

## **Авторска справка**

**Резюме на монографичен труд  
„Нови 5G мобилни клетъчни системи. Изследване на взаимодействието  
между 4G-LTE и 5G системите: архитектура, мрежови функции,  
интерфейси и протоколи“,  
ISBN: 978-619-233-282-2**

**с автор: доц. д-р Росен Иванов Пасарелски**

**(по конкурс за заемане на академична длъжност „професор“ в професионално направление 5.3 „Комуникационна и компютърна техника“, предвиден за нуждите на департамент „Телекомуникации“, ФДЕНО на Нов български университет, обявен в ДВ брой 85 / 08.10.2024г. )**

Монографичен труд с автор Росен Иванов Пасарелски на тема „Нови 5G мобилни клетъчни системи. Изследване на взаимодействието между 4G-LTE и 5G системите: архитектура, мрежови функции, интерфейси и протоколи“, с ISBN: 978-619-233-282-2, издателството на НБУ, представлява обстойно и детайлно изследване на една от най-актуалните и динамични теми в телекомуникационната област – мобилните мрежи от пето поколение (5G) и тяхното взаимодействие със системите от четвърто поколение (4G LTE).

В монографията задълбочено се изследват и анализират архитектурата, мрежовите функции, интерфейсите и протоколите на петото 5G поколение мобилни клетъчни мрежи и взаимодействието им с 4G LTE системите. Представен е подход на последователен анализ и оценка на състоянието на мрежовата архитектура в 4G-LTE мобилните системи, опорната мрежа и мрежата за радиодостъп, интерфейсите и протоколите в 4G мрежите, управлението на радиоресурсите и услугите, сигурността, каналите и методите за множествен достъп в LTE мрежите. Монографичният труд обхваща изследване и аналитичен преглед на мрежовата архитектура в 5G мобилните системи, като се разглеждат опорната мрежа, мрежата за радиодостъп и новото радио в 5G системите. В монографията детайлно се анализират мрежовите функции и обекти в 5G системите, управление и качество на услугите, контрол, одит и автентификация, мрежови протоколи и методи за множествен достъп в мрежовата архитектура. Изследвани са подходите на взаимодействие между 4G LTE и 5G системите, като се акцентира на връзката между ядрото 4G-EPC и опорната 5G мрежа, както и връзката в мрежите за радиодостъп E-UTRAN и 5G RAN. В монографията е направен обстоен анализ на експозицията на услугите между различни видове мрежи.

В края на всеки Раздел от монографичния труд са представени разширени математически анализи и модели с числови резултати на методите за множествен достъп, използвани в 4G и в 5G системите, както и математически модели с конкретни примери и изчисления за оптимизиране на възможностите за радиосигнализиране в 5G системите.

## Резюме на съдържанието на монографичния труд

Монографията е с общ обем от 220 страници, като включва 1 таблица и 23 фигури. Структурно е оформена в два основни Раздела, с предговор и въведение. Монографичният труд завършва със заключение, с което авторът обобщава своите проучвания и анализи и систематизира приносите си към труда. В края на текста са приложени списък с общо 85 цитирани източници, списък с използвани абривиатури, както и списъци с фигурите и таблиците.

Монографичният труд представя изследване и анализ на архитектурата, мрежовите функции, интерфейсите и протоколите на мобилните клетъчни мрежи от пето поколение, както и взаимодействието между 4G LTE и 5G системите. Основните функционалности и взаимовръзки в мрежовата архитектура на двете мобилни системи са разгледани детайлно.

Съдържанието на монографията е разпределено в два основни Раздела, както следва:

Раздел 1 - Изследване на мрежовата архитектура на 4G LTE мобилни системи;

Раздел 2 - Изследване на мрежовата архитектура на 5G мобилни системи.

Трудът започва с предговор и въведение в областта на мобилните клетъчни системи и тяхното еволюционно развитие.

Раздел 1 обхваща изследване на мрежовата архитектура на 4G LTE мобилни системи. В началото на Раздела се анализира референтния модел на 4G LTE архитектурата, който предоставя стандартизирана основа за внедряване на LTE мрежи. Този модел осигурява ефективна комуникация между различните мрежови елементи на LTE и улеснява оперативната съвместимост между оборудването на различни доставчици. Последователно и детайлно са разгледани компонентите на опорната мрежа в 4G LTE системите, като специално внимание е отделено на - разширеното пакетно ядро, обекта за управление на мобилността, обслужващия шлюз, шлюза на мрежата за пакетни данни и сървър за домашни абонати. Подчертава се структурата и функционирането на тези компоненти, тяхното значение в архитектурата на LTE и важноста им за безпроблемната работа на мрежата.

В този Раздел от монографията се изследват интерфейсите за връзка в 4G LTE мрежите. Обследва се широк спектър от основни интерфейси, използвани за свързване и комуникация между различни мрежови компоненти. Тези интерфейси са систематизирани по следния начин: Uu интерфейс, S1 интерфейс, X2 интерфейс, SGi интерфейс, Интерфейс S5/S8, Интерфейс S11, S2a/S2b интерфейс, S6a/S6d интерфейс, S9 интерфейс, Rx интерфейс, Gx интерфейс и Gxс интерфейс. Изследваните интерфейси играят важна роля в оперирането и осигуряването на ефективна и надеждна работа на 4G-LTE мрежата, като гарантират безпроблемна комуникация между различни мрежови компоненти и осигуряват надеждно и бързо предаване на данни за мобилни устройства.

Обърнато е детайлно внимание на контролната и потребителската равнини в 4G мрежата. Анализирана е контролната равнина в контекста на архитектурата на LTE мрежата, която играе ключова роля в управлението на носителите за радиодостъп и връзката между потребителското оборудване и разширеното ядро (EPC). Тази равнина осигурява сигнализация между универсалната наземна мрежа за радиодостъп E-UTRAN и EPC, като дава възможност на мрежата да управлява потока на данни между крайния потребител (UE) и мрежовата инфраструктура. От друга страна, потребителската равнина е разгледана с фокус върху преноса на потребителски данни, като глас, видео и други, между потребителското оборудване, E-UTRAN и пакетното ядро (EPC). Разгледани са още и функциите на потребителската равнина, свързани с управлението на параметрите на качеството на услугата (QoS) относно преноса на данни, включително приоритизирането на определени типове данни пред други и осигуряването на надеждно доставяне на информация с ниска латентност.

Раздел 1 продължава с изследване на управлението на радиоресурсите (RRM), като акцентира на функциите, свързани с разпределението, планирането и повторното използване

на радиоресурсите между различни потребителски устройства. Целта е оптимизиране на капацитета и производителността на мрежата. Разгледани са също така функциите за удостоверяване и оторизация, свързани със сигурността в LTE, които гарантират, че само упълномощени потребители и устройства могат да получат достъп до мрежата и нейните услуги.

В отделни точки от Раздел 1 методично се изследва архитектурата за сигурност на мрежата, с акцент на защитата на потребителските данни, обменяни между мобилните устройства и мрежата, механизмите за осигуряване на мрежовата сигурност, включително криптиране и защита на целостта на данните, които предотвратяват подслушването и неоторизирания достъп. Проучва се мрежата за радиодостъп в LTE, като се анализират компонентите на радиослоя и функциите, свързани с управлението на мобилността, включително хендовъра и преизбирането на клетка. Подробно се разглеждат каналите в LTE мрежите, като се подчертава, че в LTE се използват различни канали за ефективна и надеждна комуникация между базовите станции и потребителските устройства. Каналите са разделени на две основни категории: канали за управление и канали за данни.

В края на Раздел 1 е обърнато съществено внимание на методите за множествен достъп в LTE мрежите, с фокус върху две основни технологии: множествен достъп с честотно разделяне (FDMA) и множествен достъп с ортогонално разделяне на честотите (OFDMA). Предоставя се математически анализ на OFDM, включващ модели и изчисления за ортогоналност на подносещите, спектрална ефективност, честотна лента и модулация и демодулация. Математическият анализ на OFDMA включва изследвания на системата, ортогоналността на подносещите и капацитета им, както и спектралната ефективност.

Раздел 1 от монографията завършва с общи изводи, с които се резюмира работата по тази секция от монографията.

В Раздел 2 на монографичният труд се представя задълбочено изследване на мрежовата архитектура на 5G мобилните системи. Разглеждат се последователно архитектурният референтен модел на 5G мрежите, опорната мрежа, хардуерните компоненти и софтуера, използвани в 5G системите.

В тази част от монографията обстойно и детайлно се анализират мрежовите функции и обекти в 5G системите, а именно: функцията за управление на достъпа и мобилността, функцията на потребителската равнина, функцията за управление на сесии, функцията за избор на мрежов сегмент, функцията на сървъра за удостоверяване, функцията за експозиция на мрежа, функцията за контрол на политиките, функцията за таксуване, функцията за съхранение на неструктурирани данни, функцията за унифицирано управление на данни, функцията на приложението, функцията за мрежово хранилище, функцията за унифицирано хранилище на данни, функцията за специфично удостоверяване и оторизация на мрежовия сегмент, функцията за управление на възможностите на UE радиото, функцията за анализ на мрежови данни, регистър за идентификация на 5g оборудването, комуникационен прокси за услуга, прокси за защита на сигурността на границата на мрежата, не-3GPP функцията за взаимодействие, функцията за доверен не-3GPP шлюз, функцията на шлюз за кабелен достъп, доверена функцията за взаимодействие на WLAN, функцията за управление на възможностите за радио достъп на UE, функцията за управление на параметрите на UE, функцията за експозиция на възможност за обслужване, функцията за мрежова автоматизация, приложна функцията за непрекъснатост на комуникационните услуги, функцията за обработка на мрежови данни за анализ, функцията за политика и правила за таксуване, функцията за управление на подмрежата на мрежовия сегмент, информационна функцията за подпомагане на избора на мрежов сегмент, функцията за референтна точка на UE, функцията за осигуряване на сигурността.

Монографичният труд продължава с изследване на протоколите в 5G мрежовата архитектура, в частност протоколен стек на потребителската равнина и протоколен стек на контролната равнина. Също така се проучва еталонният модел на 5G архитектура без роуминг.

Разглеждат се структурата и компонентите, необходими за поддържане на комуникация между различни мрежи и доставчици на услуги в рамките на една държава или регион. Като фундамент на архитектурата е опорната 5G мрежа, която обхваща набор от мрежови функции, работещи взаимно с цел да осигурят комуникация и услуги от край до край.

В Раздел 2 на монографията много обстойно и детайлно са анализирани референтните точки в 5G архитектура. Засегнати са голям брой референтни точки в архитектурата на 5G мрежите, които служат като интерфейси между различни мрежови функции и обекти.

В отделна точка от Раздел 2 е изследвана референтната 5G архитектура с роуминг, която е проектирана да поддържа потребители, пътуващи извън домашната си мрежа и имащи нужда от достъп до 5G мобилни услуги от друга мрежа. Архитектурата предоставя насоки и най-добри практики за проектиране и внедряване на мрежова инфраструктура, протоколи и процедури, необходими за поддържане на безпроблемно предоставяне на 5G услуги в множество мрежи. Също така дава възможност на операторите на мобилни мрежи да се свързват и обменят информация, за да улеснят предоставянето на 5G услуги на своите абонати, когато пътуват в чужбина.

В Раздел 2 на монографията съществено внимание е обърнато на архитектурата за съхранение на данни в 5G. Акцент е поставен на три вида архитектури за съхранение на данни, използвани в 5G мрежите - архитектура на централизирано съхранение, архитектура на разпределено съхранение и архитектура за съхранение на ръба на мрежата. Архитектурите за съхранение на данни в 5G системите са проектирани да управляват и съхраняват ефективно големи количества данни, генерирани от 5G мрежи, устройства и приложения.

Монографията продължава със задълбочено изследване на радиомрежата за достъп в 5G системите. Направено е обстойно проучване на архитектурата на 5G - NG RAN. Засегнати са NG-RAN идентификаторите от следващо поколение, идентификатора на протокола за приложение, транспортните адреси и осигуряването на радиодостъп на потребителските устройства чрез радиомрежата от нова генерация NG-RAN. Обследвани са основните функции на NG-RAN, отговорни за осигуряването на безжичен достъп до основните мрежови услуги на потребителското оборудване. Пояснено е, че тези функции са разпределени в няколко възела в архитектурата NG-RAN и са проектирани да работят безпроблемно във взаимодействие.

Особен акцент във втория Раздел на монографията е поставен на новото радио в 5G системите, което дефинира нов ефирен интерфейс. Това е стандартът за радиоинтерфейс за 5G мобилните комуникационни системи, който е проектиран да предлага по-високи скорости на данни, по-ниска латентност и по-добро покритие в сравнение с предишни поколения безжични технологии. Анализирани са ключовите характеристики и спецификации на новото радио - NR в 5G системите.

В тази част на монографията детайлно е изследван и проблема за оптимизиране на възможностите за радиосигнализиране в 5G системи, който е от ключово значение за потвърждаване, че мрежата работи с оптимална ефективност, като същевременно предоставя висококачествени услуги и възможности, които се очакват от 5G мрежа. Това включва оптимизиране на сигнализирането между мрежата и крайните потребителски устройства, за да се гарантира, че правилните радиовъзможности се използват в подходящия момент и че служебните сигнали са сведени до минимум. Предоставени са математически модели на оптимизирането на възможностите за радиосигнализиране в 5G системи. Систематизирани са различни техники за моделиране, а именно: моделиране на канали, обработка на сигнала, алгоритми за оптимизация, линейно програмиране, теория на опашките, машинно обучение, теория на информацията, управление на радиоресурсите, управление на смущенията и топология на мрежата и маршрутизиране. Представени са числови резултати от математическите модели и анализи.

В отделна точка от Раздел 2 е изследвано обстойно взаимодействието между 4G-LTE и 5G мрежите, като се засягат ядрото EPC и 5G RAN. Акцентира се на това, че мрежата за

радиодостъп - 5G RAN се изгражда, за да работи безпроблемно със съществуващата мрежова инфраструктура на 4G EPC. Това дава възможност за плавен преход от четвърто 4G към пето 5G поколение мобилни системи, както за операторите, така и за крайните потребители. Мрежата за радиодостъп - 5G RAN използва нова архитектура на основна мрежа - 5GC, която е разработена да бъде по-гъвкава и мащабируема от предишната EPC архитектура. Въпреки това, 5GC все още може да взаимодейства с EPC чрез набор от стандартизирани интерфейси и протоколи.

Последователно е разгледано взаимодействието между 5GC с не-3GPP достъп и EPC/E-UTRAN. Дава се ясна представа, че взаимодействието между 5G основната мрежа и E-UTRAN, свързан с EPC, е възможно да бъде постигнато чрез не-3GPP достъп. Достъпът не-3GPP се отнася до мрежи, които не са базирани на 3GPP технологии за радиодостъп, като Wi-Fi, Етернет или DSL. В този сценарий потребителско оборудване може да се свърже към 5GC чрез не-3GPP достъп и все пак да има достъп до услугите, предоставени от E-UTRAN. Взаимодействието между двете мрежи се постига чрез 5G сервизен шлюз - SGW в еволюция на системната архитектура (SAE) и 4G EPC сервизен шлюз - SGW.

Разгледано е също така взаимодействието между еволюирал шлюз за пакетни данни (ePDG) свързан към EPC и 5G система. Това взаимодействие включва поддръжка на не-3GPP достъп до основната 5G мрежа, което е необходимо за активиране на 5G свързаност за устройства, които нямат собствени 5G възможности и разчитат на други технологии за достъп, като Wi-Fi или кабелни връзки.

В Раздел 2 е анализиран процеса на експозиция на услугите между различни мрежи. Пояснява се, че излагането на услуги в сценарии за взаимодействие е ключова характеристика на 5G, която позволява безпроблемна свързаност и използване на мрежови услуги в различни мрежи. Архитектурата SBA в 5G предоставя стандартизиран интерфейс за излагане на услуги, давайки възможност на различни мрежи да си взаимодействат и да доставят надеждно и високо устойчиво абонатно потребление.

Изследването продължава като в отделна точка от този Раздел се акцентира на архитектурата на 5G системите за чувствителни към времето комуникации и индустриална автоматизация. Разгледани са основните характеристики на 5G архитектурата за поддръжка на чувствителни към времето комуникации и индустриална автоматизация.

Особено важно е да се отбележи, че в Раздел 2 от монографията е направен обстоен анализ на методите за множествен достъп в 5G системи. Разгледан е детайлно неортогоналният множествен достъп (NOMA) в 5G системите и принципите на предаване с неортогонален множествен достъп. Представен е математически анализ на предаване в прав канал на 5G системи с неортогонален множествен достъп. Описва се комплексността на математическият анализ на предаване в прав канал (DL) на 5G системи с неортогонален множествен достъп - NOMA, като се засягат ключови математически концепции и се излагат числени резултати.

В края на Раздел 2 от монографията е изготвен сравнителен анализ между методите за множествен достъп NOMA и OFDMA, с цел по-ясна картина в изследването на двата метода.

Монографията завършва със заключение, в което се обобщават направените изследвания и анализи и се представят основните приноси на автора към труда.

## **Резюме на научните приноси и научноприложни резултати на автора в монографичния труд.**

В монографичният труд могат да бъдат резюмирани следните научни приноси и научноприложни резултати:

- Направени са обстойни изследвания и анализи на основните интерфейси за свързване и комуникация между различни мрежови компоненти в 4G - LTE мрежа, на функциите

и протоколите на контролната и потребителските равнини в 4G – LTE мрежа, на каналите за ефективна и надеждна комуникация между базовата станция и потребителското оборудване в LTE мрежи, на управлението на радиоресурсите, на архитектурата за сигурност, на мрежата за радиодостъп и основната мрежа в LTE.

- Предоставени са математически анализи и числови резултати на мултиплексирането с ортогонално честотно Разделяне - OFDM в LTE мрежи, математически анализ и изготвяне на модели за OFDM система в LTE, математически анализ и изготвяне на модели за OFDMA система в LTE.
- Задълбочено са изследвани и анализирани мрежовите функции и обекти в 5G системите, не-3GPP функции за взаимодействие в 5G, протоколният стек в контролната и потребителската равнини, референтните точки в мрежовата архитектура на 5G, мрежата за радиодостъп и основната мрежа в 5G, архитектурата от следващо поколение - NG RAN, взаимодействието между 4G и 5G мрежите - между ядрото EPC и 5G RAN, между 5GC с не-3GPP достъп и EPC/E-UTRAN и между еволюирал шлюз за пакетни данни свързан към EPC и 5G система.
- Изследвана е архитектурата на 5G системи за чувствителни към времето комуникации и индустриална автоматизация.
- Изчерпателно е изследван и анализиран неортогоналният множествен достъп – NOMA и принципите на предаване в 5G системите с неортогонален множествен достъп.
- Направени са математически анализи, подкрепени с числови резултати и модели за оптимизирането на възможностите за радиосигнализиране в 5G системи, математически анализ на предаване в прав и обратен канал на 5G системи с неортогонален множествен достъп и сравнителен анализ между методите за множествен достъп NOMA и OFDMA, с цел по-ясна картина в изследването на двата метода.

Трудът се характеризира и с научноприложна стойност, тъй като представените в него резултати могат да бъдат използвани в телекомуникационния сектор при проектирането, внедряването и управлението на 5G мрежи. Изследват се и се описват конкретни технически проблеми и възможности за интеграция на 4G и 5G мрежи, което има практическо значение за съществуващите оператори.

Монографията е подходяща за широк кръг от читатели, в това число студенти, изследователи и професионалисти в телекомуникационната сфера. Тя може да служи като изчерпателен ресурс по теми, свързани с мобилни клетъчни мрежи и безжични комуникации.

Октомври 2024г.

Росен Пасарелски