” процес $g(\mathbf{p}(t), \mathbf{d}(t), \alpha_{NL}(t), t)$, даден со:

$$g(\mathbf{p}(t), \mathbf{d}(t), \alpha_{NL}(t), t) = - \sum_{m=1}^M \log \left(1 + \frac{\xi_m(t) + p_m^{av}}{n_m} \right) + \sum_{i=1}^M \beta d_i(t). \quad (5.76)$$

Средната вредност од казнените процеси (5.75) сакаме да ги направиме помали од (или еднакви на) некоја целна вредност u_0 . Овие вредности за казните дадени во (5.75) го претставуваат дојдовните сообраќајни понуди за редовите на чекање, предизвикани од контролната полисна акција $\alpha_{NL}(t)$ во слотот t . Оптималното решение на (5.66) и на (5.76) имаат $d_m(t) = 0$ за сите m . Тоа значи, дека (5.76) може еквивалентно да биде претставен со

цел да се минимизира $-\sum_{m=1}^M \log\left(1 + \frac{\xi_m(t) + P_m^{av}}{n_m}\right)$ и со додавање на условот $d_m(t)=0$ за сите m .

ова е токму заради тоа што казната за отфрлање е β . Така, може да се покаже дека секогаш е подобро да се ограничат податочните потоци на Горното мрежно IP ниво (па дури и на Транспортно ниво) отколку на истите да им се дозволи прием во редовите на чекање на Долното мрежно IP ниво, па потоа да се отфрлат. Ние овде препорачување користење на β така што $1 \leq \beta \leq 2$. Бидејќи поголеми вредности на β ќе го истргуваат отфрлањето на пакети на Пониското мрежно IP ниво за пакетски неодбивања во поточниот контролер.

Понатаму, доколку земеме дека: u_{0min}^m е детерминистичка долна граница за $u_0^m(t)$ за сите m во секој слот t , g_{min}^0 е детерминистички долната граница за $g(\mathbf{p}(t), \mathbf{d}(t), \alpha_{NL}(t), t)$ за сите слотови t , плус претпоставувајќи дека имаме конечна константа $K>0$ стаква што за сите избори на $\alpha_{NL}(t)$ во слотот t имаме:

$$\mathbf{E}\{A_m(\alpha_{NL}(t), \psi(t))^4\} \leq K \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (5.77)$$

$$\mathbf{E}\{\mu_m(\alpha_{NL}(t), \psi(t))^4\} \leq K \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (5.78)$$

$$\mathbf{E}\{u_m(\alpha_{NL}(t), \psi(t))^4\} \leq K \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (5.79)$$

$$\mathbf{E}\{d_m(\alpha_{NL}(t), \psi(t))^4\} \leq K \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (5.80)$$

$$\mathbf{E}\{\xi_m(\alpha_{NL}(t), \psi(t))^4\} \leq K \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (5.81)$$

каде усреднувањата се земени во поглед распределбата на случајно независниот процес $\psi(t)$, и можните случајни контролни акции $\alpha_{NL}(t) \in A_{\psi(t)}$. Изразите (5.77)-(5.81) ги вклучуваат сите главни форми на стабилност и понатаму помагаат во процесот на одредување на перформансите граници на алгоритмот.

Со квадрирање на (5.63), (5.28) и (5.72); и собирајќи ги истите според (5.73), правејќи го Љапуновиот drift во еден чекор и додавајќи ги “казните” $V_1 \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{u}(\mathbf{x}(t), \alpha_{NL}(t), t) | \mathbf{S}(t)\}$ и $V_2 \cdot \mathbf{E}\{g(\mathbf{p}(t), \mathbf{d}(t), \alpha_{NL}(t), t) | \mathbf{S}(t)\}$ на двете страни, не е тешко да се покаже дека изразот (5.74) ја има горна граница за сите слотови t (за повеќе детали види ја Теоремата 5.2 и [66]) дадена со изразот (5.82). Заради ограничувачките претпоставки, и овде воведуваме конечна променлива B која е многу блиска до вторите моменти (во најлош случај) за $A_m(t)$, $\xi_m(t)$, $d_m(t)$ и $\mu_m(t)$ процесите, при што е дадена со равенката (5.83).

Понатаму, целта на нашиот MassiveAQUA алгоритам е да ја минимизира десната страна на неравенството за горната граница на (5.74) (т.е. минимизирање на изразот (5.82)), преку избор на најсоодветна контролна полисна акција $\alpha_{NL}(t) \in A_{\psi(t)}$ секој слот t ,

набљудувајќи ги и реалниот и виртуелните вектори со редови на чекање $\mathbf{Q}(t)$, $\mathbf{Z}(t)$, $\mathbf{U}(t)$ и конкретната состојба $\psi(t)$.

$$\begin{aligned}
& B - V_1 \mathbf{E} \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t) | \mathbf{S}(t) \right\} - \\
& - V_2 \mathbf{E} \left\{ \sum_{m=1}^M \left(\log \left(1 + \frac{\xi_m(t) + p_m^{av}}{n_m} \right) - \beta d_m(t) \right) | \mathbf{S}(t) \right\} + \\
& + \sum_{m=1}^M Q_m(t) \mathbf{E} \left\{ \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t) - \mu_m(t) - d_m(t) | \mathbf{S}(t) \right\} + \\
& + \sum_{m=1}^M U_m(t) \mathbf{E} \{ \mu_{\min} - \mu_m(t) - d_m(t) | \mathbf{S}(t) \} + \\
& + \sum_{l=1}^M Z_l(t) \mathbf{E} \{ \xi_l(t) | \mathbf{S}(t) \}.
\end{aligned} \tag{5.82}$$

$$\begin{aligned}
& B \Delta \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^M \mathbf{E} \left\{ \sum_{i=1}^N \left((w_{i,m} x_i(t))^2 + \mu_m^2(t) + d_m^2(t) \right) | \mathbf{S}(t) \right\} \right) + \\
& + \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^M \mathbf{E} \{ \mu_{\min}^2 + \mu_m^2(t) + d_m^2(t) | \mathbf{S}(t) \} \right) + \\
& + \frac{1}{2} \left(\sum_{l=1}^M \mathbf{E} \{ \xi_l^2(t) | \mathbf{S}(t) \} \right).
\end{aligned} \tag{5.83}$$

На тој начин, MassiveAQUA алгоритмот го решава погоре дефинираниот оптимизациски проблем (5.66), разбивајќи го на повеќе и сведувајќи го на посебни алгоритми кои го прават следното:

1) Поточна контрола и QoS сообраќајно рутирање преку различни RAT интерфејси на 5GT-и (вертикален multi-homing и multi-streaming процеси): Секој слот t , за секој ред на чекање $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ се земаат во предвид новите дојдовни процеси $x_m(t)$, реалниот ред на чекање $Q_m(t)$ (5.63) и виртуелните редови $Z_m(t)$ (5.28) и $U_m(t)$ (5.72), па се избира $x_m(t)$ да оди во тие редови на чекање, при што се постигнува:

$$\text{Минимизирање: } \sum_{m=1}^M Q_m(t) \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t) - V_1 \cdot \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,j} x_i(t) \tag{5.84}$$

$$\text{во зависност од: } 0 \leq \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(t) \leq \mu_m^{\max}, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \text{ и } \sum_{j=1}^M w_{i,j} = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}.$$

2) Определување на средна моќност: Секој слот t , се гледа виртуелниот ред $Z_m(t)$ (5.28) за $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ и векторот за доделување на моќност $\mathbf{p}(t)$ на секој радио интерфејс (стака што да постои опслужување при преносот кое е свесно за моќноста и користи минимум/просечно колку што му треба на радио интерфејсот), како решение за помошните променливи $\xi_m(t)$ за да се:

$$\text{Минимизира: } \sum_{l=1}^M Z_l(t) \xi_l(t) - V_2 \sum_{m=1}^M \log \left(1 + \frac{p_m^{av} + \xi_m(t)}{n_m} \right) \quad (5.85)$$

во поглед на: $-p_m^{av} \leq \xi_m(t) \leq \xi_m^{\max}, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}$.

3) Пакетско отфрлање: За секој слот t , се гледа виртуелниот ред $U_m(t)$ (5.72) и реалниот ред $Q_m(t)$ (5.63), и за $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$, се избира $d_m(t)$ според:

$$d_m(t) = \begin{cases} A_{\max}, & \text{аку } U_m(t) + Q_m(t) > \beta V_2 \\ 0, & \text{друго} \end{cases} \quad (5.86)$$

4) Ажурирање на редовите на чекање: За $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ ажурирај ги реалниот ред $Q_m(t)$, и виртуелните редови $Z_m(t)$ и $U_m(t)$ според (5.63), (5.28) и (5.72), соодветно.

5) Downlink пакетско рутирање (за пристигнатите пакети): IP пакетите кои што пристигнале преку сите RAT интерфејси и имаат насока кон апликациското ниво, се примаат во приемни редови на чекање (различни од погоре дефинираните редови), при што само се испраќаат од страна на MassiveAQUA модулот до Горното мрежно IP ниво. Таму истите се синтетизираат (се обединуваат во еден поток (stream) $x_m(t)$) и се упатуваат кон апликациското ниво до соодветниот одговарачки сервис.

Како што беше потенцирано претходно, процесите на доаѓање, процесот $\psi(t)$ и состојбата на каналот се i.i.d процеси, во секој t , и мрежата со редови на чекање во 5GT е иницијално празна (во временскиот момент 0).

5.4.2 Перформансни граници на MassiveAQUA алгоритмот

Да земеме дека имаме константа $C \geq 0$ таква што нашиот MassiveAQUA алгоритам избира најсоодветни контролни полисни акции $\alpha_{NL}(t) \in A_{\psi(t)}$ секој слот t , врз база на реалните и виртуелни редови $Q(t)$, $Z(t)$, и $U(t)$ т.е. со комбинираниот вектор за редовите на чекање $S(t)$, и ја минимизира горната граница на изразот (5.74) (т.е. изразот (5.82)). Тогаш, ако е така, ја имаме следната теорема:

Теорема 5.5 (Перформансни граници на MassiveAQUA): Доколку претпоставиме дека дојдовниот процес и информациите за каналските состојби за секој временски слот се стохастични i.i.d. процеси за слотовите со веројатност $\pi(\psi)$, проблемот со максимизирање на $\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,m} \overline{x_i(t)}$ и (5.66)-(5.69) се изводливи, и доколку фиксираме одредена вредност за константата $C \geq 0$, користејќи C -адитивна апроксимација за MassiveAQUA алгоритмот секој слот t , и имајќи соодветна контролна полисна акција ($\alpha_{NL}(t)$), плус поставувајќи ги пеналските контролни параметри $V_1=V_2=V$ имаме:

1) Временски усреднетата очекувана вредност задоволува:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \left(\sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\tau)\} + \mathbf{E}\{g(\tau)\} \right) \geq X_{\Sigma}^{optim} - \frac{B+C}{V} - g^{optim} \quad (5.87)$$

каде X_{Σ}^{optim} е оптималниот infimum од временски усреднетата сума на производот од тежинските фактори и брзините на доаѓање во мрежата со редови на чекање, која може да биде постигната со било која полиса која ги стабилизира редовите и ги задоволува ограничувањата за средните моќности и сите други побарани ограничувања. Оптималниот infimum g^{optim} е за средните вредности на целната функција $\Gamma(\bar{\mathbf{p}}, \bar{\mathbf{d}})$ (5.65), исто така достижлива за било која полиса која ги стабилизира редовите и ги задоволува ограничувањата за средните моќности и сите други побарани ограничувања. Воедно, B е дефинирана со (5.83).

2) Доколку претпоставиме дека постои конечна константа $K > 0$, $\rho \geq 0$ и $\delta > 0$ за сите (по можност случајни) избори од контролната полисна акција $\alpha_{NL}(t)$ каде (5.77)-(5.81) се исполнети, плус следните ограничувања се исполнети за сите $m \in \{1, 2, \dots, M\}$:

$$\mathbf{E}\{\xi_m(\alpha_{NL}(t), t)\} \leq -\delta + \rho, \quad (5.88)$$

$$\mathbf{E}\{d_m(\alpha_{NL}(t), t)\} \leq -\delta + \rho, \quad (5.89)$$

$$\mathbf{E}\{A_m(\alpha_{NL}(t), t) - \mu_m(\alpha_{NL}(t), t) - d_m(\alpha_{NL}(t), t)\} \leq -\delta + \rho, \quad (5.90)$$

$$\mathbf{E}\left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(\alpha_{NL}(t), t) \right\} \leq X_{\Sigma}^{optim} + \rho. \quad (5.91)$$

$$\mathbf{E}\left\{ \sum_{m=1}^M g(\alpha_{NL}(t), t) \right\} \leq g^{optim} + \rho. \quad (5.92)$$

$$\text{Тогаш важи: } \limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{Q_m(\tau) + Z_m(\tau) + U_m(\tau)\} \leq \frac{B+C}{\delta} - \frac{V(X_{\Sigma}^{optim} + u^{\min} - g^{optim} + g_{\min}^0)}{\delta} \quad (5.93)$$

каде $u^{\min} \leq \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\alpha_{NL}(\tau), \tau)\} \leq u^{\max}$, и $g_{\min}^0 \leq \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbf{E}\{g(\alpha_{NL}(\tau), \tau)\} \leq g_{\max}^0$, $\forall t \in \{1, 2, \dots, t-1\}$.

3) Доколку важат сите претходни претпоставки во теоремава, плус доколку имаме дека $\mu_{\min} \leq A_{\max}$, $Q_m(0) \leq Q_m^{\max}$, $Z_m(0) \leq Z_m^{\max}$ и $U_m(0) \leq U_m^{\max}$ за $m \in \{1, 2, \dots, M\}$, тогаш за средните вредности за “казнениот” процес $g(\mathbf{p}(t), \mathbf{d}(t), \alpha_{NL}(t), t)$ од (5.76) важи следното:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^M \left(\overline{g(\mathbf{p}(\tau), \mathbf{d}(\tau), \bar{\tau})} \right) \leq \frac{B+C}{V} + g^{optim} - (X_{\Sigma}^{optim} + X^{\sup}) \quad (5.94)$$

каде $\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\tau)\} = X^{\sup}$.

4) Реалните и виртуелните редови на чекање $\mathbf{Q}(t)$, $\mathbf{U}(t)$ и $\mathbf{Z}(t)$ се средно стабилни по брзина, и сите потребни ограничувања од оптимизацискиот проблем (5.66)-(5.70) се задоволени.

Доказ за Теорема 5.5:

Заради изборот на најсоодветна контролна полисна акција $\alpha_{NL}(t) \in A_{\psi(t)}$ при секој слот t , од MassiveAQUA алгоритмот, набљудувајќи го векторот од комбинирани редови на чекање $\mathbf{S}(t)$, имајќи конечната константа $C \geq 0$, чија цел е да го минимизира (5.82), поставувајќи ги казнените контролни параметри $V_1=V_2=V$, за сите слотови t и сите можни вектори $\mathbf{S}(t)$ имаме:

$$\begin{aligned}
\Delta(\mathbf{S}(t)) + V \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{u}(\mathbf{x}(t), \alpha_{NL}(t), t) | \mathbf{S}(t)\} + V \cdot \mathbf{E}\{g(\mathbf{p}(t), \mathbf{d}(t), \alpha_{NL}(t), t) | \mathbf{S}(t)\} \leq B + C - \\
- V \mathbf{E}\left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(\alpha_L^e(t), t) | \mathbf{S}(t) \right\} - \\
- V \mathbf{E}\left\{ \sum_{m=1}^M \left(\log \left(1 + \frac{\xi_m(\alpha_L^e(t), t) + p_m^{av}}{n_m} \right) - \beta d_m(\alpha_L^e(t), t) \right) | \mathbf{S}(t) \right\} + \\
+ \sum_{m=1}^M Q_m(t) \mathbf{E}\left\{ \sum_{i=1}^N w_{i,m} x_i(\alpha_L^e(t), t) - \mu_m(\alpha_L^e(t), t) - d_m(\alpha_L^e(t), t) | \mathbf{S}(t) \right\} + \\
+ \sum_{m=1}^M U_m(t) \mathbf{E}\left\{ \mu_{\min} - \mu_m(\alpha_L^e(t), t) - d_m(\alpha_L^e(t), t) | \mathbf{S}(t) \right\} \\
+ \sum_{l=1}^M Z_l(t) \mathbf{E}\left\{ \xi_l(\alpha_L^e(t), t) | \mathbf{S}(t) \right\}
\end{aligned} \tag{5.95}$$

Овде, $\alpha_L^e(t)$ е друга одлука за акцијата која може да се примени во слотот t . Доколку го фиксираме δ во интервалот $(0, \delta_{\max}]$, и $\rho > 0$, плус користејќи ја контролната полисна акција $\alpha_L^e(t)$ дизајнирана да ги исполнува (5.88)-(5.92) и забележувајќи дека оваа контролна полисна акција прави избори независни од $\mathbf{S}(t)$ (вредностите $x_i(\alpha_{NL}(t), t)$, $\mu_m(\alpha_{NL}(t), t)$, $d_m(\alpha_{NL}(t), t)$, и $\xi_m(\alpha_{NL}(t), t)$ се независни од моменталната состојба $\mathbf{S}(t)$ и од големината на редот/редовите на чекање), следува дека:

$$\begin{aligned}
\Delta(\mathbf{S}(t)) + V \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{u}(\mathbf{x}(t), \alpha_{NL}(t), t) | \mathbf{S}(t)\} + V \cdot \mathbf{E}\{g(\mathbf{p}(t), \mathbf{q}(t), \alpha_{NL}(t), t) | \mathbf{S}(t)\} \leq B + C - V(X_{\Sigma}^{optim} + \rho) + \\
+ V(g^{optim} + \rho) + (\rho - \delta) \sum_{m=1}^M U_m(t) + (\rho - \delta) \sum_{m=1}^M Q_m(t) + (\rho - \delta) \sum_{l=1}^M Z_l(t).
\end{aligned} \tag{5.96}$$

Исто така, изразот (5.96) држи за сите $\rho > 0$. Следно, доколку земаме лимес $\rho \rightarrow 0$ имаме:

$$\begin{aligned}
\Delta(\mathbf{S}(t)) + V \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{u}(\mathbf{x}(t), \alpha_{NL}(t), t) | \mathbf{S}(t)\} + V \cdot \mathbf{E}\{g(\mathbf{p}(t), \mathbf{q}(t), \alpha_{NL}(t), t) | \mathbf{S}(t)\} \leq B + C - V(X_{\Sigma}^{optim}) + V(g^{optim}) - \\
- \delta \sum_{m=1}^M (Q_m(t) + U_m(t) + Z_m(t)).
\end{aligned} \tag{5.97}$$

Понатаму, нека четвртите моменти (5.77)-(5.81) се исполнети и нека ја земаме Теорема 5.2, така што ограничувањата (5.67)-(5.70) се исполнети, преку користењето на законот за телескопски суми над $\tau \in \{0,1,2,\dots,t-1\}$ за $t>0$, изразот (5.97) би бил:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(t))\} - \mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(0))\} + V \cdot \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\tau)\} + V \cdot \sum_{\tau=1}^{t-1} \mathbf{E}\{g(\tau)\} \leq \\ (B + C - V \cdot X_{\Sigma}^{optim} + V \cdot g^{optim}) \cdot t - \\ - \delta \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M (Q_m(\tau) + U_m(\tau) + Z_m(\tau)). \end{aligned} \quad (5.98)$$

Уште повеќе, преку преуредување на изразите и не водејќи сметка за не-негативните изрази (кога е тоа соодветно), лесно е да се докаже дека од неравенството (5.98) директно следат следните две неравенства за сите слотови $t>0$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{t} \cdot \sum_{\tau=0}^{t-1} \left(\sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\tau)\} + \mathbf{E}\{g(\tau)\} \right) \leq \left(\frac{B+C}{V} - X_{\Sigma}^{optim} + g^{optim} \right) - \\ - \frac{\delta}{V \cdot t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M (Q_m(\tau) + U_m(\tau) + Z_m(\tau)) \\ + \frac{\mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(0))\} - \mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(t))\}}{V \cdot t}. \end{aligned} \quad (5.99)$$

и:

$$\begin{aligned} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M (Q_m(\tau) + U_m(\tau) + Z_m(\tau)) \leq \frac{B+C}{\delta} - \\ - \frac{V}{\delta} \left(X_{\Sigma}^{optim} - g^{optim} + \frac{1}{t} \cdot \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\tau)\} + \frac{1}{t} \cdot \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbf{E}\{g(\tau)\} \right) + \\ + \frac{\mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(0))\} - \mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(t))\}}{\delta \cdot t}. \end{aligned} \quad (5.100)$$

Изразот (5.99) следи после делењето на (5.98) со V и t , додека (5.100) се добива доколку изразот (5.98) го поделиме со δ и t . Сега, доколку се повикаме на тоа дека средното временско очекување на за збирот од казни за сите $u_0^m(\alpha_{NL}(t), t)$ е детерминистички ограничен со долната граница u^{\min} (по можност со негативна вредност), исто така временските усреднувања на целната функција $g(\mathbf{p}(t), \mathbf{d}(t), \alpha_{NL}(t), t)$ од (5.76) е детерминистички ограничена од долу со g_{\min}^0 (по можност со негативна вредност) и конечно, доколку се зема лимес на (5.100) како $t \rightarrow \infty$ го докажува неравенството (5.93). Следно, со земање на лимес врз (5.99) како $t \rightarrow \infty$ плус множејќи го резултатот со -1 го добиваме (5.87).

Сега, доколку тргнеме од изразот (5.99) и од лево го оставиме само изразот со целната функција $g(\mathbf{p}(t), \mathbf{d}(t), \alpha_{NL}(t), t)$, и според Џенсеновото неравенство за конвексна функција (т.е. важи дека $f(\mathbf{E}\{x\}) \leq \mathbf{E}\{f(x)\}$) имаме:

$$\begin{aligned}
\left(\sum_{m=1}^M g(\overline{\mathbf{p}(\tau)}, \overline{\mathbf{d}(\tau)}, \bar{\tau}) \right) &\leq \left(\frac{B+C}{V} - X_{\Sigma}^{optim} + g^{optim} \right) - \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\tau)\} \\
&\quad - \frac{\delta}{V \cdot t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M (Q_m(\tau) + U_m(\tau) + Z_m(\tau)) \\
&\quad + \frac{\mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(0))\} - \mathbf{E}\{L(\mathbf{S}(t))\}}{V \cdot t}.
\end{aligned} \tag{5.101}$$

Следно, доколку побараме лимес на изразот (5.101) од така добиениот израз, за $t \rightarrow \infty$ би имале за лимесот supremum-от следно:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^M g(\overline{\mathbf{p}(\tau)}, \overline{\mathbf{d}(\tau)}, \bar{\tau}) \leq \left(\frac{B+C}{V} - X_{\Sigma}^{optim} + g^{optim} \right) - \limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\tau)\}, \tag{5.102}$$

каде ако замениме во (5.102) дека $\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{m=1}^M \mathbf{E}\{u_0^m(\tau)\} = X^{\sup}$ го добиваме изразот (5.94).

Според тоа, овој MassiveAQUA алгоритам ги задоволува потребните усреднети ограничувања за казните, ги стабилизира сите редови на чекање, постигнува максимален проток, како по корисник, така и агрегиран проток, достигнува минимално доцнење од редовите на чекање, и ги постигнува следните временски средни вредности: $u_0^m(t)$ да биде во рамките на $-B/V$ на оптималната вредност X_{Σ}^{optim} , и за целната функција (5.76) да е детермистички ограничена со B/V на оптималната вредност g^{optim} . Перформансната дупка од B/V може да се направи да биде незабележливо мала, со избор на контролниот параметар V да биде доволно голем (види го изразот (5.87)). Од друга страна, имаме трговија со временската средна вредност за големината на редовите на чекање кои се зголемуваат линеарно со параметарот V , и одлуките за отфрлање на пакети се намалуваат со зголемување на параметарот V (види ги изразите (5.93) и (5.86)). Тоа ја претставува трговијата со големината на редовите на чекање од редот $[O(-1/V), O(-V)]$, или според теоремата на Литл, просечната големина на редот на чекање е пропорционален со просечното доцнење на редот, што често се нарекува performance-delay trade-off.

Горедадениот доказ на Теоремата 5.5 понатаму открива низа детали, во поглед на ефектите од иницијалните услови $\mathbf{S}(0)$ на временските средни вредности за било кој слот t (види (5.99), (5.100) и (5.101)). Погоре дадената перформансна анализа сугерира една следна контролна стратегија: Секој слот τ , да се набљудуваат моменталните вредности на $\mathbf{S}(\tau)$ и да се превземе таква контролна акција, во зависност од $\mathbf{S}(\tau)$, алчно да се минимизираат Љапуновите drift-plus-penalty изрази на десната страна од неравенството за посакуваниот Љапунов drift (5.74). Уште повеќе, контролната акција на слотот τ треба да избере најсоодветни контролни параметри V_1 и V_2 за да се минимизираат двете целни функции и самиот drift $\Delta(\mathbf{S}(\tau))$. Во исто време, треба да тежнее да ги турне редовите на

чекање кон состојба со пониско натрупување (преполнување), но да се води сметка да не се предизвикаат големи казни $u_0^m(\tau)$ (за секој m) и $g(\mathbf{p}(\tau), \mathbf{d}(\tau), \tau)$, и високи вредности за ратата на отфрлени пакети (што е пропорционално со намалувањето на контролниот параметар V_2 , според (5.86)). Затоа, ја минимизираме тежинската сума на drift-от и казните (пеналите), каде што казните се скалирани со “значајност” токму преку тежинските контролни параметри V_1 и V_2 , кои претставуваат колку многу ја нагласуваме казнената минимизација, обидувајќи се да достигнеме оптимални севкупни перформанси.

5.4.3 Доцнење во најлош случај за MassiveAQUA алгоритмот

Понатаму, нека го одредиме максималното доцнење, т.е. доцнењето во најлошиот случај на сите пакети кои не се отфрлени во редот на чекање m , кое може да го означиме како Δt_d и кое, според теоремата на Литл [96] е право-пропорционална на средната големина на редот на чекање, а обратно пропорционална со просечниот интензитет на доаѓање на пакетите во m -тиот ред на чекање. Според тоа, дадена е следната лема:

Лема 5.2: Нека претпоставиме дека редовите на чекање $Q_m(t)$ и $U_m(t)$ се развиваат според равенките (5.63) и (5.72), соодветно. Освен тоа, нека се користи алгоритмот MassiveAQUA, кој обезбедува $Q_m(t) \leq Q_m^{\max}$ и $U_m(t) \leq U_m^{\max}$ за секој временски слот $t \in \{0,1,2,3,\dots\}$. Доколку просечниот вкупен интензитет на доаѓање на пакети е $\bar{\lambda}$ и ја земеме наједноставната техника на опслужување на пакети прв-влезен-прв-излезен (т.е. FIFO), тогаш максималната големина на редот на чекање (W_m^{\max}) и доцнењето во најлош случај (Δt_d) за сите неотфрлени податочни пакети (кои останале) во m -тиот ред на чекање ќе бидат:

$$W_m^{\max} = \left\lceil \frac{Q_m^{\max} + U_m^{\max}}{\mu_{\min}} \right\rceil, \quad (5.103)$$

$$\text{и} \quad \Delta t_d = \frac{\left\lceil (Q_m^{\max} + U_m^{\max}) / \mu_{\min} \right\rceil}{\bar{\lambda}}. \quad (5.104)$$

Доказ за Лема 5.2: Нека го фиксираме временскиот слот t . И нека знаеме дека, целокупниот сообраќај кој доаѓа во m -тиот ред на чекање со брзина (интензитет) на доаѓање $A_m(t)$ е или опслужен или отфрлен со соодветна одлука за отфрлање на пакет $d_m(t)$ во тој временски слот, или пред временскиот слот $t + W_m^{\max}$. Сега, нека тргнеме од претпоставка која е спротивна на претходното, и нека стигнеме до противречност (негирање), со што ќе ја докажеме Лема 5.2. Според равенката (5.63) интензитетот на доаѓање $A_m(t)$ се додава на големината на редот на чекање $Q_m(t+1)$ и прв пат е овозможен да биде опслужен во временскиот слот $t+1$. Така, мора да важи следното: $Q_m(\tau) > \mu_m(\tau) + d_m(\tau)$ за сите $\tau \in \{t+1, \dots, t+W_m^{\max}\}$ (инаку, целата содржина на редот на чекање во слотот τ ќе биде

испразнета). Земајќи ја во предвид и равенката (5.72) за сите временски слотови кога $\tau \in \{t+1, \dots, t+W_m^{\max}\}$ и кога важи $Q_m(\tau) > \mu_m(\tau) + d_m(\tau)$, имаме:

$$U_m(\tau + 1) \geq U_m(\tau) - \mu_m(\tau) - d_m(\tau) + \mu_{\min}, \quad (5.105)$$

па собирајќи ја равенката (5.105) за сите временски слотови $\tau \in \{t+1, \dots, t+W_m^{\max}\}$ следува:

$$U_m(t + W_m^{\max} + 1) - U_m(t + 1) \geq - \sum_{\tau=t+1}^{t+W_m^{\max}} (\mu_m(\tau) + d_m(\tau)) + W_m^{\max} \cdot \mu_{\min}. \quad (5.106)$$

Реорганизирајќи ги нештата во претходната равенка (5.106) и користејќи го фактот што го земавме дека важат: $U_m(t + W_m^{\max} + 1) \leq U_m^{\max}$ и $U_m(t + 1) \geq 0$ следува:

$$W_m^{\max} \cdot \mu_{\min} \leq U_m^{\max} + \sum_{\tau=t+1}^{t+W_m^{\max}} (\mu_m(\tau) + d_m(\tau)). \quad (5.107)$$

Од друга страна, збирот на $\mu_m(\tau) + d_m(\tau)$ на целиот интервал $\tau \in \{t+1, \dots, t+W_m^{\max}\}$ мора да биде стриктно помал од $Q_m(t+1)$. Во спротивно, според FIFO начинот на опслужување, сите податоци кои доаѓаат во редот на чекање, ќе бидат сместени на самиот крај од редот на чекање (на крајот од содржината на $Q_m(t+1)$) и ќе треба да бидат отстранети за време на овој интервал. Затоа имаме:

$$\sum_{\tau=t+1}^{t+W_m^{\max}} (\mu_m(\tau) + d_m(\tau)) < Q_m(t+1) \leq Q_m^{\max}. \quad (5.108)$$

Комбинирајќи ги (5.107) и (5.108) заедно, следува:

$$W_m^{\max} \cdot \mu_{\min} < U_m^{\max} + Q_m^{\max} \quad (5.109)$$

Од каде што следува:

$$W_m^{\max} < \frac{(U_m^{\max} + Q_m^{\max})}{\mu_{\min}}. \quad (5.110)$$

Директно од равенката (5.110) следува дека истата противречи на равенката (5.103), при што истата е докажана. Понатаму, доколку се подели веќе докажаната максималната големина на редот на чекање (W_m^{\max}) со просечниот вкупен интензитет на доаѓање на пакети $\bar{\lambda}$ се добива равенката (5.104). Со тоа, доказот за Лемата 5.2 е завршен.

5.4.4 Симулациски резултати и анализи за 5GT со MassiveAQUA алгоритмот

Понатаму, во овој дел, се презентирани резултати и анализи од погоре дадениот MassiveAQUA алгоритам, имплементиран во 5GT за сценарија кои вклучуваат потполна мрежна покриеност од повеќе различни типови на RAT-и, за 250 5G мобилни терминали и еден 5G фиксен терминал (сервер во јадрото на мобилната мрежа). Од три различни

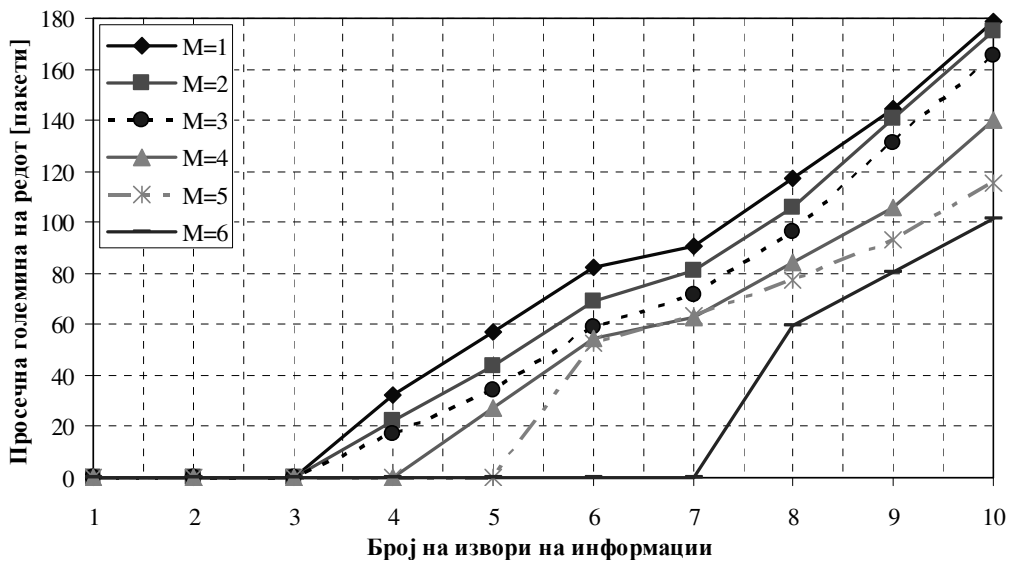
сценарија, се добиени резултати за средниот проток, средната големина (backlog) на редовите на чекање за различни мрежни услови, а исто така и вредности за средните доцнења на редовите за чекање во 5G-ите. Симулациските сценарија се повеќе-клеточни (multi-cell), поставени во густа урбана област, со случајно избрани почетни позиции за мобилните терминали, кои се униформно распределени во дадена урбана област. Резултантната средна моќност за секој RAT интерфејс во 5G е $p_m^{av} = 0.7 W$. Да нагласиме дека, избраните максимални излезни брзини на опслужување се внимателно и намерно одбрани да бидат адекватни на максималните опслужувачки брзини во uplink (преку делење на битските брзини во uplink со средниот број на бити по пакет) за LTE, LTE-Advanced, IEEE 802.11n, IEEE 802.16e, IEEE 802.16m, IEEE 802.11ac и IEEE 802.11b RAT-ите, кои брзини се делат на 250-те мобилни терминали во рамките на една клетка.

Во табела 5.3 се сумирани поважните употребени параметри за сите три сценарија за кои се претставени графици со резултати. Секоја симулација е изведена со 10^7 временски слотови. На слика 5.7 е дадена просечната големина на редот на чекање (колку во просек има пакети во сите редови на чекање) наспроти различниот број на различниот број на мултимедиски извори. Просечните интензитети на доаѓање (брзините на доаѓање на пакети) за различниот број на извори (апликации) на информации се дадени во табела 5.3. Несомнено, како што бројот на искористени интерфејси расте во 5G-и, просечната големина на редовите на чекање станува сè помала. Случајот кога имаме 6 интерфејси има најдобри резултати во споредба со другите случаи (кога има помал број на RAT интерфејси) за било кој број на извори на информации. Воочлива е разликата помеѓу сите случаи со повеќе интерфејси и случајот кога имаме само еден интерфејс и немаме MassiveAQUA во мобилниот терминал (за $M=1$ на сликата 5.7)). Според теоремата на Литл, доколку ја поделиме просечната големина на редовите на чекање со просечните дојдовни брзини – ќе ја добиеме горната граница на просечното временско доцнење на редовите на чекање. Според тоа, во случаите со повеќе интерфејси во 5G со MassiveAQUA алгоритмот имаат минимални просечни доцнења за било колку активни извори на информации, а со тоа и веројатноста за отфрлање на пакети и загушувањата на пакети стануваат минимални. Следно, на слика 5.8 се дадени просечните протоци во uplink по мобилен 5G уред наспроти просечната брзина на движење на истите, кога бројот на извори на информации е фиксен (т.е. кога $N=3$). Ова е сценарио 2 и искористените сервиси се: Видео-конференција, VoIP и податочен сервис. Повеќе од очигледно е дека со порастот на бројот на RAT интерфејси протокот расте за било која брзина на движење, и покрај тоа што со порастот на брзината овие криви имаат опаѓачки тренд.

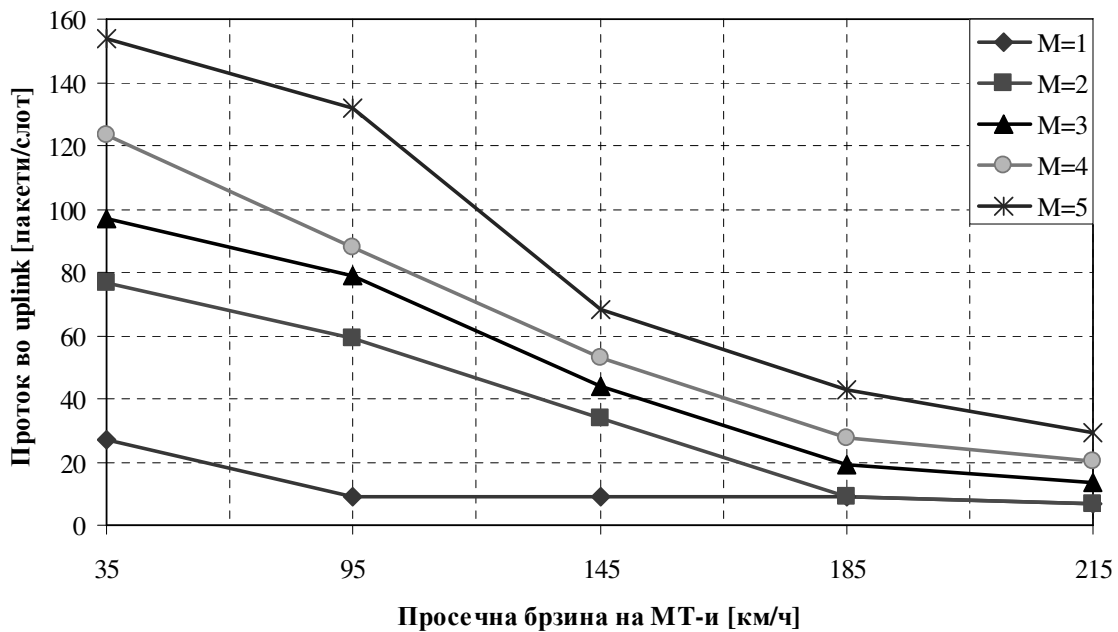
Табела 5.3 Симулациски параметри за трите сценарија

Сценарио	Параметри и вредности	Опис
Сценарио 1	$v = 40$ км/ч	Просечна брзина на мобилните терминали
	$x_{10}=[68.9655; 50; 24.316; 100; 50; 50; 24.316; 50; 68.9655; 68.9655]$ $x_9=[68.9655; 50; 24.316; 100; 50; 50; 24.316; 50; 68.9655]$ $x_8=[68.9655; 50; 24.316; 100; 50; 50; 24.316; 50]$ $x_7=[68.9655; 50; 24.316; 100; 50; 50; 24.316]$ $x_6=[68.9655; 50; 24.316; 100; 50; 50]$ $x_5=[68.9655; 50; 24.316; 100; 50]$ $x_4=[68.9655; 50; 24.316; 100]$ $x_3=[68.9655; 50; 24.316]$ $x_2=[68.9655; 50]$ $x_1=[68.9655]$	Вектори на средните дојдовни брзини за различен број на извори на информации
	$\mu_1 = (1/250)*[44643];$ $\mu_2 = (1/250)*[44643; 12500];$ $\mu_3 = (1/250)*[6694.4; 37000; 12500];$ $\mu_4 = (1/250)*[6694.4; 12500; 5000; 44643];$ $\mu_5 = (1/250)*[6694.4; 12500; 5000; 44643; 5000];$ $\mu_6 = (1/250)*[6694.4; 12500; 5000; 44643; 12500; 6694.4].$	Вектори на излезните опслужувачки брзини за различен број на RAT интерфејси (за M редови на чекање).
Сценарио 2	$\mu_1 = (1/250)*[6694.4];$ $\mu_2 = (1/250)*[6694.4; 12500];$ $\mu_3 = (1/250)*[6694.4; 5000; 12500];$ $\mu_4 = (1/250)*[6694.4; 12500; 5000; 6694.4];$ $\mu_5 = (1/250)*[6694.4; 12500; 5000; 12053.57; 2250].$	Вектори на излезните опслужувачки брзини за различен број (M) на RAT интерфејси.
	$x=[68.9655; 50; 24.316]$	Вектор со средните временски брзини на доаѓање за $N=3$ сервиси (извори на информации)
Сценарио 1 и 2	$V=V_1=V_2=10$	Казнени контролни параметри
Сценарио 3	$x=[69; 50]$	Вектори со средните временски брзини на доаѓање за $N=2$ сервиси (извори на информации)
	$v = 40$ км/ч	Средна брзина на движење на мобилните терминали
	$3a_{Rout=76.7776}: \mu_2 = (1/250)*[6694.4; 12500];$ $3a_{Rout=93.4456}: \mu_2 = (1/250)*[6694.4; 16667];$ $3a_{Rout=96.7776}: \mu_3 = (1/250)*[6694.4; 12500; 5000];$ $3a_{Rout=98.2160}: \mu_2 = (1/250)*[12054; 12500];$ $3a_{Rout=103.5552}: \mu_3 = (1/250)*[6694.4; 12500; 6694.4].$	Вектори на излезните опслужувачки брзини за различен број на RAT интерфејси (за M редови на чекање) и различни агрегирачки протоци.
	$V_1=10$	Првиот казнен контролен параметар
Сценарио 1, 2 и 3	$p_m^{av}=0.7 W$	Просечна моќност за секој интерфејс

Исто така, со помал број на RAT интерфејси, просечниот проток е помал и поддржува само мал дел од радио пристапните мрежи (претежно оние RAT со најдобра поддршка за мобилноста по корисник). Клучна опсервација за MassiveAQUA алгоритмот и воглавно за целиот 5GT е тоа што истиот прави оптимална поточна контрола и оптимални одлучувања за избор на RAT/RAT-и, едновременно предизвикувајќи мрежна стабилност и минимална големина на редовите на чекање.



Слика 5.7. Просечна големина на редовите на чекање во 5GT-и наспроти бројот на извори.

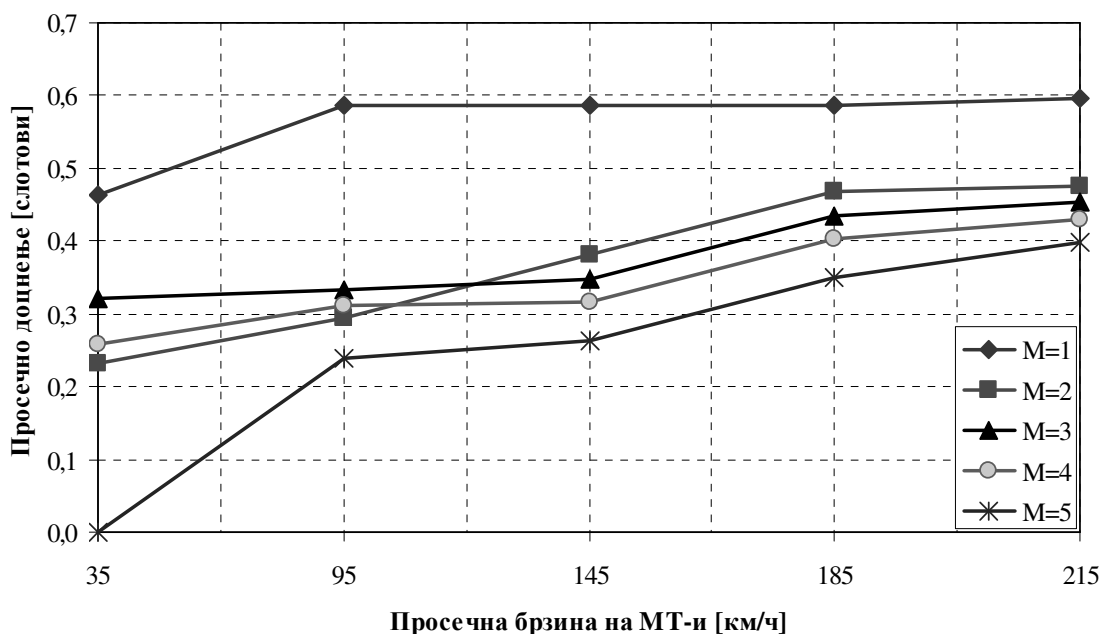


Слика 5.8. Просечен проток во uplink наспроти брзината на движење на МТ-и.

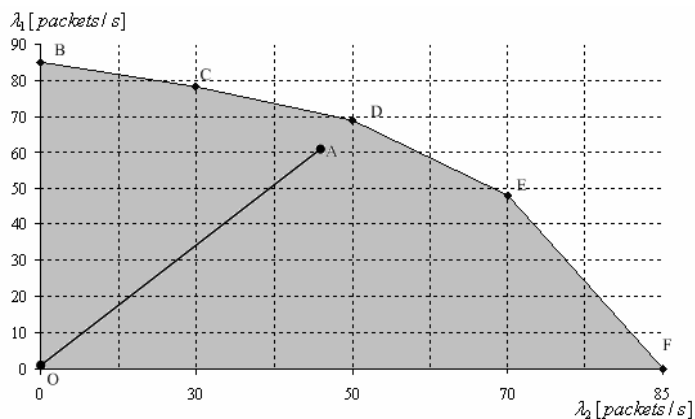
Како што се очекуваше, најлошиот случај на uplink проток го имаме за мобилниот уред со само еден RAT интерфејс ($M=1$). Понатаму, за истото сценарио 2, на слика 5.9 е дадено просечното доцнење на редовите на чекање за различни средни брзини на движење на 5G мобилни терминали. Имаме минимални вредности за доцнењето за случаите кога имаме 5GT-и со поголем број на RAT интерфејси (како на пример, кога бројот на RAT интерфејси е $M=5$). Како што се зголемува брзината на движење на 5GMT, просечните доцнења во редовите на чекање стануваат поголеми за било кој случај (крива). Сè до просечна брзина на движење 95 км/ч случаите со $M=3$ и $M=4$ број на интерфејси покажуваат полоши резултати од случајот со $M=2$ интерфејси, заради фактот што во овој случај користиме 5G мобилни терминали со два интерфејси кои припаѓаат на WLAN

(IEEE 802.11n) и LTE RAT-ите, кои покажуваат навистина добри перформанси (во поглед на протокот и средното доцнење од редовите на чекање) за ниски брзини, бидејќи имаат доста солидна поддршка за мобилност при посочените просечни брзини. После брзини кои се поголеми од 110 км/ч, како што и се очекува, вредностите на доцнењата за различните случаи се подредуваат по очекуван редослед, и како што се зголемува бројот на искористени RAT интерфејси во 5GMT, така и перформансите во поглед на доцнењето се подобруваат.

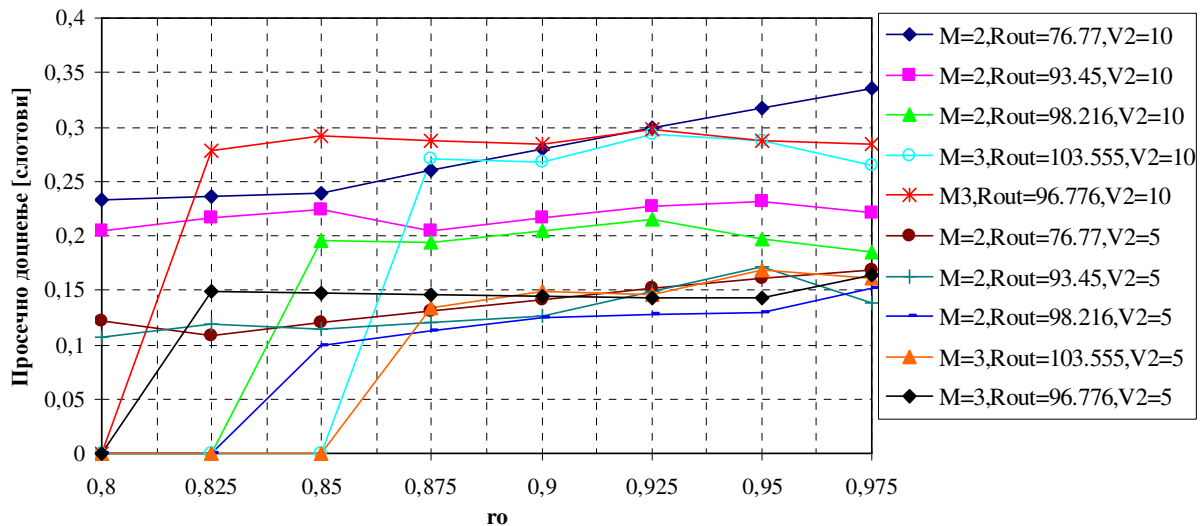
Во сценарио 3, имаме само два извори на информации (два сервиси), и регион на капацитет даден на слика 5.10, заедно со приказот на параметарот ρ_0 (однос од моменталната и максималната вредност на искористениот капацитет на понуден сообраќај).



Слика 5.9. Просечно доцнење во редовите на чекање наспроти брзината на движење на МТ-и.



Слика 5.10. Регион на капацитетот Λ . За $\lambda = (50, 69)$ (т.е., точката D) се дозволени различни големини за отсечката OA (параметарот $\rho_0=OA/OD$).



Слика 5.11. Просечно доцнење во редовите на чекање за различни вредности на параметарот ro .

Понатаму, сликата 5.11 ги покажува просечните доцнења во редовите на чекање за различни вредности на параметарот ro , и за различни вредности на казнениот (пеналски) контролен параметар V_2 , доколку казнениот контролен параметар за првата казнена функција е $V_1=10$. Како што параметарот ro се зголемува, и се доближува до неговата максимална вредност (која е 1, т.е. кога сегментот $OA=OD$ на сликата 5.10), така просечните вредности на доцнењата од редовите на чекање стануваат сè постабилни и ограничени. Како што може да се забележи од слика 5.11, кога ro поставуваме казнениот контролен параметар половина од неговата претходна вредност за случајот кога V_2 е 10 (т.е. кога $V_2=5$), доцнењата за сите пет испитани случаи стануваат помали со максимални вредности од околу 0.15 временски слотови. Во исто време, тоа има тенденција да ги турне редовите на чекање кон помали загушувања (натрупувања), но од друга страна, се добиваат поголеми вредности за пакетската отфрлувачка рата (која пропорционално расте со смалувањето на казнениот контролен параметар V_2 , според равенката (5.86)). Според тоа, намалувајќи ја тежинската сума на Љапуновиот drift и “казната” за втората казнена функција од (5.76), ro намалуваме просечното доцнење на редовите, но ја зголемуваме пакетската рата на отфрлање на пакети од сите редови на чекање. И за двете различни вредности на овој контролен параметар V_2 (т.е. кога $V_2=10$ и кога $V_2=5$), случајот кога имаме $Rout=98.2160$, т.е. кога имаме балансираны редови на чекање со речиси еднакви вредности за соодветните излезни опслужувачки брзини на редовите (т.е. за случајот кога $\mu_2 = (1/250) * [12054; 12500]$), постигнуваме најмали можни доцнења во споредба со сите други случаи, дури и за случајот кога имаме три RAT интерфејси во 5GT-и (т.е. најголем број на интерфејси од сите испитани случаи). Според тоа, можеме да заклучиме дека вредностите за излезните опслужувачки брзини на секој од редовите на чекање од RAT

интерфејсите имаат многу значајно влијание врз перформансите на 5G јазлите со MassiveAQUA алгоритам во себе, и истите би требало да бидат доста урамнотежени.

5.5 Заклучок за симулациските резултати и анализи за 5GТ со Љапунова оптимизација

Во оваа глава од докторската дисертација беа претставени нови аналитички рамки-водилки за идните 5G широкопојасни multi-RAT мрежи со вертикален multi-homing и multi-streaming својства, и со користење на Љапунова drift-plus-penalty техника имплементирана во корисничките мобилни уреди и во серверите во јадрото на мобилната мрежа (т.е. во 5G проху серверите), која врши оптимален избор на RAT/RAT-и за даден мултимедиски извор на сервис. Со тоа, се постигнува високо ниво на QoS, максимален просечен проток по корисник и севкупен проток на мрежата, стабилност на системот, минимални големини на редовите на чекање, а со тоа и минимални доцнења, при ограничувања на моќноста на одредени средни дозволени вредности. Овде презентираниот концепт на 5G јазел води кон практични контроли со користење на полиси и контролни алгоритми кои резултираат во оптимални и стабилни мрежи и системи, со високо ниво на QoS поддршка за било кој мултимедиски сервис. Воедно, овие 5G јазли, несомнено влегуваат во 5G парадигмата на мобилни и безжични мрежи кои треба да се имплементираат во иднина.

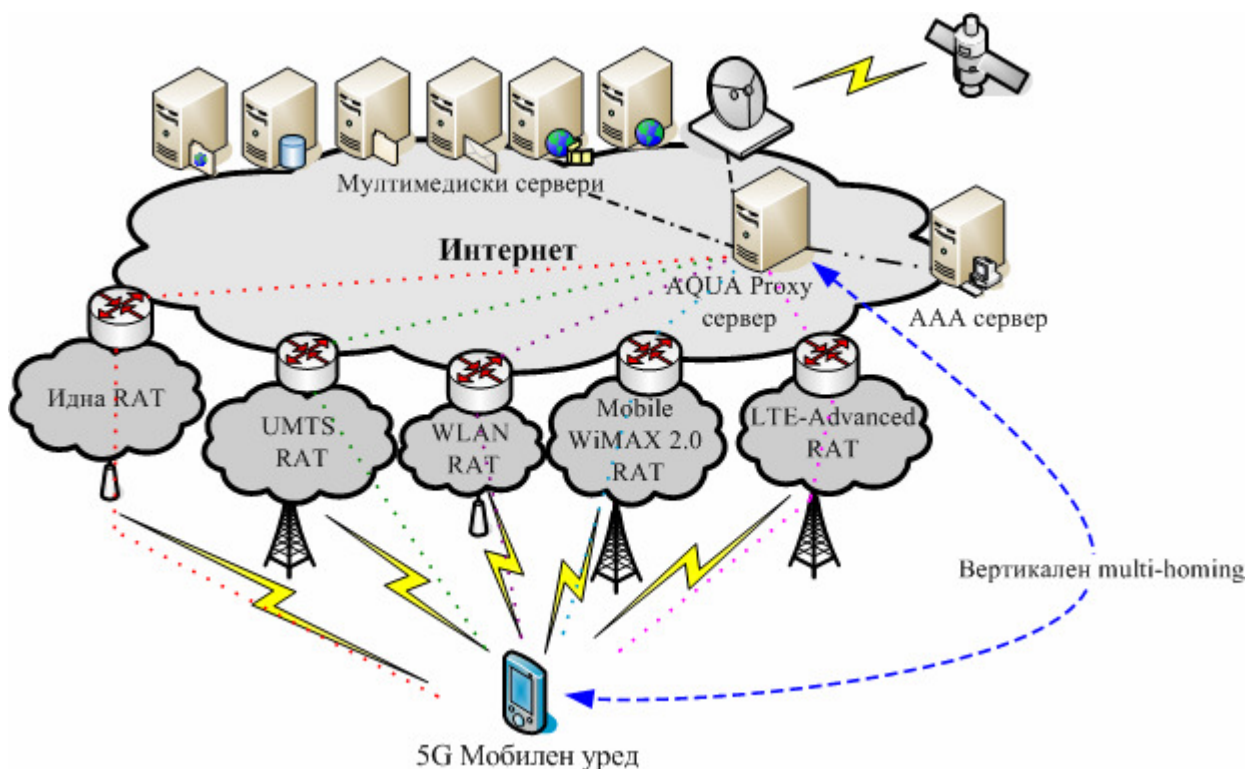
6. Некои примени на 5G јазлите со AQUA модул

Постигнатите одлични резултати, перформанси и можности на нашиот напреден QoS модул за 5G мобилните и безжични мрежи, презентирани во претходните две глави, би имале широка научна примена, и би влијаеле токму во тоа, овој модул да влезе во рамките на финалните стандарди за 5G мрежите, или во најмала мера би учествувал во креирањето на логиката, парадигмата и архитектурата на истите. При тоа би се додефинирале дополнителни нови или модифицирани нивоа, меѓу-нивоа и модули во идните 5G мобилни и безжични мрежи (кои не постојат до сега) за да може беспрекорно да функционира самиот предложен QoS концепт, заедно со останатите концепти на напредните мобилни безжични IP мрежи. На крај, е многу важно да се изберат и дефинираат процесите и модулите кои ќе изберат најдобри QoS и QoE, со истовремено најевтина цена на дадена услуга користејќи една или повеќе безжични мобилни мрежи во исто време (што е основна способност на идните генерации на мобилни уреди за користење на мобилна широкопојасна сервиси и агрегација на мрежи). Се разбира дека истражувањата не застануваат овде, и водат кон низа нови насоки, кон можни продлабочувања, усовршувања и подобрувања на QoS механизмите и оптимизациските алгоритми, за да може истите да допринесат уште поголем прогрес во полето на постојните и идни мобилните безжични системи, како суштинска област од телекомуникациите.

Се разбира, во презентираната рамка водилка за 5G мобилни и фиксни уреди со интелигентен QoS модул во себе, како и кај повеќето напредни истражувања основен недостаток би била техничката поддршка, т.е. денешните мобилни уреди не се во состојба да ги изведуваат сложените алгоритми, да чуваат големи бази со податоци, да имаат огромни процесирачки моќи и низа други барања кои се наведени погоре. Но, ако се следи Муровиот закон, како и Кумеи-овиот закон (Koomey's law [52]) за експоненцијалниот развој на процесорската и мемориската можност на мобилните и фиксните терминали, тогаш неминовно е дека во иднина (барем до 2020 год., до кога е планирана имплементацијата на 5G мрежите) истите ќе бидат со многу поголеми можности и перформанси, па не би постоела никаков проблем или пречка, иновациите простигнати и предложени во оваа дисертација да се имплементираат во идните 5G мрежи и мрежни уреди. Во таа насока, на слика 6.1 е презентирана една можна примена на нашиот 5G MT и AQUA проху сервер(и) во едно конкретно хетерогено сценарио за 5G, каде се присутни постојни (UMTS, WLAN, Mobile WiMAX, LTE/LTE-Advanced) и идни RAT-и. Според

истражувањата, нашиот предложен 5G MT има вертикален multi-homing и multi-streaming способности, и може да го раздели сообраќајниот потокот (кој потекнува од една или повеќе мултимедиски апликации) да оди низ повеќе RAT интерфејси, кој сообраќај се собира од другата страна во AQUA Proxy серверот и се проследува до дестинацијата и обратно. На тој начин ги користиме сите достапни радио пристапни мрежи оптимално и ефикасно, нудејќи висока QoS поддршка за било кој мултимедиски сервис. Како што може да се види од сценариото на слика 6.1, самиот мобилен уред нема ограничувања во тоа колку и кои радио пристапни точки (технологии) ќе ги користи и во начинот на нивно комбинирање. Така, бидејќи ова е корисничко-центриран концепт, оставена е значителна слобода на избор на корисникот, да може да си профилира кои сè пристапни мрежи ќе ги користи и кои сервисни профили. При тоа стартуваниот QoS оптимизациски алгоритам во мобилниот уред и на страната на AQUA Proxy серверот ќе ја избере најдобрата рута (или рути) за даден сервис, обезбедувајќи најдобар QoS за секој 5G корисник. Воедно, вертикалниот multi-homing домен е означен од каде до каде се развива и постои, нудејќи низа на поволности и можности да се користат повеќе потоци и агрегација на битски брзини на мрежно ниво. При тоа, мобилниот уред може да постави како IPv4, така и IPv6 адреси за секој посебен мрежен интерфејс, без некои посебни ограничувања.

Понатаму, бидејќи Next Generation Mobile Broadband (скратено NGMB, Следна генерација на мобилни широкопојасни мрежи) мрежите и сервисите се развиваат и истражуваат со огромно темпо, проследени со фундаментални промени и предности, нашиот предложен 5G мобилен концепт може без двоумење да се пронајде и во овие мрежи. Поконкретно, 5G MT со вклучен AQUA модул во себе со различни оптимизирачки алгоритми може да најде примена во NGMB мрежите кои користат Capacity Building (CB) преку овие високо перформансни мобилни широкопојасни мрежи и да гарантираат QoS обезбедување за учење на далечина со користење на мултимедиски сервиси (кои вклучуваат пренос на аудио, видео и податоци преку Интернет). Оваа примена е несомнено наметната од причина што NGMB мрежите бараат паметни уреди, способни да обезбедат широк опсег на мултимедиски сервиси (во реално време и вон-реално време) до крајните корисници, кои се корисничко-центрирани, со широк спектар од можности. Бидејќи идните 5G мобилни мрежи го следат токму горенаведениот концепт, се очекува да станат еден од главните делови на NGMB мрежите и сервисите.



Слика 6.1. Можна примена на 5G мобилен уред и AQUA Proxy сервер во хетерогено сценарио.

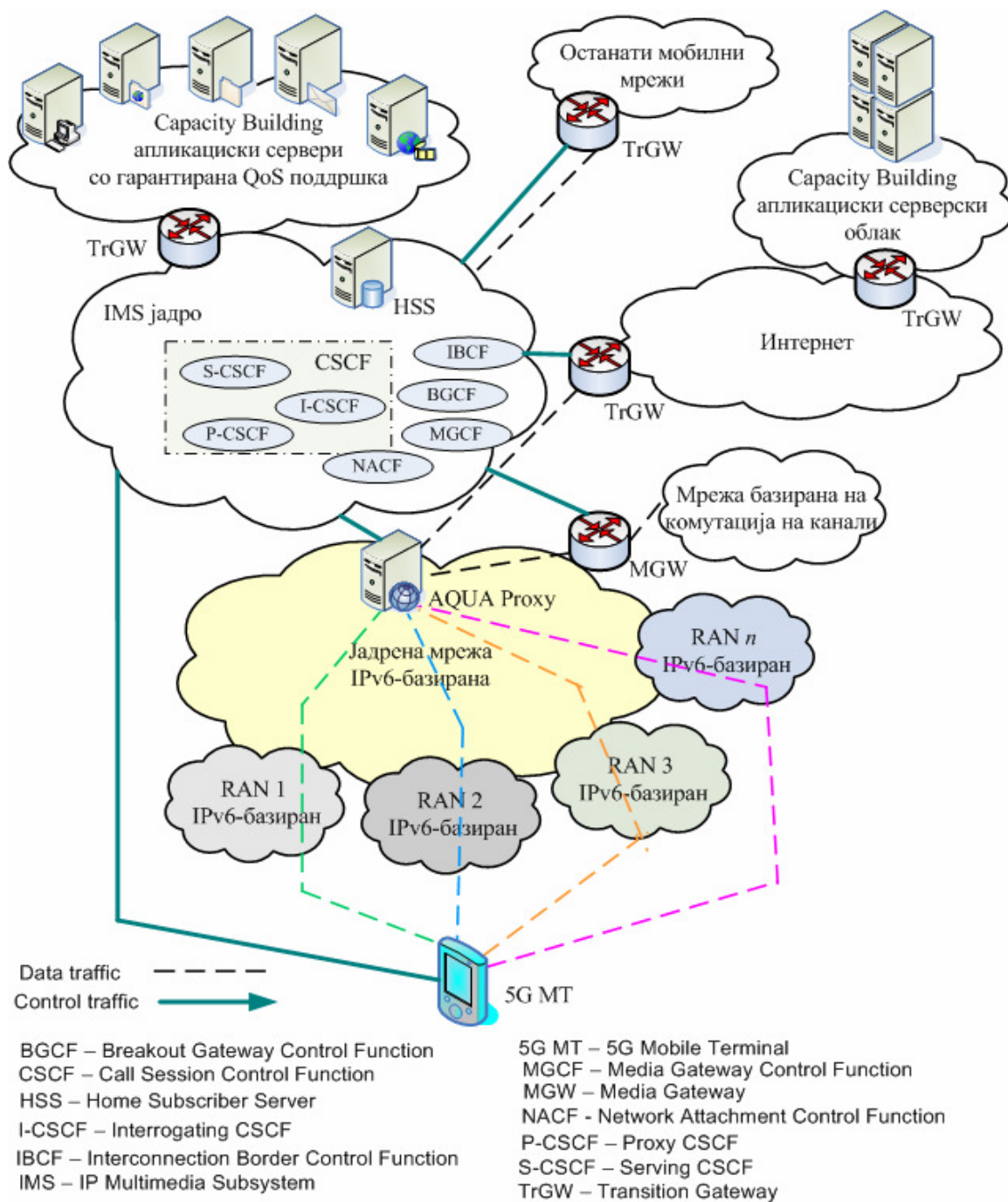
Исто така, 5G мобилните и безжични мрежи се очекува да се усогласат со ITU стандардите што се однесуваат на Next Generation Networks (NGN), Интернет технологиите и идните мрежи [9], [10] и [55]. Нашиот предложен 5G MT со AQUA модул во себе, многу лесно би нашол примена во NGMB мрежите, бидејќи може да обезбеди СВ можности за мултимедиски СВ сервиси за учење на далечина, вклучувајќи високо ниво на QoS поддршка, како и доставување на Over-The-Top (OTT) сервиси преку Интернет.

Пред сè, луѓето со заеднички цели, потенцијали и работи се главна суштина за СВ сервисите, каде учесниците во учењето на далечина (курсеви, семинари, вебинари и сл.) можат да пристапат до мултимедиски сервиси преку мобилните широкопојасни мрежи, во било кое време, од било кое место на планетава и од било кој мобилен уред. Освен тоа, концептот на СВ е концептуален процес на развој, споделување и здружување на знаење, способности, вештини, ресурси и процеси кои организациите, заедниците на луѓе треба да ги споделат, развијат, прилагодат или изградат, со цел да се постигнат забележливи и одржливи резултати широм светот. На тој начин, соодветни СВ сервиси (на пр.: учење на далечина, e-learning курсеви, виртуелни училници, обуки во реално-време доставени преку video-streaming, консултации преку VoIP и мултимедиски интерактивни апликации, итн.) можат да се дефинираат со соодветна QoS поддршка во NGMB мрежите, и/или OTT апликации остварени преку NGMB мрежите, а исто така и преку било кој IP-базирани мрежи, каде несомнено доаѓа примената на нашиот 5G MT со AQUA модул во себе од

една страна (во пристапниот дел) и AQUA Proxy серверот од другата (во јадрото на мрежата).

Понатаму, на слика 6.2 претставуваме едно можно сценарио во кое се користат СВ сервиси од страна на крајните корисници преку NGMB мрежи, со помош на нашиот предложен 5G MT и AQUA Proxy серверот. Самиот 5G MT и AQUA Proxy серверот со вертикални multi-homing и multi-streaming карактеристики се способни да се справат со повеќе радио мрежни конекции (RAT-и) и да го зголемат преносот на податоци од мултимедискиот сервис (на пр.: веб страна, video streaming, итн.) преку пренос на секој засебен објект од секој сервис во посебен поток, за да достигне највисоко ниво на задоволни крајни корисници. На тој начин, преку користењето на нашиот предложен 5G MT со AQUA модул во себе, една HTML страна од некоја конкретна e-learning курс платформа, поставена на мултимедиски СВ сервер, се дели на повеќе видови на објекти од различен тип: Java applet-и, ActiveX конторли, слики, видеа и чист текст. Така, наместо да креираме посебни конекции за секој објект, како што тоа е случајот со TCP, AQUA модулот ги користи своите вертикални multi-streaming и multi-homing карактеристики, со цел да го забрза процесот на пренос на избраната HTML страна преку посебни протоци кои одат преку повеќе RAT-и.

Освен тоа, корисникот преку 5G MT можат да користат СВ мултимедиски сервиси со QoS поддршка, доставена преку повеќе сервери кои се поставени во IMS јадрото на даден NGMB мрежен провајдер, каде што корисникот ќе има многу високо ниво на QoS поддршка за овие сервиси, или од друга страна, корисникот може да користи OTT СВ сервиси преку Интернет, без стриктни QoS побарувања и без најдобра QoS поддршка. Како и да е, сите СВ сервиси одат преку NGMB јадрените мрежи и преку било која постојна RAT (на пр.: 3G, 4G) и идна RAT (5G) завршуваат во корисничкиот MT (во downstream насока) и обратно (во upstream насока). Понатаму се презентирани симулациски резултати за средниот системски проток и мултимедиската пристапна веројатност за различни NGMB мрежни услови, заедно со интервалите на доверба, користејќи мултимедиски СВ сервиси. Ова сценарио е повеќе-клеточно, поставено во густа урбана област, со случајна поставеност на MT-и во испитуваното сценарио, со што е докажана применливоста на нашето решение за овие мрежи и сервиси. Сценариото се состои од три типа на RAT-и. Сите базни и пристапни точки се поставени на различни локации во симулациската средина, и нивните позиции (по клетка), заедно со нивниот радиус на покривање и капацитети се дадени во Табела 6.1.



Слика 6.2. Примена на 5G мобилен уред и AQUA Proxy сервер во NGMB мрежи со СВ сервиси.

Табела 6.1. Параметри за RAT-ите во симулациското сценарио со NGMB мрежи и СВ сервиси

	Позиција (координати) [m,m]	Мрежен радиус [m]	Мрежен капацитет [kb/s]
RAT1	(0,0)	2000	300000
RAT2	(0, 0); (-120, -120); (120, 120); (0,-255); (-120, 120); (120, -120); (0,255);	70	600000
RAT3	(0, 0); (-120, -120); (120, 120); (120,0); (-120, 120); (120, -120); (0,120);	40	7000000

Вредностите се внимателно одбрани за да одговараат на веќе постојни капацитети од RAT-гии: LTE, IEEE 802.11n и IEEE 802.11ac. При тоа, за RAT1 (LTE) имаме применето адаптивна модулација и кодирање, т.е., за различни оддалечености од центарот на RAT1 (LTE) базната станица користиме различни модулациски и кодирачки шеми (според LTE стандардот [56]). За физичката мобилност на МТ-и, како и во претходни сценарија, употребуваме 2-D имплементација на Gauss-Markov модел за мобилност разгледувајќи просечни брзини во интервалот 20-320 км/ч, при што е обезбедено големо ниво на случајност за мобилните корисници и големи степени на слобода на движење. Освен тоа, кога група на МТ-и ја напуштаат макро клетката со RAT1 покриеност, се претпоставува дека исто толку МТ-и влегуваат во набљудуваната клетка, па просечниот број на корисници по клетка останува константен цело време.

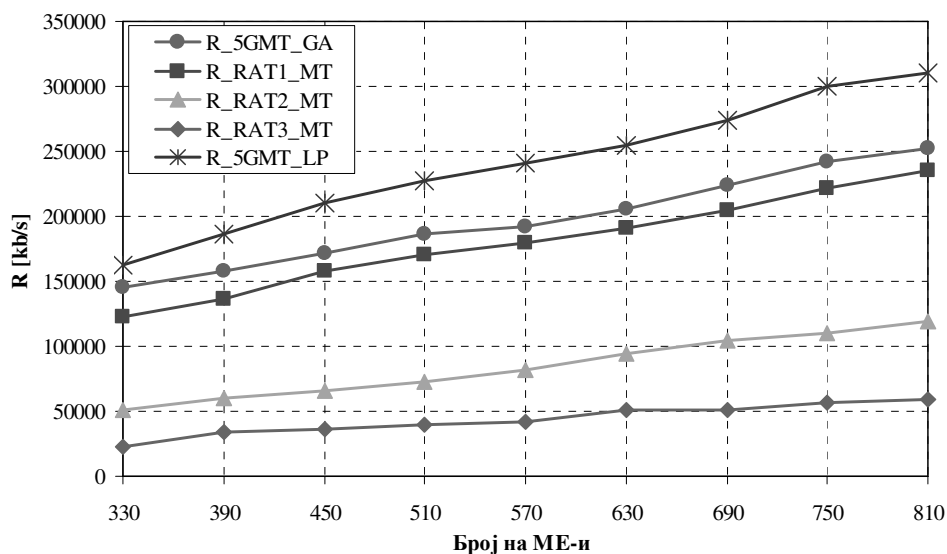
Мултимедискиот СВ сервисен поточен модел во предложената форма се состои од три различни типови на сервиси кои генерално се дефинирани со минимална загарантирана битска брзина (капацитет), почетно и крајно време на сервисот. При тоа овие три мултимедиски СВ сервиси се следните:

- Прв сервисен тип: Видео конференција за учесниците во e-learning курсот/обуката или консултациите со менторот; ниска битска брзина (128 kb/s) и минимално пропагациско време (150 ms од крај-до-крај).
- Втор тип на сервис: video-streaming за презентација на содржини во реално време и споделување на знаење; средна битска брзина (256 kb/s), подобар квалитет пропагациско време (150 ms од крај-до-крај), осетлив на jitter (до 50 ms).
- Трет тип на сервис: Податочен сервис за симнување на материјали од e-learning курсеви, форуми, посета на веб страни; висока битска брзина (512 kb/s) и поголема толеранција на доцнење (до 1 секунда), нула пакетска грешки за доставената содржина.

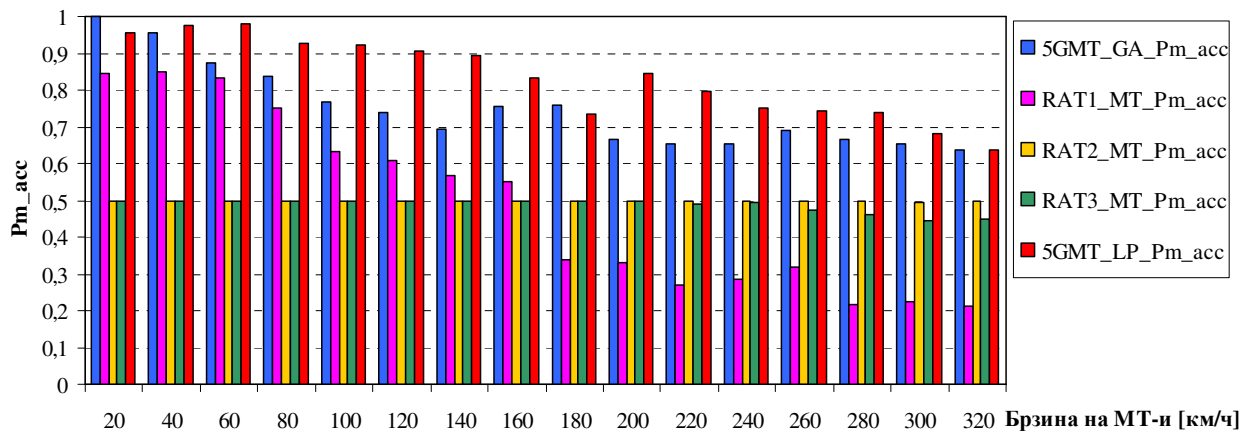
За време на симулацијата, за даден број на активни мобилни корисници (N), секој корисник добива еден од трите типови на сервиси дефинирани погоре. Во случаите кога имаме напреден 5G ME со AQUA модул во себе, за секој корисник му се доделуваат не само еден, туку сите три типа на сервиси наеднаш. Воедно, имаме пет различни сценарија. Во првиот случај, сите МТ-и се опремени со AQUA модул во себе со GA оптимизација во три-RAT МТ (со три RAT интерфејси). Во вториот случај сите МТ-и имаат LP како оптимизациски алгоритам во AQUA модулот, на местото од GA (во првиот случај). Овој случај на МТ го означуваме како 5GMT_LP. Понатаму, во останатите три случаи, користиме МТ-и без AQUA модул и без multi-RAT (интерфејси), но само со еден RAT интерфејс. Така, во третиот случај имаме МТ-и кои користат само RAT1 технологија (т.е.

само LTE интерфејс), во четвртиот има МТ-и кои користат само RAT2 интерфејси (т.е. само IEEE 802.16n интерфејс), и во петтиот последен случај, имаме МТ-и само со RAT3 интерфејс (т.е. само IEEE 802.11ac интерфејс).

Симулациските резултати за постигливите просечни битски брзини (протоци, означени со R) за различен број на МТ-и за сите пет погоре дефинирани случаи се претставени на слика 6.3. При тоа, просечната брзина на движење на МТ-и е поставена на 40 км/ч и вкупното симулациско време е 120 секунди (според [54] тоа време претставува основна вредност за добивање на корисни статистички резултати од QoS мерењата за секој сервис). Како што може да се забележи, протокот за нашиот предложен МТ, со AQUA модул во себе, за било кој број на МТ-и, е многу поголем од вредностите на просечниот проток за случајот кога користиме само МТ-и кои можат да имаат пристап само до RAT1 (R_{RAT1_MT}), или само до RAT2 (R_{RAT2_MT}) или RAT3 (R_{RAT3_MT}). Од друга страна, доколку ги споредиме протоците на R_{5GMT_LP} кривата (каде се користи LP за оптимизациски алгоритам) и протокот кога користиме GA како оптимизациски алгоритам во AQUA модулот на МТ (кривата R_{5GMT_GA}), МТ-и со LP постигнуваат највисок системски проток за било кој број на МТ-и. Само за мал број на МТ-и (т.е. 330 МТ-и по клетка), овие два случаи имаат блиски вредности за просечните битски брзини по клетка. Ова повлекува дека МТ со LP може да биде користен за средни и висока сообраќајна концентрација во NGMB мрежите (кога бројот на МТ-и е над 330), додека GA може да се користи во AQUA за многу мала густина на сообраќаен волумен (мал број на МТ-и, т.е. не повеќе од 300). Понатаму, на слика 6.4 е претставена просечната мултимедиска пристапна веројатност по клетка (P_{m_acc}) за различни брзини на движење на 500 МТ-и, при симулациско време од 120 секунди.



Слика 6.3. Просечен системски проток во NGMB мрежи со СВ сервиси наспроти бројот на МТ-и.



Слика 6.3. Просечна мултимедиска пристапна веројатност за различна брзина на МТ-и.

Вредноста за мултимедиската пристапна веројатност (P_{m_acc}) се пресметува според равенката (4.11). За случајот кога користиме МТ-и со AQUA модули со LP алгоритам, просечната вредност за P_{m_acc} се поголеми од вредностите за МТ-и со AQUA модулите со GA алгоритам за било која просечна брзина на движење, освен за најниски брзини, како 20 км/ч. Како и да е, вредностите за P_{m_acc} , за првите два случаи се значително поголеми од вредностите добиени за останатите три случаи, кога се користат МТ-и кои можат да пристапат само до еден RAT. Разликата во вредностите за P_{m_acc} по клетка, помеѓу МТ-и со AQUA модул со GA како оптимизирачки алгоритам и со LP како оптимизирачки алгоритам, во просек изнесува 0.125 (за поединечни физички брзини на МТ-и е и помала). Кога имаме повисока брзина на движење на МТ-и (со просечна брзина на МТ-и поголема од 60 км/ч), треба да се даде предноста на користење на 5G МТ со LP како оптимизирачки алгоритам во AQUA модулот за сите тие сценарија и случаи каде што P_{m_acc} е круцијален QoS параметар за СВ сервисите. Генерално, високите вредности за мултимедиската пристапна веројатност (P_{m_acc}) понатаму резултира во пониска веројатност на грешка, пониска пакетска грешка, повисоко ниво на достапност за сервисот и поголема доверливост и надежност. Згора на сè, би добиле поголеми агрегирани битски брзини заради вертикалниот multi-homing и multi-RAT карактеристики во МТ-и за било кој СВ сервис.

Понатаму, настрана од точкастите естиматори и/или просечните вредности, каде користиме само еден број за да се сумираат измерените резултати, во продолжение ги претставуваме интервалите на доверба за просечните протоци по клетка и просечните мултимедиски пристапни веројатности по клетка. Математичкиот апарат и начинот на пресметување на интервалите на доверба, барем за горенаведените податоци, веќе е образложен во глава 4 (подглава 4.4.4) и во [54], па овде се само прикажани крајните

резултати. Во табела 6.2 и табела 6.3 се претставени пресметаните интервали на доверба (CI-и) за просечната битска брзина (Гаусова распределба) и мултимедиската пристапна веројатност (биномна распределба) по клетка, според соодветните равенки за интервалите на доверба дадени во [54] (страна 330 и 332) и во подглава 4.4.4.

Табела 6.2 ги дава интервалите на доверба (интервалите се дадени во kb/s) за просечниот проток по клетка за различен број на МТ-и и четири различни степени на слобода ($\beta=\{0.8,0.9,0.95,0.99\}$), за сите пет симулациски случаи дискутирани погоре. Понатаму, на табела 6.3 ги претставуваме интервалите на доверба за просечните вредности на мултимедиската пристапна веројатност по клетка, за различен број на МТ-и, за истите четири степени на слобода како и во табелата 6.2, и за сите пет симулациски случаи. Параметарските вредности за РАТ-ите искористени во ова симулациско сценарио се: просечна брзина на МТ-и од 50 км/ч и вкупно времетраење на симулацијата од 120 секунда. Во табелите 6.2 и 6.3, со порастот на степенот на доверба, интервалот на доверба се шири околу средната вредност, како што впрочем е и очекувано.

Табела 6.2. Интервали на доверба (CIs) (во kb/s) за средниот проток по клетка за различен број (N) на МТ-и и за четири степени на слобода (β).

R_5GMT_GA [kb/s; kb/s]

β	CI за N=330	CI за N=390	CI за N=450	CI за N=510	CI за N=570	CI за N=630
0,8	(144690; 147070)	(157160; 159800)	(169770; 173340)	(184200; 188520)	(189360; 194260)	(203240; 209020)
0,9	(144350; 147410)	(156790; 160170)	(169270; 173840)	(183590; 189130)	(188660; 194960)	(202420; 209840)
0,95	(144050; 147710)	(156460; 160500)	(168830; 174280)	(183060; 189660)	(188050; 195570)	(201700; 210560)
0,99	(143470; 148290)	(155820; 161140)	(167960; 175150)	(182000; 190720)	(186860; 196760)	(200290; 211970)
β	CI за N=690	CI за N=750	CI за N=810	CI за N=870	CI за N=930	CI за N=990
0,8	(220540; 226480)	(238270; 245090)	(248810; 255630)	(256760; 264630)	(270600; 279100)	(284070; 292290)
0,9	(219700; 227320)	(237300; 246060)	(247840; 256600)	(255630; 265760)	(269390; 280310)	(282900; 293460)
0,95	(218960; 228060)	(236450; 246910)	(246990; 257450)	(254660; 266730)	(268340; 281360)	(281880; 294480)
0,99	(217520; 229500)	(234790; 248570)	(245330; 259110)	(252740; 268650)	(266260; 283440)	(279880; 296480)

R_5GMT_LP [kb/s; kb/s]

β	CI за N=330	CI за N=390	CI за N=450	CI за N=510	CI за N=570	CI за N=630
0,8	(161030; 163250)	(184110; 188580)	(209180; 211920)	(226030; 228950)	(239750; 242430)	(253420; 256680)
0,9	(160720; 163560)	(183470; 189220)	(208790; 212310)	(225610; 229370)	(239370; 242810)	(252950; 257150)
0,95	(160440; 163840)	(182920; 189770)	(208460; 212640)	(225250; 229730)	(239040; 243140)	(252550; 257550)
0,99	(159900; 164380)	(181830; 190860)	(207790; 213310)	(224540; 230440)	(238380; 243800)	(251750; 258350)
β	CI за N=690	CI за N=750	CI за N=810	CI за N=870	CI за N=930	CI за N=990
0,8	(271520; 275280)	(298260; 301780)	(309040; 312500)	(331520; 335800)	(335780; 339940)	(353980; 358580)
0,9	(270980; 275820)	(297760; 302280)	(308550; 312990)	(330910; 336410)	(335180; 340540)	(353320; 359240)
0,95	(270520; 276280)	(297330; 302710)	(308120; 313420)	(330380; 336940)	(334670; 341050)	(352750; 359810)
0,99	(269600; 277200)	(296470; 303570)	(307280; 314260)	(329340; 337980)	(333650; 342070)	(351620; 360940)

R_RAT1_MT [kb/s; kb/s]

β	CI за N=330	CI за N=390	CI за N=450	CI за N=510	CI за N=570	CI за N=630
0,8	(121340; 124160)	(135320; 138430)	(155840; 160060)	(167690; 172270)	(177530; 181700)	(189000; 193260)
0,9	(120940; 124560)	(134880; 138880)	(155240; 160660)	(167030; 172920)	(176930; 182300)	(188400; 193870)
0,95	(120590; 124910)	(134490; 139260)	(154720; 161180)	(166460; 173490)	(176410; 182820)	(187870; 194400)

0,99	(119900; 125600)	(133730; 140020)	(153690; 162210)	(165350; 174610)	(175390; 183840)	(186830; 195440)
β	CI за N=690	CI за N=750	CI за N=810	CI за N=870	CI за N=930	CI за N=990
0,8	(201810; 206740)	(218900; 224890)	(232450; 238510)	(233870; 238960)	(242400; 250860)	(248710; 262830)
0,9	(201110; 207440)	(218040; 225740)	(231590; 239370)	(233140; 239690)	(241190; 252070)	(246690; 264840)
0,95	(200500; 208050)	(217300; 226490)	(230840; 240120)	(232510; 240320)	(240140; 253120)	(244940; 266600)
0,99	(199290; 209250)	(215840; 227950)	(229370; 241590)	(231270; 241560)	(238080; 255180)	(241500; 270040)

R_RAT2_MT [kb/s; kb/s]

β	CI за N=330	CI за N=390	CI за N=450	CI за N=510	CI за N=570	CI за N=630
0,8	(50723; 51813)	(59734; 60900)	(65319; 66919)	(71869; 73695)	(81160; 83124)	(92812; 94930)
0,9	(50567; 51969)	(59568; 61066)	(65091; 67147)	(71609; 73955)	(80880; 83404)	(92510; 95232)
0,95	(50432; 52104)	(59424; 61210)	(64892; 67346)	(71383; 74181)	(80637; 83647)	(92247; 95495)
0,99	(50166; 52370)	(59139; 61495)	(64502; 67736)	(70937; 74627)	(80158; 84126)	(91731; 96011)
β	CI за N=690	CI за N=750	CI за N=810	CI за N=870	CI за N=930	CI за N=990
0,8	(104060; 106150)	(109030; 111320)	(118180; 120790)	(127120; 129900)	(138180; 141150)	(144710; 147830)
0,9	(103770; 106440)	(108700; 111650)	(117810; 121160)	(126720; 130290)	(137750; 141570)	(144270; 148280)
0,95	(103510; 106700)	(108410; 111930)	(117480; 121490)	(126380; 130640)	(137380; 141940)	(143880; 148670)
0,99	(103000; 107210)	(107850; 112490)	(116840; 122120)	(125700; 131320)	(136660; 142670)	(143120; 149430)

R_RAT3_MT [kb/s; kb/s]

β	CI за N=330	CI за N=390	CI за N=450	CI за N=510	CI за N=570	CI за N=630
0,8	(22832; 23692)	(33665; 34449)	(36015; 36753)	(39192; 40160)	(41707; 42753)	(50626; 51840)
0,9	(22709; 23815)	(33553; 34561)	(35910; 36858)	(39054; 40298)	(41558; 42902)	(50453; 52013)
0,95	(22602; 23922)	(33456; 34658)	(35819; 36949)	(38933; 40419)	(41428; 43032)	(50302; 52164)
0,99	(22393; 24131)	(33265; 34849)	(35639; 37129)	(38697; 40655)	(41173; 43287)	(50006; 52460)
β	CI за N=690	CI за N=750	CI за N=810	CI за N=870	CI за N=930	CI за N=990
0,8	(50480; 51720)	(55738; 57104)	(58151; 59647)	(62853; 64087)	(66172; 67742)	(71508; 73148)
0,9	(50303; 51897)	(55544; 57298)	(57938; 59860)	(62677; 64263)	(65949; 67965)	(71274; 73382)
0,95	(50149; 52051)	(55374; 57468)	(57752; 60046)	(62524; 64416)	(65754; 68160)	(71070; 73586)
0,99	(49847; 52353)	(55041; 57801)	(57387; 60411)	(62222; 64718)	(65371; 68543)	(70670; 73986)

Табела 6.3. Интервали на доверба (CIs) за просечните Pm_acc по клетка за различен број (N) на МТ-и и за четири различни степени на слобода (β).

5GMT_GA_Pm_acc

β	CI за N=330	CI за N=390	CI за N=450	CI за N=510	CI за N=570	CI за N=630
0.8	(0,8701; 0,9006)	(0,8734; 0,9035)	(0,8588; 0,8905)	(0,9378; 0,959)	(0,9093; 0,9349)	(0,8751; 0,905)
0.9	(0,8652; 0,9044)	(0,8686; 0,9072)	(0,8538; 0,8944)	(0,9341; 0,9613)	(0,905; 0,9379)	(0,8702; 0,9086)
0.95	(0,8608; 0,9075)	(0,8642; 0,9103)	(0,8493; 0,8977)	(0,9308; 0,9633)	(0,9012; 0,9404)	(0,8659; 0,9117)
0.99	(0,852; 0,9134)	(0,8555; 0,9161)	(0,8402; 0,9039)	(0,9238; 0,9667)	(0,8933; 0,945)	(0,8572; 0,9174)

5GMT_LP_Pm_acc

β	CI за N=330	CI за N=390	CI за N=450	CI за N=510	CI за N=570	CI за N=630
0.8	(0,9033; 0,9297)	(0,9599; 0,9765)	(0,9895; 0,997)	(0,9726; 0,986)	(0,8975; 0,9247)	(0,9709; 0,9848)
0.9	(0,8989; 0,9329)	(0,9568; 0,9782)	(0,9876; 0,9975)	(0,9699; 0,9873)	(0,893; 0,9279)	(0,9682; 0,9862)
0.95	(0,895; 0,9355)	(0,9539; 0,9796)	(0,9857; 0,9978)	(0,9674; 0,9883)	(0,889; 0,9306)	(0,9656; 0,9872)
0.99	(0,887; 0,9403)	(0,9479; 0,9821)	(0,9814; 0,9983)	(0,962; 0,99)	(0,8808; 0,9356)	(0,9601; 0,989)

RAT1_MT_Pm_acc

β	CI за N=330	CI за N=390	CI за N=450	CI за N=510	CI за N=570	CI за N=630
0.8	(0,8062; 0,8638)	(0,7951; 0,8541)	(0,8121; 0,8691)	(0,8088; 0,8662)	(0,7795; 0,8403)	(0,8254; 0,8804)
0.9	(0,7968; 0,8706)	(0,7856; 0,8611)	(0,8026; 0,8759)	(0,7993; 0,873)	(0,7697; 0,8477)	(0,8162; 0,8868)
0.95	(0,7883; 0,8763)	(0,777; 0,867)	(0,7942; 0,8815)	(0,7909; 0,8786)	(0,761; 0,8539)	(0,8079; 0,8921)
0.99	(0,7712; 0,8867)	(0,7597; 0,8778)	(0,7771; 0,8917)	(0,7737; 0,889)	(0,7435; 0,8652)	(0,7912; 0,9018)

RAT2_MT_Pm_acc

β	CI за N=330	CI за N=390	CI за N=450	CI за N=510	CI за N=570	CI за N=630
0.8	(0,4692; 0,5277)	(0,4687; 0,5272)	(0,4697; 0,5282)	(0,4687; 0,5272)	(0,4695; 0,528)	(0,4701; 0,5285)
0.9	(0,461; 0,5359)	(0,4604; 0,5354)	(0,4615; 0,5364)	(0,4604; 0,5354)	(0,4613; 0,5362)	(0,4618; 0,5368)
0.95	(0,4538; 0,5431)	(0,4533; 0,5426)	(0,4544; 0,5436)	(0,4533; 0,5426)	(0,4541; 0,5434)	(0,4547; 0,5439)
0.99	(0,44; 0,5569)	(0,4394; 0,5564)	(0,4405; 0,5574)	(0,4394; 0,5564)	(0,4403; 0,5572)	(0,4409; 0,5577)

RAT3_MT_Pm_acc

β	CI за N=330	CI за N=390	CI за N=450	CI за N=510	CI за N=570	CI за N=630
0.8	(0,4687; 0,5272)	(0,4687; 0,5272)	(0,4694; 0,5278)	(0,4674; 0,526)	(0,4687; 0,5272)	(0,4687; 0,5272)
0.9	(0,4604; 0,5354)	(0,4604; 0,5354)	(0,4611; 0,5361)	(0,4591; 0,5342)	(0,4604; 0,5354)	(0,4604; 0,5354)
0.95	(0,4533; 0,5426)	(0,4533; 0,5426)	(0,454; 0,5432)	(0,452; 0,5414)	(0,4533; 0,5426)	(0,4533; 0,5426)
0.99	(0,4394; 0,5564)	(0,4394; 0,5564)	(0,4402; 0,5571)	(0,4381; 0,5553)	(0,4394; 0,5564)	(0,4394; 0,5564)

На крај, според постигнатите симулациски резултати и приложените анализи, предложениот 5G мобилен уред со AQUA модул во себе, покажува највисоко ниво на пристапна мултимедиска веројатност, највисока агрегирана битска брзина, а со тоа и највисок процент на задоволни корисници. Затоа нашиот предложен 5G МТ има голема примена во multi-RAT хетерогени NGMB мрежи, и без сомнеж може да се употребува во NGMB сценарија со постојни и идни RAT-и, за различни постојни и идни Capacity Building сервиси на глобално ниво. Неопходноста од ефикасна и QoS поддржана достава на СВ сервиси, вклучувајќи online и мешовити курсеви и обуки, е од особена важност, особено заради фактот што до СВ сервисите вообичаено се пристапува преку мобилен уред, како паметни (smart) телефони и лаптопи и слично, каде QoS е на прво место, особено во мобилните широкопојасни мрежи.

7. Заклучок

Да се живее, значи да се истражува, а токму тоа е и мотото на науката. На крајот од секое истражување лежи потребата од извлекување на заклучок, идни насоки и можни примени кои произлегуваат од дотогашните истражувања и научни пробиви. Затоа во рамките на оваа глава го даваме генералниот заклучок на оваа докторска дисертација. Непобитна вистина е дека обезбедувањето на задоволителен QoS во мобилните и безжични мрежи е доста суштинска цел, која бара навистина многу истражувања, развивања и вложувања на голем труд. Областа е доста широка и доста комплексна. Јасно е едно, дека иако е тешко да се воспостави беспрекорен QoS во сите безжични мобилни IP мрежи, на сите нивоа, на било која локација, и во било кое време, сепак обезбедувањето на задоволително ниво на QoS, барем во одредени реони од овие мрежата е сепак можна. Така со помош на оваа докторска дисертација, е докажано и анализирано дека е возможно да се постигне токму тоа: задоволително обезбедување на QoS во сегашните и идните 5G мобилни и безжичните мрежи и сервиси. Имено, овде најпрво беа разгледани досега постојните QoS механизми во безжичните и мобилни системи, бидејќи најголеми резултати може да се постигнат доколку се тргне со анализа на предностите и недостатоците на знаењата што веќе постојат, а кои мора да се продлабочат и усовршат, или во крајна мера да се исцрпат одредени инспиративни идеи од истите и да се открие нешто нови и подобро.

Основната цел на истражувањата во рамките на оваа докторска дисертација беа да се провери можноста за имплементација на напредни интелигентни QoS механизми и модули со поддршка на вертикален multi-homing и multi-streaming карактеристики и можности во сегашните и идни 5G мобилни и безжични мрежи, во насока на подобрување на QoS и QoE параметрите. Освен тоа, основна задача на истражувањето беше да одговори на низа прашања меѓу кои е: Дали со воведување на дополнителна интелигенција во мобилните уреди и базните станици или некој трет јазел во јадрениот дел на мрежата, би се подобрил квалитетот на сервис во хетерогените мобилни и безжични мрежи? Одговорот е докажано потврден токму преку воведување на напредни QoS модули и алгоритми за оптимизација во 5G мобилните и фиксните уреди, се овозможени сјајни перформанси за предложените решенија и 5G рамки-водилки. Следно прашање беше: Дали поставувањето на овој модул на IP ниво и создавањето на логичка независност од мрежната технологија би резултирало во поголема хетерогеност и решавање на низа конфигурациски проблеми и проблеми поврзани со влошувањето на некои QoS параметри? И повторно одговорот е

потврден, да, токму со поставување на интелигентното рутирање на IP мрежно ниво, кое е обединувачко и единствено за било која RAT, се постигна независност од радио пристапните технологии, а со тоа можност да биде вклучена било која постојна и идна пристапна технологија, и да се постигнат високо ниво на QoS за било кој сервис, и избегнување на низа проблеми во хетерогените мобилни и безжични мрежи. Понатаму би се постигнало поголемо ниво на задоволни корисници во идните 5G мобилни и безжични IP мрежи со воведување на напредни QoS механизми и модули во мобилниот уред и на страната на мрежата (во некој проху сервер во јадрото на мобилната безжична хетерогена мрежа). Дополнително беше даден нов OSI протоколен модел на мрежните уреди и серверски јазли, преку комбинирање на некои постојни механизми и модели за да се постигне задоволителен QoS во мобилните и безжични средини, за било кој мултимедиски сервис.

Така, во таа насока беа предложени (во глава 4) нов дизајн на 5G мобилен терминал и фиксен Proху сервер, кои поседува multi-RAT интерфејси и користи напреден интелигентен QoS модул во себе, при што нуди агрегација на мрежни технологии и има вертикални multi-homing и multi-streaming карактеристики. Напредниот модул за QoS поддршка беше наречен Advanced QoS-based User-centric Aggregation (AQUA) модул. Овој нов 5G мобилен уред со AQUA модул во себе беше истражен и евалуиран преку користење на симулациски анализи, при што беа прикажани резултати за врвните QoS параметри, како просечниот агрегиран проток од сите корисници по клетка и мултимедиската сервисна пристапна веројатност (рата), во повеќе различни сценарија, со повеќе различни мрежни услови и хетерогени безжични и мобилни средини со различен број на радио пристапни точки. Според симулациските резултати и анализи, предложениот 5G мобилен уред со AQUA модул во себе и со два оптимизациски алгоритми (генетски алгоритам и линеарно програмирање) дава одлични перформанси и обезбедува вертикални multi-homing можности при најразлични мрежни околности. Според тоа, истиот обезбедува високо ниво на задоволни корисници за било кој мултимедиски сервис, највисоко ниво на мултимедиска сервисна пристапност (рата), широкопојасни битски брзини, оптимално користење на сите ресурси од достапните радио пристапни мрежи, минимална цена на чинење по сервис и интелигентно балансирање со сообраќајниот товар преку различните радио пристапни технологии. Анализите покажаа дека добивката во перформансите доколку користиме AQUA модул во 5G мобилните уреди станува поголема, доколку имаме повеќе достапни радио пристапни точки (базни станици или пристапни WLAN точки), во споредба со случаите кога имаме само една или

две базни станици (или воопшто помал број на радио пристапни точки). Воедно, предложениот 5G мобилен терминал може лесно да биде генерализира во multi-RAT хетерогени 5G мрежни сценарија, кои вклучуваат било која сегашна (т.е., постојна) или идна радио пристапна технологија, и истиот да биде лесно остварлив за употреба во 5G multi-RAT мрежните архитектури и решенија (како што тоа беше прикажано во претпоследната глава).

Понатаму, во главата 5 беше прикажана уште едена нова аналитичка рамка-водилка за 5G јазли со вертикален multi-homing и вертикален multi-streaming својства за 5G широкопојасни мобилни мрежи, која го максимизира просечниот проток во целата мрежа, постигнува стабилност на редовите на чекање и на целиот систем, едновременно обезбедувајќи минимални големини на редовите на чекање и минимално доцнење за било кој употребен мултимедиски сервис. Здружената стохастичка Љапунова стабилност и оптимизацијата на перформансите, беа клучни за обезбедувањето на оптимално сообраќајно опслужување и контрола за идните 5G мобилни и фиксни терминали. Така, 5G јазлите со Љапунова drift-plus-penalty оптимизациска техника можат да бидат имплементирани во мобилните уреди, на страната на корисниците и во проху или cloud серверите во јадрото на мрежата (на пр., некој доделен 5G контролен агрегирачки сервер), и да се справуваат со повеќе едновремени мултимедиски извори на информации (сервиси) преку оптимално користење на повеќе радио интерфејси (кои припаѓаат на различни радио пристапни техники) и да обезбедат високо ниво на QoS поддршка. Презентираните два модели на 5G јазли, едниот со AQUAplus алгоритам а другиот со MassiveAQUA алгоритам, водат кон практична контрола со користење на соодветни полиси и полисни акции кои се докажано оптимални, квалитетни и стабилни. Воедно беа изведени и низа на перформансни граници за можностите од употребените алгоритми базирани на Љапунови drift-plus-penalty оптимизациски техники.

Така, придонесот на оваа дисертација ќе биде токму во понудувањето на еден интелегентен напреден механизам за подобрување на QoS во постојните и идните (5G) хетерогените мобилни и безжични мрежи, кој би постигнал најдобри цена-перформанси, би одбрал најдобра/и мрежа/и (т.е. комбинација од радио пристапни мрежи) за даден мултимедиски сервис да има максимално добар квалитет на услуга и би резултирал со најголемо задоволство на сите корисници (повисок QoE). Во таа насока, врз база на изложеното, дефинираме специфични истражувачки проблеми и цели кон кои тежнееме, при што можеме да ги издвоиме следните значајни придобивки од оваа докторска дисертација:

- Обезбедување на корисничко-ориентирана мрежа и корисничко-ориентирани уреди, каде интелигенцијата на мрежата е спуштена на ниво на мобилен уред, при што централно место има корисникот.
- Воведување на multi-RAT мобилен уред со агрегација на радио пристапни мрежи, каде мобилниот уред може да ја користи било која мрежна технологија или да ги користи сите достапни мрежи наеднаш, добивајќи врвна широкопојасна битска брзина и врвен квалитет на било која мултимедиска услуга.
- Воведувањето на напредни механизми и модули за квалитет на услугата (QoS) во постојни и идни 5G мобилни безжични мрежи, кои лесно се имплементираат, оптимално работаат и допринесуваат кон високо задоволително ниво на сите QoS параметри за сите корисници и добивање врвни оценки за QoE параметрите за било кои мултимедиски сервиси.
- Понуда на отворено решение кон сите можни постоечки и идни мобилни и безжични мрежни технологии, дефинирано на мрежно ниво, независно од било која радио пристапна технологија, решение кое е скалабилно и флексибилно (т.е. лесно може да се имплементира било кој нов 5G радио интерфејс и нова 5G радио пристапна технологија).
- Предложување на нов 5G мобилен уред со вграден QoS модул со оптимизациски алгоритми базирани на генетски алгоритми и линеарно програмирање, со воведени вертикален multi-homing и вертикален multi-streaming можности и својства, кој постигнува високи сервисни и мрежни перформанси во поглед на QoS.
- Воведување за прв пат (барем според нашите сознанија) аналитички модел за 5G јазел со Љапунова drift-plus-penalty оптимизациска техника во себе. Оваа оптимизациска техника можат да бидат имплементирани во мобилните уреди и во серверите во јадрото на 5G мобилната мрежа.
- Постигнување на врвни перформансни можности со предложените 5G уреди, во поглед на врвната QoS поддршка, преку постигнување на широкопојасни битски протоци, минимално доцнење од-крај-до-крај, високо ниво на искористување на ресурсите кај достапните мобилните мрежи, максимална пристапна рата до мултимедиските сервиси, стабилност на системите и мрежите, минимална просечна големина на редовите на чекање и минимално доцнење за истите.

Со тоа ни се отвораат вратите кон обезбедување на висока QoS поддршка за сите мултимедиски сервиси во 5G мобилните безжични системи, со можност транспарентно (за корисникот) да се избераат најквалитетни и најсоодветни мрежни технологии преку која

оптимално ќе се распределат различните протоци (multi-streaming и multi-homing својства). Токму тоа е врвното ремек дело, кое е вклучено во концептите на 5G.

Имено, науката е постојано истражување. Затоа, и во иднина треба да се продолжи во таа насока кон понатамошни истражувања и подобрувања на овде опишаните концепти, рамки-водилки и механизми, кон добивање на што подобри и поефикасни резултати, модели и оптимизации, со кои би се издигнале комуникациите на планетарно ниво, на едно навистина повисоко и поквалитетно рамниште, за доброто на сите.

Во таа насока, идеите и истражувањата немаат крај, како што немаат крај ни телекомуникациите. Останува, заклучокот дека секоја цел (желба) е остварлива, само треба да се поработи на таа идеја и да се посвети доволно внимание, труд и истражување, пред истата да се реализира со одличен успех и врвни резултати.

Работна библиографија:

- [1] Federico Boccardi et al.. "Five Disruptive Technology Directions for 5G." *IEEE Communications Magazine*. Vol. 52, No. 2, February (2014): 74-80.
- [2] Naga Bhushan et al.. "Network Densification: The Dominant Theme for Wireless Evolution into 5G." *IEEE Communications Magazine*. Vol. 52, No. 2, February (2014): 82-89.
- [3] Boyd Bangerter, Shilpa Talwar, Reza Arefi, and Ken Stewart. "Networks and Devices for the 5G Era." *IEEE Communications Magazine*. Vol. 52, No. 2, February (2014): 90-96.
- [4] Cheng-Xiang Wang et al.. "Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks." *IEEE Communications Magazine*. Vol. 52, No. 2, February (2014): 122-130.
- [5] Janevski, Toni. *5G Mobile Phone Concept*. Science Paper, Las Vegas, USA: CCNC conference, January 2009.
- [6] Lu, W. Willie. "An Open Baseband Processing Architecture for Future Mobile Terminals Design." *IEEE Wireless Communications*. Volume: 15 , Issue: 2, April (2008): 110 - 119.
- [7] Aleksandar Tudzarov and Toni Janevski. "Design for 5G Mobile Network Architecture." *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*. Vol. 3, No. 2, August (2011): 112-123.
- [8] Josef Noll, Mohammad. M.R Chowdhury. "5G – Service Continuity in Heterogeneous Environments." *Wireless Personal Communications* - DOI: 10.1007/s11277-010-0077-6, Published online: 31 July 2010.
- [9] Toni Janevski, "NGN Architectures, Protocols, and Services", John Wiley and Sons, April 2014.
- [10] Toni Janevski, "Internet Technologies for Fixed and Mobile Networks", Artech House, USA, November 2015.
- [11] Recommendation ITU-T Y.2052 (02/2008): Framework of multi-homing in IPv6-based NGN.
- [12] Recommendation ITU-T Y.2056 (08/2011): Framework of vertical multihoming in IPv6-based Next Generation Networks.
- [13] M. Rahman and F. Mir. *Fourth generation (4G) mobile networks - features, technologies and issues*. Science Paper, London, UK, 6th IEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies (3G 2005), November (2005): 1-5.

- [14] Moustafa A. Youssef, Arunchandar Vasan, Raymond E. Miller, "Specification and Analysis of the DCF and PCF Protocols in the 802.11 Standard Using Systems of Communicating Machines", 10th IEEE ICNP'02, Paris, France, 2002.
- [15] Mangold, Stefan, et al. eds. *IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service, European Wireless*. Vol. 1 Florence, Italy: European Wireless (2002): 32-39.
- [16] Xiao, Yang. *IEEE 802.11e: QoS Provisioning at the MAC Layer*. IEEE Wireless Communications, June (2004): 72 – 79.
- [17] Kaaranen, Heikki, et al. eds. *UMTS Networks: Architecture, Mobility and Services*. 2nd ed. England: John Wiley & Sons Ltd. (2005): 210-221.
- [18] *IEEE 802.16-2004, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks*. 3 Park Avenue, New York: IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, 2004.
- [19] *IEEE 802.16e-2005 and IEEE 802.16-2004/Cor1-2005: Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1*. 3 Park Avenue, New York: IEEE Computer Society, February 28, 2006.
- [20] *IEEE Std 802.16m-2011: Standard for local and metropolitan area networks – Part 16: Air interface for broadband wireless access systems – Amendment 3: Advanced air interface*. 3 Park Avenue, New York: IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, May 6, 2011.
- [21] *IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society: "IEEE Std 802.16m-2011 Standard for local and metropolitan area networks"*, 2011.
- [22] Braden Robert, David D. Clark and Scott Shenker. "Integrated Services In The Internet Architecture: An Overview". Technical Report 1633, Ray Pelletier, IETF Administrative Director, 33 pages, IETF, 1994. Последно пристапено: 15 Март 2016 < <http://www.ietf.org/rfc/rfc1633.txt> >
- [23] Black, L. David. "Differentiated Services and Tunnels", RFC2983, Ray Pelletier, IETF Administrative Director, 14 pages, IETF, 2000. Последно пристапено: 15 Март 2016 < <http://www.ietf.org/rfc/rfc2983.txt> >
- [24] Demetrios, Zeinalipour-Yazti. *A Glance At Quality Of Services In Mobile Ad Hoc Networks*. Science Paper, New York, USA: IWCMC '06 , International conference on Wireless communications and mobile computing, 2006.
- [25] Chaing Kee, Chua Hannan Xiao and Winston K.G Seah. *A quality of service model for ad hoc wireless networks*. 1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 2003.

- [26] Tomislav Shuminoski, Toni Janevski. *Advanced Mobile Terminals with Radio Network Agregation for Heterogeneous Wireless Networks*. Science paper. Ohrid, Macedonia: XI International Conference ETAI 2013, September 26-28, 2013.
- [27] Tomislav Shuminoski, Toni Janevski. *Radio Network Aggregation for 5G Mobile Terminals in Heterogeneous Wireless Networks*. Science paper. Nish, Serbia: XI International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services - TELSIKS 2013, October 16 - 19, 2013.
- [28] Tomislav Shuminoski, Toni Janevski, "Novel Adaptive QoS Framework for Integrated UMTS/WLAN Environment." *Telfor Journal*. Vol. 5, No. 1, (2013): 14-19.
- [29] Tomislav Shuminoski, Toni Janevski, "Novel Adaptive QoS Provisioning in Heterogeneous Wireless Environment." *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS) 2011*. Vol. 3, No 1, ISSN: 2076-0930, April (2011): 1-7.
- [30] Tomislav Shuminoski, Toni Janevski. *Adaptive Cross-layer QoS Framework for Multimedia Traffic in Heterogeneous UMTS/WLAN Networks*. Science paper. Belgrade, Serbia: 19-th Telecommunications Forum, TELFOR'11, 22-24 November, 2011.
- [31] Shuminoski, Tomislav. *QoS Challenges & Requirements in Future Generation Wireless Networks*. Science Paper, Skopje, Macedonia: ITU CoE Training Workshop on 3G-HSPA & LTE: Towards the Next generation of Mobile Networks, 3-5 Feb 2010.
- [32] Shuminoski, Tomislav, Toni Janevski. *Numerical Analysis of Effective QoS Provisioning in Wireless Mesh Networks*. Science paper. Vrnachka Banja, Srbija: 53th ETRAN Conference, 15 – 18 June, 2009.
- [33] Shuminoski, Tomislav, Toni, Janevski. *QoS Provisioning in MANETs with Biologically Inspired Algorithms*. Science Paper. Ohrid, Macedonia: ETAI 2009 IX National Conference with International Participation, 26 – 29 September, 2009.
- [34] Shuminoski, Tomislav, Toni, Janevski. *Novel Adaptive VoIP QoS Provisioning In Integrated UMTS/WLAN Networks*. Science Paper. Ohrid, Macedonia: ICEST 2010. 23-26 June, 2010.
- [35] Aleksandar Tudzarov and Toni Janevski. *Functional Architecture for 5G Mobile Networks*. International Journal of Advanced Science and Technology, Vol. 32, pp. 65-78, 2011.
- [36] Aleksandar Tudzarov and Toni Janevski. *Protocols and Algorithms for the Next Generation 5G Mobile Systems*. Network Protocols and Algorithms, ISSN 1943-3581, Vol. 3, No. 1, pp.94-114, 2011.

- [37] Aleksandar Tudzarov and Toni Janevski. *Efficient Radio Access Technology Selection for the Next Generation Wireless Networks*. International Journal of Research and Reviews in Next Generation Networks, Vol. 1, No. 1, pp.14-25, 2011.
- [38] Yu Fei, Vincent W.S. Wong, Victor C.M. Leung. "Efficient QoS Provisioning for Adaptive Multimedia in Mobile Communication Networks by Reinforcement Learning." *Mobile Networks and Applications 11*, DOI: 10.1007/s11036-005-4464-2, Springer (2006): 101–110.
- [39] Xin Gang Wang, Geyong Min, John E. Mellor, Khalid Al-begain. "An Adaptive QoS Management Scheme For Interworking Cellular and WLAN Networks". *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking - Wireless IP through integration of wireless LAN and cellular networks*. Volume 47, Issue 2, February (2005): 167 - 183.
- [40] Yaw Nkansah-Gyekye and Johnson I. Agbinya. *Vertical Handoff Decision Algorithm Based on Fuzzy Logic and Genetic Algorithm*. Science Paper. SATNAC 7-10 September 2008.
- [41] L. Giupponi, et al (2005). A novel joint radio resource management approach with reinforcement learning mechanisms. In Proceedings of the 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC '05), pp. 621–626, Phoenix, Arizona, USA.
- [42] K. Radhika and A. Venugopal Reddy. "Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks based on Fuzzy Multiple Criteria Decision Making". *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887), Volume 22– No.1, (2011).
- [43] Alexandros Kaloxylos, Ioannis Modeas, Fotos Georgiadis and Nikos Passas. „Network Selection Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks: from Design to Implementation“. *Network Protocol and Algorithms*, ISSN 1943-3581, Vol. 1, No. 2, (2009): 27-47.
- [44] M.Alkhwilani and A.Ayesh. „Access Network Selection Based on Fuzzy Logic and Genetic Algorithms“. *Advances in Artificial Intelligence*, Volume 8, Issue 1, (2008).
- [45] R. Moskowitz and P. Nikander. "Host Identity Protocol (HIP) Architecture", RFC 4423, Ray Pelletier, IETF Administrative Director, 24 pages, IETF, 2006. Последно пристапено: 15 Март 2016 < <https://tools.ietf.org/html/rfc4423>>
- [46] R. Moskowitz et al. "Host Identity Protocol", RFC 5201, Ray Pelletier, IETF Administrative Director, 104 pages, IETF, April 2008. Последно пристапено: 15 Март 2016 < <https://tools.ietf.org/html/rfc5201>>

- [47] R. Moskowitz et al. "Host Identity Protocol Version 2 (HIPv2)", RFC 7401, Ray Pelletier, IETF Administrative Director, 128 pages, IETF, April 2015. Последно пристапено: 15 Март 2016 < <https://tools.ietf.org/html/rfc7401>>
- [48] E. Nordmark and M. Bagnulo. "Shim6: Level 3 Multihoming Shim Protocol for IPv6", RFC 5533, Ray Pelletier, IETF Administrative Director, 124 pages, IETF, June 2009. Последно пристапено: 15 Март 2016 < <https://tools.ietf.org/html/rfc5533>>
- [49] A. Ford et al. "TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses", RFC 6824, Ray Pelletier, IETF Administrative Director, 64 pages, IETF, January 2013. Последно пристапено: 15 Март 2016 < <https://tools.ietf.org/html/rfc6824>>
- [50] Shaojian Fu and Mohammed Atiquzzaman (2004). SCTP: State of the Art in Research, Products, and Technical Challenges. *IEEE Communications Magazine*, pp.: 64-76.
- [51] E. Kohler, M. Handley and S. Floyd (2006). RFC: 4340. "Datagram Congestion Control Protocol (DCCP)." <<http://tools.ietf.org/html/rfc4340>> Последно пристапено: 15 Март 2016.
- [52] Jonathan G. Koomey, Stephen Berard, Marla Sanchez, Henry Wong. "Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing". *IEEE Annals of the History of Computing*, July–September (2011): 46-54.
- [53] Dan Broyler, Abdul Jabbar and James P.G. Sterbenz. *Design and analysis of a 3-D gauss-markov mobility model for highly dynamic airborne networks*. Science paper. *ITC '10*, 2010.
- [54] Recommendation ITU-T E.804 (02/2014): QoS aspects for popular services in mobile networks.
- [55] Toni Janevski, "Traffic Analysis and Design of Wireless IP Networks", Artech House, May 2003.
- [56] LTE standard overview, < <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte> >, Последно посетен на: 26 Март 2016.
- [57] Stefan Parkvall, Erik Dahlman, Anders Furuskär, Ylva Jading, Magnus Olsson, Stefan Wänstedt, Kambiz Zangi. "LTE-Advanced – Evolving LTE towards IMT-Advanced." *IEEE Xplore*. 2008.
- [58] Александр Михайлович Ляпунов, „Общая задача об устойчивости движения“, докторская диссертация, защита диссертации: 30 сентября 1892 года в Московском университете.
- [59] Lyapunov, A. M. (1992), The general problem of the stability of motion, Translated by A. T. Fuller, London: Taylor & Francis, ISBN 978-0-7484-0062-1

- [60] Костадинова, Сања, “Квалитативна анализа на динамичките системи и нивна примена”, магистерски труд, одбранет: 1 Јули 2010, Скопје.
- [61] Michael Malisoff, Frédéric Mazenc, "Constructions of Strict Lyapunov Functions", Springer, London, 2009.
- [62] Michael J. Neely, "Queue Stability and Probability 1 Convergence via Lyapunov Optimization", Cornell University Library, 20 Aug 2010, објавено online: <http://arxiv.org/pdf/1008.3519.pdf>
- [63] L. Georgiadis, M. J. Neely, and L. Tassiulas, “Resource allocation and cross-layer control in wireless networks”, Foundations and Trends in Networking, vol. 1, no. 1, pp. 1-149, 2006.
- [64] M. J. Neely, “Dynamic Power Allocation and Routing for Satellite and Wireless Networks with Time Varying Channels”, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, LIDS, 2003.
- [65] M. J. Neely, “Energy optimal control for time varying wireless networks”, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 7, pp. 2915-2934, July 2006.
- [66] M. J. Neely, “Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queuing Systems,” Morgan&Claypool, USA, 2010.
- [67] M. J. Neely. Queue stability and probability 1 convergence via lyapunov optimization. Arxiv Technical Report, arXiv:1008.3519, August 2010. 50, 51
- [68] O. Kallenberg. Foundations of Modern Probability, 2nd ed., Probability and its Applications. Springer-Verlag, 2002.
- [69] Y. V. Borovskikh and V. S. Korolyuk. Martingale Approximation. VSP BV, The Netherlands, 1997.
- [70] L. Tassiulas and A. Ephremides, “Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks”, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 37, no. 12, Dec. 1992.
- [71] L. Tassiulas and A. Ephremides, “Dynamic server allocation to parallel queues with randomly varying connectivity”, IEEE Trans. on Inform. Theory, vol. 39, pp. 466-478, March 1993.
- [72] N. Kahale and P. E. Wright, “Dynamic global packet routing in wireless networks,” Proc. IEEE INFOCOM 1997.
- [73] M. Andrews et al., “Providing quality of service over a shared wireless link”, IEEE Communications Magazine, vol. 39, no.2, pp.150-154, 2001.

- [74] M. J. Neely, E. Modiano, and C. E. Rohrs, "Power allocation and routing in multi-beam satellites with time varying channels," *IEEE Transactions on Networking*, vol. 11, no. 1, pp. 138-152, Feb. 2003.
- [75] M. J. Neely, E. Modiano, and C. Li., "Fairness and optimal stochastic control for heterogeneous networks", *Proc. IEEE INFOCOM*, March 2005.
- [76] A. Stolyar, "Maximizing queueing network utility subject to stability: Greedy primal-dual algorithm", *Queueing Systems*, vol. 50, no. 4, pp. 401-457, 2005.
- [77] L. Georgiadis, M. J. Neely, and L. Tassiulas, "Resource allocation and cross-layer control in wireless networks", *Foundations and Trends in Networking*, vol. 1, no. 1, pp. 1-149, 2006.
- [78] M. J. Neely, "Optimal backpressure routing for wireless networks with multi-receiver diversity", *Proc. of Conf. on Information Sciences and Systems (CISS)*, March 2006.
- [79] J. W. Lee, R. R. Mazumdar, and N. B. Shroff, "Opportunistic power scheduling for dynamic multiserver wireless systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no.6, pp. 1506-1515, June 2006.
- [80] M. J. Neely, "Energy optimal control for time varying wireless networks", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 7, pp. 2915-2934, July 2006.
- [81] M. J. Neely, "Super-fast delay tradeoffs for utility optimal fair scheduling in wireless networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Special Issue on Nonlinear Optimization of Communication Systems, vol. 24, no. 8, pp. 1489-1501, Aug. 2006.
- [82] A. Eryilmaz and R. Srikant, "Joint congestion control, routing, and mac for stability and fairness in wireless networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Special Issue on Nonlinear Optimization of Communication Systems, vol. 14, pp. 1514-1524, Aug. 2006.
- [83] M. J. Neely, "Optimal energy and delay tradeoffs for multi-user wireless downlinks", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 9, pp. 3095-3113, Sept. 2007.
- [84] A. Eryilmaz and R. Srikant, "Fair resource allocation in wireless networks using queue-length-based scheduling and congestion control", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, no. 6, Dec. 2007, pp. 1333-1344.
- [85] Q. Li and R. Negi, "Scheduling in wireless networks under uncertainties: A greedy primal-dual approach", *Arxiv Technical Report: arXiv:1001:2050v2*, June 2010.
- [86] P.R. Kumar and S.P. Meyn, "Stability of queueing networks and scheduling policies", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol.40,.n.2, pp.251-260, Feb. 1995.

- [87] M. J. Neely, E. Modiano, and C. E Rohrs., "Dynamic power allocation and routing for time varying wireless networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23, no. 1, pp. 89-103, Jan. 2005.
- [88] Sridharan, A., Moeller, S., Krishnamachari, B., "Making distributed rate control using Lyapunov drifts a reality in wireless sensor networks," in Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks and Workshops, 2008. WiOPT 2008. 6th International Symposium on, vol., no., pp.452-461, 1-3 April 2008.
- [89] Michael J. Neely, Rahul Urgaonkar, "Cross-layer adaptive control for wireless mesh networks", Ad Hoc Networks (Elsevier journal), Vol. 5, No. 6, pp. 719-743, August 2007.
- [90] M. J. Neely and R. Urgaonkar, "Optimal Backpressure Routing in Wireless Networks with Multi-Receiver Diversity", Ad Hoc Networks (Elsevier journal), Vol. 7, No. 5, pp. 862-881, July 2009.
- [91] M. J. Neely and R. Urgaonkar, "Opportunism, backpressure, and stochastic optimization with the wireless broadcast advantage", Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, Oct. 2008.
- [92] A. Stolyar, "Maximizing queueing network utility subject to stability: Greedy primal-dual algorithm", Queueing Systems, vol. 50, no. 4, pp. 401-457, 2005.
- [93] X. Lin, N. B. Shroff, and R. Srikant, "A tutorial on cross-layer optimization in wireless networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Nonlinear Optimization of Communication Systems, vol. 14, no. 8, Aug. 2006.
- [94] Y. Yi and M. Chiang, "Stochastic network utility maximization: A tribute to Kelly's paper published in this journal a decade ago", European Transactions on Telecommunications, vol. 19, no. 4, pp. 421-442, June 2008.
- [95] J-M. Coron, B. d'Andrea-Novel and G. Bastin, "A strict Lyapunov function for boundary control of hiperbolic systems of concervation laws", IEEE Transactions on Automatic Control, 52 (2007), 2-11. link: <http://www.ann.jussieu.fr/coron/Documents/2007-ieee-article.pdf>, последно посетен: 27 Март 2016.
- [96] D. P. Bertsekas and R. Gallager, "Data Networks", New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1992.
- [97] ITU-T Study Group 2 (Working Party 3/2) and ITU-D SG 2/16 & ITC (Draft 2001-06-20), "TELETRAFFIC ENGINEERING", Handbook, editor: Villy B. Iversen., Geneva, December 2003. Link: < https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG02.16.1-2001-PDF-E.pdf >, последно посетен 27 Март 2016.

- [98] IEEE 802.11ac: What Does it Mean for Test?. White Paper of LitePoint, A *Teradyne Company*. 2012.
- [99] IEEE 802.11ac: What Does it Mean for Test?,
< http://litepoint.com/whitepaper/80211ac_Whitepaper.pdf >, Последно посетен на: 28 Март 2016.
- [100] Marchese, Mario. *QoS over Heterogeneous Networks*. 2nd ed. Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [101] Xiao, XiPeng. *Technical, Commercial and Regulatory Challenges of QoS*. 1st ed. Burlington, USA: Morgan Kaufman (2008): 225-245.
- [102] 802.11ac: Very High Throughput, White Paper from Ruckus, February 2013.
- [103] Julian, David, et al. eds. *QoS and fairness constrained convex optimization of resource allocation for wireless cellular and ad hoc networks*. Vol 2. New York: IEEE INFOCOM'02, June (2002): 477–486.
- [104] Cheng, Ho Ting, Weihua Zhuang. “An optimization framework for balancing throughput and fairness in wireless networks with QoS support”. *IEEE transactions on wireless communications*. vol.7, No.2, February (2008): 584-593.
- [105] Chiang, Mung. “Balancing transport and physical layers in wireless multihop networks: Jointly optimal congestion control and power control.” *IEEE J. Select. Areas Commun.* vol. 23, no. 1, January (2005): 104–116.
- [106] Huang, Vincent, Weihua Zhuang. “QoS Based Fair Resource Allocation in Multi-Cell TD/CDMA Communication Systems.” *IEEE transactions on wireless communications*. vol.5, No.2, February (2006): 339–346.
- [107] Abdrabou, Atef, Weihua Zhuang. “A Position-Based QoS Routing Scheme for UWB Mobile Ad Hoc Networks.” *IEEE journal on selected areas in communications*. vol. 24, No. 4, April (2006):850–856.
- [108] Owen, Guillermo. *Game Theory*. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2001.
- [109] Wu, Dapend, Rohit Negi. “Effective capacity: A wireless link model for support of quality of service.” *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 2, no. 4, July (2003): 630–643.
- [110] Shannon, E. Claude. “A mathematical theory of communications.” *Bell Labs Technical J.* vol. 27, October (1948): 623–656.
- [111] Goldsmith, Andrea. *Wireless Communications*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2004.

- [112] Liu, Zhenyu, Marta Z. Kwiatkowska and Costas Constantinou. "A Biologically Inspired QoS Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks." *International Journal of Wireless and Mobile Computing*. Vol. 1. Issue ¾. April(2006): 2-11.
- [113] Gunes, Mesut, Udo Sorges and Imed Bouazizi. "ARA – The Ant-Colony Based Routing Algorithm for MANETs." Science Paper. Vancouver, British Columbia, Canada: *International Workshop on Ad Hoc Networking (IWAHN 2002)*. August, 2002.
- [114] Xiao, Hannan, et al. eds. *A flexible quality of service model for mobile ad-hoc networks*. In Proc. of the IEEE 51st Vehicular Technology Conference (VTC), September (2000): 445–449.
- [115] Xue, Qi, Aura, Ganz. "Ad hoc QoS on-demand routing (AQOR) in mobile ad hoc networks." *Journal of Parallel and Distributed Computing - Special issue on Routing in mobile and wireless ad hoc networks*. Volume 63 Issue 2, February (2003): 154-165.
- [116] Abdrabou, Atef, Weihua, Zhuang. "Statistical QoS routing for IEEE 802.11 multihop ad hoc networks." *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Volume: 8 Issue:3, March (2009): 1542 - 1552.
- [117] Liu, Zhenyu, Marta Z. Kwiatkowska, Costas C. Constantinou. "A swarm intelligence routing algorithm for MANETs." in *Proceedings of the IASTED International Conference on Communications Internet and Information Technology*. no. 433, November (2004): 484–489.
- [118] Kwon, Taekyoung, et al. eds. "QoS provisioning in wireless/mobile multimedia networks using an adaptive framework." *Journal Wireless Networks*. Volume 9, Issue 1, January (2003): 51–59.
- [119] Fei, Yu, Vincent W.S. Wong and Victor C.M. Leung, "Efficient QoS Provisioning for Adaptive Multimedia in Mobile Communication Networks by Reinforcement Learning." *Mobile Networks and Applications*. Vol. 11, no. 1, February (2006): 101–110.
- [120] 3GPP; *Technical Specification Group Services and System Aspects; 3GPP Systems to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking; System Description (Release 6)*. Valbonne, France: 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 23.234, v.6.2.0, September 2004.
- [121] Zhou, Yu, et al. eds. "A Dual-Mode Mobile Station Modules for WLAN/UMTS Internetworking Systems." *Proc. OPNETWORK 2007*. Washington, DC, August 27-31, 2007.
- [122] Holma, Harri, Antti Toskala. *WCDMA for UMTS Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. 3rd ed. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd., 2004.

- [123] Zhai, Hongqiang, Xiang, Chen and Yuguang Fang. "How Well Can the IEEE 802.11 Wireless LAN Support Quality of Service." *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 4, no.6, November (2005): 3084-3094.
- [124] Glisic, G. Savo. *Advanced Wireless Networks 4G Technologies*. 1st ed. University of Oulu, Finland: John Wiley & Sons Ltd., 2006.
- [125] ITU-R: Futuristic mobile technologies foresee "IMT for 2020 and beyond": Link: <http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx> Последно посетен 29 Март 2016.
- [126] Jonathan Rodriguez, "Fundamentals of 5G Mobile Networks", John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [127] D. Bertsimas, D. Gamarnik and J. Tsitsiklis, "Performance of multiclass Markovian queueing networks," *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control 2000*, Sydney, NSW, 2000, pp. 534-539 vol.1. doi: 10.1109/CDC.2000.912819