

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Айдын Мехмед Хъкъ

**МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА ПОВИШАВАНЕ НА
QUALITY OF SERVICE (QoS) В МРЕЖИ, БАЗИРАНИ НА
БЕЗЖИЧНИ ТЕХНОЛОГИИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „Доктор”**

**по докторска програма „Компютърни системи, комплекси и мрежи“ към
професионално направление „Комуникационна и компютърна техника“**

Научен ръководител: доц. д-р инж. Венета Панайотова Алексиева

Рецензенти:

- 1.**
- 2.**

Варна, 2020 г.

Дисертационният труд е обсъден на в катедра „Компютърни науки и технологии“ и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Компютърни науки и технологии“.

Автор: инж. Айдын Мехмед Хъкъ

Заглавие: Методи и средства за повишаване на Quality of Service (QoS) в мрежи, базирани на безжични технологии

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Айдын Мехмед Хъкъ

**МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА ПОВИШАВАНЕ НА
QUALITY OF SERVICE (QoS) В МРЕЖИ, БАЗИРАНИ НА
БЕЗЖИЧНИ ТЕХНОЛОГИИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „ДОКТОР”**

Варна, 2020 г.

Дисертационният труд съдържа 180 страници, включително 79 фигури, 77 таблици и 5 приложения, оформени в 3 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 110 заглавия, от които 14 на кирилица и 96 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на Г. от Ч. в на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №/..... Г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се в Докторантски център, стая 318 НУК.

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Актуалност на проблема

В световен мащаб най-активно развиващите се технологии са 5G и 4G, наред с тях и Интернет на обектите (Internet of Things). Безжичните мобилни мрежи преминават все по-активно към 5G технологията. Въпреки това 4G е актуална и най-широко разпространената. Комуникациите, базирани на Интернет на обектите са тясно свързани с 4G и 5G, защото трафикът генериран от сензорните мрежи с множество възли разчита на обслужване чрез тях. Обслужването на множество клиенти и устройства при мобилните мрежи и тези, базирани на Интернет на обектите изисква осигуряване на високо качество (QoS), за постигане на добро потребителско изживяване. Това може да се осигури с адекватно управление на хранването, управление на потребителската мобилност, контрол на достъпа, управление на натоварването, управление на пакетите, приоритизиране на потребителския трафик в мрежата, като пряко свързани с QoS са последните четири.

2. Цели и задачи на изследването

Целта на дисертационния труд е изследване и разработване на методи и средства за повишаване на QoS в мрежи, базирани на 4G и IoT безжични технологии. Акцентира се върху изследване влиянието на алгоритмите за приоритизиране на трафика върху качеството на обслужване при тях.

Задачите, които са формулирани за постигане на поставената цел са следните:

- Да се дефинира система от показатели за оценяване ефективността на механизми за приоритизиране на трафика в безжични мрежи;
- На база дефинираната система от показатели за LTE безжични мобилни мрежи да се предложи приоритизационен алгоритъм, който спазва 3GPP QCI стандарта за QoS, отлага необслужените заявки за следващ TTI, предоставя допълнителни параметри на ISP за приоритизиране на трафика, извършва гъвкаво разпределяне на ресурсите по абонати и предоставя приоритетно обслужване на заявките от мобилни абонати;
- На база дефинираната система от показатели за 6LoWPAN сензорна мрежа да се предложи приоритизационен алгоритъм, който обединява QoS изисквания на приложно и мрежово ниво, като предоставя приоритетно обслужване на спешни пакети.

3. Обект и предмет на изследване

Обект на изследването са 4G LTE мобилни и 6LoWPAN сензорни IoT мрежи.

Предмет на изследването са алгоритмите за приоритизиране на потребителския трафик при LTE и 6LoWPAN мрежи и механизмите за разпределяне на ресурси.

4. Методи на изследване

Използвани са емпирични методи като наблюдение, сравнение, експериментирание за изследване влиянието на алгоритмите за приоритизиране на потребителския трафик върху качеството на услугите при LTE и 6LoWPAN мрежи. На база изследваното влияние на класически алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN мрежи е формулирана необходимостта от подобряване приоритизирането на трафика. Като емпирико-теоретичен подход за изследване и оценка както на съществуващи алгоритми за приоритизиране, така и на предложените в дисертационния труд, е използвана симулация.

5. Място на изследване

Изследванията са проведени в лабораториите на катедра КНТ при ТУ – Варна.

6. Научна новост на изследването

Резултатите от проведените в съответствие с целта и задачите на дисертационния труд теоретични и експериментални изследвания се свеждат до следните основни приноси:

Предложен е алгоритъм за приоритизиране на трафика в 4G LTE безжична мобилна мрежа, при който се постига подобро качество на обслужване на абонатите.

Предложен е алгоритъм за приоритизиране на трафика в 6LoWPAN сензорна мрежа за IoT, който подобрява качеството на обслужване на статични и мобилни възли.

Дефинирана е система от показатели за оценяване ефективността на алгоритми за приоритизиране на трафика в безжични мрежи.

Дефинирана е система от показатели за оценяване на симулационни продукти за безжични мобилни и сензорни мрежи.

Разработена е симулационна среда за моделиране на разпределяне на ресурси и изследване качеството на обслужване (QoS) при LTE мрежа в една клетка и при хоризонтален хендовър.

Разработена е симулационна среда за моделиране на разпределяне на ресурси и изследване качеството на обслужване (QoS) при 6LoWPAN мрежа при работа с едно пълнофункционално устройство и при хоризонтален хендовър.

7. Практическа ценност на изследването

Предложената система от показатели може да бъде приложена както за анализ на проблемите във всеки алгоритъм за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN мрежи, така и за оценка на влиянието им върху качеството на обслужване. Дефинираната система от показатели за сравнение на симулатори за безжични мобилни и сензорни мрежи може да бъде използвана като базово средство за оценка на симулатори от този тип. Разработената система от качествени параметри и техните количествени измерители за анализ и оценка на алгоритмите за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN мрежи може да бъде използвана за комплексно оценяване функционалността на различни безжични мрежови инфраструктури.

Предложените алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN са приложими за подобряване качеството на обслужване при тези мрежи. Извършените изследвания доказват, че предложените алгоритми подобряват обслужването за статични устройства, разположени по-близо до обслужващата станция и за мобилни устройства, които се движат по-бързо. Разработените симулационни продукти позволяват изследване функционалността на нови алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN.

8. Аprobация на изследването

Междинните резултати от теоретичните и експериментални изследвания са докладвани на една конференция в чужбина, три международни конференции в България, от които две са реферирани в база данни „Scopus“ и са отразени в две статии в списания.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1. Анализ на методи и средства за повишаване на качеството на обслужване при безжични мрежи

В първа глава е представено развитието на безжичните мобилни мрежи от четвърто поколение в Европа, Северна Америка и България. Разгледани са спецификите на безжичните технологии LTE и 6LoWPAN. Представен е процеса за планиране на ресурсите при LTE, както и изискванията за качество на обслужване. Разгледани са най-известните класически методи за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN, като е представено обобщение на основните предимства и недостатъци на разглежданите приоритизационни алгоритми.

Изводите, които могат да се направят на основата на анализа, представен в първа глава са:

- LTE и 6LoWPAN са широко използвани съвременни технологии. Те позволяват изграждане на универсални и конвергентни мрежи. Технологиите предлагат повишено качество на услугите (QoS – Quality of Service) чрез приоритизация и класифициране на трафика;
- Продължаващото нарастване на LTE абонаментите в световен мащаб и преминаването към LTE-Advanced увеличава очакванията на потребителите по отношение на QoS. Има патентовани решения, които предлагат различни алгоритми за приоритизация на трафика от планировчика на LTE eNodeB. Те не са базирани на класическите алгоритми за приоритизация и въпреки, че осигуряват гъвкаво обслужване, предлагат решения за подобряване на QoS само в определени аспекти. От тази гледна точка голям практически интерес представлява създаването на нови алгоритми за приоритизиране на трафика, съобразени с нарастващите изисквания на потребителите и доставчиците;
- Разрастването на съвременните сензорни мрежи като част от Интернет на обектите и постепенното им навлизане в ежедневието е причина да се търси все по-добро QoS за техните потребители. Приоритизацията на трафика при съвременните мрежи от този тип е едно от евтините решения за подобро QoS, тъй като реализират концепцията „Virtual Sensor Network“. Това позволяват обслужването на различни приложения в рамките на една и съща сензорна мрежа;
- Съществуващите алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE не предлагат критерии за приоритизиране на заявки от: абонати заплатили цена за гарантирана услуга; близките до обслужващата станция абонати; мобилните абонати и тези които се движат с по-висока скорост; GBR, като се спазват изискванията за QoS, дефинирани от 3GPP;
- Съществуващите алгоритми за приоритизация ускоряват обслужването на заявки при сензорна мрежа с еднотипни приложения, но при тях не се вземат предвид редица параметри, като: тип на изисквания трафик; спешност на данните; спешност на трафика, генериран от конкретно устройство; скорост на преместване на мобилно устройство и др. Това довежда до необходимостта от разработване и изследване на нови алгоритми за приоритизиране на трафика, отговарящи на изискванията на този тип мрежи.

Глава 2. Методи и средства за повишаване на качеството на услугите в мрежи, базирани на безжични технологии

Очакваното нарастване на безжичните 4G и 5G абонаменти изисква предлагане на нови алгоритми за приоритизиране на трафика от мобилни устройства за клетъчни и IoT мрежи.

С цел подобряване на качеството при обслужване доставчикът може да използва различни критерии за приоритизиране на трафика като: заплатена цена за гарантирана услуга;

приоритизиране на заявки от устройства, които са по-близо до обслужващата станция; приоритизиране на заявки от мобилни устройства и според скоростта им на движение, с цел минимизиране на загубите от извършване на хендвър; приоритизиране на заявките според типа на изисканата услуга; приоритизиране на пакети маркирани като спешни.

Предлаганите алгоритми в дисертационния труд имат за основна цел да подобрят качеството на обслужване за устройствата, разположени по-близо до обслужващата станция и за мобилните устройства, за да се минимизират загубите причинени от извършването на Handover.

2.1. Предлаган алгоритъм за приоритизиране на трафика от планировчика на базовата станция при LTE технология

В безжичните радиомрежи базовата станция трябва да позволява достъп на възможно най-голям брой потребители, за да се увеличат приходите. От друга страна е необходимо да се гарантира качеството на услугите, за да се осигури задоволително обслужване. Максималният брой потребители, които базовата станция може да поддържа, е обвързан с честотната лента на системата. Прямо ограниченията за QoS, ако се запълни максимално възможната честотна лента, новите заявки за свързване с базовата станция трябва да бъдат отхвърлени.

Нека капацитетът на клетката е C . Тогава натоварването на клетката L във времеви интервал t е:

$$L = \sum_{i=1}^n L_i(t), \quad (2.1)$$

където

$$L_i(t) = \frac{b_i^u}{b_i(t)} \quad (2.2)$$

и

$$L \leq C \quad (2.3)$$

Ако Bearer j иска да използва същата клетка в същия времеви интервал t , това ще бъде възможно ако:

$$L + L_j(t) \leq C \quad (2.4)$$

Ако това условие не е изпълнено, означава, че ресурсите в текущия ТП не са достатъчни и планировчикът трябва да пренареди ресурсите в целия ТП и трябва да разпредели ресурсите в резервната честотна лента. В такива случаи е необходимо да се открият достатъчно големи пространства за новите заявки. Ако в текущия ТП няма достатъчно ресурси, планировчикът се опитва да намери ресурси в следващия ТП. Тази стратегия намалява закъснението при отговорите, а това е полезно за трафик, чувствителен към забавяне.

Предлаганият в дисертационния труд алгоритъм за обслужване на UEs в низходяща посока при LTE мрежа се изпълнява на два етапа – контролиране на достъпа и планиране на ресурсите.

2.1.1. Контролиране на достъпа

Контролът на достъпа управлява броя на UEs, от които може да се приемат заявки, според натоварването на мрежата. Тези потребители, от които се приемат заявки за обслужване могат да се приоритизират от алгоритъма за планиране на ресурсите и да се обслужат заявките. Това се извършва, за да се избегне претоварване на системата с твърде много UEs. Планировчикът разпределя ресурсните блокове по UEs според нуждите им. За да се задейства контролът на достъпа в базовата станция (eNodeB), UE трябва да бъде свързан с нея.

2.1.2. Планиране на ресурсите

След успешно автентичиране на UE с базовата станция, се стартира планировчикът. Разпределянето на ресурсите се реализира в следните стъпки:

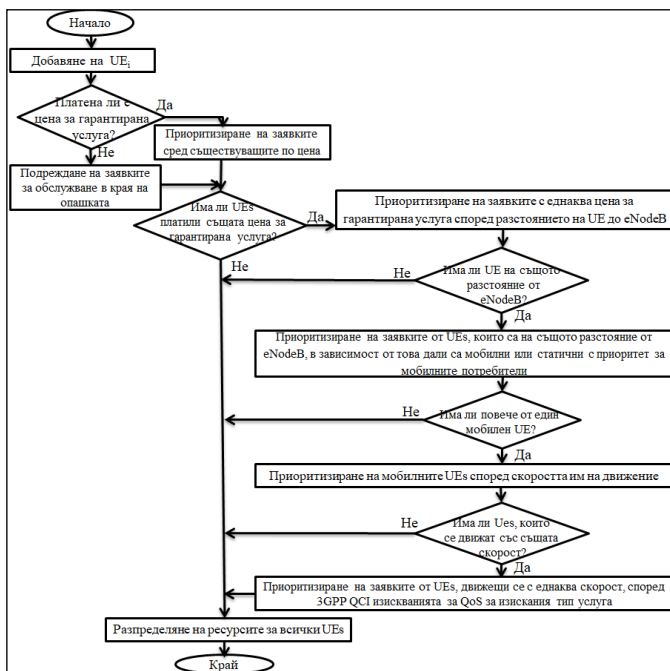
1. определя се общият брой UEs (BR), които се обслужват от планировчика за този момент (t). Ако в предходния времеви интервал ($t-1$) са удовлетворени всички UEs се използва (2.5), в противен случай (2.6).

$$BR_t = BR_{t-1} + 1 \quad (2.5)$$

$$BR_t = BR_{t-1} - 1 \quad (2.6)$$

2. определя се дали новия UE може да се включи за обслужване от планировчика: ако е достигнат максималния брой UE за обслужване в един времеви интервал (Time Slot), заявката от този UE се отхвърля, в противен случай UE се добавя в системата и планировчикът започва да обслужва неговите заявки.

Разпределението на ресурсите по абонати, в планировчика, се базира на приоритети, представени на Фиг. 2.1.



Фиг. 2.1. Предлаган алгоритъм за приоритизиране на трафика при LTE

Предложената приоритизация се изпълнява по следния алгоритъм:

- първоначално потребителските заявки се приоритизират според заплатената цена за гарантирана услуга – най-висок приоритет се дава на заявките с най-висока заплатена цена. Цената се задава чрез стойност, от 0 до 7, където 0 определя най-нисък приоритет, а 7 най-висок;
- когато има множество абонати, заплатили същата цена, техните заявки се приоритизират според разстоянието на UE до базовата станция – най-висок приоритет получават заявките

на абонати, които се намират най-близо до eNodeB. Отдалечените потребители имат по-нисък приоритет, защото са по-близо до края на обслужващата клетка и мобилните абонати може да иницирират процедура за преминаване към друга базова станция (Handover);

- ако множество UEs се намират на същото разстояние до eNodeB, заявките на мобилните потребители се обслужват с по-висок приоритет;
- когато мобилните потребители са много, заявките се приоритизират според скоростта на движение на абоната. Заявките от потребители, които се движат с по-висока скорост се подреждат с по-висок приоритет, защото те ще преминат по-бързо през обслужващата клетка и ще иницирират прехвърляне на предаването към друга клетка. Ако тези заявки не се третират с приоритет това ще доведе до влошаване качеството на услугите за тези потребители;
- когато има множество абонати, които се движат със една и съща скорост, заявките им се приоритизират съгласно QCI изискванията на 3GPP стандарта според изисквания тип услуга.

Разпределянето на ресурсите от планировчика след приоритизиране на потребителските заявки се извършва неравномерно. Разпределя се повече ресурс за потребителите които са получили по-висок приоритет на заявките. Потребителските заявки, за които няма достатъчно ресурс за обслужване в текущия TTI се отлагат за обслужване в следващ TTI.

2.2. Предлаган алгоритъм за приоритизиране на трафика от главното устройство при 6LoWPAN технология за Интернет на обектите

Предоставяне качество на услугите (QoS) е един от ключовите проблеми в полезността и навлизането на 6LoWPAN мрежите в пазара за Интернет на обектите. При традиционните безжични сензорни мрежи като мерки за качество на услугите се разглеждат специфични за приложенията аспекти – точност на данните, забавяне на агрегиране, покритие и живот на мрежата.

Докато QoS е утвърден при традиционните мрежи, при мрежите за Интернет на обектите остава неопределен. При интегриране на безжична сензорна мрежа с IP базирана трябва да се решат редица проблеми, за да се осигурят изискванията за качество. При 6LoWPAN предоставянето на качество на обслужването е различно от обикновените сензорни мрежи, както и от IP мрежите, заради двойния ѝ характер. От една страна 6LoWPAN са IPv6 мрежи, докато от друга са сензорни мрежи с ниска мощност и изключително ограничени ресурси. Това означава, че е необходимо да се осигурят леки IP подобни решения, които могат да бъдат внедрени на устройства с ограничени ресурси. Ориентирането на сензорните мрежи към виртуални такива и IP природата на 6LoWPAN позволяват да се поддържат различен тип услуги. Това довежда до усложняване осигуряването на качеството на обслужване.

С цел да се осигури адекватен механизъм за качество на услугите, който да отговаря на предизвикателствата при мрежи за Интернет на обектите, в дисертационния труд се предлага алгоритъм за приоритизиране на трафика от координатора на мрежата.

Качеството на обслужване може да се осигури по време на обслужване на заявки от крайните възли. За да може да се извърши това възелът трябва да бъде свързан с координатора. Когато към координатора има свързани крайни възли, той периодично по комуникационната среда изпраща Веасоп пакети, ако е с активен Веасоп режим. Те са с формат съгласно IEEE 802.15.4 стандарта. При прочитане на Веасоп фрейма по комуникационната среда възлите разбират, че могат да предават своите данни. След прочитане на Веасоп започва период на

надпреварване за предаване на данни, базиран на CSMA/CA, заедно с това координаторът изпълнява механизма за контрол разпределянето на ресурсите, който работи по подобен на планировчика при LTE начин:

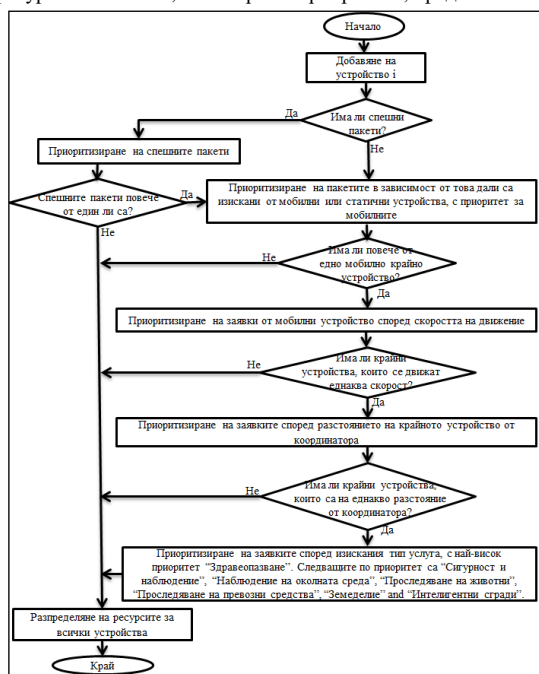
1. Определя се общият брой възли (BR), които се обслужват за този момент (t). Ако в предходния времеви интервал ($t-1$) са удовлетворени всички възли се използва (2.7), в противен случай (2.8).

$$BR_t = BR_{t-1} + 1 \quad (2.7)$$

$$BR_t = BR_{t-1} - 1 \quad (2.8)$$

2. Определя се дали новия възел може да се включи за обслужване от координатора: ако е достигнат максималния брой възли за обслужване в един времеви интервал, заявката от този възел се отхвърля, в противен случай възелът се добавя в системата и планировчикът започва да обслужва неговите заявки.

Разпределението на ресурсите по възли, се базира на приоритети, представени на Фиг. 2.2.



Фиг. 2.2. Предлаган алгоритъм за приоритизиране на трафика при 6LoWPAN

Приоритизирането на трафика според предлагания алгоритъм се извършва както следва:

- първоначално с най-висок приоритет се планират заявките, съдържащи Emergent Dispatch Header. Този хедър идентифицира пакета като спешен, което означава, че е необходимо им тези заявки да се обслужват с приоритет;

- в случай, че има множество пакети с Emergent Dispatch Header, заявките се приоритизират според типа на устройството, което ги изисква. С по-висок приоритет се обслужват заявки от мобилни устройства;
- ако има множество мобилни устройства, техните заявки се приоритизират според скоростта им на движение. С по-висок приоритет се обслужват заявки от по-бързо движещите се устройства;
- при наличие на множество мобилни устройства, които се движат с еднаква скорост, следващият критерий, въз основа на който се приоритизират заявките, е разстоянието на сензора до координатора. За целта се използва принципа на Knowledge Based LWFPF механизма. Пакетите, изпратени от сензори, които са най-близо до координатора имат по-висок приоритет;
- ако има множество сензори на едно и също разстояние от 6LoWPAN координатора, заявките се приоритизират в зависимост от вида на приложението на сензора. Приложенията за здравеопазване (Healthcare) се обслужват с най-висок приоритет, след това са услугите за сигурност и наблюдение (Security and surveillance), наблюдение на околната среда (Environmental monitoring), проследяване на животни (Animal tracking), проследяване на превозни средства (Vehicle tracking), земеделие (Agriculture) и интелигентни сгради (Smart Buildings).

2.3. Предлагаща система от показатели за оценяване ефективността на алгоритми за приоритизиране на трафика в безжични мрежи

Съществуват редица сравнителни анализи и проучвания на различни алгоритми за приоритизиране. Най-често извършваните сравнителни анализи се основават на средните стойности за забавяне, пропускателна способност, коефициент на загуба на пакети. Тези параметри, обаче, може да не са достатъчни за извършване на цялостен сравнителен анализ между различни алгоритми за приоритизиране.

В дисертационния труд са предложени единадесет критерия за оценяване работата на различните алгоритми за приоритизиране на трафика:

- спазва стандарта за QoS;
- предоставя допълнителни параметри за приоритизиране, различни от стандартните;
- брой RB останали за обслужване в следващ времеви интервал;
- начин на разпределяне на ресурсите по абонати;
- предоставя приоритет на абонат, който е платил по-висока цена за гарантирана услуга;
- приоритизиране на абонатите, които се намират по-близо до обслужващата станция;
- предоставя приоритетно обслужване на заявки от мобилни потребители;
- предоставя приоритетно обслужване на заявки от абонати, които се движат с високи скорости;
- предоставя приоритетно обслужване на GBR услугите;
- предоставя приоритетно обслужване на Non-GBR услугите, когато е изискан по-голям брой от тези заявки;
- предоставя приоритетно обслужване на заявките, за които максималното забавяне е високо.

Изложените критерии за извършване на комплексен сравнителен анализ на алгоритми за приоритизиране на трафика може да се приложат за такива, свързани с LTE. Не всички от тях може да се използват по предназначение за 6LoWPAN технология. Съответно наборът от критерии за комплексно сравнение на алгоритми за приоритизиране на трафика при 6LoWPAN мрежи се предлага да е:

- брой пакети останали за обслужване в следващ времеви интервал;
- начин на разпределяне на ресурсите по абонати;
- предоставя приоритет на абонат, който е платил по-висока цена за гарантирана услуга;
- приоритизиране на абонатите, които се намират по-близо до обслужващата станция;
- предоставя приоритетно обслужване на заявки от мобилни потребители;
- предоставя приоритетно обслужване на заявки от абонати, които се движат с високи скорости;
- приоритизиране на спешен трафик;
- приоритизиране на трафик от приложения, касаещи здравеопазването.

2.4. Предлага на система от показатели за оценяване на симулатори за изследване на LTE безжични мобилни мрежи

В литературата има редица проучвания, представящи сравнителен анализ на симулационните продукти за изследване на безжична мрежа. Направените сравнения според всеки автор се базират на различни критерии. За извършване сравнителен анализ на продукти за симулиране работата на LTE безжични мобилни мрежи е необходима комбинация от критерии, с която да се прецизира изборът на най-подходящ симулатор за изследване работата на технологията и за учебни цели. Тази комбинация се предлага да бъде следната:

- моделиране на различни механизми за приоритизация на трафика при LTE;
- моделиране на различни методи за разпределяне на ресурсите;
- симулиране на LTE мобилност;
- генериране формата на LTE вълни;
- моделиране на различни видове трафик;
- възможност за създаване на различни симулационни модели (мрежови архитектури) за LTE мрежи;
- поддържане на графичен потребителски интерфейс;
- наличие на ръководство за потребители и разработчици;
- възможност за елементарен статистически анализ на мрежовия трафик;
- измерване на типични характеристики на производителност;
- анализ на получените резултати;
- възможност за визуално представяне на изследваната мрежа;
- поддържана операционна система;
- лесна инсталация;
- скалируемост;
- език на програмиране;
- време за изучаване;
- използване на процесора (Average CPU);
- използване на паметта (Commit);

- лиценз за ползване.

2.5. Предлагаема система от показатели за оценяване на симулатори за изследване на 6LoWPAN сензорни мрежи за Интернет на обектите

Направени са множество сравнителни анализи на симулатори за безжични сензорни мрежи като при различните проучвания се разглежда различен набор от критерии, които не са достатъчни за оценяване на приложимостта на симулационните среди за изследване на QoS в 6LoWPAN. Затова системата от критерии за оценяване на 6LoWPAN симулатори се предлага да бъде както следва:

- моделиране на различни механизми за приоритизация на трафика при 6LoWPAN;
- моделиране на различни видове трафик;
- възможност за изграждане на различни мрежови архитектури за 6LoWPAN;
- симулиране на 6LoWPAN мобилност;
- анализ на получените резултати;
- възможност за визуално представяне на изследваната мрежа;
- нагледно представяне на въведените данни;
- извеждане на статистически резултати за направените тестове;
- поддържане на графичен потребителски интерфейс;
- наличие на ръководство за потребители и разработчици;
- поддържана операционна система;
- скалируемост;
- поддържана хардуерна платформа;
- оценяване батерията/времето за живот;
- моделиране на консумацията на енергия;
- език за програмиране;
- лесна инсталация;
- време за изучаване;
- използване на процесора (Average CPU);
- използване на паметта (Commit);
- лиценз за ползване.

На база предложените алгоритми за приоритизиране на трафика и предложената система от показатели за оценяване ефективността на алгоритми за приоритизиране на трафика в безжични мрежи, са направени следните изводи:

- Предложен е алгоритъм за приоритизиране на трафика в 4G LTE безжична мобилна мрежа, при който се постига подобро качество на обслужване на абонатите;
- Предложен е алгоритъм за приоритизиране на трафика в 6LoWPAN сензорна мрежа за IoT, който подобрява качеството на обслужване на статични и мобилни възли;
- Предложена е система от показатели за оценяване ефективността на алгоритми за приоритизиране на трафика в LTE безжични мрежи;
- Предложена е система от показатели за оценяване ефективността на алгоритми за приоритизиране на трафика в 6LoWPAN безжични мрежи;
- Предложена е система от показатели за оценяване на симулационни продукти за изследване качеството на услугите за безжични мобилни мрежи и сензорни мрежи за Интернет на обектите;

- Разработен е софтуер за симулиране на LTE мрежа, в който са внедрени както съществуващи приоритизационни алгоритми, така и предложения в дисертационния труд алгоритъм;
- Разработен е софтуер за симулиране на 6LoWPAN мрежа, в който са внедрени както съществуващи приоритизационни алгоритми, така и предложения в дисертационния труд алгоритъм.

Глава 3. Експериментални изследвания и резултати

В Глава 3 е направен комплексен сравнителен анализ на симулатори за LTE и 6LoWPAN мрежи. Изследвани са описаните в Глава 1 класически и предложените от автора в Глава 2 алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN мрежи. Симулирани са различни ситуации и са представени получените резултати за изследване качеството на обслужване. Разгледани са ситуации при статични и мобилни устройства и как различните алгоритми третира обслужването на потребителите. Извършен е комплексен сравнителен анализ на тези алгоритми за приоритизация при LTE и 6LoWPAN мрежи.

3.1. Качествени и количествени параметри за анализ на качеството на услугите при безжични мобилни мрежи от четвърто поколение и безжични сензорни мрежи за Интернет на обектите

Поради очевидната разнотипност на показателите за оценка на алгоритми за приоритизация на трафика, извеждане на конкретна функция за качеството на различни алгоритми е невъзможна. В такива случаи се използват усреднени комплексни показатели. Методът с усреднени комплексни оценки може да се използва по подобен начин и за реализиране на сравнителен анализ между симулационни продукти за изследване на качеството на услугите при LTE и 6LoWPAN мрежи.

Комплексният анализ се избира да се основава на средна аритметична и средна геометрична оценка, които се оценяват съответно по формулите (3.1) и (3.2).

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n b_i d_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (3.1)$$

$$R_g = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{b_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n b_i}} \quad (3.2)$$

Реализирането на комплексен сравнителен анализ позволява да се избегне субективността на автора при оценяване обекта на сравнение. Изборът на геометрична и аритметична математическа зависимост се определя като оптимален от гледна точка на състоятелност, нормираност и сравнимост. Грешките в оценките на единичните показатели при използване на геометрична и аритметична зависимост осигуряват компромисно изпълнение на условията за максимална чувствителност при влошаване на единичните показатели за качество и минимална чувствителност към грешките при определянето им.

3.2. Резултати от изследвания на алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE технология

С цел изследване на алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN мрежи са направени тестове за пропускателна способност, забавяне, съотношение на доставени пакети и съотношение на изгубени пакети за статични и мобилни устройства.

Таблица 3.2, Таблица 3.3, Таблица 3.4 и Таблица 3.5 представят получените резултати от тестовете за 100 статични устройства, а Таблица 3.9, Таблица 3.10, Таблица 3.11 и Таблица 3.12 резултатите за 100 мобилни устройства при LTE технология.

Таблица 3.2. Резултати за пропускателна способност за статични абонати при LTE

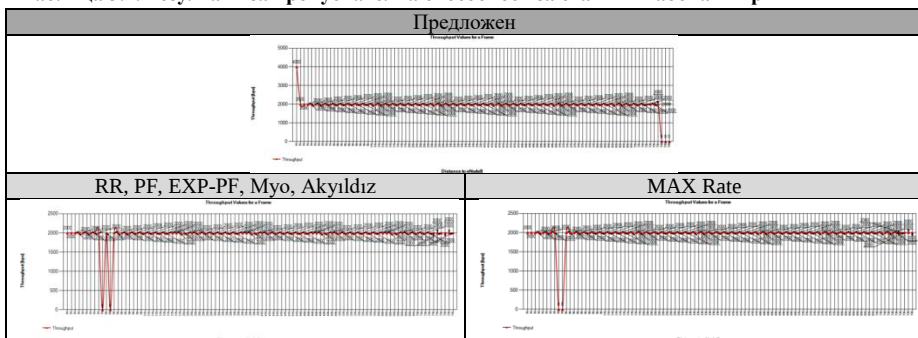


Таблица 3.3. Резултати за забавяне за статични абонати при LTE

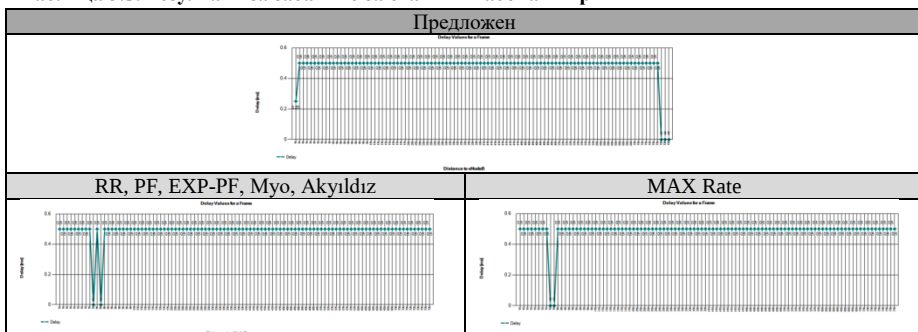


Таблица 3.4. Резултати за съотношение на доставени пакети за статични абонати при LTE

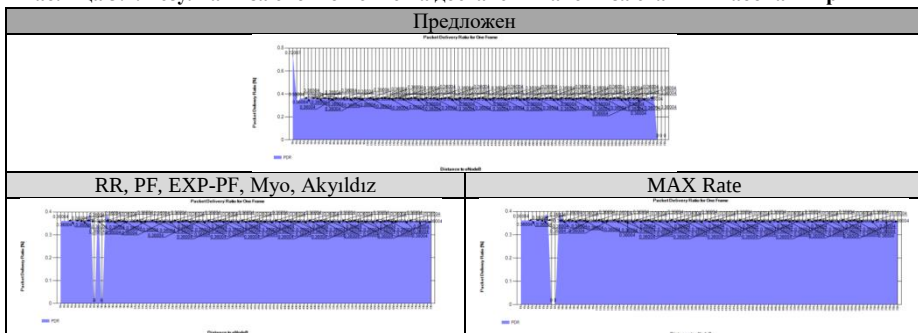


Таблица 3.5. Резултати за съотношение на изгубени пакети за статични абонати при LTE

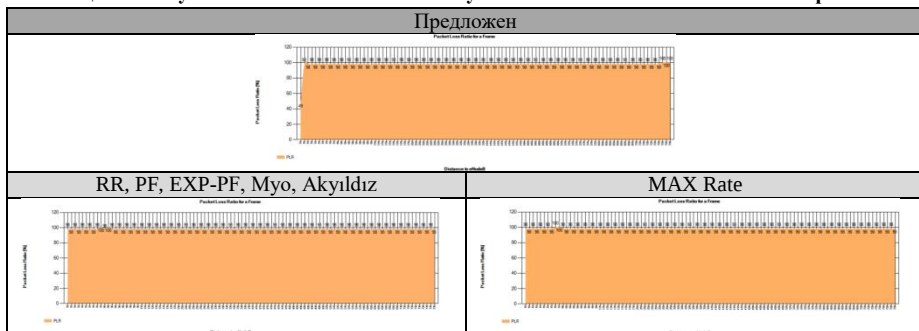


Таблица 3.9. Резултати за пропускателна способност за мобилни абонати при LTE

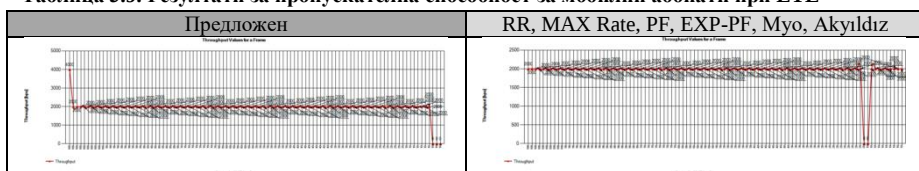


Таблица 3.10. Резултати за забавяне за мобилни абонати при LTE

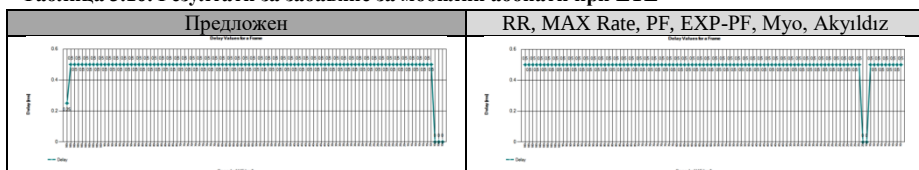


Таблица 3.11. Резултати за съотношение на доставени пакети за мобилни абонати при LTE

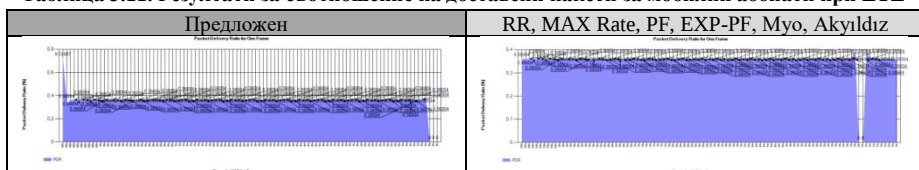
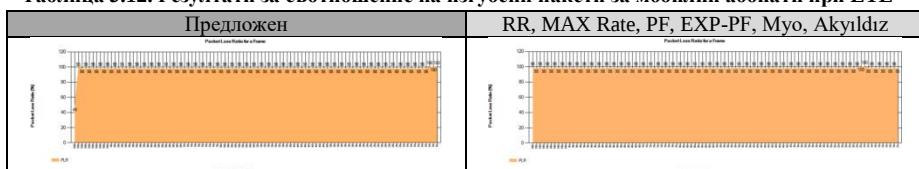


Таблица 3.12. Резултати за съотношение на изгубени пакети за мобилни абонати при LTE



Резултатите от проведените експериментални изследвания показват, че предложеният в дисертационния труд алгоритъм за приоритизация при LTE дава по-добри резултати спрямо класическите алгоритми по отношение на: наличие на статични абонати на разстояние до 250

метра от базовата станция; мобилни потребители които се движат с над 80 км/ч. По отношение на останалите показатели предложеният алгоритъм постига съизмерими резултати.

Според резултатите, получени за комплексните оценки, може да се твърди, че предложеният в дисертационния труд приоритизационен алгоритъм се явява по-добър от останалите. Предложеният алгоритъм има няколко предимства: спазва напълно 3GPP стандарта; обслужва с приоритет GBR услуги; позволява на ISP да въведе цена за гарантирана услуга, според която да се приоритизират заявките на тези потребители, както и приоритизиране на заявки от мобилни потребители, което ще намали загубите причинени от хендвър процедура. На база на това се очаква подобряване на качеството на услугите за крайните потребители.

Таблица 3.23. Средна аритметична и средна геометрична комплексна оценка на алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE мрежи

Комплексна оценка	Предложен алгоритъм	RR	MAX Rate	PF	EXP-PF	Алгоритъм на Myo	Алгоритъм на Akylidiz
Ra	0.255	0.164	0.182	0.182	0.173	0.194	0.185
Rg	0.234	0.156	0.166	0.166	0.161	0.176	0.162

Според представените резултати от изследването поради широкия набор от разглеждани критерии най-подходящи за изследване на LTE мрежите се явяват MATLAB, Vienna LTE Simulator и NS-3. При изследване на критериите поотделно, обаче, се вижда, че предложеният симулатор предоставя по-добри стойности за показателите: „Лесна инсталация“, „Време за изучаване“, „Използване на процесора“, „Използване на паметта“, „Лиценз за ползване“, които са от изключителна важност по отношение на обучението.

Таблица 3.25. Комплексни оценки за сравнение на симулатори за LTE мрежи

Комплексен показател	Изследвани симулатори							
	OPNET	QualNet	OMNeT++	NS-2	NS-3	Vienna LTE Simulator	MATLAB	LTE PHY Lab
R _a	0.444	0.446	0.434	0.460	0.479	0.472	0.501	0.451
R _g	0.336	0.372	0.347	0.362	0.398	0.403	0.418	0.376

3.2. Резултати от изследвания на алгоритми за приоритизиране на трафика при 6LoWPAN технология

Таблица 3.27, Таблица 3.28, Таблица 3.29 и Таблица 3.30 представят получените резултати от тестовете за 10 статични, а Таблица 3.32, Таблица 3.33, Таблица 3.34 и Таблица 3.35 резултатите за 10 мобилни устройства при 6LoWPAN технология.

Таблица 3.27. Резултати за пропускателна способност за статични абонати при 6LoWPAN

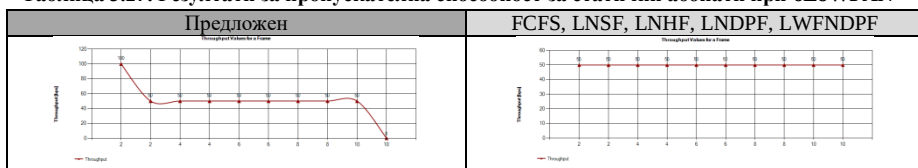


Таблица 3.28. Резултати за забавяне за статични абонати при 6LoWPAN

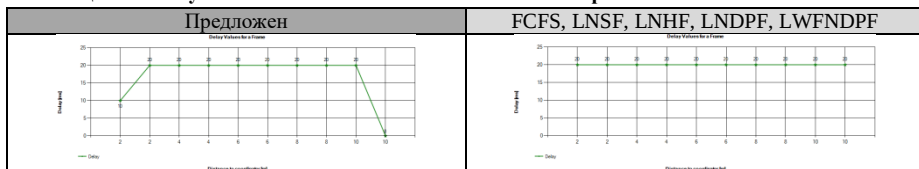


Таблица 3.29. Резултати за съотношение на доставени пакети за статични абонати при 6LoWPAN

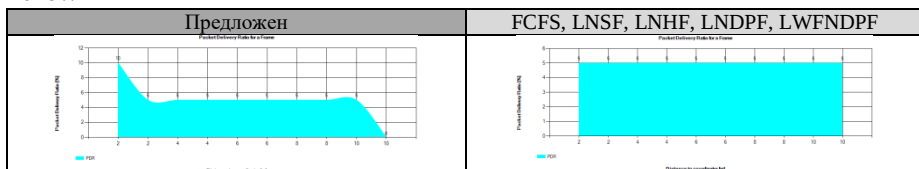


Таблица 3.30. Резултати за съотношение на изгубени пакети за статични абонати при 6LoWPAN

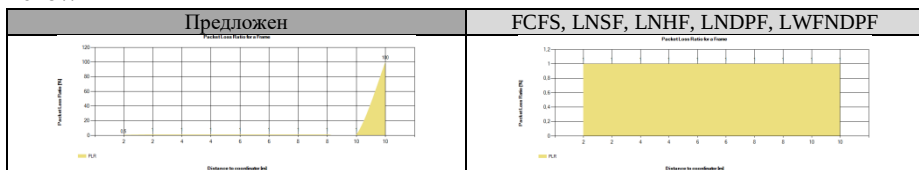


Таблица 3.32. Резултати за пропускателна способност за мобилни абонати при 6LoWPAN

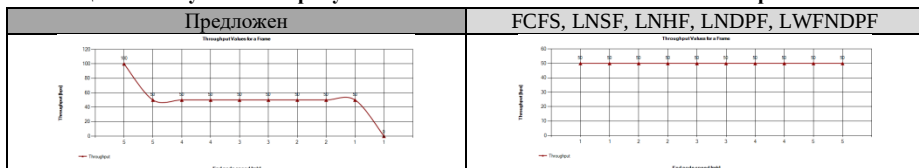


Таблица 3.33. Резултати за забавяне за мобилни абонати при 6LoWPAN

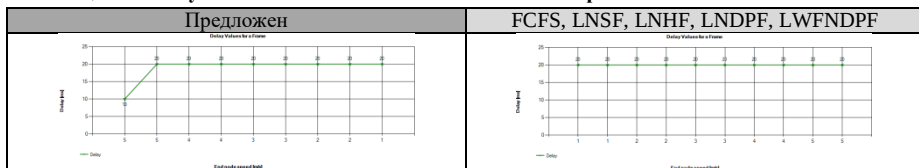


Таблица 3.34. Резултати за съотношение на доставени пакети за мобилни абонати при 6LoWPAN

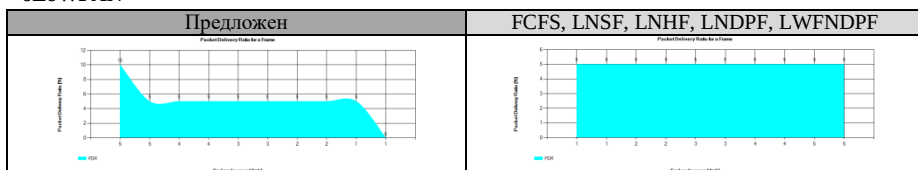
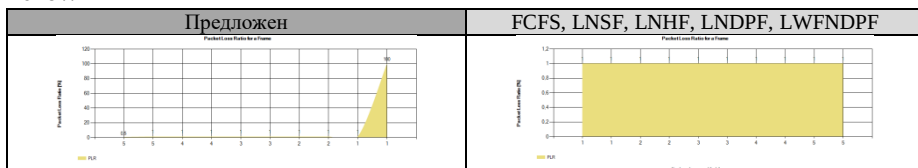


Таблица 3.35. Резултати за съотношение на изгубени пакети за мобилни абонати при 6LoWPAN



На база резултатите от проведените експериментални изследвания се вижда, че предложеният алгоритъм за приоритизиране на трафика при 6LoWPAN в сравнение с разглежданите алгоритми подобрява качеството на обслужване на статични възли, разположени на близко разстояние от координатора; на движещи се мобилни възли в градска среда, както и на възли, движещи се по-бързо преди извършване на мобилност. По отношение на останалите показатели предложеният алгоритъм постига съизмерими резултати.

Комплексните оценки (Таблица 3.7) показват, че съгласно разглежданите критерии за сравнение предложеният приоритизационен алгоритъм се явява най-добър.

Ако се разгледат резултатите за използваните критерии поотделно се вижда, че предложеният алгоритъм предоставя еднакви или съизмерими с останалите алгоритми резултати. Предложеният алгоритъм има предимство по критерии „Начин на разпределяне на ресурсите по абонати“, „Предоставя приоритетно обслужване на заявки от мобилни потребители“, „Предоставя приоритетно обслужване на заявки от абонати, които се движат с високи скорости“ и „Приоритизиране на спешен трафик“, според които осигурява най-добри резултати.

Таблица 3.45. Средна аритметична и средна геометрична комплексна оценка на алгоритми за приоритизиране на трафика при 6LoWPAN мрежи

Комплексен показател	Предложен алгоритъм	FCFS	LNSF	LNHF	LNDPF	LWNDPF
Ra	0.28	0.17	0.21	0.21	0.22	0.21
Rg	0.275	0.165	0.199	0.199	0.209	0.199

Според представените резултати от изследването поради широкия набор от разглеждани критерии най-подходящ за изследване на 6LoWPAN сензорни мрежи е симулатор COOJA и QualNet. Ако се разгледат критериите поотделно, се вижда, че предложеният симулатор предоставя по-добри стойности за показателите: „Лесна инсталация“, „Време за изучаване“, „Използване на процесора“, „Използване на паметта“, „Лиценз за ползване“, които са от изключителна важност по отношение на обучението. Също така предоставя съизмерими, с

останалите симулатори, резултати за много други критерии. Това дава повод за твърдение, че предложеният симулатор е подходящ за целите на обучението.

Таблица 3.47. Сравнение на комплексните оценки на симулатори за 6LoWPAN мрежи

Комплексен показател	Изследвани симулатори					
	COOJA	QualNet	OMNeT++	NS-3	TOSSIM	Предложен
R_p	0.481	0.474	0.415	0.466	0.417	0.417
R_s	0.414	0.402	0.345	0.402	0.358	0.302

Изводите, които могат да се направят на основата на експерименталните резултати, представен в трета глава са:

- Резултатите от проведените експериментални изследвания дават основание да се приеме, че предложеният в дисертационния труд алгоритъм за приоритизация при LTE дава по-добри резултати спрямо класическите алгоритми по отношение на: наличие на статични абонати на разстояние до 250 метра от базовата станция; мобилни потребители които се движат с над 80 км/ч; мобилни абонати след извършване на Handover, които се движат по-бавно и се намират по-близо до eNodeB. По отношение на останалите показатели предложеният алгоритъм постига съизмерими резултати.
- Комплексната аритметична и геометрична оценка на предложени в дисертационния труд алгоритъм за приоритизация при LTE показват, че той според формулираните в дисертационния труд критерии се явява по-добър от останалите.
- На база резултатите от проведените експериментални изследвания може да се приеме, че предложеният алгоритъм за приоритизиране на трафика при 6LoWPAN в сравнение с разглежданите алгоритми подобрява качеството на обслужване на статични възли, разположени на близко разстояние от координатора; на движещи се мобилни възли в градска среда, както и на възли, движещи се по-бързо преди извършване на мобилност. По отношение на останалите показатели предложеният алгоритъм постига съизмерими резултати.
- Комплексната аритметична и геометрична оценка на предложени в дисертационния труд алгоритъм за приоритизация при 6LoWPAN показват, че той според формулираните в дисертационния труд критерии се явява по-добър от останалите.
- Направените комплексни оценки на разработените за целите на дисертационния труд симулатори за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN показват, че те имат съизмерими с разглежданите симулатори характеристики, което дава повод за твърдение, че са подходящи за целите на обучението.

Основни изводи и предложения за практиката

Един от проблемите, породен от големия брой устройства при съвременните безжични мобилни и сензорни мрежи е осигуряването на високо качество на обслужване. Повишаването на качеството на обслужване при тези мрежи е пряко свързано с познаване на влияещите му аспекти. Един от аспектите влияещи върху качеството на обслужване е приоритизирането на потребителския трафик в мрежата, поради което за целта на дисертационния труд са изследвани различни алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN мрежи, базирани на симулация. Предложена е система от показатели, която може да бъде приложена както за анализ на различни алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN мрежи, така и за оценка на качеството и ефективността на всеки алгоритъм. На база предложената система от показатели е извършено експериментално изследване и сравнителен анализ на предложените

алгоритми за приоритизация при LTE и 6LoWPAN мрежи с подобни. Разработената система от показатели може да се използва за комплексно оценяване функционалността на различни алгоритми за приоритизиране на трафика.

Приоритизирането на трафика при LTE и 6LoWPAN мрежи е един от аспектите със съществена роля върху качеството на обслужване за предоставените от мрежите услуги. Изследванията в областта на алгоритмите за приоритизиране на трафика са насочени главно към приоритизиране на трафик който не търпи отлагане във времето, като не се обръща внимание на критерии за приоритизиране като заплатена цена за гарантирана услуга, разстояние до обслужващата станция, мобилност, скорост на движение и др.

Предложени са алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN мрежи, които приоритизират спешен трафик и такъв който не търпи отлагане, като се спазват и допълнителни критерии за приоритизиране като заплатена цена за гарантирана услуга, разстояние до обслужващата станция, мобилност, скорост на движение, тип на трафика. Със симулация на експериментална мрежа е доказана ефективността на предложените алгоритми за приоритизиране на трафика. Подобренията в качеството на обслужване при предложения алгоритъм за приоритизиране в LTE мрежа се отнасят за по-близките до базовата станция абонати и за мобилните абонати които се движат с по-висока скорост. При алгоритъма за приоритизиране в 6LoWPAN мрежи подобренията се отнасят за устройствата генерирали спешен трафик, тези които се намират по-близо до обслужващия координатор и за мобилните възли, които се движат по-бързо.

Дефинирана е система от индикатори за оценка на функционалността на симулатори на LTE и 6LoWPAN мрежи. Дефинираните системи от индикатори за сравнение на симулатори може да бъдат използвани като базово средство за оценка на симулатори за безжични мобилни и сензорни мрежи.

Разработените симулационни средства може да бъдат използвани за изследване на функционалността на нови алгоритми за приоритизиране на трафика при LTE и 6LoWPAN мрежи.

Приноси на дисертационния труд

Приноси с научен характер:

- Предложен е алгоритъм за приоритизиране на трафика в 4G LTE безжична мобилна мрежа, при който се постига подобро качество на обслужване на абонатите;
- Предложен е алгоритъм за приоритизиране на трафика в 6LoWPAN сензорна мрежа за IoT, който подобрява качеството на обслужване на статични и мобилни възли.

Приноси с научно-приложен характер:

- Дефинирана е система от показатели за оценяване ефективността на алгоритми за приоритизиране на трафика в безжични мрежи;
- Дефинирана е система от показатели за оценяване на симулационни продукти за безжични мобилни и сензорни мрежи;

Приноси с приложен характер:

- Разработена е симулационна среда за моделиране на разпределяне на ресурси и изследване качеството на обслужване (QoS) при LTE мрежа в една клетка и при хоризонтален хендвър;

- Разработена е симулационна среда за моделиране на разпределяне на ресурси и изследване качеството на обслужване (QoS) при 6LoWPAN мрежа при работа с едно пълнофункционално устройство и при хоризонтален хендвър;

Публикации по темата на дисертационния труд

1. Хъкъ, Айдън. Изследване на 4G клетъчни безжични мрежи. // Компютърни науки и технологии, ТУ-Варна, 2017, бр. 1, с. 46-50, ISSN: 1312-3335
2. Aleksieva, V., Haka, A. Modified Scheduler for Traffic Prioritization in LTE Network. In: Proceedings of the Second International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ITI'17), Volume 2, Varna, 2017, p.228-238, ISSN: 2194-5357, ISSN Online: 2194-5365, p.II-181-185
3. Haka, Aydan. Simulation Framework for Realization of Handover in LTE Network in Urban Area. In: Proceedings of the 1st International Conference "Applied Computer Technologies" ACT 2018. Ohrid, Macedonia, 21-23 June 2018, p.122-126, ISBN: 978-608-66225-0-3
4. Haka, A., Vasilev, R., Aleksieva, V., Valchanov, H. Simulation Framework for Building of 6LoWPAN Network. In: Proceedings, 2019 16-th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 6-8 June 2019, Varna, Bulgaria, p.522-526, ISBN: 978-1-7281-1412-5, IEEE Catalog number: CFP19L07-USB
5. Хъкъ, А. Сравнителен анализ на механизми за приоритизация в LTE Scheduler. //Компютърни науки и технологии, ТУ-Варна, 2018, бр. 1, с. 24-31, ISSN: 1312-3335
6. Haka, A. Study of 6LoWPAN Wireless Sensor Network Simulators for Purposes of Education. //Proceedings of International Scientific Conference UNITECH Gabrovo 2019, Volume II, 15-16 November 2019, pp: II-22 - II-27, ISSN: 1313-230X

Научно-изследователска работа по други договорни теми и задачи:

- Научноизследователски проект: „Изследване на приложни методи базирани на машинно обучение с цел повишаване качеството на услугите (QoS)“ – НП8/2017г., с ръководител доц. Милена Карова.
- Научноизследователски проект: „Интегриране на машинно обучение и виртуализационни технологии за реализация и управление на облачни услуги“ – НП5/2018г., с ръководител доц. Христо Вълчанов.
- Член на организационен комитет на пета научна конференция с международно участие „Компютърни науки и технологии“, 28-29 септември, 2018г., Варна, България.
- Научноизследователски проект: „Изследване на качеството на услугите при безжични технологии за Internet of Things“ – НП5/2019г., с ръководител доц. Венета Алексиева.
- Проект в помощ на докторанти ПД7/2019г. на тема: „Изследване на QoS в мрежи, базирани на безжични комуникации“, с ръководител доц. Венета Алексиева.
- Национална програма: „Млади учени и постдокторанти“ 2019г. – Етап 1.

Специални благодарности на:

доц. д-р инж. Венета Алексиева, доц. д-р инж. Христо Вълчанов, моето семейство и на всички, които са били съпричастни към моята дисертационна работа.

ABSTRACT

Dissertation Title: Methods and Means for Enhancing QoS in Wireless Technology Based Networks

of the Requirement for the Degree Doctor of Philosophy

by MSc Aydan Mehmed Haka

The aim of the presented PhD is to investigate the impact of traffic prioritisation algorithms on the quality of service in wireless networks based on 4G LTE and 6LoWPAN technologies.

The first chapter presents the development of fourth generation wireless mobile networks in Europe, North America and Bulgaria. The specifics of LTE and 6LoWPAN wireless technologies discussed. The LTE resource planning process and service quality requirements presented. The most popular classic traffic prioritisation methods for LTE and 6LoWPAN discussed, and a summary of the main advantages and disadvantages of the prioritisation algorithms considered. The main goals and tasks of the PhD thesis formulated.

Chapter Two sets out the motives for creating traffic prioritisation algorithms for LTE and 6LoWPAN networks. A system of indicators proposed to evaluate the performance of algorithms for prioritising traffic in wireless networks. The algorithms for traffic prioritisation in LTE and 6LoWPAN networks proposed in the dissertation described. A system of indicators for evaluating simulators for 4G LTE wireless mobile networks and 6LoWPAN sensor networks for Internet of things proposed. Simulation products for LTE and 6LoWPAN networks proposed.

In Chapter Three, a comprehensive comparative analysis of simulators for LTE and 6LoWPAN networks is made. The classic algorithms described in Chapter One and the algorithms for traffic prioritisation in LTE and 6LoWPAN networks proposed in Chapter Two investigated. Different situations are simulated and the results obtained presented to investigate the quality of service. Static and mobile situations discussed, and how different algorithms treat customer service. A comprehensive comparative analysis of these prioritisation algorithms for LTE and 6LoWPAN networks performed.