

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ
имени Гумарбека Даукеева

Кафедра «Телекоммуникационные сети и системы»

Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой
PhD, доцент Темырканова Э.К.
(ученая степень, звание, ФИО)

(подпись)

« _____ » _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка

на тему: «Анализ архитектур сетей 5-го поколения мобильной связи»

Магистрант: <u>Емжаева К.Б.</u>	_____	группа <u>МРЭТн -18-1</u>
(Ф.И.О.)	(подпись)	
Руководитель: <u>к.т.н., профессор</u>	_____	<u>Туманбаева К.Х.</u>
(ученая степень, звание)	(подпись)	(Ф.И.О.)
Рецензент _____	_____	_____
(ученая степень, звание)	(подпись)	(Ф.И.О.)
Консультант по ВТ <u>к.т.н., профессор</u>	_____	<u>Туманбаева К.Х.</u>
(ученая степень, звание)	(подпись)	(Ф.И.О.)
Нормоконтроль: <u>к.т.н., профессор</u>	_____	<u>Туманбаева К.Х.</u>
(ученая степень, звание)	(подпись)	(Ф.И.О.)

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ
имени Гумарбека Даукеева

Институт Космической Инженерии и Телекоммуникаций

Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

Кафедра: «Телекоммуникационные сети и системы»

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Емжаевой Куралай Болаткызы
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации «Архитектура сетей 5-го поколения мобильной связи»

Утверждена Ученым советом университета №122 от «25» октябрь

Срок сдачи законченной диссертации «25» мая 2020г.

Цель исследования состоит в анализе архитектур сетей 5-го поколения мобильной связи и определение пропускной способности сети для мобильных пользователей

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1. Анализ современного состояния сети 5G
2. Определение основных характеристик сетей 5G/ИМТ-2020 и их сопоставление с действующими сетями ИМТ
3. Модель производительности для сетей 5G с учетом мобильности пользователей внутри и между сотами

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

Рисунок 3.1 – Модель очереди PS

Рисунок 3.2 – Иллюстрация передачи данных между зонами и из зоны

Рисунок 3.4 – Непрерывную временную Марковскую цепь

Рисунок 3.6 – Вероятность передачи обслуживания в зависимости от общей скорости поступления новых запросов на подключение

Рисунок 3.7 – Среднее время пребывания в рассматриваемой соте как функция от общей скорости поступления новых соединений

Рекомендуемая основная литература

1. Bruno Baynat, Narcisse Nya Kamtchoum. Performance Model for 4G/5G Networks Taking into Account Intra- and Inter-Cell Mobility of Users. 41st IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN 2016), IEEE, Nov 2016, Dubai, United Arab Emirates. pp.212-215, 10.1109/LCN.2016.45. hal-01620458.

2. SONATA project Deliverable D2.2 “Architecture design,” available at: <http://sonatanfv.eu/sites/default/files/sonata/public/contentfiles/pages/SONATAD2.2ArchitectureandDesign.pdf>

Г Р А Ф И К
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1. Информационный обзор согласно теме	05.11.2018	
2. Анализ современного состояния сети 5G (теоретическая часть)	14.03.2019	
3. Определение основных характеристик сетей 5G/IMT-2020 и их сопоставление с действующими сетями IMT (исследовательская глава)	02.02.2020	
4. Модель производительности для сетей 5G с учетом мобильности пользователей внутри и между сотами (расчетная часть)	18.03.2020	

Дата выдачи задания_30 сентябрь 2018г._____

Заведующий кафедрой _____ (Темырканова Э.К.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Научный
руководитель диссертации _____ (Туманбаева К.Х.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению
магистрант _____ (Емжаева К.Б.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Аңдатпа

Бұл диссертация бесінші буын желілік архитектурасын және 5G архитектурасының негізгі қағидаларын талдауға арналған.

Жұмыста бесінші буын желісінің негізгі сипаттамалары ұсынылған, ресурстарды бірлесіп қолдану арқылы жаппай қызмет көрсету жүйесі (ЖҚК) ретінде 4G/5G желілерінің талдамалы моделі әзірленді. Сонымен қатар, ұялы телефонның ішкі және одан тыс ұялы пайдаланушылары үшін өткізу қабілеті мен кідірісі сияқты негізгі сипаттамалар анықталған.

Аннотация

Данная диссертационная работа посвящена анализу архитектур сети пятого поколения и основных принципов архитектуры 5G.

В работе представлены основные характеристики сети пятого поколения, разработана аналитическая модель сетей 4G/5G как системы массового обслуживания (СМО) с совместным использованием ресурсов. На основе разработанной модели определены такие основные характеристики, как пропускная способность и задержка для мобильных пользователей внутри и вне соты.

Annotation

This dissertation is devoted to the analysis of fifth-generation network architectures and the basic principles of 5G architecture.

The main characteristics of the fifth generation network are presented in the work, an analytical model of 4G / 5G networks as a queuing system (QS) with resource sharing is developed. Based on the developed model, such basic characteristics as bandwidth and delay for mobile users inside and outside the cell are determined.

Содержание

Введение	7
1 Анализ современного состояния сети 5G	8
1.1 Архитектура сети 5G	8
1.2 Основные принципы архитектуры 5G	11
1.3 К централизованной и распределенная архитектура	14
1.4 Программные модули или сетевые функции сети 5G	16
1.4.1 Функция управления доступом и мобильностью (AMF - Access and Mobility Management Function)	16
1.4.2 Функция управления сессиями (SMF - Session Management Function)	17
1.4.3 Функция передачи данных пользователей (UPF - User Plane Function)	17
1.4.4 Модуль управления данными пользователей (UDM - Unified Data Management)	18
1.4.5 Унифицированная база данных (UDR - Unified Data Repository)	18
1.4.6 Система хранения неструктурированных данных (UDSF - Unstructured Data Storage Function)	18
1.4.7 Функция выбора сетевого слоя (NSSF - Network Slice Selection Function)	19
1.4.8 Функция управления политиками (PCF – Policy Control Function)	20
1.4.9 Функция обеспечения взаимодействия с внешними приложениями (NEF - Network Exposure Function)	20
1.4.10 Хранилище сетевых функций (NRF - NF Repository Function)	21
1.4.11 Прикладная функция (AF - Application Function)	22
1.4.12 CUPS (control and user plane separation)	23
1.4.13 Network Slicing	23
1.4.14 PDU сессии	24
1.4.15 Тип PDU сессии (PDU Session Type)	24
1.4.16 Режимы работы функции бесшовности абонентских сессий и услуг (SSC mode)	25
1.5 Идентификаторы пользователей	26
1.5.1 Международный постоянный идентификатор подписки абонента – 5G SUPI (Subscription Permanent Identifier)	26
1.5.2 Постоянный идентификатор оборудования пользователя - Permanent Equipment Identifier (PEI)	26
1.5.3 Скрытый идентификатор пользователя – SUCI (Subscription Concealed Identifier)	27
1.5.4 Глобальный временный уникальный идентификатор абонента 5G-GUTI (5G Globally Unique Temporary Identifier)	27

2	Определение основных характеристик сетей 5G/ИМТ-2020 и их сопоставление с действующими сетями ИМТ	28
2.1	Общее описание услуг и сервисов, предполагаемых для предоставления на сетях 5G/ИМТ-2020	28
2.2	Общее описание технологических решений для радиointерфейсов сетей 5G/ИМТ-2020	30
2.3	Общее описание технологических решений для сетевой инфраструктуры 5G/ИМТ-2020	32
2.4	Анализ международных тенденций развития услуг и сервисов в сетях подвижной связи при переходе к технологиям 5G/ИМТ-2020	33
2.5	5G-ИoT-LPWAN: взаимоотношение	35
3	Модель производительности для сетей 5G с учетом мобильности пользователей внутри и между сотами	47
3.1	Методы моделирования производительности для сетей 5G	47
3.2	Предположения о системе и движении транспорта	48
3.3	Модель	50
3.4	Границы производительности	55
3.5	Сквозная производительность пользователей	58
3.6	Результаты работы	58
	Заключение	64
	Список литературы	65
	Аббревиатура	68
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	69

Введение

5G-это мобильная сеть 5-го поколения. Это новый глобальный беспроводной стандарт после сетей 1G, 2G, 3G и 4G. 5G обеспечивает новый вид сети, предназначенной для соединения практически всех и вся вместе, включая машины, объекты и устройства.

Беспроводная технология 5G предназначена для обеспечения более высоких пиковых скоростей передачи данных с несколькими Гбит/с, сверхнизкой задержкой, большей надежностью, большой пропускной способностью сети, повышенной доступностью и более равномерным пользовательским интерфейсом для большего числа пользователей. Более высокая производительность и повышенная эффективность расширяют возможности новых пользователей и связывают новые отрасли промышленности. Сокращение времени задержки в сети очень важный показатель для телемедицины и других отраслей, для которых этот показатель критичен.

В Казахстане в течение трех лет планируется запустить сети пятого поколения в крупнейших городах. Первоначально сети будут развиваться внутри крупных объектов. Проведены тестовые испытания в Нур-Султане и Алматы с использованием разных диапазонов частот. Поэтому исследование архитектур сети пятого поколения и его основных характеристик является актуальной задачей.

Целью магистерской диссертации является анализ архитектур сетей 5-го поколения мобильной связи и определение пропускной способности сети для мобильных пользователей.

Для достижения цели необходимо выполнить следующее:

- 1) провести анализ современного состояния сети 5G;
- 2) провести анализ архитектур сети пятого поколения и основных принципов архитектуры 5G;
- 3) определить основные характеристики сети пятого поколения;
- 4) разработать аналитическую модель сетей 4G/5G как системы массового обслуживания (СМО) с совместным использованием ресурсов;
- 5) используя разработанную модель, определить такие основные характеристики, как пропускная способность и задержка для мобильных пользователей внутри и вне соты.
- 6) разработать имитационную модель в среде MatLab

Практическая ценность диссертации заключается в разработке аналитической модели, которую можно использовать при расчетах пропускной способности и величины задержки в мобильной сети пятого поколения при обслуживании мобильных пользователей.

1 Анализ современного состояния сети 5G

1.1 Архитектура сети 5G

Пятое поколение мобильной связи, действующее на основе стандартов телекоммуникаций, следующих за существующей технологией 4G-LTE. В сентябре 2015 года в США на семинаре 3GPP было положено начало стандартизации сетей 5G. В соответствии с этими планами 1-ая фаза спецификаций должна быть завершена до второй половины 2018 г., 2-я фаза – до декабря 2019 г. Наконец в декабре 2017 года была завершена стандартизация так называемой Non-Stand-Alone архитектуры построения 5G. Текущий план-график стандартизации показан на рисунке 1.1.

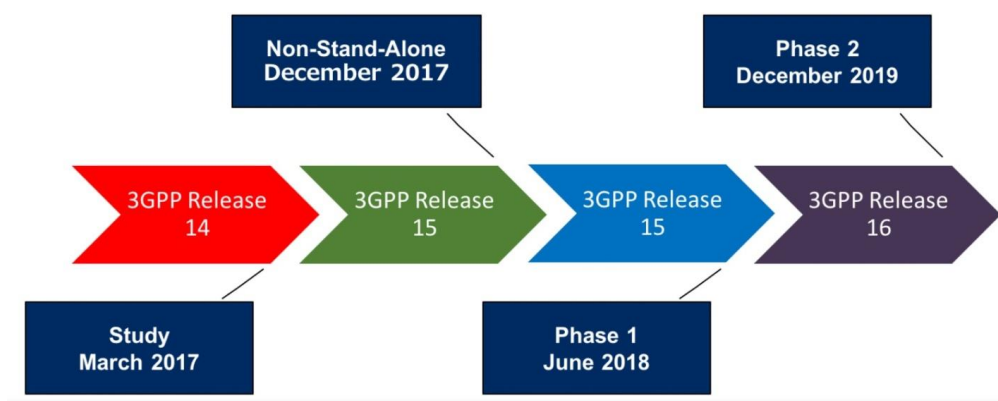


Рисунок 1.1 – График стандартизация сетей 5G

Архитектура сети 5G разрабатывается для поддержки обмена всевозможными данными и предоставления различных услуг.

Особенность архитектуры сети 5G состоит в том, что она основана не только в аппаратном решении. В отличие от сетей предыдущих поколений, которые строились на базе аппаратных решений, сеть 5G строится на базе программных решений. Поэтому эту сеть называют платформой. Она строится на основе программно-конфигурируемых сетей SDN (Software Defined Network), а также виртуализации сетевых функций NFV (Network Function Virtualization)[1].

Функции 5G реализуются в виртуальных программных функциях VNF (Virtual Network Function), которые работают в инфраструктуре NFV. Различие между этими похожими по звучанию понятиями состоит в том, что VNF – это функция, а NFV – это технология. В свою очередь, NFV реализуется в физической инфраструктуре центров обработки данных, ЦОД, на базе стандартного коммерческого оборудования COTS (Commercial Off The Shelf). Оборудование COTS включает лишь три вида стандартных, относительно недорогих устройств – сервер (вычислительное устройство), коммутатор (сетевое устройство) и система хранения данных[2].

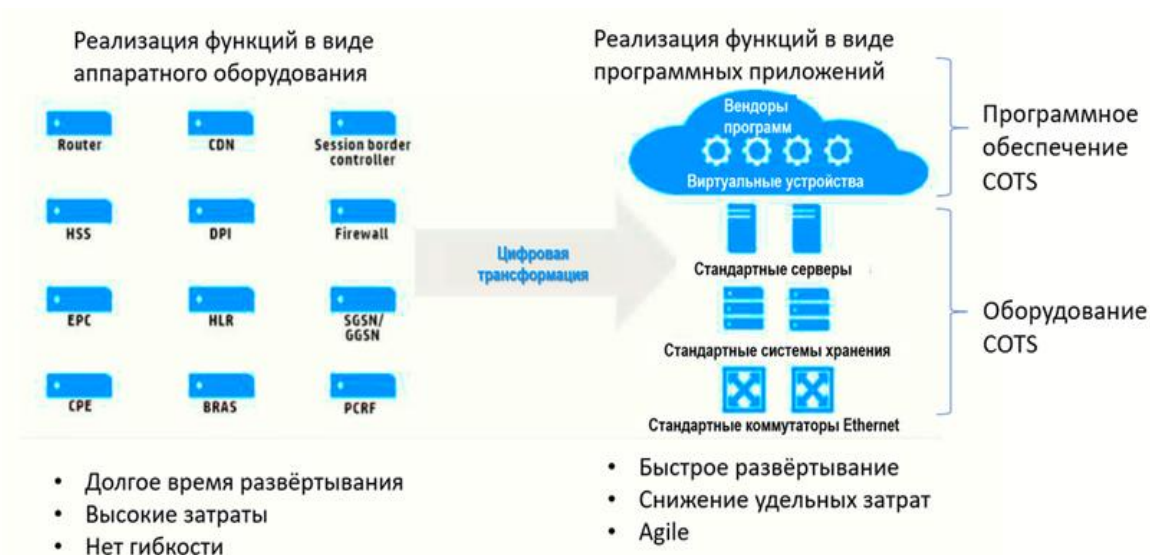


Рисунок 1.2 – Структура сети 5G

Основными характеристиками сети мобильной связи пятого поколения являются:

- сверх-широкополосный мобильный доступ (enhanced Mobile Broadband, eMBB);
- ультранадежная связь с низкими задержками (Ultra-Reliable and Low Latency Communications, URLLC);
- массовое подключение различных датчиков и устройств из мира "Интернета вещей" (massive Machine Type Communications, mMTC).

Рекомендация 3GPP TR 38.913 определяет следующие ключевые показатели сетей 5G:

- пиковая скорость передачи данных на линии вниз (Downlink) 20 Гбит/с (спектральная эффективность 30 бит/с/Гц);
- пиковая скорость передачи данных на линии вверх (Uplink) 10 Гбит/с (спектральная эффективность 15 бит/с/Гц);
- минимальная задержка в подсистеме радиодоступа для сервисов URLLC - 0,5 мс, для сервисов eMBB - 4 мс;
- максимальная плотность подключенных к сети в городских условиях устройств из мира «Интернета вещей» - 1 000 000 устройств/км²;
- автономная работа устройств из мира "Интернета вещей" без подзарядки аккумулятора в течение 10 лет;
- поддержка мобильности при максимальной скорости передвижения объектов 500 км/ч.

Данные показатели являются порой несовместимыми и даже взаимоисключающими. Поэтому различным устройствам в различные моменты времени будут доступны только определенные сервисы с определенными показателями (в рамках концепции Network Slicing).

Таким образом, основными особенностями сети 5G являются высокая скорость, большое количество устройств и минимальная задержка (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Особенности сети 5G

Развитие сети 5G соответствует требованиям современного общества. Распространение подключенных объектов и устройств проложит путь к широкому спектру новых услуг и связанных с ними бизнес-моделей, позволяющих автоматизировать работу в различных секторах промышленности и на вертикальных рынках (например, энергетика, электронное здравоохранение, умный город, подключенные автомобили, промышленное производство и т. д.). В дополнение к более распространенным приложениям, ориентированным на человека, например к дополнению виртуальной и дополненной реальности, потоковой передаче видео 4k и т. д. Сети 5G будут поддерживать коммуникационные потребности приложений типа «машина-машина» и «машина-человек» для повышения безопасности нашей жизни. и удобнее. Автономно связывающиеся устройства создадут мобильный трафик со значительно отличающимися характеристиками, чем сегодняшний трафик, в основном от человека к человеку. Сосуществование ориентированных на человека и машинного типа приложений налагает очень разнообразные функциональные и ключевые показатели производительности (KPI) / требования к производительности, которые должны будут поддерживать сети 5G.

Таким образом, концепция сегментирования сети будет удовлетворять спрос вертикальных секторов, которые запрашивают выделенные телекоммуникационные услуги, предоставляя операторам описания требований к сегментам сети по требованию, обращенные к потребителю, как показано на рисунке 1.4[3].

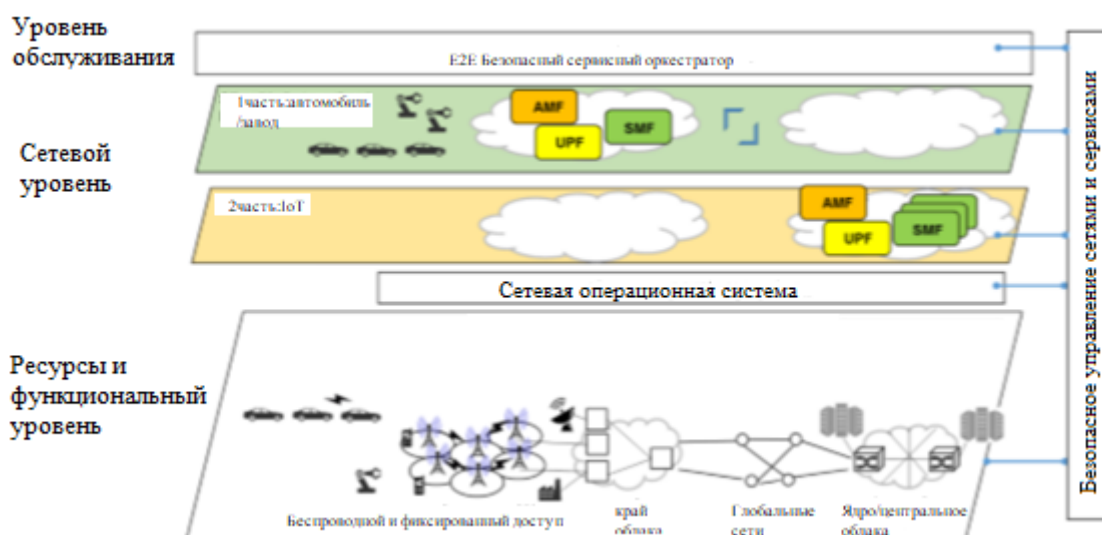


Рисунок 1.4 - Общая архитектура сети 5G

1.2 Основные принципы архитектуры 5G

Основные принципы архитектуры сети 5G заключаются в следующем:

- разделение сетевых узлов на элементы, обеспечивающие работу протоколов «плоскости пользователя» (UP - User Plane) и элементы, обеспечивающие работу протоколов «плоскости управления» (CP - Control Plane), что значительно увеличивает гибкость в части масштабирования и развертывания (допуская централизованное и децентрализованное размещение отдельных составляющих сетевых узлов);
- разделение сетевых элементов на сетевые слои (Network Slicing), основываясь на услугах, предоставляемых конкретным группам конечных пользователей;
- реализация сетевых элементов в виде виртуальных сетей функций - VNF (Virtual Network Functions);
- поддержка одновременного доступа к централизованным и локальным службам, что позволяет реализовывать концепции облачных (fog computing) и пограничных (edge computing) вычислений;
- определение конвергентной архитектуры, объединяющей различные типы сетей доступа (AN - Access Network) - 3GPP (New Radio - NR) и не 3GPP (WiFi и пр.) с единой опорной сетью (CN - Core Network);
- поддержка единых алгоритмов и процедур аутентификации (в не зависимости от типа сети доступа);
- поддержка сетевых функций без сохранения состояния (stateless), где вычислительный ресурс отделен от ресурса хранения;
- поддержка роуминга с маршрутизацией трафика как через домашнюю сеть (Home routed), так и с локальным приземлением (Local breakout) в гостевой сети (VPLMN)[1].

В архитектуре 5G взаимодействие между сетевыми функциями представлено двумя способами:

– сервис-ориентированное, когда одни сетевые функции (например, AMF) позволяют другим авторизованным сетевым функциям получать доступ к их сервисам;

– интерфейсное, которое показывает какое взаимодействие существует между сервисами сетевых функций, описанных как взаимодействие точка-точка (например, интерфейс N11) между любыми двумя сетевыми функциями (например, AMF и SMF).

Сетевые функции на плоскости управления 5G должны использовать только сервис-ориентированные интерфейсы для их взаимодействия.

На рисунке 1.5 изображена архитектура сети 5G с точки зрения сервис-ориентированного взаимодействия различных сетевых функций на плоскости управления[1].

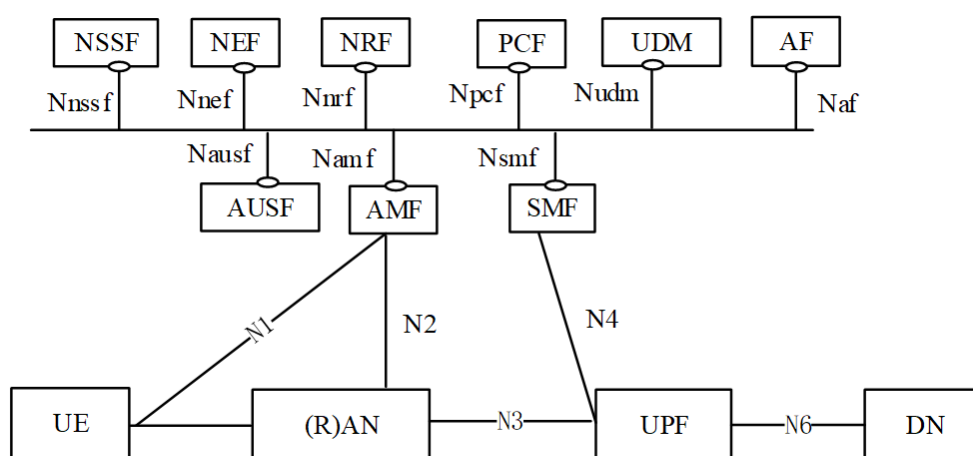


Рисунок 1.5 – Архитектура сети 5G. Взаимодействие сетевых функций

Сеть 5G включает в себя следующие основные программные модули и сетевые функции (NF):

- функция управления доступом и мобильностью (AMF - Access and Mobility Management Function);
- функция управления сессиями (SMF - Session Management Function);
- функция передачи данных пользователей (UPF - User Plane Function);
- модуль управления данными пользователей (UDM - Unified Data Management);
- унифицированная база данных (UDR - Unified Data Repository);
- система хранения неструктурированных данных (UDSF - Unstructured Data Storage Function);
- функция выбора сетевого слоя (NSSF - Network Slice Selection Function);
- функция управления политиками (PCF - Policy Control Function);
- функция обеспечения взаимодействия с внешними приложениями (NEF - Network Exposure Function);

- хранилище сетевых функций (NRF - NF Repository Function);
- прикладная функция (AF - Application Function);
- функция поддержки обмена короткими текстовыми сообщениями посредством протокола NAS (SMSF - SMS Function);
- функция взаимодействия с не-3GPP сетью доступа (N3IWF - Non-3GPP InterWorking Function)[1].

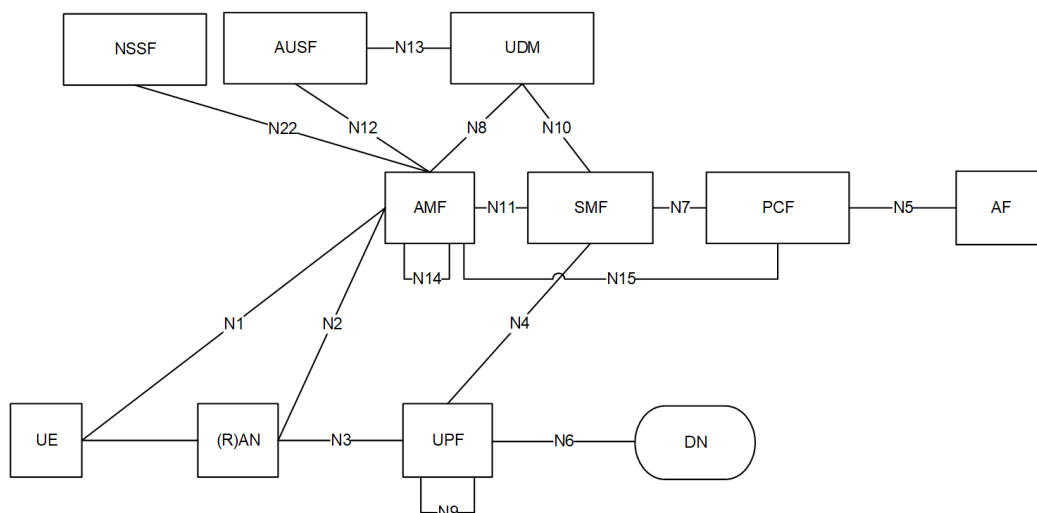


Рисунок 1.6 – Архитектура сети 5G. Сетевые интерфейсы

На рисунке 1.6 изображена архитектура сети 5G с указанием сетевых интерфейсов. Для упрощения схемы на рисунке 1.5 не показаны сетевые функции UDSF, SDSF, NEF и NRF, а также не показан UDR.

Становится очевидной необходимость сопоставления таких ориентированных на клиента соглашений об уровне обслуживания (SLA) с описаниями сетевых сегментов, ориентированными на ресурсы, которые облегчают создание и активацию экземпляров слайсов. В прошлом операторы выполняли такое сопоставление вручную для ограниченного числа типов услуг / срезов (главным образом, широкополосной мобильной связи - МВВ, голосовая служба и SMS). Таким образом, с увеличением числа таких запросов клиентов и соответствующих сетевых сегментов инфраструктура управления и контроля мобильной сети должна будет демонстрировать значительно повышенный уровень автоматизации для всего управления жизненным циклом экземпляров сетевых сегментов[1].

Более конкретно, автоматизация жизненного цикла среза должна быть реализована с помощью архитектуры, включающей функции и инструменты, которые реализуют когнитивные процедуры для всех фаз жизненного цикла: фазы подготовки, создания экземпляра, фазы конфигурации и активации, фазы времени выполнения и фазы вывода из эксплуатации. Два фундаментальных технологических средства включают мягкое оповещение, например, виртуализацию сетевых функций, а также программно-определяемые программируемые сетевые функции и ресурсы

инфраструктуры. Другие ключевые элементы представляют собой эффективные процедуры и протоколы управления и оркестровки. Наконец, масштабируемые, сервисно-ориентированные алгоритмы анализа данных, которые используют многодоменные источники данных, дополненные надежными механизмами безопасности, проложат путь для развертывания специализированных сетевых сервисов с различными виртуализированными NF (VNF) в общей инфраструктуре надежным способом.

Рекурсивная структура в контексте 5G может быть определена как дизайн, правило или процедура, которая может применяться многократно [1,2]. В контексте сетевой службы эта рекурсивная структура может быть либо конкретной частью сетевой службы, либо повторяющейся частью платформы развертывания, и она определяется как способность создавать службу из существующих служб. Определенный сервис может рекурсивно масштабироваться, что означает, что определенный шаблон может заменить часть себя. Как и в случае определения рекурсивного сервиса, рекурсивная структура в (программной) архитектуре 5G может создаваться и связываться повторно. Это улучшает масштабируемость, поскольку один и тот же экземпляр может быть развернут много раз в разных местах одновременно. Рекурсивность также приводит к более легкому управлению эластичностью, масштабируемостью и изменениями. Рекурсивность путем делегирования частей службы нескольким экземплярам одного и того же программного блока является естественным способом обработки более сложных и больших рабочих нагрузок или графиков служб. Если эта рекурсивность будет учтена с самого начала разработки 5G, преимущества этого подхода будут минимальными.

В контексте виртуальной инфраструктуры такая рекурсивная структура позволяет экземпляру слайса работать поверх ресурсов инфраструктуры, предоставленных экземпляром слайса ниже. Арендатор (владелец экземпляра слайса) может управлять своей виртуальной инфраструктурой, поскольку он работает с физической, выделяя и перепродавая часть ресурсов другим арендаторам. Это означает, что каждый арендатор может владеть и развертывать свою собственную систему MANO. Для поддержки рекурсии необходим набор однородных API для обеспечения уровня абстракции для управления каждым срезом и управления базовыми виртуальными ресурсами, который прозрачен для уровня иерархии, на которой работает арендатор. Различные арендаторы запрашивают предоставление срезов через эти API. С помощью шаблона, плана или SLA каждый арендатор задает не только характеристики среза (топология, QoS и т. д.), но также некоторые расширенные атрибуты, такие как требуемый уровень устойчивости, управления и контроля. Поставщик должен позаботиться о соблюдении требований и управлении доступными ресурсами[1].

1.3 К централизованной и распределенная архитектура

До недавнего времени развитие подсистемы радиодоступа (Radio Access Network, RAN) определялось поступательным внедрением радиointерфейсов для новых мобильных стандартов и расширением ассортимента радиооборудования для соответствующих частотных диапазонов на основе распределенной архитектуры (рисунок 1.7а). Но требования к емкости, гибкости и эффективности сетей 5G настолько масштабны, что предполагают пересмотр существующих функциональных и топологических принципов построения сети RAN. Отправными точками для такого пересмотра являются неэффективность протокола общего открытого радиointерфейса (Common Public Radio Interface, CPRI) с точки зрения транспорта и переход к централизованной архитектуре[4].

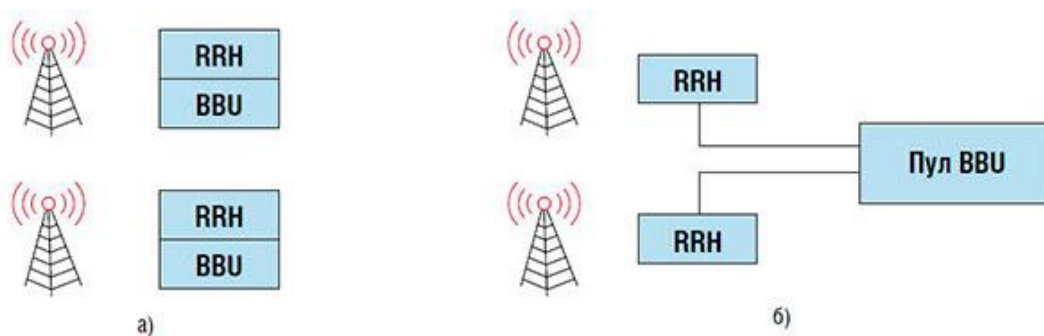


Рисунок 1.7 – Распределенная (а) и централизованная (б) архитектуры RAN

Протокол CPRI используется между радиомодулем выносного блока (RRH) и цифровым модулем (BBU) базовой станции. Он предполагает реализацию на транспортном канале принципа D-RoF (Digital Radio over Fiber), при соблюдении которого QAM-модулированный радиосигнал передается между BBU и RRH по двум несущим в оцифрованном виде (IQ data). Поэтому, в частности, при работе в рамках технологии LTE с шириной канала 20 МГц, обеспечивающей скорость до 150 Мбит/с, для транспорта CPRI необходима полоса 2,5 Гбит/с. При внедрении технологий 5G с ростом скорости требования к полосе в транспортной сети возрастают многократно. Кроме того, CPRI предполагает наличие отдельного соединения для каждой антенны. А это означает, что при внедрении в сетях 5G решения Massive MIMO, например для MIMO 64 x 64, будут нужны 384 отдельных волокна или DWDM-несущие.

Как полагает большинство экспертов, для 5G RAN оптимальной является централизованная архитектура (рисунок 1.7б). При этом наилучшим вариантом станет построение BBU с использованием технологий виртуализации и облачных вычислений.

Централизованная архитектура RAN (Centralized RAN, C-RAN) предполагает, что BBU нескольких базовых станций объединены в хабы и расположены на одной площадке. Это позволяет применять более эффективные алгоритмы цифровой обработки, которые значительно увеличивают емкость сети за счет уменьшения интерференции и более оптимального использования радиоресурсов. Кроме того, сокращается число единиц вспомогательного оборудования (кондиционеры, маршрутизаторы и т.д.), поскольку уменьшается количество площадок их размещения. Соответственно, снижаются капитальные затраты.

Если при строительстве хабов BBU задействовать технологии виртуализации и облачных вычислений, то стоимость решения можно снизить благодаря объединению вычислительных мощностей в пулы и повышению КПД их использования из-за неравномерной нагрузки в сети. Заметим, что сети RAN, построенные на основе указанных технологий, часто называют C-RAN, под «С» подразумевая «Cloud».

Смягчение требований к полосе на транспортном канале между RRH и BBU достигается использованием «улучшенного» протокола CPRI (enhanced CPRI, eCPRI). Ожидается, что его внедрение благодаря переносу части функций цифровой обработки в RRH (new RRH/BBU functional split) позволит снизить требования к полосе пропускания более чем в 10 раз. Коммерческое применение новых аппаратных платформ BBU и RRH с поддержкой eCPRI уже началось[4].

1.4 Программные модули или сетевые функции сети 5G

1.4.1 Функция управления доступом и мобильностью (AMF - Access and Mobility Management Function)

Функция управления доступом и мобильности (AMF) обеспечивает:

- организацию интерфейсов плоскости управления N1, N2;
- организацию обмена сигнализации NAS через интерфейс N1, шифрование и защита целостности сигнализации NAS;
- управление регистрацией пользовательского терминала (UE) в сети и контроль возможных состояний регистрации (RM-DEREGISTERED, RM-REGISTERED);
- управление соединением пользовательского терминала (UE) с сетью и контроль возможных состояний соединения (CM-IDLE, CM-CONNECTED);
- управление доступностью пользовательского терминала (UE) в сети в состоянии CM-IDLE;
- управление мобильностью пользовательского терминала (UE) в сети в состоянии CM-CONNECTED;
- передачу коротких сообщений между оборудованием пользователя (UE) и SMF;
- управление службами определения местоположения;

- передачу сообщений между UE и функцией управления местоположением LMF (Location Management Function), а также между RAN и LMF;

- выделение идентификатора потока данных EPS (Evolved Packet System) для взаимодействия с EPS;

- взаимодействие с неопределенными стандартами 3GPP сетями доступа посредством модуля взаимодействия N3IWF (Non-3GPP InterWorking Function)[1].

Также AMF может включать в себя подфункции управления безопасностью, в т.ч. якорную функцию безопасности (SEAF), функцию управления контекстом безопасности (SCMF) и функцию управления политикой безопасности (SPCF).

Независимо от количества сетевых функций в сети доступа 5G имеется только один экземпляр интерфейса сигнализации NAS между пользовательским оборудованием и сетью, который терминируется на одной из сетевых функций, которая в свою очередь реализует по меньшей мере, защиту сигнализации NAS и управление мобильностью[1].

1.4.2 Функция управления сессиями (SMF - Session Management Function)

Функция управления сессиями связи (SMF) обеспечивает:

- управление сессиями связи, т.е. создание, изменение и освобождение сессии, включая поддержку туннеля между сетью доступа (AN) и UPF;

- распределение и управление IP-адресами терминалов пользователей (UE);

- выбор используемого шлюза UPF;

- организацию взаимодействия с функцией управления политиками (PCF);

- управление работой шлюза UPF, в том числе управление применением политик качества QoS;

- динамическую настройку терминалов пользователя с помощью протоколов DHCPv4 (сервер и клиент) и DHCPv6 (сервер и клиент);

- проксирование ARP (Address Resolution Protocol) запросов, как указано в IETF RFC 1027 и/или в IETF RFC 4861 [54] для Ethernet фреймов (SMF отвечает на ARP запросы, предоставляя MAC-адрес, соответствующий IP-адресу, отправленному в запросе);

- контроль сбора тарификационных данных и организация интерфейса с системой биллинга;

- бесшовность (не разрывность) предоставления услуг SSC (Session and Service Continuity);

- взаимодействие с гостевыми сетями в рамках процедур роуминга[1].

1.4.3 Функция передачи данных пользователей (UPF - User Plane Function)

Функция передачи данных пользователей (UPF) обеспечивает:

- интерфейс подключения к внешним сетям передачи данных, в т.ч. к глобальной сети Интернет;
- маршрутизацию и передачу пакетов данных пользователей;
- буферизацию пакетов и инициацию уведомления терминалов пользователей (UE) о наличии данных для передачи по линии вниз (DL);
- маркировку пакетов данных в соответствии с требуемыми параметрами QoS;
- диагностику пакетов информации (например, обнаружение приложений на основе шаблона потока данных) и применение сетевых политик в соответствии с целеуказаниями, сформированными PCRF;
- предоставление отчетов об использовании трафика;
- проксирование ARP (Address Resolution Protocol) запросов, как указано в IETF RFC 1027 и/или в IETF RFC 4861 [54] для Ethernet фреймов.

Также UPF является якорной точкой для поддержки мобильности как внутри одной, так и между различными технологиями радиодоступа (если применимо)[1].

1.4.4 Модуль управления данными пользователей (UDM - Unified Data Management)

Модуль управления данными пользователей (UDM) обеспечивает:

- управление данными профилей пользователей, включая хранение и модификацию перечня доступных пользователям услуг и соответствующих им параметров;
- управление идентификаторами пользователей (SUPI);
- генерацию учетных данных аутентификации 3GPP АКА;
- авторизацию доступа на основе данных профиля пользователя (например, ограничение роуминга);
- управление регистрацией пользователя (т.е., хранение обслуживающего AMF);
- поддержку непрерывности обслуживания/сеанса связи, т.е. хранение назначенных SMF/DNN для текущих сеансов связи;
- управление доставкой SMS сообщений.

При этом несколько различных UDM могут обслуживать одного и того же пользователя для различных транзакций[1].

1.4.5 Унифицированная база данных (UDR - Unified Data Repository)

UDR осуществляет хранение различных абонентских данных и имеет прикладные интерфейсы Nudr с пограничными элементами доступа UDM FE, PCF FE, NEF FE[1].

1.4.6 Система хранения неструктурированных данных (UDSF - Unstructured Data Storage Function)

Концепция построения на опорной сети 5GC подразумевает разделение сетевых функций NF (Network Function) и систем хранения данных, порождаемых и обрабатываемых этими функциями (Storage). При этом определены системы хранения и обработки как структурированных, так и неструктурированных данных (UDSF - Unstructured Data Storage Function), т.е. данных, которые либо не имеют четко определенную структуру, либо данных, структура которых не известна хранилищу. Сетевые функции NF взаимодействуют с системами хранения данных USDF – через интерфейс N18.

Одним из кейсов применения UDSF является сохранение модулями управления доступом и мобильностью (AMF) текущих контекстов зарегистрированных пользовательских терминалов (UE). Данная информация может быть использована для обеспечения безобрывности абонентских сессий как при плановом выводе из сервиса одного из AMF группы моделей (AMF Set), так и при возникновении аварийной ситуации. В обоих случаях резервный AMF подхватит сервис, используя контексты, сохраненные предшественником в UDSF.

Наиболее типичной реализацией является совмещение на одной физической платформе системы хранения неструктурированных данных (UDSF) и унифицированной базы данных (UDR).

Типовая структура организации UDR/UDSF приведена на рисунке 1.8[1].

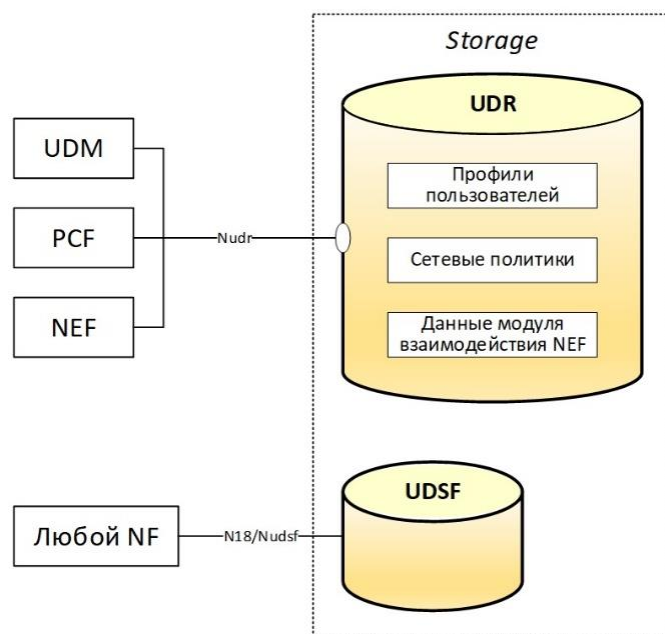


Рисунок 1.8 – Типовая структура организации UDR/UDSF[1]

1.4.7 Функция выбора сетевого слоя (NSSF - Network Slice Selection Function)

Функция выбора сетевого слоя (NSSF) обеспечивает:

– выбор необходимого набора сетевых слоев (Network Slices) в процессе регистрации пользовательского терминала в сети (в зависимости от типа предоставляемой услуги, типа оборудования абонентского терминала, его местоположения и т.д.);

– определение модулей AMF, которые будут использоваться для обслуживания пользовательского терминала или, на основе конфигурации, определение списка модулей AMF, путем запроса в NRF;

– хранение информации о доступных сетевых слоях (NSSAI - Network Slice Selection Assistance Information)[1].

1.4.8 Функция управления политиками (PCF – Policy Control Function)

Функция управления политиками (PCF) в реальном времени формирует и назначает пользовательским терминалам те или иные политики, включая параметры качества обслуживания (QoS) и правила тарификации. Так, для передачи того или иного типа трафика могут динамически создаваться виртуальные каналы с различными характеристиками. При этом во внимание могут приниматься требования сервиса, запрашиваемого абонентом, его профиль, местоположение, уровень загрузки сети, объем потребленного трафика и т.д.[1].

1.4.9 Функция обеспечения взаимодействия с внешними приложениями (NEF - Network Exposure Function)

NEF позволяет организовать безопасное взаимодействие внешних платформ и приложений с опорной сетью 5G. Для решения данной задачи NEF:

– Позволяет платформам и приложениям подписываться на определённые события, генерируемые различными элементами сети, и в последствии получать уведомления о возникновении таких событий (см. рисунок 6). Например:

– Loss of connectivity - детектирование сетью потери связанности с конкретным UE (детектируется AMF);

– UE reachability - восстановление связанности с конкретным UE (детектируется AMF);

– Location Reporting - отчеты о местоположении (детектируется AMF);

– Change SUPI-PE association - смена терминала абонентом сети = изменение связи IMSI - IMEI (детектируется UDM).

Позволяет осуществлять провижининг информации по конкретным UE в сеть 5G.

– Позволяет управлять параметрами QoS и правилами тарификации (PCC) по конкретным UE[1].

Для взаимодействия с различными элементами, платформами и приложениями (или сетевыми функциями NFs) NEF может поддерживать подмножество прикладных программных интерфейсов API. Безопасность

взаимодействия обеспечивается посредством реализуемых NEF механизмов безопасности, включая аутентификацию и авторизацию соответствующих платформ и приложений. Таким образом, функция обеспечения взаимодействия с внешними приложениями является логическим продолжением элемента SCEF архитектуры узкополосного интернета вещей (NB-IoT), анонсированного в релизе 13 3GPP.

NEF может сохранять информацию, полученную от NFs, в виде структурированных данных в UDR, используя стандартный интерфейс Nudr, и в дальнейшем переиспользовать ее для трансляции другим NFs, либо с целью анализа[1].

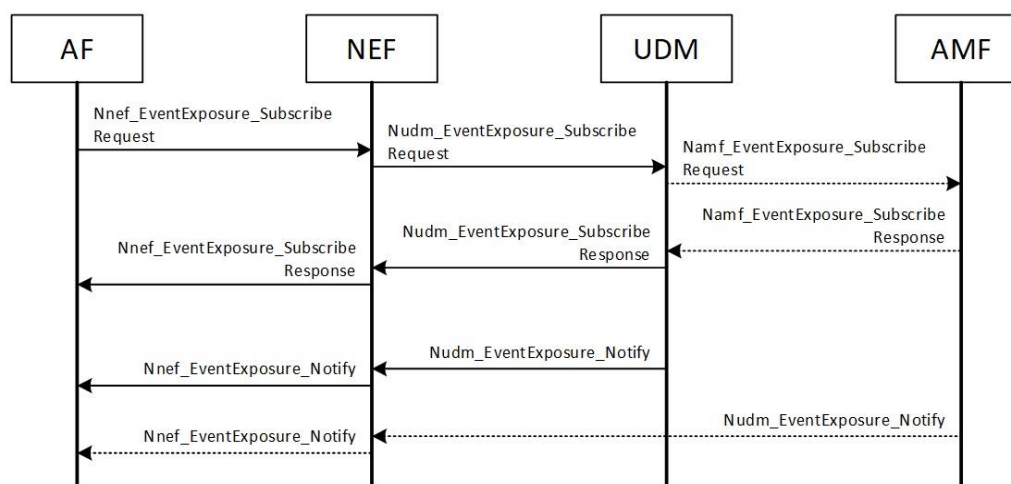


Рисунок 1.9 - Уведомления о возникновении событий[1]

1.4.10 Хранилище сетевых функций (NRF - NF Repository Function)

Хранилище сетевых функций (NRF) представляет собой эволюционное развитие сервера доменных имен DNS. Обеспечивает хранение профилей всех развернутых на сети экземпляров сетевых функций и выбор одного или нескольких экземпляров в рамках процедуры «NF Discovery Request» процесса управления абонентскими сессиями. При этом каждая сетевая функция при включении должна "прописать" в NRF свой статус, а также свои функциональные возможности и поддерживаемые опции[1].

Профиль экземпляра NF, поддерживаемый в NRF, включает следующую информацию:

- идентификатор экземпляра сетевой функции;
- тип сетевой функции;
- идентификатор PLMN;
- идентификатор (ы), связанные с сетевым слоем, например, S-NSSAI, NSI ID;
- FQDN или IP-адрес сетевой функции;
- информация о емкости сетевой функции;

- информация о разрешенных сервисах;
- имена поддерживаемых сервисов;
- информация о точках обмена информацией для каждой поддерживаемой службы;
- идентификация сохраненных данных/информации;
- другие параметры сервисов, например, DNN (Data Network Name), параметры интерфейсов для уведомлений;
- уровень PLMN (NRF сконфигурирован для работы на всей PLMN);
- уровень сетевых слоев совместного использования (NRF сконфигурирован таким образом, что он принадлежит нескольким сетевым слоям);
- уровень сетевых слоев определенного использования (NRF сконфигурирован с принадлежностью к S-NSSAI);

При организации роуминга несколько NRF могут быть развернуты в разных сетях:

- NRF(ы) в гостевой PLMN (известные как vNRF), сконфигурированные для работы в гостевой PLMN;
- NRF(ы) в домашней PLMN (известные как hNRF), сконфигурированные для работы в гостевой PLMN, с которым взаимодействует vNRF через интерфейс N27[1].

1.4.11 Прикладная функция (AF - Application Function)

Прикладная функция (AF) сети 5G взаимодействует с опорной сетью и, как пример, может решать следующие задачи:

- управление маршрутизацией трафика;
- предоставление доступа к модулю обеспечения взаимодействия с элементами сети (NEF);
- взаимодействие с функцией управления политиками.

В зависимости от конкретного внедрения на сети оператора связи, отдельным внешним платформам и приложениям может быть разрешен прямой (непосредственный) доступ к сетевыми функциями 5GC. Другие системы будут осуществлять доступ к сетевым функциям 5GC через прикладные программные интерфейсы API, предоставляемые модулем обеспечения взаимодействия сетевых функций[1].

1.4.12 CUPS (control and user plane separation)

В соответствии с архитектурой SDN для сетей 5G определено разделение шлюза пакетной передачи данных на две составляющие - плоскость управления (SMF) и плоскость пользовательского трафика (UPF) - control and user planes separation (CUPS). При этом ради объективности стоит отметить, что концепция CUPS релизом 14 3GPP определена и для сетей 4G-LTE, где предусмотрено разделение SGW на C-SGW (control plane) и U-SGW (user plane), а PGW соответственно - на C-PGW и U-PGW.

Упрощение архитектуры UPF по сравнению с PGW сети 4G-LTE позволяет снизить как стоимость разработки и производства самих узлов, так и затраты на их эксплуатацию. В конечном счете, это открывает путь к "пограничным вычислениям" (edge computing) за счет возможности устанавливать на сети большое кол-во шлюзов, размещая их в непосредственной близости к сети доступа. Однако такой подход создает проблему мобильности, поскольку перемещение пользовательского терминала с активной сессией передачи данных будет сопровождаться частой сменой UPF. 3GPP решает данную проблему путем введения новой функциональности - бесшовности абонентских сессий и услуг - SSC (Session and Service Continuity)[1].

1.4.13 Network Slicing

Network Slicing подразумевает разделение физической архитектуры 5G на множество виртуальных сетей или слоёв. Каждый сетевой слой включает в себя функции уровня управления, функции уровня пользовательского трафика и сеть радиодоступа (5G-NR, либо non-3GPP). Базируясь на архитектуре NFV/SDN, каждый слой обладает своими характеристиками и нацелен на решение той или иной бизнес-задачи. 3GPP определяет три стандартных сетевых слоя:

- верх-широкополосный доступ (eMBB, Enhanced Mobile Broadband) - пользователи глобальной сети Интернет, камеры видеонаблюдения;
- ультра-надежность и низкие задержки (URLLC, Ultra Reliable Low Latency Communication) - транспорт без водителя, дополненная и виртуальная реальность;
- интернет вещей (IoT, Internet of Things) - миллионы устройств, передающие малые объёмы данных от случая к случаю.

Каждый оператор может определять дополнительные сетевые слои, например, выделенный сетевой слой для критических коммуникаций, для внутрикorporативной связи и т.д.

Конкретный пользовательский терминал (UE) может обслуживаться одновременно одним или несколькими сетевыми слоями (максимум - 8-ю). При этом модуль AMF является общим для всех слоев, а вот остальные элементы (в т.ч. SMF, UPF) могут различаться. Также различные слои могут включать в себя различные сети радиодоступа, либо единую сеть, но с отличающимися характеристиками. И, как один из бизнес-кейсов, сетевые слои могут иметь различающиеся параметры безопасности.

При регистрации в сети в рамках процедуры установления RRC соединения (и далее - в сообщении NAS) пользовательский терминал (UE) передает список запрашиваемых сетевых слоев (S-NSSAI - Single Network Slice Selection Assistance Information). На первом шаге, на основании полученных от UE данных, списка сетевых слоев, содержащихся в UDM профиле пользователя и местоположения абонента осуществляется выбор элемента AMF, который может обеспечить необходимый набор услуг. Выбор

AMF осуществляется с привлечением модуля выбора сетевого слоя (NSSF) и репозитория сетевых функций (NRF).

На втором шаге назначается модуль управления сессиями (SMF) и далее - шлюз передачи пользовательского трафика (UPF). Назначение SMF/UPF может происходить в соответствии со статическими настройками, либо - динамически (через репозиторий сетевых функций - NRF)[1].

1.4.14 PDU сессии

В архитектуре 5G взаимодействие пользовательских терминалов (UE) с сетями передачи данных (Data Network) осуществляется в рамках PDU сессий (PDU Session-s). UE может иметь одновременно несколько созданных PDU сессий для связи с различными сетями передачи данных и получения различных сервисов. При этом разные сессии могут организовываться через различные сетевые функции в соответствии с концепцией Network Slicing. PDU сессии создаются только по запросу пользовательского терминала. Однако, архитектура 5G позволяет прикладной функции (AF) инициировать на UE процедуру запуска сервиса (Application Triggering). Инициация указанной процедуры осуществляется посредством направления UE в теле короткого SMS сообщения команды «Application trigger message», получив которое соответствующее приложение, установленное на пользовательском терминале, может запросить создание PDU сессии.

В отличие от сетей 4G-LTE в сетях 5G создание сессий полностью контролируется SMF и осуществляется в рамках сигнального диалога NAS SM между UE и SMF (при этом AMF, терминирующий интерфейс N1 (NAS), осуществляет лишь прозрачную трансляцию трафика NAS SM). В процессе своего существования PDU сессия может быть перемещена между 3GPP и non-3GPP технологиями доступа.

Каждая PDU сессия характеризуется следующими атрибутами:

- S-NSSAI (Single Network Slice Selection Assistance Information) - фактически тип или идентификатор сетевого слоя;
- DNN (Data Network Name) - имя внешней сети передачи данных, фактически аналог имени точки доступа сетей 2.5G/3G/4G-LTE (APN);
- PDU Session Type - тип PDU сессии;
- SSC mode - режим работы функции бесшовности абонентских сессий и услуг;
- PDU Session Id - уникальный для данного UE идентификатор PDU сессии;
- User Plane Security Enforcement information - информация обеспечения безопасности пользовательского трафика, включая шифрование и контроль целостности[1].

-

1.4.15 Тип PDU сессии (PDU Session Type)

3GPP определяет 5 возможных типов PDU сессий - IPv4, IPv6, IPv4v6, Ethernet и неструктурированный тип (Unstructured). Первые три типа сеть 5G получила в наследство от технологий предыдущих поколений (2.5G/3G/4G-LTE). Их использование предполагает назначение пользовательскому терминалу (UE) для каждой PDU сессии соответствующего адреса (IPv4 или IPv6). Кроме этого, сеть может определить UE адреса DNS серверов, P-CSCF (для IMS сессии), MTU и GPSI (Generic Public Subscription Identifier - публичный идентификатор подписки пользователя, например, MSISDN).

Тип PDU сессии «Ethernet» не использовался сетями предыдущих поколений. Данный тип предполагает обмен Ethernet фреймами между пользовательским терминалом (UE) и сетью в соответствии с MAC адресами источника и получателя. Сеть 5G не назначает UE ни IP, ни MAC адреса, но при этом UE может иметь IP адрес либо прописанный статически, либо назначенный динамически DHCP сервером, находящемся с ним в одном broadcast домене. Однако, данный IP адрес никоим образом не используется сетью 5GC и заголовок IP-уровня пакета пропускается сетью прозрачно. Допускается включение UE в режиме моста (bridge-a). В этом случае за UE может находиться локальная сеть (LAN) с несколькими устройствами, имеющими собственные MAC адреса (эти устройства не аутентифицируются сетью 5G). При авторизации PDU сессии DN-AAA сервер может назначить SMF для данной сессии список разрешенных MAC адресов (до 16-ти) и все ethernet фреймы, направляемые UE в восходящем канале, должны содержать в качестве адреса источника (source MAC) только разрешенные адреса. Фреймы, не удовлетворяющие данному условию, будут блокироваться[1].

Тип PDU сессии «Unstructured» ориентирован в первую очередь на устройства из «мира Интернета вещей», передающие и принимающие non-IP данные. Для сессий этого типа 5GC организует туннель между UPF и сервером приложений, в который и инкапсулируются неструктурированные данные, генерируемые в рамках данной сессии[1].

1.4.16 Режимы работы функции бесшовности абонентских сессий и услуг (SSC mode)

3GPP определяет три режима работы функции бесшовности абонентских сессий и услуг (SSC mode):

Режим 1 - смена UPF при выполнении пользовательским терминалом (UE) процедуры хэндовера не предусматривается. Соответственно, на протяжении всей сессии UE обслуживается одним шлюзом UPF и имеет неизменный IP адрес.

Режим 2 - предусматривается возможность смены UPF при выполнении пользовательским терминалом (UE) процедуры хэндовера. При этом сначала завершается сессия с текущим шлюзом (UPF-old), а затем устанавливается сессия с новым шлюзом (UPF-new). Соответственно, возможен кратковременный разрыв сессии и смена IP адреса.

Режим 3 - также предусматривается возможность смены UPF при выполнении пользовательским терминалом (UE) процедуры хэндовера. Но при этом сначала устанавливается сессия с новым шлюзом (UPF-new), а затем завершается сессия с текущим шлюзом (UPF-old). Соответственно, обеспечивается непрерывность сессии, но допускается смена IP адреса[1].

1.5 Идентификаторы пользователей

1.5.1 Международный постоянный идентификатор подписки абонента – 5G SUPI (Subscription Permanent Identifier)

Назначается каждому абоненту сети 5G и хранится в унифицированной базе данных UDM и USIM модуле пользователя. В качестве идентификатора SUPI может выступать международный идентификатор мобильного абонента – IMSI (International Mobile Subscriber Identity), либо идентификатор доступа к сети – NAI (Network Access Identifier), формат которого определен RFC 4282[1].

1.5.2 Постоянный идентификатор оборудования пользователя - Permanent Equipment Identifier (PEI)

В настоящее время 3GPP определяет только один возможный формат PEI - это IMEI (International Mobile Station Equipment Identity). IMEI представляет собой уникальную цифровую последовательность, и должен назначаться всем пользовательским терминалам (UE), поддерживающим 3GPP технологию радиодоступа, при их производстве[1].

При этом нужно различать две формы представления - собственно IMEI, состоящий из 15-ти десятичных цифр и IMEISV (16 цифр). IMEI включает в себя следующие поля:

- TAC (Type Allocation Code) - 8 десятичных цифр;
- SNR (Serial Number) - 6 десятичных цифр;
- CD (Check Digit) / SD (Spare Digit) - одна десятичная цифра.

В состав IMEISV входят:

- TAC (Type Allocation Code) - 8 десятичных цифр;
- SNR (Serial Number) - 6 десятичных цифр;
- SVN (Software Version Number) - две десятичные цифры.

TAC назначается ассоциацией GSMA в соответствии с рекомендацией GSMA TS.06 и определяет код конкретной модели пользовательского терминала.

SNR назначается производителем и определяет серийный номер устройства.

CD представляет собой контрольную сумму, рассчитанную по алгоритму Луна.

SD - заполнитель, используемый в ответе пользовательского терминала (UE) при запросе идентификатора IMEI со стороны сети (устанавливается в значение 0).

SVN - номер программной версии UE.

В большинстве моделей мобильных телефонов вывести идентификатор IMEI на экран можно посредством комбинации *#06#, набранной на клавиатуре устройства[1,2].

1.5.3 Скрытый идентификатор пользователя – SUCI (Subscription Concealed Identifier)

Представляет собой зашифрованную копию международного постоянного идентификатора подписки абонента на услуги (5G SUPI) и позволяет избежать передачу 5G SUPI по сети в открытом виде, даже при первичной регистрации пользовательского терминала в сети (Initial attach).

Для защиты SUPI используется криптографическая схема, основанная на эллиптических кривых (Elliptic Curve Integrated Encryption Scheme – ECIES). Публичный ключ, применяемый для шифрования SUPI, должен храниться в защищенной памяти USIM карты; закрытый ключ – в функциональном элементе извлечения идентификатора пользователя (SIDF). При этом часть SUPI, содержащая мобильный код страны (MCC) и мобильный код сети (MNC) и задействованная для маршрутизации сигнального трафика не шифруется. 3GPP допускает возможность шифрования SUPI в пользовательском терминале (вариант по умолчанию) и USIM модуле. Сеть оператора связи и пользовательский терминал также должны поддерживать так называемую нулевую схему (null-scheme) при которой защита публичного идентификатора пользователя не осуществляется[1,2].

1.5.4 Глобальный временный уникальный идентификатор абонента 5G-GUTI (5G Globally Unique Temporary Identifier)

Назначается модулем управления доступом и мобильностью (AMF) вне зависимости от типа сети доступа (3GPP, non-3GPP). При "выходе в эфир" пользовательский терминал должен использовать именно 5G-GUTI (за исключением первичной регистрации в сети – initial attach, а также иных случаев, когда валидный 5G-GUTI отсутствует). Формат 5G-GUTI показан на рисунке 1.10[1].

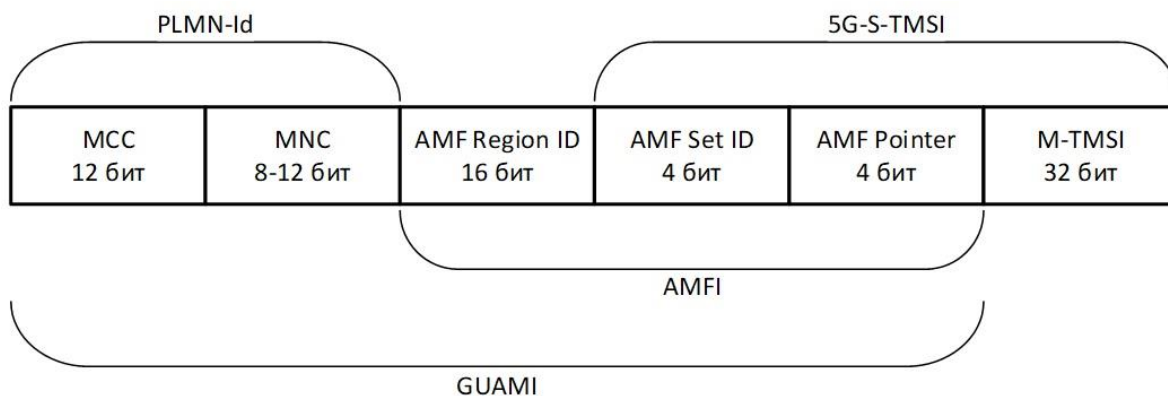


Рисунок 1.10 – Формат 5G-GUTI[1]

2 Определение основных характеристик сетей 5G/ИМТ-2020 и их сопоставление с действующими сетями ИМТ

2.1 Общее описание услуг и сервисов, предполагаемых для предоставления на сетях 5G/ИМТ-2020

Существующие сети 4G не позволяют в требуемой мере обеспечить новые потребности абонентов в инновационных услугах подвижной связи. При этом операторы столкнулись с недостаточной гибкостью сетей связи, увеличением их сложности и ростом стоимости их эксплуатации. Технологии 5G/ИМТ-2020, позволяющие нивелировать указанные недостатки, являются закономерным этапом развития сетей подвижной связи.

Международный союз электросвязи МСЭ-R определил показатели главных эксплуатационных характеристик сети, достижение которых позволяет отнести ее к сети 5-го поколения:

- увеличение пропускной способности сети (рост скорости передачи данных в 10-100 раз в расчете на абонента - до 10 Гбит/с (DL) и до 5 Гбит/с (UL));
- обеспечение роста потребляемого трафика в расчете на 1 абонента (рост в 1000 раз) – до 500 Гб на пользователя в месяц; - увеличение количества подключаемых абонентских устройств в соте в 10-100 раз - до 300 000 на узел и до 1 миллиона устройств на 1 км²;
- уменьшение сквозной задержки передачи данных в сети с 10 мс до 1 мс; - рост спектральной эффективности радиointерфейса до 3 раз;
- многократное увеличение времени автономной работы абонентских устройств с небольшим энергопотреблением, таких как сенсоры IoT/M2M/D2D – до 10 лет;

– снижение стоимости эксплуатации и энергопотребления сетей 5G/IMT-2020 до 10 раз по сравнению с сетью 4G[5,6].

Услуги, предоставляемые сетью связи 5G/IMT-2020, классифицированы МСЭ-R на 3 группы:

Первая группа: усовершенствованная подвижная широкополосная связь (eMBB). Эта группа услуг охватывает сценарии использования, ориентированные на человека и обеспечивающие доступ к мультимедийному контенту, услугам и данным (аналогична услугам, предоставляемым в настоящее время сетями LTE). К таким услугам относятся: Ultra HD и видео, 3D видео, в том числе в реальном времени, онлайн игры, виртуальная реальность (возможные области применения: образование, развлечения, здравоохранение, военная промышленность), расширенные сервисы социальных сетей, облачные сервисы (возможные области применения: государственные услуги, бизнес приложения, вычисления), голос, в том числе потоковый, музыка в реальном времени, вещание MBMS[5,6]..

Для качественной поддержки этих услуг должны обеспечиваться мультигигабитные скорости передачи данных. В сценариях для eMBB высокое значение имеют практическая пользовательская скорость передачи данных, трафик на единицу площади, пиковая скорость передачи данных, мобильность, энергоэффективность и эффективность использования спектра.

Вторая группа: крупномасштабные системы межмашинной связи (MTC). Данный сценарий использования характеризуется большим количеством подключенных устройств, передающих относительно небольшой объем данных, не столь чувствительных к задержке. Для качественной поддержки этих услуг необходимо обеспечить низкую стоимость абонентских устройств при поддержке большой зоны охвата и продолжительного времени работы устройства от батареи. Основные области применения: энергетика, транспорт, здравоохранение, торговля, общественная безопасность, промышленность, ЖКХ, беспилотные транспортные средства. Сценариям MTC свойственны высокая плотность соединений и необходимость поддержания корректного функционирования большого количества устройств в сети. Для реализации данного сценария важны низкая стоимость устройства и его энергоэффективность[5,6]..

Третья группа: сверхнадежная передача данных с малой задержкой (URLLC). В данном сценарии использования предъявляются жесткие требования к таким показателям функционирования сети, как пропускная способность, задержка и готовность. К таким услугам относятся беспроводное управление промышленными и производственными процессами (роботизация), дистанционная медицина, в частности, хирургия, автоматизация распределения энергии в «умных» электросетях, общественная безопасность, «умные» дома и города, применение интеллектуальных транспортных средств и внедрение интеллектуальной дорожной инфраструктуры на базе V2X и т.д. В некоторых сценариях URLLC высокое значение имеет низкая задержка для того, чтобы обеспечить работу

критически важных служб безопасности, а также высокий уровень мобильности в сфере услуг безопасности перевозок[5,6].

В приложении А показаны потенциальные требования к некоторым применениям типов услуг 5G/IMT-2020 и возможность их реализации с использованием существующих сетей[5,6].

Для реализации на сети мобильной связи пятого поколения перечисленных выше трех основных групп услуг сети 5G/IMT-2020 должны обладать следующими характеристиками:

- гибкость использования спектра и ширины полосы – возможность проектирования системы связи по отношению к различным спектральным сценариям, и, в частности, к возможности функционировать в различных диапазонах частот;

- надежность - способность обеспечить работу услуги с очень высоким коэффициентом готовности (где под коэффициентом готовности подразумевается вероятность того, что сеть окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени) [5,6];

- устойчивость - способность сети сохранять работоспособное состояние во время и после влияния внешних воздействий (чрезвычайные ситуации, аварийное отключение электроэнергии и т.п.);

- безопасность и конфиденциальность - способность обеспечивать шифрование и защиту целостности абонентских данных, предотвращение несанкционированного доступа, защиту сети от взлома, мошенничества и т.д.;

- энергоэффективность - способность обеспечивать заданное время работы, обеспечиваемое накопленной энергетической емкостью. Это особенно важно для M2M-устройств, которым необходим продолжительный срок службы аккумулятора (например, более 10 лет), так как их постоянное техническое обслуживание затруднено физическими или экономическими причинами[5,6].

2.2 Общее описание технологических решений для радиointерфейсов сетей 5G/IMT-2020

В отличие от предыдущих поколений, где для каждого нового поколения сетей связи (2G, 3G, 4G) разрабатывался новый радиointерфейс, в сети подвижной связи технологии 5G/IMT-2020 планируется применять как новый радиointерфейс (New Radio или NR согласно спецификациям 3GPP серии 38), так и эволюцию стандарта LTE-Advanced[5,6].

Стандарт LTE-Advanced продолжает эволюционировать, приближаясь по своим характеристикам к возможностям стандарта NR. В стандарте LTE-Advanced уже реализована поддержка активных антенных систем, использование более эффективного кодирования и модуляции, агрегация нескольких частотных каналов, уменьшенная задержка на уровне радиointерфейса. Однако структура радиointерфейса NR изначально разрабатывалась для обеспечения более высоких скоростей передачи данных

и меньших задержек, более эффективного использования частотного ресурса за счет:

- применения сигналов с большей шириной спектра (до 100 МГц в диапазоне до 6 ГГц и до 400 МГц в диапазоне свыше 6 ГГц);
- обеспечения минимальных задержек на радиointерфейсе за счет возможности увеличения частоты следования временных слотов кадровой структуры, за счет модификации протокола управления радиоресурсами;
- применения адаптивного к нагрузке временного дуплекса;
- применения более эффективных помехоустойчивых кодов;
- использования активных антенных систем миллиметрового диапазона с большим количеством элементов, узкой диаграммой направленности излучения и высокой избирательностью;
- реализации индивидуальных сценариев использования ресурсов полосы частот канала NR для абонентских терминалов различных типов и производительности (широкополосных/узкополосных абонентских терминалов WB/NB UE, абонентских терминалов с агрегацией несущих CA UE)[5,6].

Несмотря на меньшую эффективность реализованных технических решений по сравнению с NR, эволюционный путь развития имеет более низкую стоимость и обеспечивает высокую скорость развертывания на основе существующей инфраструктуры, а также возможность обслуживания имеющихся терминалов LTE.

Для поддержки возможности подключения большого числа маломощных устройств в рамках реализации концепции IoT в 3GPP были разработаны такие режимы работы LTE как eMTC и NB-IoT, дополняющие возможности друг друга. Технология LTE-eMTC в большей степени ориентирована на более надежную связь с поддержкой мобильности и возможностью более высокой скорости передачи при потере в максимальном покрытии и энергетике (в силу больших скоростей передачи). NB-IoT оптимизирована для сегмента IoT, где требуются максимальная дальность связи, малые скорости и большая энергоэффективность.

Радиointерфейс NR играет роль ключевого радиointерфейса для сценариев высокой пропускной способности и малой задержки. New Radio предполагается развертывать как в нижних, так и верхних диапазонах радиочастот. Ключевыми особенностями радиointерфейса являются пересмотренная структура кадра с возможностью минимизации задержки до 1 мс, более широкие каналы, более эффективное помехоустойчивое кодирование и более эффективное использование сложных антенных систем.

Спектральная эффективность технологии 5G/IMT-2020 существенно выше, чем у 4G, за счет использования усовершенствованного радиointерфейса. В миллиметровом диапазоне радиочастот (26 ГГц) основной вклад в повышение пиковой спектральной эффективности достигается за счет применения Massive MIMO с большим количеством

излучающих элементов в активной антенной решетке, и выигрыш может достигать 50-80%. К методам повышения эффективности использования спектра в сети 5G/IMT-2020, которые рассматривались в 3GPP, относятся следующие[5,6]:

1. Усовершенствованные формы сигналов, модуляция и кодирование, схемы многостанционного доступа:

- фильтрованное OFDM (FOFDM);
- модуляция с множеством несущих с использованием банка фильтров (FBMC);
- многостанционный доступ с разделением по шаблону (PDMA); - многостанционный доступ на основе разреженных кодов (SCMA);
- многостанционный доступ с разделением на основе перемежения (IDMA) и распределение по несущим с низкой плотностью (LDS).

На данном этапе стандартизации технологии 5G/IMT-2020 (3GPP релиз 15), в качестве метода мультиплексирования принят метод CP-OFDM (Cyclic-Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing) на канале «вниз» (DL) и CP-OFDM с DFT или без в канале «вверх» (UL).

2. Антенные технологии:

- формирование трехмерного луча FD-MIMO (3D beamforming);
- активная антенная система (AAS) с решеткой излучателей;
- усовершенствованные системы с многоканальным входом/многоканальным выходом (massive и multi user MIMO).

3. Гибкость при использовании спектра: - агрегация несущих с различным дуплексом (TDD и FDD);

- двухканальное подключение, в том числе и в мультистандартной сети;
- динамический TDD.

4. Обеспечение прямой связи между абонентскими терминалами.

5. Использование в микросотах схем модуляции более высокого порядка и использование эталонных сигналов с уменьшенным объемом служебной информации (основан на применении функционала Lean Carrier)[5].

2.3 Общее описание технологических решений для сетевой инфраструктуры 5G/IMT-2020

Мобильные сети 5G/IMT-2020 должны строиться с применением новых технологических принципов:

- мультидиапазонность радиосети;
- технологическая гетерогенность построения сетей 5G/IMT-2020 (HetRAT) состоит в возможностях одновременного использования сетей радиодоступа на различных радиотехнологиях 5G/4G/WLAN;
- инфраструктурная гетерогенность построения сетей (HetNet) состоит в возможностях одновременного использования и управления в одной соте базовых станций различного уровня – макро/ микро/ пико и фемто.

Сеть ПРТС, создаваемая на технологиях 5G/IMT-2020, должна соответствовать следующим архитектурным требованиям высокого уровня:

- обеспечение реализации разнообразных услуг и приложений с разными требованиями к сети связи, в том числе и пограничных вычислений (MEC);
- быстрое внедрение новых услуг и приложений;
- обеспечение автоматического конфигурирования услуг, виртуальных и физических ресурсов и их мониторинга;
- обеспечение поддержки большого количества MVNO и выделенных сетей, в том числе для обеспечения предоставления услуг IoT;
- обеспечение гарантированного качества обслуживания;
- обеспечение эффективного использования сетевых ресурсов, включая использование радиочастотного спектра и пропускной способности сети[5].

Таким образом, сеть 5G/IMT-2020 подразумевает полностью автоматическое конфигурирование новых услуг и приложений, быстрое выделение необходимых сетевых ресурсов, эффективное использование полосы частот и пропускной способности сети, обеспечение качества обслуживания.

Технологически обеспечение перечисленных выше требований в сетях на базе технологий 5G/IMT-2020 должно достигаться путем:

- реализации принципа программируемости сети, что означает повсеместный, где это возможно, переход от использования оборудования к использованию программного обеспечения, включая реализацию функций обработки информации управления и сигнализации, конфигурирование услуг, виртуальных и физических ресурсов сети;
- четкого логического отделения функций уровня управления от уровня данных пользователя, включая опорную сеть 5G/IMT-2020. Реализация этой возможности позволит независимо друг от друга развивать и масштабировать программные и физические ресурсы, относящиеся к этим уровням;
- реализации принципа логических сетевых слоев, который позволяет автоматизировать процесс конфигурирования сетевых ресурсов и адаптировать архитектуру сети к требованиям услуг и сетевых сервисов;
- использования облачных вычислений (cloud computing), обеспечивающих возможность эмуляции сетевых элементов посредством услуги «Инфраструктура как услуга (Infrastructure as a Service (IaaS))»;
- внедрения технологий NFV (Network Functions Virtualization – виртуализация физических сетевых элементов телекоммуникационной сети, когда сетевые функции исполняются программными модулями, работающими на стандартных серверах и виртуальных машинах (VM) в них) и SDN (Software Defined Network – программно-определяемая сеть – метод администрирования компьютерных сетей, позволяющий управлять услугами сети, когда функционал управления отделен от нижележащего уровня пересылки пакетов) в сетях радиодоступа (C-RAN), пакетных транспортных

сетях, а также для виртуализации функций узлов коммутации сети телефонной связи (vIMS - virtual IMS);

– реализации функций хранения и предоставления контента для услуг, чувствительных к задержкам передачи, на границе сети, как можно ближе к потребителю контента (Mobile Edge Computing)[5,6].

2.4 Анализ международных тенденций развития услуг и сервисов в сетях подвижной связи при переходе к технологиям 5G/IMT-2020

5G/IMT-2020 – это и новый стандарт связи, и технологическая эволюция мобильных сетей, и новая парадигма услуг телекоммуникаций и информационных технологий. Сеть 5G/IMT-2020 будет представлять собой плотно распределенную матрицу следующих функций: вычисления, хранения и сети[5,6].

Развитие мобильных сетей связи при переходе к технологиям 5G/IMT-2020 характеризуются следующими особенностями:

1. Внедрение принципиально новых услуг, таких как:

– услуги на основе голограмм и мультимедиа с полным эффектом присутствия, включая трансляции спортивных матчей и интерактивные фильмы с охватом в 360°;

– полномасштабные услуги виртуальной и дополненной реальности (Virtual Reality/Augmented Reality - VR/AR), включая услуги AR при навигации и вождении автомобиля, диагностику и хирургическое вмешательство на расстоянии с помощью хирургического робота;

– услуги со сверхнизкой задержкой по времени, включая дистанционное управление спасательным роботом и автономное вождение автомобиля;

– услуги Интернета вещей (Internet of Things - IoT) на основе массового подключения устройств;

– интеллектуальные услуги на основе больших объемов данных;

– тактильный Интернет[5].

2. Многократный рост мобильного трафика, вызванный:

– ростом объема потребления видеослужб и увеличением разрешения видеоизображения; - увеличением количества подключенных к сети устройств (смартфоны, планшеты, разнообразные устройства класса M2M и D2D, беспилотные транспортные средства и т.д.);

– ростом темпа использования приложений;

– широким использованием облачных технологий;

– использованием современных online игр и их обновлением[5,6].

3. Превалирующая роль смартфонов, как источника мобильного трафика данных.

– во всех регионах Земного шара за период с 2017 г. по 2023 г. прогнозируется резкий рост трафика данных - в 6-10 раз в зависимости от региона;

– около 95% трафика данных будет генерироваться смартфонами.[5,6]

4. Мобильное видео – доминирующий вид мобильного трафика данных.

5. На первом этапе развития сетей связи стандарта 5G/IMT-2020 наиболее востребованными будут функциональные возможности и услуги, относящиеся к мультимедийным развлечениям с повышенными требованиями к качеству контента: обеспечение гигабитных скоростей, «живые» спортивные трансляции, кино с элементами виртуальной реальности, использование элементов дополненной реальности для управления автомобилями в реальном времени. Также абоненты заинтересованы в таких новых услугах, как синхронный перевод с иностранного языка, «умный дом», управление дронами (беспилотными летательными аппаратами).

Менее важны для потенциальных абонентов сети 5G/ IMT-2020 следующие возможности: большее время работы смартфона от одной зарядки аккумулятора, усиленная безопасность персональных данных, наивысшее качество видеостриминга, возможность подключения к сети почти любого устройства в доме.

6. Превращение предприятий различных сфер и отраслей экономики в контент-провайдеров мобильных сетей. Ведущие мировые операторы имеют намерение развивать 5G-услуги как для абонентов, так и для корпоративного и промышленного использования.

7. Изменение способов монетизации услуг сетей связи 5G/IMT-2020.

– развитие интернета вещей (IoT/IIoT/M2M/D2D); - совместные проекты с компаниями из других отраслей;

– специализированные отраслевые проекты и сценарии с распределением доходов[5,6].

8. Непосредственная заинтересованность администраций связи в скором и эффективном внедрении разнообразных технологий на базе сетей связи 5G/IMT2020 в экономики своих стран:

– усилия по глобальной или региональной гармонизации спектра, выделяемого для сетей 5G/ IMT-2020;

– изменение тарифов за использование 1 МГц спектра в связи с необходимостью выделения гораздо более широких полос непрерывного спектра для эффективной работы сетей 5G/ IMT-2020;

– создание государственно-частных партнерств для практического продвижения сетей 5G/ IMT-2020 в реальную экономику;

– активное проведение мер по конверсии и перераспределению спектра в пользу сетей связи 5G/ IMT-2020[5,6].

2.5 5G-IoT-LPWAN: взаимоотношение

Технологии 5G должны обеспечивать более высокую пропускную способность по сравнению с технологиями 4G, что позволит обеспечить большую доступность широкополосной мобильной связи, а также использование режимов device-to-device («устройство к устройству», прямое соединение между абонентами), сверхнадёжные масштабные системы

коммуникации между устройствами, а также меньшее время задержки, скорость интернета 1—2 Гбит/с, меньший расход энергии батарей, чем у 4G-оборудования, что благоприятно скажется на развитии Интернета вещей (англ. IoT)[8].

IoT - это категория приложений. Эти приложения могут охватывать стандарты 4G, 5G и 802.11. Приложение, масштаб, диапазон и результат вашего проекта помогут вам выбрать оптимальное решение для подключения. Приложения IoT - это просто все, что подключено или управляется через Интернет. Они варьируются от автомобилей до фонарей, лекарств и даже биологических функций.

Следующая эволюция, которую мы сейчас начинаем, - это подключение устройств, которые не имеют или не нуждаются в высокой скорости или пропускной способности, но требуют широкой области соединения. Это включает в себя все: от местоположения отслеживания до счетчиков / счетчиков, приборов, сигналов тревоги и показателей здоровья человека.

Используемые нами технологии и решения (Ethernet, Wi-Fi и сотовая связь) излишни для этого нового жанра подключения.

LPWAN обладает низкой пропускной способностью, малыми частотными каналами, широкими зонами покрытия и требует длительного времени автономной работы (5-10 лет).

Технологии LPWAN охватывают как лицензионные, так и нелицензионные частоты. В каждом подмножестве (лицензированном и нелицензированном) находятся несколько конкурирующих технологий и решений.

Давайте посмотрим на LPWAN с нелицензированной стороны. Это будет промышленный, научный медицинский (ISM) спектр, 900 МГц, 2,4 ГГц и 5 ГГц. Ключевые игроки сосредотачиваются на более низких частотах, чтобы получить расстояние за счет пропускной способности, которая им не нужна для их сегментов рынка.

В этой области и в процессе построения сетей SigFox, LoRa и Ingenu являются одними из основных решений.

Разработчики LoRa Alliance считают, что технология LoRa имеет значительные преимущества перед WiFi и сотовыми сетями, благодаря возможности развертывания межмашинных соединений (Machine-to-Machine, M2M) на расстояние до 20 км при скорости до 50 Кбит/с, а также имеет минимальное потребление электроэнергии, обеспечивающее несколько лет автономной работы на одном аккумуляторе типа AA. Масштаб применений данной технологии велик: от домашней автоматизации и интернета вещей до промышленности и умных городов [7,9]. LoRa является следующей ступенью развития LPWAN решения, которое было разработано и запатентовано Корпорацией Semtech. Суть технологии сводится к вариации линейной частотной модуляции (Chirp Spread Spectrum, CSS). Технология использует кодировку данных широкополосными импульсами с частотами, которые уменьшаются или увеличиваются на некотором временном интервале. Такое

решение позволяет приёмнику быть устойчивым к отклонениям частоты от номинального значения и упрощает требования к тактовому генератору, тем самым позволяет использовать недорогие кварцевые резонаторы.

Система использует прямую коррекцию ошибок (Forward Error Correction , FEC) и работает в субгигагерцовом диапазоне частот: 169, 433 и 915 МГц в США, а в Европе – в диапазоне 868 МГц. Чаще всего применяются рабочие частоты 868 и 915 МГц. Также, вследствие высокого уровня внешнего воздействия, ограничено используется рабочий диапазон 2.4 МГц [10, 11]. Согласно спецификации [7,12], LoRa (а также SIGFOX) использует циклически единственный вариант передачи, который ограничивает скорость создания сообщений. Тем не менее, за счет поддержки нескольких каналов, LoRa позволяет конечным узлам участвовать в процедурах обмена данными посредством изменения частоты несущей при соблюдении беспопытного лимита цикла в каждом канале. Выбор скорости передачи данных - это компромисс между зоной покрытия и объемом данных, сообщения с разными скоростями передачи данных не мешают друг другу. Скорость передачи данных LoRa находится в диапазоне от 0,3 до 50 Кбит/с. Чтобы максимизировать время автономной работы конечных устройств и общую пропускную способность сети, сетевая инфраструктура LoRa может управлять скоростью передачи данных для каждого прибора индивидуально посредством адаптивной скорости передачи данных. В то время как реализация LoRa является закрытой, остальная часть стека протоколов, известный как LoRaWAN, остается открытой, и ее развитие осуществляется LoRa Alliance, возглавляемого IBM. Отличительной особенностью LoRa сети является то, что она предусматривает три класса устройств для решения различных задач и применений в сети. На рисунке 2.1 отображены классы устройств: класс А (для всех), класса В и класс С.

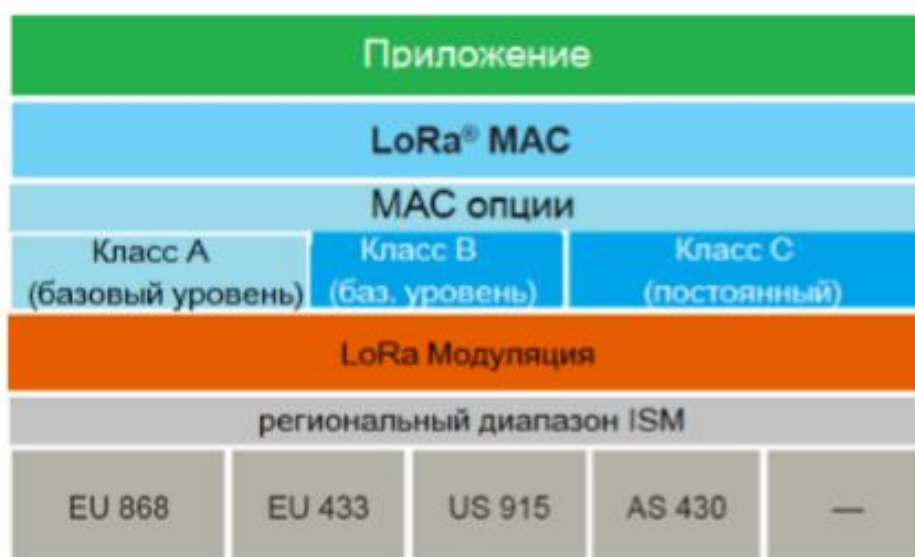


Рисунок 2.1 - Классы устройств в сетях LoRa

«Класс А» определяет функциональный режим по умолчанию в сетях LoRa. В «классе А» сеанс связи осуществляет конечное устройство. Узел передает данные короткими посылками по заданному графику на шлюз. После каждой передачи данных, оконечное устройство открывает одно приемное окно на некоторый промежуток времени, ожидая следующей команды, отправляемой сервером. В случае, если ответа не поступает, узел переходит в режим сна, тем самым уменьшая потребление энергии. Второе окно открывается в другом поддиапазоне (предварительно согласовывается с сервером) в целях повышения устойчивости против колебаний канала. Сервер накапливает данные и пересылает их сразу, как только узел выходит на связь. Сети «класса А» предназначены главным образом для мониторинга приложений, они наиболее экономичны в электропотреблении и наиболее распространены на практике [12, 13]. В «классе В» выделено дополнительное окно приема, которое открывается устройством по расписанию. По специальному сигналу «маяк» от шлюза конечное устройство осуществляет синхронизацию внутреннего времени со временем сети, тем самым составляя расписание. Таким образом, благодаря такому дополнительному окну, у сервера появляется возможность начать передачу данных в заранее известное время. Наконец, устройства «класса С» имеют максимальное, почти непрерывное окно приема, которое закрывается только на время передачи данных. Это позволяет применять их для решения задач, требующих получения большого объема данных. Этот класс устройств потребляет наибольшее количество энергии, поэтому обычно не использует батарейное питание, но получает данные от сервера сети с наименьшими задержками. На рис. 2.2 рассмотрена архитектура LoRaWAN сетей [8,13]. Классическая сеть LoRaWAN состоит из следующих элементов: конечные узлы, шлюзы, сервер сети и сервер приложений. Конечный узел (End-Node) предназначен для осуществления управляющих, контролирующих и измерительных функций. Он содержит набор необходимых датчиков и управляющих элементов. Имеют, как правило, батарейное питание. Узлы включают передачу данных лишь на некоторый промежуток времени (обычно на 1–5 секунд), по окончании которого открывается два временных окна для приема данных. Остальное время приемопередатчик конечных узлов находится либо в неактивном состоянии, либо в состоянии приема, в зависимости от класса устройства (А, В или С).



Рисунок 2.2 - Архитектура сети LoRa

Устройство, принимающее данные от конечных устройств с помощью радиоканала и передающее их в транзитную сеть – Шлюз LoRa (Gateway/Concentrator). Транзитными сетями могут выступать Ethernet, WiFi, сотовые сети и любые другие телекоммуникационные каналы. Шлюз и конечные устройства образуют сетевую топологию типа «звезда». Часто данное устройство содержит многоканальные приёмопередатчики для обработки сигналов в нескольких каналах одновременно или даже, нескольких сигналов в одном канале. Соответственно, несколько таких устройств обеспечивает зону покрытия сети и прозрачную двунаправленную передачу данных между конечными узлами и сервером. Сервер сети (Network Server) предназначен для управления сетью: заданием расписания, адаптацией скорости, хранением и обработкой принимаемых данных. Сервер приложений (Application Server) может удаленно контролировать работу конечных узлов и собирать необходимые данные с них. Сеть LoRa обычно имеет топологию «звезда», в которой устройства подключаются через шлюзы LoRa, которые, в свою очередь, подключены к общей сервер сети (NetServer) через стандартные протоколы IP[8,12].

Модель LoRa Transceiver была построена на Matlab Simulink с использованием фундаментальных компонентов в Simulink, чтобы продемонстрировать, как надежные сложные схемы модуляции могут быть построены, рентабельно и эффективно. Модель передатчика-приемника LoRa с использованием модуляции FSK показана на рисунке 2.3.

В результате моделирования системы приемопередатчика LoRa, были получены следующие результаты. Как видно из рисунка 2.4 изменения уровней мощности сигнала и характеристик компонентов в приемник и АЦП напрямую влияют на характеристики приемника.

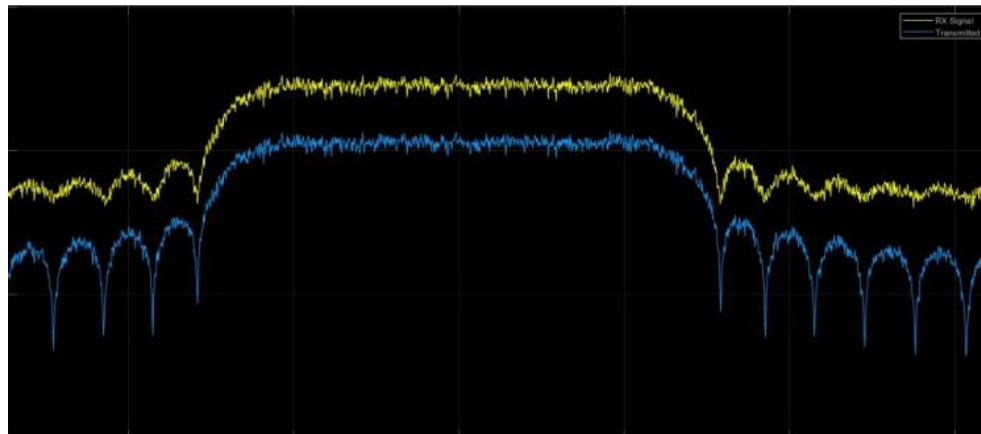


Рисунок 2.4 - Переданный и принятый сигнал

Рисунок 2.4 показывает, что переданный и принятый сигналы почти одинаковы только с небольшим ухудшением принимаемого сигнала из-за шум добавлен в блок. Переданный сигнал и принятый сигнал получены на центральной частоте 0 Гц[7].

Технология SigFox. SIGFOX является частной компанией, которая направлена на создание всемирной сети, специально разработанной для устройств (Internet of Things , IoT). Технология позволяет осуществлять передачу данных на большие расстояния при малой мощности передающего устройства и малой емкости батареи. Сеть отлично подходит для простых и автономных устройств, которые посылают небольшое количество данных в эту сеть. Так сеть SIGFOX похожа на сотовую инфраструктуру (GSM- и GPRS-3G-4G), но является более энергоэффективной и в тоже время менее затратной. SIGFOX использует ультра-узкую полосу частот (Ultra Narrow Band , UNB) на основе радио технологии для подключения устройств к глобальной сети. Использование UNB – ключевой фактор в обеспечении очень низкого уровня мощности передатчика, который будет использоваться во время состояния поддержания соединения надежных данных. Сеть работает в существующих нелицензируемых диапазонах (The industrial, scientific and medical , ISM) в глобальном масштабе и сосуществует в этих частотах с другими радио-технологиями без проблемы перекрытия сети или проблемы пропускной способности. В Европе широко используется диапазон 868,8 МГц (как определено в ETSI и CEPT), а в США 915 МГц (как определено FCC). Зона охвата сети SIGFOX составляет около 30–50 км в сельской местности и в городских районах. Обычно, где больше затруднений и шума, диапазон снижается в пределах от 3 до 10 км. На рис. 2.5

представлена топология сети технологии SIGFOX [8,15]. Общая топология сети была разработана для обеспечения масштабируемой, высокопроизводительной сети, с очень низким расходом энергии, при этом сохраняя простую и легкую топологию «звезда» на основе сотый инфраструктуры.



Рисунок 2.5 - Топология сети SIGFOX

В SIGFOX узлы могут использоваться в двух конфигурациях:

– Режим P2P – прямой связи между узлами (Интерфейс LAN);

– Гибридный режим – SIGFOX / P2P (P2P + GW в сети SIGFOX). В режиме P2P, узлы могут подключаться непосредственно между ними и сразу отправлять сообщения, при этом отправка будет бесплатная, т. к. передача данных происходит без транзитного канала, за который надо платить. Это полезно, т. к. можно создать вторичные сети в любое время и нет необходимости менять прошивку, достаточно только использовать специальные команды текущей библиотеки. В Гибридном режиме мы используем сочетание SIGFOX и P2P режимов, позволяющих отправлять только определенные сообщения через сеть. В этом случае мы используем один узел в качестве шлюза сети (режим P2P + SIGFOX), а остальные узлы в режиме P2P[7].

SIGFOX с ETSI определили, что одно устройство может в день отправить до 140 сообщений, при этом одно сообщение должно содержать максимально 12 байт полезной информации. Было установлено, что этих 12 байт покрывают потребности устройств, которые передают такие данные, как коэффициент потребления энергии, местоположение устройства, сигнал тревоги и другие основные типы сенсорной информации. Также возможно передавать до 4 сообщений, состоящих из 8 байт полезной информации в сутки в сторону каждого устройства. Эти 8 байт позволяют отправить данные конфигурации, а также оптимизировать срок службы аккумулятора. Этого бывает достаточно в случае, если не требуется полноценная двусторонняя связь. Устройство, чтобы получить сообщение, должно запросить данные с сервера, на котором заблаговременно должно быть запрограммировано определенное время, либо конкретное событие. Технология использует

шифрование AES с HMACs с закрытым ключом, который встроен в прибор, плюс некоторый порядковый номер. Технология SIGFOX направлена на низкую стоимость устройств, где требуется широкая зона покрытия. Есть целый ряд приложений, которые нуждаются в этой технологии беспроводной связи. Области, в которых могут быть использованы сети SIGFOX включают в себя:

- дома и потребительские товары;
- энергетические коммуникации - в частности, интеллектуальный учет;
- здравоохранения – в частности, приложения mHealth;
- транспорт – включая в себя техническое управление;
- удаленный мониторинг и контроль;
- розничная точка продажи, хранение обновлений и т. д.;
- безопасность[8].

Стандарт имеет ряд преимуществ по сравнению с другими базовыми технологиями LPWAN сетей. Это большая зона покрытия; высокая проникающая способность; до 20 лет работы сенсора от 2-х батарей AA, т. е. сверхнизкое энергопотребление; низкая стоимость. Как и все технологии современного мира, энергоэффективная сеть SIGFOX, к сожалению, также имеет и отрицательные характеристики:

- низкая скорость передачи данных;
- зависимость от сотовой инфраструктуры;
- ограниченная помехоустойчивость;

Технология NB-IoT. NB-IoT имеет ряд достоинств таких, как широкая зона охвата, быстрая модернизация существующей сети, низкое энергопотребление, гарантирующее 10-летний срок службы батареи, низкую стоимость терминала, подклочи и играй, повышенную надежность и высокую сеть операторского класса безопасности. NB-IoT идеально соответствует требованиям рынка LPWAN, позволяя операторам расширить эту новую область. NB-IoT позволяет современным операторам работать с традиционными направлениями IoT, такими как интеллектуальные системы учета, отслеживания, благодаря ультранизкой стоимости, а также открывает больше возможностей промышленности, например, «умный Город», системы электронного здравоохранения. Технология NB-IoT рассматривает эволюцию от отрасли сотовой связи к Интернету вещей. Это беспроводная узкополосная разновидность глобальных сетей с низким энергопотреблением, которая в первую очередь предназначена для приложений M2M. Стандарт NB-IoT был специфицирован соглашением 3GPP в Release 13 (LTE Advanced Pro) и с 2016 г. по настоящее время он проходит тестирование. Ниже, на рис. 6, представлено девять отраслей, в которых мы видим большой потенциал рынка для NB-IoT сервисов[8]:



Рисунок 2.6 - Целевые отрасли для NB-IoT сервисов

Модель в настоящее время включает в себя более пятидесяти случаев использования, охватывающих многие категории услуг, такие как:

- интеллектуальный учет (электричество, газ и вода);
- охранно-пожарная сигнализация для домов и коммерческих объектов;
- приборы для измерения параметров здоровья;
- отслеживания людей, животных или предметов;
- умные городские инфраструктуры, такие как уличные фонари или система контроля и учета транспортных средств;
- подключение промышленных приборов, таких как сварочные аппараты или воздушные компрессоры. Как уже упоминалось ранее сервисам, которые используют низкую мощность сетей, как правило, требуется широкая зона охвата и низкое энергопотребление, которое является необходимым условием для почти 80 % всех случаев использования LPWAN[7].

Сравнивая присущие возможности NB-IoT с другими технологиями LPWAN такими, как e-MTC, SIGFOX, LoRa, NB-IoT обеспечивает более высокую производительность. Кроме того, наблюдая за всеми технологиями с точки зрения сетевых инвестиций, сценариев покрытия, трафика входящей и исходящей линии связи и надежности сети, можно сделать вывод, что NB-IoT является наиболее подходящей технологией. Известно, что несколько операторов по всему миру используют полосу частот 900 МГц для GSM из-за его обширных возможностей покрытия. Это возможно потому, что такие низкие полосы частот имеют отличные характеристики распространения, и это, как правило, улучшает проникновение в помещении. Развертывание NB-IoT в полосах частот, таких как 700, 800 и 900 МГц является отличным выбором, поскольку это довольно обширная экосистема в основном из-за его поддержки со стороны многих мировых ведущих операторов. Существует значительное число коммерческих сетей UMTS и LTE, которые в настоящее время работают в диапазоне частот 900 МГц. В 3GPP были предложены 3 сценария для развертывания LPWAN NB-IoT: Guard Band (защитная полоса), In Band (в полосе частот) и Standalone (автономный)⁴. Сеть может быть развернута как автономный носитель Standalone с использованием любого

доступного спектра более 180 кГц. Кроме того, сеть может быть в распределении LTE спектра, либо в рамках более широкой несущей LTE InBand, либо в LTE Guard Band – защитной полосе[8].

Технология Weightless P. Weightless – представляет собой открытый стандарт для сетей LPWAN повышенной мощности, предназначенной для производительности сети. В специальной группе интересов Weightless (Special Interest Group, SIG) предлагается три различных протокола – Weightless-N, Weightless-W, и Weightless-P, которые поддерживают различные формы и варианты использования. Weightless-W это открытый стандарт предназначен для работы в частотах телевизионного диапазона (TV white space, TVWS). Weightless-W идеально подходит для использования в нефтяной и газовой отрасли. Weightless-N делает акцент на чрезвычайно широкую зону покрытия вместо высоких скоростей передачи данных. Хотя ограничивается односторонним движением связи. Weightless-N поддерживает большой диапазон и низкое энергопотребление. Weightless-N идеально подходит для сенсорных сетей на базе показаний температуры, контроля уровня жидкости в резервуаре, измерений и многое другое. Weightless-P это узкополосная технология LPWAN для IoT-решений, требующих высокую плотность конечных устройств, долгосрочную службу батареи, и двунаправленную связь. Особенности этой технологии являются масштабируемость, оптимизация восходящей и нисходящей линии связи, широкая зона покрытия, длительный срок службы батареи и безопасная сеть. Он использует узкий диапазон групп модуляций, предлагая возможность двунаправленной связи для того, чтобы обеспечить непревзойденное качество обслуживания (Quality of Service, QoS). В отличие от Weightless-N и -W, Weightless-P не требует температурной компенсации кварцевого генератора (Temperature Compensated Crystal Oscillator, TCXO) из-за широкого диапазона электромагнитного излучения (ДМВ). Weightless-P является наиболее масштабируемой субгигагерцовой технологией LPWAN. Одна базовая станция Weightless-P поддерживает больше устройств, чем любая другая технологии LPWAN в суб-ГГц диапазоне. Высокая емкость базовых станций минимизирует затраты на развертывание. Можно выделить десять основных характеристик Weightless-P:

- технология узкополосная (12,5 кГц на канал);
- оптимизация поддержки плановых и внеплановых трафик-движений (в стандарте TDMA/FDMA);
- спектрально-эффективная модуляция OQPSK;
- работает по всему диапазону лицензионных освобожденных от суб-ГГц ISM полосах частот для глобального развертывания: 169 / 433 / 470 / 780 / 868 / 915 / 923 МГц;
- роуминг;
- 2 км в городской среде;

- время-синхронизации базовых станций для эффективного радиопланирования ресурсов и использования;
- возможность совместного использования инфраструктуры;
- адаптивная скорость передачи данных: 200 бит/с – 100 кбит/с[7];
- контроль мощности передачи для нисходящей линии связи и Восходящей линии связи для того, чтобы уменьшить помехи и увеличить пропускную способность сети. Ресурсы в субгигагерцовом нелицензируемом спектре ограничены и трафик от других технологий неуклонно растет. Поэтому Weightless-P использует узкополосный 12,5 кГц каналы, что дает возможность передавать в 7 раз больше данных, чем SIGFOX, и в 98 раз больше данных, чем LoRaWAN в городских условиях. Синхронные сети означают, что каждое устройство и базовая станция точно знает, когда говорить, а когда слушать. Множественный доступ с временным разделением каналов (Time Division Multiple Access , TDMA) представляет собой метод доступа к каналу для общих средних сетей. Это позволяет нескольким пользователям совместно использовать один и тот же частотный канал путем деления сигнала на различные временные интервалы. Множественный доступ с частотным разделением каналов (Frequency Division Multiple Access , FDMA) это еще один способ доступа к каналу, где пользователям предоставляется индивидуальный частотный диапазон и координируется доступ между несколькими пользователями. Стоит отметить, что LoRaWAN и SIGFOX не синхронные сети. Низкая задержка, двунаправленная связь между конечными устройствами и базовой станции обеспечивает надежную сеть и производительность. Базовая станция может иметь полный контроль над своей сетью и конечными устройствами в любое время. У других технологий конечные устройства недоступны, пока устройство не начнет передачу данных по восходящей линии связи. Несколько подканалов с малой задержкой в восходящей и нисходящей линии сокращает время приема и также уменьшает разрядку аккумулятора. После отправки конечным узлом данных, базовая станция Weightless-P сообщает каждому устройству точное время и канал использования для того, чтобы избежать столкновений и обеспечить успешную доставку важных данных. Как ранее уже было отмечено, в связи с ростом трафика в суб-ГГц диапазоне, шанс потери данных или их дублирование увеличивается. LoRa и SIGFOX к этому вопросу подошли примитивно: сообщения отправляются несколько раз до успешной доставки[7]. Этот метод быстро истощает батарею. Weightless-P построен на основе функций надежности сотовых сетей: синхронная сеть обеспечивает самую высокую вероятность успешной доставки данных с одной попытки. Метод адаптивной скорости передачи данных обеспечивает оптимальную производительность сети и увеличивает срок службы батарей конечных устройств, т. к. он регулирует фактическую скорость передачи данных в зависимости от близости каждого узла к базовой станции. Чем ближе к базовой станции оконечные узлы, тем более высокая скорость передачи данных, что приводит к более короткому эфирному времени и более низкой

выходной мощности. Противоположно, узлы, которые наиболее удалены от базовой станции, используют самую низкую скорость передачи данных и самую высокую выходную мощность. Weightless-P технология поддерживает протокол безопасности и обеспечивает:

- взаимную проверку подлинности с доверенной третьей стороны;
- шифрование переговоров;
- EAP-GPSK схему аутентификации в качестве базовой линии;
- аутентификация в сети. AES-128/256 шифрования. Прямое исправление ошибок.

Более компактный и оптимизированный протокол обеспечивает уменьшение сложности и стоимость системы по сравнению с сотовой M2M или будущей NBIoT. Технология активно используется в смарт измерениях, автомобильных системах слежения, отслеживании активов, в умных автомобилях – диагностика и модернизация транспортных средств, мониторинге состояния здоровья, датчиках движения, умных приборов, смарт-инфраструктуре электронных платежей и др[8].

3 Модель производительности для сетей 5G с учетом мобильности пользователей внутри и между сотами

3.1 Методы моделирования производительности для сетей 5G

В 5G, как и в других системах беспроводной связи, адаптивная модуляция и кодирование (AMC) стали стандартным подходом. Идея AMC заключается в динамической адаптации схемы модуляции и кодирования к условиям канала таким образом, чтобы достичь самой высокой спектральной эффективности во все времена [16,31]. Таким образом, модуляция и/или кодирование могут изменяться со временем для данного пользователя в зависимости от его местоположения и качества канала. Это особенно верно, когда пользователи являются мобильными, подчеркивая влияние мобильности на производительность пользователей и сотовых телефонов. Возникающие в результате этого колебания скоростей передачи используются оппортунистическими планировщиками для увеличения общей пропускной способности передачи данных [17], [18], [19]. Но даже планировщики с честной стратегией совместного использования ресурсов могут воспользоваться преимуществами мобильности пользователей.

Тот факт, что мобильность может улучшить производительность, уже отмечены в статьях [20, 21, 22, 23, 24]. Эти работы в основном представляют теоретические свойства и границы производительности. Например, в работе [20] авторы идентифицируют два предельных режима бесконечно быстрых и бесконечно низких вариаций канала, и показывают, что эти предельные режимы обеспечивают простые ограничения производительности на уровне потока. [21]. Кроме того, разрабатывает нижнюю и верхнюю границы для показателей производительности на уровне потока и показывает, что мобильность имеет тенденцию увеличивать общую пропускную способность сети. В работе [22] авторы анализируют сети с несколькими взаимодействующими базовыми станциями и показывают, что мобильность увеличивает область устойчивости системы. Авторы [25] моделируют систему OFDMA совместно, используя Пропорциональную справедливость (PF) и Иерархическую модуляцию (HM), с помощью многомерной цепи Маркова, и показывают, что в присутствии HM существует простая циклическая служба, такая как Round Robin, дает лучшую производительность, чем PF.

Наибольший интерес представляет работа [26], в которой авторы оценивают влияние мобильности пользователей на производительность сотовой связи при справедливой и гибкой схеме планирования. В частности, они показывают, что в рамках обеих политик планирования мобильность повышает пропускную способность на границе соты. Но поскольку марковский процесс, описывающий их модель, больше не является обратимым в случае, когда мобильные пользователи справедливо делятся ресурсами, они могут разрабатывать выражения в замкнутой форме только в двух предельных случаях, а именно, когда пользователи статичны и когда

пользователи имеют теоретическую бесконечную скорость. Для получения более реалистичных скоростей их анализ основан на численном решении многомерных цепей Маркова.

В этой главе представлена модель многоканальной системы массового обслуживания (СМО) с совместным использованием ресурсов. Такая дисциплина обслуживания в англоязычной литературе называется Processor Sharing (PS).

В отличие от предыдущих исследований, наша модель не основывается на численном анализе сложных цепей Маркова или на ограничительных допущениях, такие как бесконечная скорость пользователей, и как таковая является одним из первых отслеживаемых и точных приближений для сотовых сетей 4G/5G с мобильными пользователями. Оригинальность подхода заключается в том, чтобы отделить модель мобильности от самой модели соты, связав входные параметры очереди PS с параметрами физической мобильности. Показано, что разработанная модель согласуется с вышеупомянутыми аналитическими границами для реалистичных скоростей пользователей. Применяя данную модель можно количественно оценить прирост скорости как на производительность соты, так и на конечную производительность пользователей, а также исследовать влияние внутрисотовой и межсотовой мобильности.

3.2 Предположения о системе и движении транспорта

Рассмотрим макросоту 5G с дисциплиной планирования с циклическим перебором. Для данного количества активных пользователей ресурсы поровну распределяются между пользователями. Пользователь, который находится один в соте, будет иметь разные скорости передачи данных, если он находится близко к базовой станции, по сравнению со случаем, когда он находится далеко от нее. Таким образом, сота может быть разделена на J зон одинаковых условий радиосвязи или классов, каждая из которых характеризуется достижимой пропускной способностью, то есть пропускной способностью, которая может быть достигнута пользователем при планировании базовой станцией [27]. Пользователь класса j , $j = 1, \dots, J$, то есть в настоящее время присутствующий в зоне j , получит пропускную способность C_j , если он один во всей соте. Даже если это не является необходимым для развития нашей работы, можно предположить, как, например, в [28], что J зоны образуют концентрические окружности радиуса R_j , где зона 1 является центральной зоной, а зона J является периферийной зоной.

Допустим, что требования к связи поступают в соту в соответствии с пуассоновским процессом скорости Λ . Мы предполагаем, что пользователь, который переносит новое требование соединения, имеет вероятность, что p_j первоначально будет иметь класс j и, таким образом, начать свою загрузку в зоне j . В результате в зону j поступают новые требования к соединению по пуассоновскому процессу со скоростью $\Lambda_j = p_j \Lambda$.

В отличие от предыдущих классических работ по моделям очередей PS (например, [27]), мы предполагаем, что пользователи являются мобильными и, таким образом, могут изменить зону во время загрузки или покинуть соту до завершения передачи. Рассматриваемая нами модель мобильности заключается в следующем. Важно подчеркнуть, что это модель физической мобильности пользователей, которая отделена от использования ресурсов соты пользователями. Обозначим через Θ_j время физического пребывания пользователя в зоне j при каждом посещении зоны, то есть время, в течение которого он физически находится в зоне j , начиная с момента, когда он появляется в зоне j (либо потому, что он начинает его загрузку в зоне j , или потому что он входит в зону j из другой соседней зоны или соты) и заканчивается, когда он покидает зону j (все еще активную или нет) для другой соседней зоны или окончательно покидает соты. Затем мы определяем P_{jk} , вероятность того, что пользователь, который физически (то есть активен или нет) существует в зоне j , переместится в соседнюю зону k . Если внешняя часть соты помечена как 0, P_{j0} - это вероятность того, что пользователь выйдет из соты из зоны j , а P_{0j} - это вероятность того, что пользователь войдет в соты из зоны j . Обратите внимание, что когда зоны образуют концентрические окружности, пользователи могут покинуть соты и войти в нее только из зоны J .

Предположена, что каждый новый запрос на соединение (независимо от его начального класса) приносит одинаково распределенный объем Σ загружаемых данных. Как только поступает новый запрос, он запускает начало новой передачи данных (в зоне, где появляется запрос). Эта передача заканчивается либо потому, что пользователь завершил свою передачу перед тем, как покинуть соты (независимо от количества зон, которые он посетил за это время), либо потому, что он покинул соты до завершения ее передачи. В результате объем, фактически переданный данным пользователем в соте, в среднем меньше Σ .

В настоящей работе мы рассматриваем, что случайные величины Σ и Θ_j экспоненциально распределены. Первое предположение необходимо для приведенных ниже выводов. На самом деле, а также из-за свойства отсутствия памяти экспоненциального распределения, предположение об экспоненциальном объеме позволяет нам забыть объем данных, уже переданных Пользователем в предыдущих зонах, пока он все еще активен и перемещается в другую зону или в другую соты. Это резко упрощает анализ. С другой стороны, предположение об экспоненциальном времени пребывания в каждой зоне сделано только для упрощения, и можно рассмотреть другие более реалистичные распределения.

Теперь рассмотрим частный случай, когда зоны J образуют концентрические окружности радиуса R_j , и посмотрим, как мы можем оценить параметры движения и мобильности. Во - первых, поверхность зоны j равна $S_j = \pi(R_j^2 - R_{j-1}^2)$, когда $j > 1$ и $S_1 = \pi R_1^2$. Если поступление новых заявок на подключение равномерно распределено по всей поверхности соты, то

вероятность p_j того, что в зоне j появится новая заявка на подключение, пропорциональна поверхности зоны j :

$$p_j = \frac{S_j}{\pi R_j^2} \quad (3.1)$$

Что касается среднего времени пребывания в зоне j , $E(\Theta_j)$, то можно обоснованно предположить, что оно пропорционально квадратному корню из поверхности зоны и обратно пропорционально скорости V пользователей:

$$E(\Theta_j) = K \frac{\sqrt{S_j}}{V} \quad (3.2)$$

Когда зоны образуют концентрические окружности, пользователь, физически существующий в зоне j , $j = 2, \dots, J-1$, имеет вероятность $P_{j,j-1}$ переместиться в зону $j-1$ и вероятность $P_{j,j+1}$ переместиться в зону $j+1$ (при этом, конечно, $P_{j,j-1} + P_{j,j+1} = 1$). Для зоны 1, очевидно, $P_{1,2} = 1$. А из зоны J пользователь может либо вернуться в зону $J-1$ с вероятностью $P_{J,J-1}$, либо выйти из соты с вероятностью $P_{J,0}$. Все эти вероятности явно зависят как от радиуса R_j зон, так и от реальной мобильности пользователей. Однако без дополнительных предположений о физической мобильности пользователей можно использовать следующее приближение:

$$P_{j,j-1} = \frac{R_{j-1}}{2R_j}, j > 1 \quad (3.3)$$

Это линейное приближение, которое учитывает очевидные пределы: когда $R_{j-1} \rightarrow 0$, $P_{j,j-1} \rightarrow 0$ и когда $R_{j-1} \rightarrow R_j$, $P_{j,j-1} \rightarrow \frac{1}{2}$

Заметим, что вероятности p_j и P_{ij} , а также среднее время пребывания $E(\Theta_j)$ являются входными параметрами для модели очереди PS. Любые альтернативные выражения, вытекающие из реалистичной модели физической мобильности пользователей, могут быть попеременно использованы без изменения представленной ниже разработки.

3.3 Модель

Чтобы упростить представление, рассмотрим в этом разделе соту как изолированную от внешнего мира и явно не учитываем активных пользователей, которые делают передачу данных из соседних сот.

Модель представляет собой заполнение соты многоклассовой общей очередью процессора, как показано на рисунке 3.1. Каждый класс соответствует определенной зоне соты. Клиенты класса j поступают в очередь

в соответствии с Пуассоновским процессом скорости λ_j , $j = 1, \dots$. Важно отметить, что, в отличие от [29,31], λ_j отличается от скорости Λ_j новых запросов на подключение, появляющихся в зоне j , поскольку она должна включать прибытие пользователей, которые перемещаются из другой зоны, оставаясь при этом активными. Если мы обозначим через Λ_{ij} среднее число активных пользователей, перемещающихся из зоны i в зону j в единицу времени, то получим:

$$(3.4) \quad \begin{cases} \lambda_1 = \Lambda_1 + \Lambda_{21} \\ \lambda_j = \Lambda_j + \Lambda_{j-1,j} + \Lambda_{j-1,j}, j = 2, \dots, J-1 \\ \lambda_J = \Lambda_J + \Lambda_{J-1,J} \end{cases}$$

Заметим, что ослабление предположения о том, что сота изолирована от внешнего мира, будет заключаться в добавлении к λ_j термина, который будет представлять скорость активных пользователей, совершающих передачу данных извне. Пока же мы можем просто считать, что эта скорость является частью предположительно известной скорости Λ_j новых требований к соединению, возникающих в зоне J .

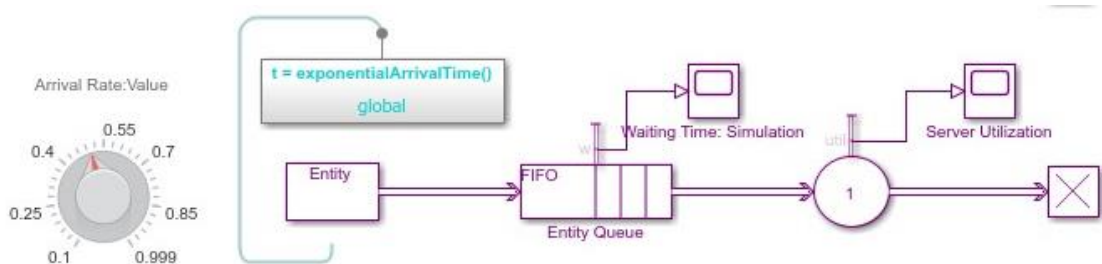


Рисунок 3.1 - Модель очереди PS

Скорость класса- j , в свою очередь, может быть выражена как в [28,30]:

$$\mu_j = \frac{C_j}{x_j} \quad (3.5)$$

где x_j определяется как среднее число битов, передаваемых активным пользователем в зоне j , для каждого посещения зоны, т. е. между моментом, когда он входит в зону (или появляется в зоне), и моментом, когда он покидает ее (или заканчивает свою передачу в зоне).

Прежде чем продолжать работу, важно подчеркнуть, что очередь PS всегда стабильна, т. е. для этой системы нет условия стабильности. Это можно интуитивно объяснить тем фактом, что все пользователи мобильны и в конечном итоге покинут соты через конечное время. Когда скорость требований новостного соединения возрастает и стремится к бесконечности,

пользователи с большой вероятностью покидают соты, прежде чем загрузить один бит.

В результате надо оценить все входные параметры очереди PS, а именно λ_j и μ_j , для $j = 1, \dots, J$ или, точнее, всех Λ_{ij} и x_j . Отметим, что в [29,31] для оценки остался только один параметр.

При заданных параметрах λ_j и μ_j стандартные результаты для стационарных многоклассовых очередей совместного использования процессора могут быть легко применены для расчета средних пропускных способностей $\bar{\gamma}_j$, полученных пользователями в зоне j во время их передачи, то есть.

$$\bar{\gamma}_j = C_j(1 - \rho) \quad (3.6)$$

$$\text{Где } \rho = \sum_{j=1}^J \rho_j \text{ и } \rho_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j}$$

Чтобы оценить первые недостающие параметры x_j , требуемые в выражении μ_j , мы используем методологию, разработанную в [29,31] для сот с одной зоной, и применяем ее для каждой зоны в отдельности. Как показано в [29,31], в особом случае, когда Ξ и Θ_j распределены экспоненциально, x_j относится к средней пропускной способности $\bar{\gamma}_j$, получаемой пользователями в зоне j , и к среднему времени $E(\Theta_j)$, которое пользователь физически проводит в зоне j , так как :

$$\bar{x}_j = \frac{E(\Xi)E(\Theta_j)\bar{\gamma}_j}{E(\Xi) + E(\Theta_j)\bar{\gamma}_j} \quad (3.7)$$

Теперь нужно оценить недостающие параметры Λ_{ij} , появляющиеся в выражениях λ_j . Если обозначим через h_j вероятность передачи обслуживания из зоны j , то есть вероятность того, что активный пользователь в зоне j покинет зону, не завершив свою передачу, мы можем выразить $\Lambda_{j j+1}$ и $\Lambda_{j j-1}$ как:

$$\begin{cases} \Lambda_{j j+1} = \lambda_j h_j P_{j j+1}, j = 1, \dots, J-1 \\ \Lambda_{j j-1} = \lambda_j h_j P_{j j-1}, j = 2, \dots, J \end{cases} \quad (3.8)$$

Вероятности передачи h_j могут быть выражены следующим образом:

$$h_j = \int_0^{+\infty} P \left[\Theta_j \leq \frac{y}{\gamma_j} \right] f_{\Xi}(y) dy \quad (3.9)$$

Предполагая, что Σ и Θ_j экспоненциально распределены, предыдущий интеграл легко дает [29,31]:

$$h_j = \frac{E(\Xi)}{E(\Xi) + E(\Theta_j)\gamma_j} \quad (3.10)$$

В конечном итоге получим систему из 6 зависимых уравнений (3.4-3.8, 3.10), которые будут решаться с помощью итерационного метода с фиксированной точкой.

Если некоторые пользователи могут выйти из сот, не завершив свою передачу, будет нормальным считать, что некоторые пользователи могут входить в соты извне, при этом некоторый объем данных остается для передачи. Чтобы учесть внешние передачи обслуживания, можно просто добавить к скорости λ_j внешней зоны соты скорость пользователей, осуществляющих передачу обслуживания извне, обозначенную как Λ_{0j} :

$$\lambda_j = \Lambda_j + \Lambda_{j-1j} + \Lambda_{0j} \quad (3.11)$$

Теперь возникает вопрос: как можно оценить Λ_{0j} ? Упомянутое ранее решение, заключающееся в том, что Λ_{0j} является известным входным параметром, не является удовлетворительным. Предложено альтернативное решение, которое состоит в предположении, что рассматриваемые соты вовлечены в сеть статистически эквивалентных сот. Если это верно, то среднее число активных пользователей по единицам времени, которые совершают передачу данных из сот во внешнюю среду, должно быть равно среднему числу активных пользователей по единицам времени, которые совершают передачу данных из внешней среды в соты. То есть, должно быть $\Lambda_{0j} = \Lambda_{j0}$, и эта величина может быть просто связана с вероятностью передачи зоны J рассматриваемой соты как: $\Lambda_{j0} = \lambda_j h_j P_{j0}$. В результате, чтобы учесть соты, вовлеченную в сеть эквивалентных сот, последнее уравнение системы (3.4) должно быть заменено на:

$$\lambda_j = \frac{1}{1 - h_j P_{j0}} (\Lambda_j + \Lambda_{j-1j}) \quad (3.12)$$

Однако важно отметить, что эта система, учитывающая хендоверы извне, не всегда стабильна. Как показано в работе [26], условие устойчивости этой системы не зависит от скорости V пользователей и эквивалентно условию устойчивости системы, в которой пользователи имеют бесконечную скорость. Она может быть выражена следующим образом: $\Lambda < \frac{C_\infty}{E(\Sigma)}$, где C_∞ -

эквивалентная мощность системы, в которой пользователи имеют бесконечную скорость.

Теперь можно вывести из модели производительность активного пользователя в рассматриваемой соте. Во-первых, можно перерисовать модель очереди PS, как показано на рисунке 3.2 для особого случая, когда $J = 2$, четко показывая петли обратной связи активных пользователей, выполняющих передачу обслуживания из одной зоны в другую, и активных пользователей, приходящих извне.

Обозначено через λ общую скорость поступления запросов на соединение в соте. λ отличается от скорости Λ новых запросов на подключение, которые появляются в соте, поскольку он должен включать пользователей, которые перемещаются извне соты, оставаясь при этом активными:

$$\lambda = \Lambda + \Lambda_{0J} = \Lambda + \Lambda_{J0} \quad (3.13)$$

Исходя из классических результатов очередей PS, можно рассчитать среднее количество клиентов каждого класса, соответствующее среднему количеству активных пользователей в каждой зоне:

$$\bar{Q}_j = \frac{\rho_j}{1 - \rho} \quad (3.14)$$

И получается по закону Литтла среднее время \bar{R} проведенное активным пользователем в соте, начиная с момента появления нового активного пользователя в соте (либо из-за нового требования соединения, либо из-за передачи активного пользователя от снаружи) и завершается либо тогда, когда пользователь завершает свою передачу в соты перед тем, как покинуть ее, либо покидает соты до завершения своей передачи:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^J \bar{Q}_j}{\lambda} \quad (3.15)$$

После определяется q_j как вероятность того, что активный пользователь находится в зоне j :

$$q_j = \frac{\bar{Q}_j}{\sum_{j=1}^J \bar{Q}_j} \quad (3.16)$$

Затем нужно рассчитать среднюю пропускную способность $\bar{\gamma}$, полученную активным пользователем за все время его пребывания в соте:

$$\bar{\gamma} = \sum_{j=1}^J q_j \bar{\gamma}_j \quad (3.17)$$

Из $\bar{\gamma}$ и R можно вывести \bar{X} , общее число битов, передаваемых в среднем Пользователем в течение всего его пребывания в соте:

$$\bar{X} = \bar{\gamma} R \quad (3.18)$$

Конечно, $\bar{X} \leq E(\Sigma)$.

Наконец, оценено глобальная вероятность передачи H , т. е. вероятность того, что активный пользователь покинет соты до завершения ее передачи, независимо от количества зон, которые он посетил за это время. H рассчитывается как отношение между средним числом активных пользователей, покидающих соты в единицу времени (из зоны J), и общим числом новых активных пользователей, появляющихся в соте в единицу времени:

$$H = \frac{\bar{Q}_j \frac{P_{j0}}{E(\Theta_j)}}{\lambda} \quad (3.19)$$

3.4 Границы производительности

Производительность рассматриваемой системы с мобильными пользователями, физически движущимися с некоторой скоростью V , ограничена производительностью двух систем. В первом случае пользователи статичны ($V = 0$), а во втором-имеют бесконечную скорость ($V = \infty$)

Модель, соответствующая первой системе, где пользователи статичны, представляет собой классическую многоклассную очередь PS с параметрами

$\lambda_j = \Lambda_j$ и $\mu_j = \frac{C_j}{E(\Sigma)}$. Известно, что она эквивалентна очереди PS одного класса

со скоростью поступления $\lambda = \sum_{j=1}^J \lambda_j$ и скоростью обслуживания μ , равной

среднему гармоническому значению каждой скорости обслуживания:

$\frac{1}{\mu_s} = \sum_{j=1}^J \frac{p_j}{\mu_j}$, p_j - вероятность появления нового спроса на соединение в зоне j .

Это соответствует соте с одной зоной, имеющей эквивалентную емкость C_s , равную среднему гармоническому C_j

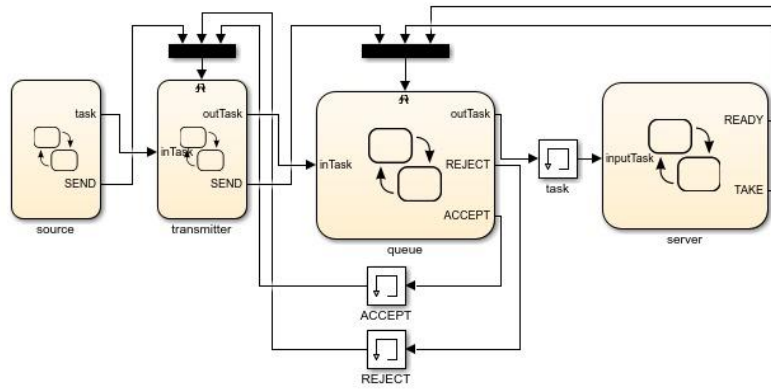


Рисунок 3.2 – Иллюстрация передачи данных между зонами и из зоны

$$(3.20) \quad \frac{1}{C_s} = \sum_{j=1}^J \frac{p_j}{C_j}$$

В этой системе статические пользователи получают среднюю пропускную способность $\bar{\gamma}_s$ во время их передачи, заданную по формуле:

$$(3.21) \quad \bar{\gamma}_s = C_s(1 - \rho)$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\mu_s}$, пока выполняется условие устойчивости $\lambda < \mu_s$. Рисунок 3.3 иллюстрирует эту первую границу красным цветом. Как показано в [26,31], вторая система, где пользователи имеют бесконечную скорость, эквивалентна одноклассовой очереди PS с скоростью прибытия $\lambda = \sum_{j=1}^J \lambda_j$, а скорость обслуживания μ_∞ равна среднему арифметическому каждой скорости обслуживания: $\mu_\infty = \sum_{j=1}^J \alpha_j \mu_j$, где $\mu_j = \frac{C_j}{E(\Sigma)}$ и α_j -вероятность того, что пользователь физически находится в зоне j (активен или нет) и задается по формуле:

$$(3.22) \quad \alpha_j = \prod_{i=1}^{j-1} \frac{E(\Theta_{i+1})P_{i+1}}{E(\Theta_i)P_{i+1}} \alpha_1, j = 2, \dots, J$$

Рисунок 3.3 иллюстрирует эту вторую границу синим цветом, соответствующую очереди PS с эквивалентной емкостью C_∞ и средней пропускной способностью пользователей $\bar{\gamma}_\infty$, заданной по формуле:

$$(3.23) \quad C_\infty = \sum_{j=1}^J \alpha_j C_j \quad \text{и} \quad \bar{\gamma}_\infty = C_\infty \left(1 - \frac{\Lambda E(\Xi)}{C_\infty}\right)$$

Производительность системы, в которой пользователи имеют заданную скорость V , например, пропускная способность, полученная пользователями во время их пребывания в сети, лежит между этими двумя границами. Как показано на рисунке 3.4, пропускная способность начинается со значения C_V , когда нагрузка очень мала, и сходится к пределу $\frac{C_\infty}{E(\Sigma)}$ (то же самое для любой скорости V), когда нагрузка очень высока. Для того чтобы рассчитать величину C_V , рассмотрим непрерывную временную Марковскую цепь, представленную на рисунке 3.5 (для $J = 4$ зон) и моделирующую поведение системы, подаваемой на очень низкую нагрузку, т. е. когда в сети находится не более одного клиента. Состояния j этой непрерывной временной Марковской цепи соответствуют одному клиенту в зоне j , а состояние 0 – пустой системе.

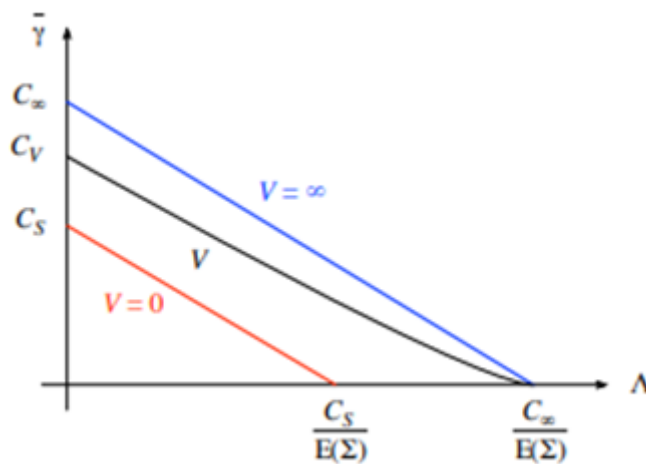


Рисунок 3.3 – Границы пропускной способности, полученные пользователями в сети

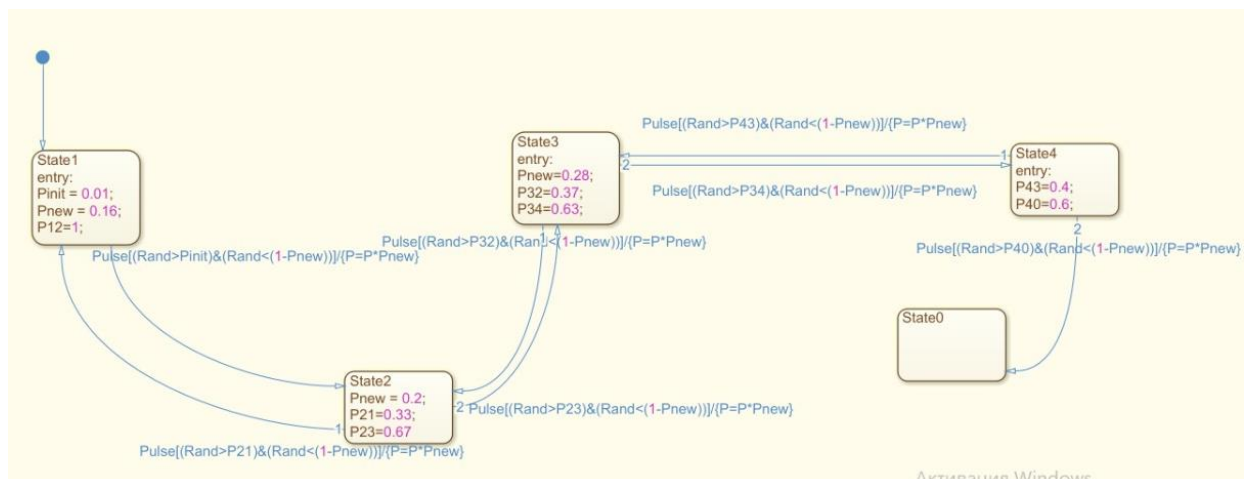


Рисунок 3.4 – Непрерывную временную Марковскую цепь

C_V может быть выражено из стационарной вероятности π_i этого непрерывная временная Марковская цепь как в отношении (3.24), и

соответствует среднему арифметическому емкости C_j , взвешенной по вероятностям β_j , что активный пользователь (предположительно, один в соте) находится в зоне j :

$$C_V = \sum_{j=1}^J \beta_j C_j \quad (3.24)$$

$$\text{где } \beta_j = \frac{\pi_j}{\sum_{i=1}^J \pi_i}, j = 1, \dots, J$$

Надо обратить внимание, что результат не зависит от скорости δ , появляющейся в этом непрерывном временном Марковской цепи. Наконец, можно легко проверить, что для любой скорости V пользователей: $C_S < C_V < C_\infty$, $C_V \rightarrow C_S$ при $V \rightarrow 0$ и $C_V \rightarrow C_\infty$ при $V \rightarrow \infty$.

3.5 Сквозная производительность пользователей

Рассмотрено случай сети статистически эквивалентных сот и определено сквозная производительность мобильных пользователей, возможно, осуществляя хэндоверы внутри и между сотами. Поскольку предположено, что размер данных, подлежащих передаче пользователями, распределяется по экспоненте, когда пользователь выполняет передачу обслуживания и покидает соты, не завершив свою передачу, данные, оставшиеся для передачи, имеют такое же распределение, что и исходное (без памяти свойство экспоненциального распределения). В результате число n_h хэндоверов, которое должен выполнить пользователь, и количество n_c сот, которые пользователь должен посетить до завершения своей передачи, геометрически распределены с параметром H (начиная с 0 для первого и из 1 для второго), со средствами, предоставленными:

$$\bar{n}_h = \frac{H}{1-H} \text{ и } \bar{n}_c = \frac{1}{1-H} \quad (3.25)$$

Обозначено продолжительность процедуры передачи обслуживания, то есть продолжительность прерывания обслуживания, когда пользователь меняет соту. С помощью соотношения (3.26) можно оценить среднее время сквозной передачи \bar{T} пользователя, определяемое как среднее время, необходимое пользователю для завершения полной передачи, независимо от количества сот и количества зон в каждой соте, которые посетил пользователь во время его передачи:

$$\bar{T} = \bar{n}_c \bar{R} + \bar{n}_h t_h \quad (3.26)$$

Наконец, получено среднюю сквозную пропускную способность $\bar{\Gamma}$, которую пользователь получает во время полной передачи, как:

$$\bar{\Gamma} = \frac{E(\Sigma)}{\bar{T}} \quad (3.27)$$

3.6 Результаты работы

Сравнено результаты, представленные моделями, с результатами, полученными с помощью самодельного симулятора дискретных событий, разработанного в Matlab. Предположено, что сота использует 100 блоков Resource для канала нисходящей линии связи и предлагает пользователям четыре MCS (28, 23, 16, 6). Это приводит к четырем зонам передачи с соответствующей пропускной способностью $C_1 = 25$ Мбит/с, $C_2 = 23$ Мбит/с, $C_3 = 20$ Мбит/с и $C_4 = 18$ Мбит/с [29,30]. Установлена константа $K = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$ и принята $E(\Sigma) = 10$ МБ для среднего объема данных, передаваемого всеми пользователями. Использован следующий радиус, соответствующий модели концентрических окружностей сот: $R_1 = 100$ м, $R_2 = 150$ м, $R_3 = 200$ м и $R_4 = 250$ м, R_4 приблизительно соответствует рабочему диапазону антенны LTE в городской среде. Среднее время пребывания в каждой зоне $E(\Theta_j)$ задана уравнением (3.2). Согласно оценкам, приведенным в разделе 3.3, результирующая вероятность представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры соты

Параметры	1 Зона	2 Зона	3 Зона	4 Зона
Новые вероятности соединения p_j	0.16	0.20	0.28	0.36
Движущиеся вероятности P_{ij}	$P_{12}=1$	$P_{21}=0.33$ $P_{23}=0.67$	$P_{32}=0.37$ $P_{34}=0.63$	$P_{43}=0.40$ $P_{40}=0.60$

На рисунках 3.4, 3.5 и 3.6 соответственно показано сравнение пропускной способности пользователей, вероятности передачи обслуживания и времени пребывания пользователей в рассматриваемой соте в зависимости от общей скорости поступления новых соединений. Выбрана разные значения скорости V

Видно, что предсказанная модель очень близка к результатам моделирования. Средняя относительная ошибка между характеристиками, прогнозируемыми моделью, и результатами, полученными путем моделирования, составляет в среднем около 8%, и в худшем случае эта ошибка остается менее 22%.

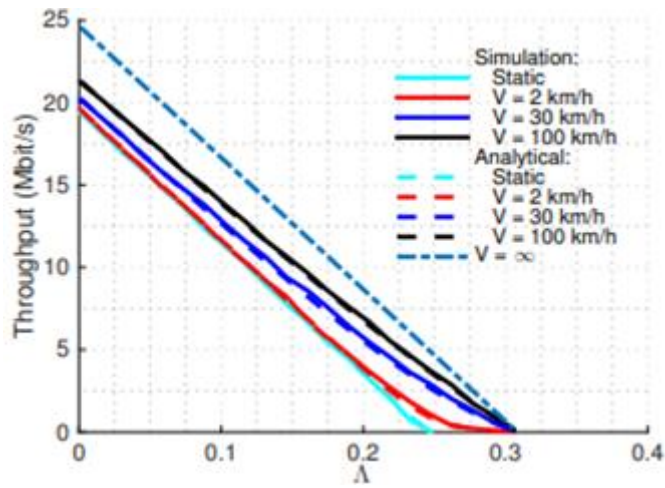


Рисунок 3.5 – Пропускная способность, получаемая активными пользователями в зависимости от общей скорости поступления новых требований к подключению.

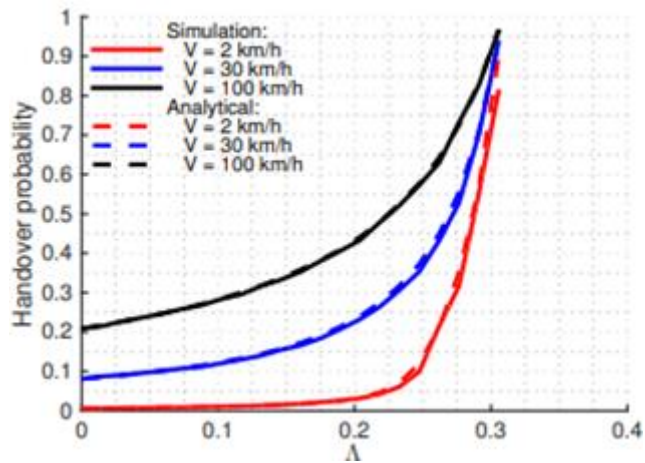


Рисунок 3.6 – Вероятность передачи обслуживания в зависимости от общей скорости поступления новых запросов на подключение.

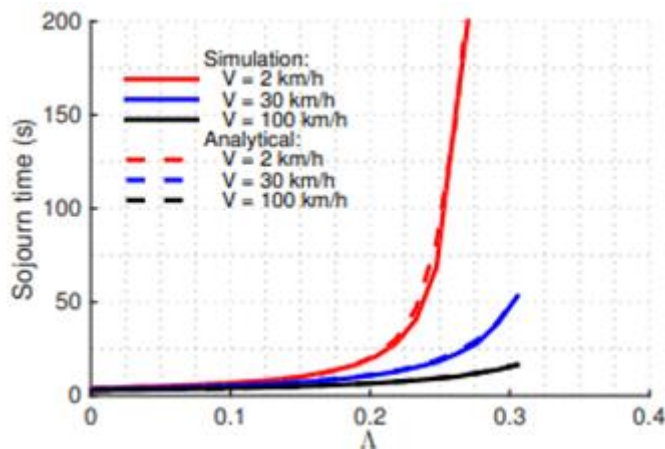


Рисунок 3.7 – Среднее время пребывания в рассматриваемой сети как функция от общей скорости поступления новых соединений.

Как объясняется в разделе 3.4, пропускная способность мобильных пользователей (рисунок 3.4) ограничена пропускной способностью, получаемой, когда все пользователи статичны (нижняя граница), и пропускной способностью, получаемой с бесконечной скоростью (верхняя граница). Как и ожидалось, мобильность пользователей улучшает время пребывания пользователей (рисунок 3.6), пропускную способность C_v , пропускную способность и стабильность пользователей, которая составляет $<0,24$ для системы со статическими пользователями и $<0,30$, когда пользователи мобильны. В этом последнем случае условие стабильности не зависит от скорости пользователя. Причина этого состоит в том, что выигрыш от пользователей, переходящих из плохих условий канала в хорошие, перевешивает потери от пользователей, перемещающихся в обратном направлении. Пользователи в благоприятных условиях имеют больше шансов завершить свои переводы, прежде чем перейти в худшее место.

Важно отметить, что, это улучшение сопровождается увеличением скорости передачи обслуживания (рисунок 3.5). Передача N начинается с начального значения, которое зависит от скорости и увеличивается с Λ . N сходится к 1, когда $\Lambda \rightarrow 0,30$.

Исследована производительность конечных пользователей в системе. На рисунке 3.7 показано количество посещенных сот в сети как функция от общей скорости поступления новых требований к соединению для разных значений скорости пользователей. С учетом уравнения (3.25) и рисунка 3.5; На количество посещенных сот сильно влияет скорость пользователей, и она все больше зависит от скорости поступления новых требований к соединению.

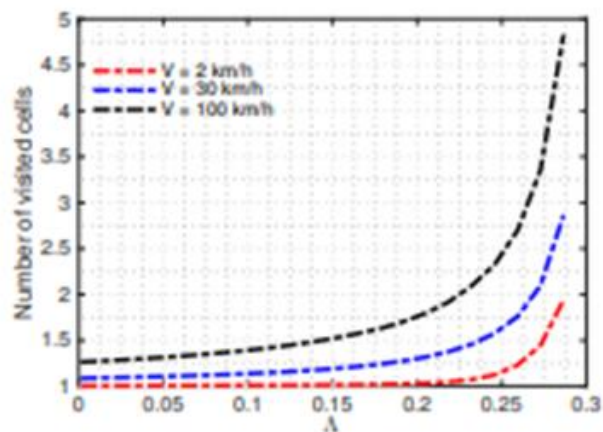


Рисунок 3.8 – Среднее количество посещенных сот в зависимости от общей скорости поступления новых требований к подключению

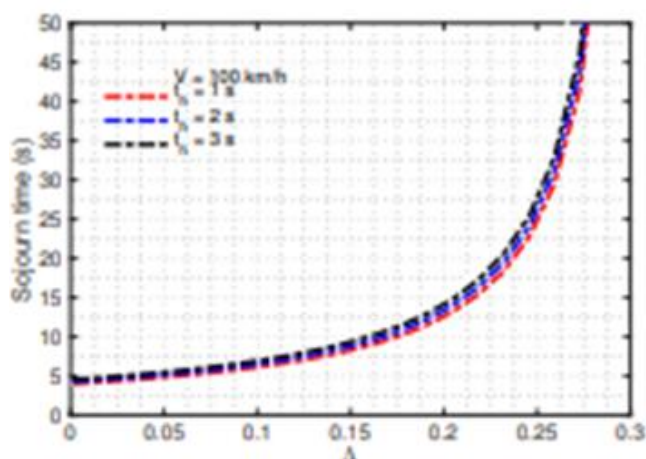


Рисунок 3.9 – Среднее время пребывания в сети в зависимости от общей скорости поступления новых требований к подключению.

Поскольку в 5G поддерживается только жесткая передача обслуживания, время, необходимое для завершения передачи, должно учитывать прерывание обслуживания из-за процедуры передачи обслуживания.

На рисунке 3.8 показано время пребывания пользователей в сети (время, которое пользователь должен завершить передачу), все еще в зависимости от общей скорости поступления новых требований соединения Λ . Выбрана три значения для продолжительности процедуры передачи t_h (1 с, 2 с, 3 с) и 100 км/ч для скорости пользователя.

Время, затрачиваемое пользователем на завершение перевода, увеличивается с общей скоростью поступления Λ . На это время также влияет продолжительность процедуры передачи обслуживания

Также рассмотрена влияние скорости пользователей на производительность. На рисунке 3.9 представлена общая скорость поступления новых соединений $\Lambda = 0,15$, пропускная способность как функция скорости пользователя. Надо обратить внимания на то, что по этой кривой значительный прирост мобильности сравнивается со сценарием, в котором все пользователи статичны. В частности, пропускная способность мобильных пользователей является функцией увеличения скорости, ограниченной статической пропускной способностью пользователей и пропускной способностью, получаемой, если пользователи имели бесконечную скорость

Рисунок 3.10 является аналогом рисунка 3.9 с учетом продолжительности прерывания обслуживания из-за процедуры хэндовера, которая установлена в 2с. Эта кривая подчеркивает влияние передачи обслуживания на увеличение пропускной способности. В частности, для скорости менее 420 км/ч мобильность приводит к увеличению пропускной способности; и выше этого значения наблюдается потеря пропускной

способности по сравнению со сценарием только со статическими пользователями.

Эти числовые результаты показывают, как скорость передачи обслуживания уравнивает улучшение производительности на уровне потока, и доказывают, что прирост мобильности является немонотонной функцией скорости пользователя.

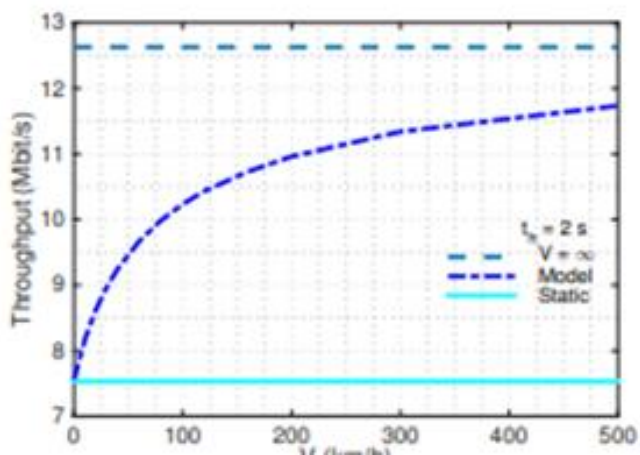


Рисунок 3.10 – Средняя пропускная способность, получаемая активными пользователями в зависимости от скорости пользователей при $\Lambda = 0,15$.

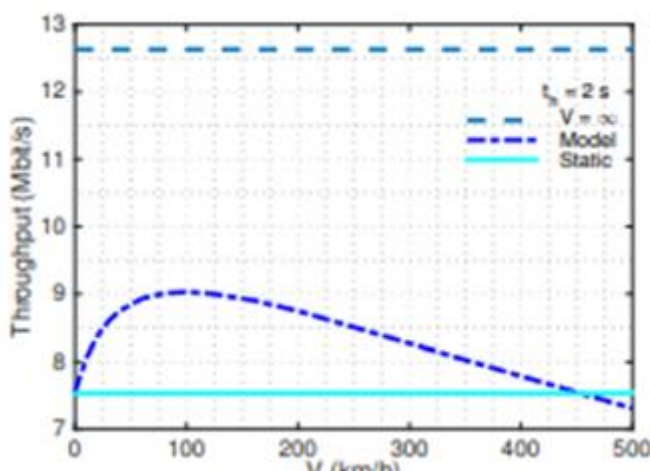


Рисунок 3.11 - Средняя пропускная способность, получаемая активными пользователями в зависимости от скорости пользователей с учетом прерывания обслуживания из-за процедуры передачи данных при $\Lambda = 0,15$.

Заключение

В первой главе магистерской диссертации приведен анализ современного состояния сети 5G. Основные отличия сетей связи пятого поколения от существующих требует более высокую скорость передачи данных, дает возможность подключить больше устройств, а также масштабная виртуализация. Для реализации таких требований требуется применения новых технологий таких как виртуализация сетевых функции VNF, взаимодействие устройство-устройство D2D.

Вторая глава посвящена определению основных характеристик сетей 5G/IMT-2020 и их сопоставление с действующими сетями IMT. Приведены общее описание и услуг сервисов предполагаемых для предоставления на сетях 5G. Описано топологическое решение для радиоинтерфейсов и для сетевой инфраструктуры 5G.

Рассмотрено взаимоотношение между 5G, IoT, а также LPWAN.

В третьей главе разработана модель очереди PS для оценки производительности сотовых сетей передачи данных с политикой циклического перебора, учитывающей внутри- и между сотовую мобильность пользователей. Показали, модель согласуется с известными аналитическими границами, соответствующими статическим пользователям или бесконечной скорости, и обеспечивает очень хорошую точность для более общих скоростей. Модель подтверждает, что мобильность может улучшить производительность пользователей в данной соте, и позволяет количественно оценить выигрыш. Он также обеспечивает сквозную производительность пользователей в сети статистически эквивалентных сот и показывает, что производительность больше не является монотонной функцией скорости.

Подход, использованный в этой диссертационной работе, заключающийся в отделении модели мобильности от сотовой модели, может быть применен ко многим другим модельным системам, например, к связанным моделям PS очереди для сетей взаимодействующих базовых станций, или к моделям для более общих политик планирования.

Список литературы

1 [https://itechinfo.ru/content/%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0-%D1%81%D0%B5%D1%82%D0%B8-5g#:~:text=%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0%20%D1%81%D0%B5%D1%82%D0%B8%205G%20%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%B0%D1%82%D1%8B%D0%B2%D0%B0%D0%B5%D1%82%D1%81%D1%8F%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F,SDN%20%2D%20Software%20Defined%20Networking\).](https://itechinfo.ru/content/%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0-%D1%81%D0%B5%D1%82%D0%B8-5g#:~:text=%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0%20%D1%81%D0%B5%D1%82%D0%B8%205G%20%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%B0%D1%82%D1%8B%D0%B2%D0%B0%D0%B5%D1%82%D1%81%D1%8F%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F,SDN%20%2D%20Software%20Defined%20Networking).)

2 [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:5G_\(пятое_поколение_мобильной_связи\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:5G_(пятое_поколение_мобильной_связи))

3 SONATA project Deliverable D2.2 “Architecture design,” available at: <http://sonatanfv.eu/sites/default/files/sonata/public/contentfiles/pages/SONATAD2.2ArchitectureandDesign.pdf>

4 <http://www.iksmedia.ru/articles/5505529-Govorim-5G-podrazumevaem-transportn.html>

5 Концепция создания и развития сетей 5G/ИМТ-2020 в Российской Федерации (Проект)

6 Приказ Минкомсвязи России от 27.12.2019 N 923 "Об утверждении Концепции создания и развития сетей 5G/ИМТ-2020 в Российской Федерации"

7 Емжаева К. Моделирование LoRaWAN в MatLab с использованием Simulink . – М.: Поиск, №4-2019(декабрь). – С.:

8 Кумаритова Д. Л., Киричек Р. В. Обзор и сравнительный анализ технологий LPWAN сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Том 4. № 4. С. 33–48.

9 <https://ru.wikipedia.org/wiki/5G>

10 Kirichek R., Kulik V. Long-Range Data Transmission on Flying Ubiquitous Sensor Networks (FUSN) by Using LPWAN Protocols // Communications in Computer and Information Science. 2016. Vol. 678. pp. 442–453. DOI: 10.1007/978-3-319-51917-3_39.

11 Кулик В. А., Киричек Р. В., Бондарев А. Н. Методы исследования беспроводных каналов связи Интернета Вещей в условиях совместной работы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 1 (9). С. 106–114.

12 Кулик В. А., Выборнова А. И. Методы комплексного тестирования Интернет Вещей // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN). 2016. С. 305–312.

13 Гимранов Р. Р., Киричек Р. В., Шпаков М. Н. Технология межмашинного взаимодействия LoRa // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 2 (10). С. 62–73. URL: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/2-15.pdf>

14 Kirichek R. The Model of Data Delivery from the Wireless Body Area Network to the Cloud Server with the Use of Unmanned Aerial Vehicles // 30th European Conference on Modelling and Simulation Proceedings (ECMS). 2016. pp. 603–606. DOI: 10.7148/2016-0603.

15 Nolan K. E., Guibene W., Kelly M. Y. An Evaluation of Low Power Wide Area Network Technologies for the Internet of Things // International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). 2016. pp. 439–444. DOI: 10.1109/IWCMC.2016.7577098.

16 A. J. Goldsmith and S.-G. Chua, “Adaptive coded modulation for fading channels,” *IEEE Transactions on Communications*, 1998.

17 U. Ayesta, M. Erausquin, and P. Jacko, “A modeling framework for optimizing the flow-level scheduling with time-varying channels,” *Performance Evaluation*, vol. 67, no. 11, pp. 1014–1029, 2010.

18 T. Bonald, “A score-based opportunistic scheduler for fading radio channels,” in *European Wireless*, 2004.

19 S. C. Borst, A. Proutiere, and N. Hegde, “Capacity of wireless data networks with intra-and inter-cell mobility,” in *INFOCOM*, 2006.

20 T. Bonald, S. C. Borst, and A. Proutiere, “How mobility impacts the flow-level performance of wireless data systems,” in *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, IEEE, 2004.

21 T. Bonald, S. Borst, N. Hegde, M. Jonckheere, and A. Proutiere, “Flowlevel performance and capacity of wireless networks with user mobility,” *Queueing Systems*, 2009.

22 S. C. Borst, N. Hegde, and A. Proutiere, “Mobility-driven scheduling in wireless networks,” in *INFOCOM 2009*, pp. 1260–1268, IEEE, 2009.

23 M. K. Karray, “User’s mobility effect on the performance of wireless cellular networks serving elastic traffic,” *Wireless Networks*, 2011.

24 J. Kim, B. Kim, J. Kim, and Y. H. Bae, “Stability of flow-level scheduling with markovian time-varying channels,” *Performance Evaluation*, vol. 70, no. 2, pp. 148–159, 2013.

25 A. Jdidi and T. Chahed, “Flow-level performance of proportional fairness with hierarchical modulation in ofdma-based networks,” *Computer Networks*, 2011.

26 N. Abbas, T. Bonald, and B. Sayrac, “Opportunistic gains of mobility in cellular data networks,” in *13th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, 2015, pp. 315–322, IEEE, 2015.

27 T. Bonald and A. Proutiere, “Wireless downlink data channels: user performance and cell dimensioning,” in *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 339–352, ACM, 2003.

28 C. Tarhini and T. Chahed, “Qos-oriented resource allocation for streaming flows in ieee802. 16e mobile wimax,” *Telecommunication Systems*, vol. 51, no. 1, pp. 65–71, 2012.

29 B. Baynat, R.-M. Indre, N. Nya, P. Olivier, and A. Simonian, "Impact of mobility in dense lte-a networks with small cells," in IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 1–5, IEEE, 2015.

30 3GPP, "3gpp ts 36.213 v9.2.0 (2010-06): Physical layer procedures," 2010.

31 Bruno Baynat, Narcisse Nya Kamtchoum. Performance Model for 4G/5G Networks Taking into Account Intra- and Inter-Cell Mobility of Users. 41st IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN 2016), IEEE, Nov 2016, Dubai, United Arab Emirates. pp.212-215, 10.1109/LCN.2016.45. hal-01620458

Аббревиатура

5G – Fifth generation
QoS – Quality of service
IoT – Internet of Things
SDN – Software Defined Network)
NFV – Network Function Virtualization
COTS –Commercial Off The Shelf
eMBB – enhanced Mobile Broadband
URLLC – Ultra-Reliable and Low Latency Communications
mMTC – massive Machine Type Communications
AN – Access Network
CN – Core Network
NF – Network Function
AMF – Access and Mobility Management Function
SMF – Session Management Function
UPF – User Plane Function
UDM – Unified Data Management
UDR – Unified Data Repository
UDSF – Unstructured Data Storage Function
NSSF – Network Slice Selection Function
PCF – Policy Control Function
NEF – Network Exposure Function
NRF – NF Repository Function
AF – Application Function
SMSF – SMS Function
N3IWF – Non-3GPP InterWorking Function
RRH – Remote Radio Head
BBU – Battery Backup Unit
D-RoF – Digital Radio over Fiber
SMF – Session Management Function
UPF – User Plane Function
ARP – Address Resolution Protocol
UDM – Unified Data Management
UDR – Unified Data Repository
UDSF – Unstructured Data Storage Function
NSSF – Network Slice Selection Function
PCF – Policy Control Function
NEF – Network Exposure Function
NRF - NF Repository Function
AF - Application Function
IMEI (International Mobile Station Equipment Identity

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Требования к некоторым применениям типов услуг 5G/IMT-2020 и возможность предоставления услуг на существующих сетях

Тип услуги	Применение	Основные применения	Возможность предоставления на сетях LTE Advanced	Требования к покрытию
Сверхширокополосная мобильная связь (eMBB)	Передача видео со сверхвысоким разрешением (4K, 8K), 3D видео (в т.ч. широкоэмитательные услуги)	Сверхвысокая скорость радиосоединения, низкая задержка (видео реального времени). Задержка ≤ 200 мс	1. LTE Advanced - возможно при невысокой концентрации абонентов (суммарная пропускная способность до 100 Гбит/с/км ²) 2. От 100 Гбит/с/км ² до 1000 Гбит/с/км ² – только сети 5G/IMT-2020	Ограниченное
	Виртуальная реальность (применение VR в производстве, телеприсутствие и прочие VR-сервисы). Дополненная реальность	Сверхвысокая скорость радиосоединения, сверхнизкая задержка	1. LTE Advanced - возможно при невысокой концентрации абонентов (суммарная пропускная способность до 100 Гбит/с/км ²) и требованиях по задержке до 7 мс. 2. Требования по скорости свыше 4 Гбит/с и задержке ≤ 2 мс – только сети 5G/IMT-2020	Ограниченное
	Тактильный интернет	Сверхнизкая задержка	Только сети 5G/IMT-2020	Ограниченное
	Игры в облаке (VR-сервисы с коммуникациями)	Сверхвысокая скорость радиосоединения. Низкая задержка ≤ 7 мс	Только сети 5G/IMT-2020	Ограниченное
	Мобильная «последняя миля» - альтернатива оптической линии связи до квартиры	Высокая скорость радиосоединения до 150 Мбит/с	LTE Advanced - возможно при невысокой концентрации абонентов (суммарная пропускная способность до 100 Гбит/с/км ²)	Ограниченное
	Беспроводная связь в высокоскоростных поездах	Скорость до 500 км/ч. Задержка ≤ 10 мс	LTE Advanced - возможно	Отдельные транспортные артерии
Услуги передачи данных в условиях высокой	Суммарная пропускная способность до 100	Только сети 5G/IMT-2020	Ограниченное	

	концентрации абонентов	Гбит/с/км ²		
--	------------------------	------------------------	--	--

Продолжение приложения А

Тип услуги	Применение	Основные применения	Возможность предоставления на сетях LTE Advanced	Требования к покрытию
Сверхширокополосная мобильная связь (eMBB)	Подключенные счетчики воды, электроэнергии и пр.	Возможность преодоления препятствий	LTE Advanced - возможно – до 100 тыс. устройств на кв. км	Региональное или республиканское
	Умный дом (подключенные бытовые устройства и пр.)	Возможность преодоления препятствий	LTE Advanced - возможно – до 100 тыс. устройств на кв. км.	Региональное или республиканское
	Умный офис	Функционирование в условиях чрезвычайных ситуаций, возможность преодоления препятствий, высокая надежность	LTE Advanced - возможно – до 100 тыс. устройств на кв. км.	Региональное или республиканское
Массовая межмашинная связь (MTC)	Умный город (системы видеонаблюдения и пр.)	Работа на коротких и длинных дистанциях, функционирование в условиях чрезвычайных ситуаций, работа в условиях быстро движущихся объектов и наличия препятствий, высокая надежность радиосоединения, возможность преодоления препятствий	1. LTE Advanced - возможно – до 100 тыс. устройств на кв. км. 2. Полномасштабный «Умный город» в крупных городских агломерациях с высокой плотностью населения – только сети 5G/IMT-2020	Городское

--	--	--	--	--

Продолжение приложения А

Тип услуги	Применение	Основные применения	Возможность предоставления на сетях LTE Advanced	Требования к покрытию
Массовая межмашинная связь (МIoT)	Сенсорные сети (промышленные, коммерческие и т.д.)	Работа на коротких и длинных дистанциях, функционирование в условиях чрезвычайных ситуаций, работа в условиях быстродвижущихся объектов и наличия препятствий, Mesh сеть	1. LTE Advanced - возможно – до 100 тыс. устройств на кв. км. 2. Сценарии со сверхвысокой концентрацией датчиков IoT в отдельных зонах (производство, инфраструктура) – только сети 5G/IMT-2020	Ограниченное
	Удаленный контроль перевозок (мониторинг транспортных средств)	Работа на коротких и длинных дистанциях, функционирование в условиях чрезвычайных ситуаций, работа в условиях быстродвижущихся объектов и наличия препятствий	LTE Advanced - возможно	Региональное или федеральное
	Частичная промышленная автоматизация, мониторинг и контроль	Надежность и высокая скорость радиосоединения, низкая задержка, работа на коротких и длинных дистанциях, функционирование в условиях чрезвычайных ситуаций	1. Удаленный контроль производственного оборудования и объектов - возможно LTE Advanced 2. Smart Grid – («умные» сети) - управление производством, передачей и потреблением электроэнергии - возможно LTE Advanced	Региональное или федеральное
Сверхнадежная связь (URLLC)	Полная промышленная автоматизация, в том числе управление ключевыми энергетическими объектами, удаленно управляемое оборудование	Сверхвысокая надежность и высокая скорость радиосоединения, сверхнизкая задержка, работа на коротких и длинных дистанциях, функционирование в условиях чрезвычайных ситуаций	Только сети 5G/IMT-2020	Ограниченное

--	--	--	--	--

Продолжение приложения А

Тип услуги	Применение	Основные применения	Возможность предоставления на сетях LTE Advanced	Требования к покрытию
Сверхнадежная связь (URLLC)	Критически важные приложения. Электронное здравоохранение (удаленная хирургия при помощи роботов и др.)	Сверхвысокая надежность и высокая скорость радиосоединения, низкая или сверхнизкая задержка	Только сети 5G/IMT-2020	Ограниченное
	Критически важные приложения (работа в опасных средах, спасательные миссии)	Высокая или сверхвысокая надежность и высокая скорость радиосоединения, низкая или сверхнизкая задержка, работа на коротких и длинных дистанциях, функционирование в условиях чрезвычайных ситуаций, возможность преодоления препятствий	1. Дроны (наблюдение, доставка) - возможно LTE Advanced 2. Дроны, спасательные роботы (real-time - поиск людей, тушение пожаров и пр.) - только сети 5G/IMT-2020	Региональное или республиканское
	Поддержка транспорта. Требуется непосредственное участие водителя (прямые коммуникации между устройствами, предиктивная аналитика движения, оповещения об опасных ситуациях, анализ плотности трафика)	Высокая надежность и высокая скорость радиосоединения, низкая задержка, работа на коротких и длинных дистанциях, функционирование в условиях чрезвычайных ситуаций, работа в условиях быстро движущихся объектов и наличия препятствий	Частичная автоматизация транспортной системы - возможно LTE Advanced	Региональное или республиканское
	Беспилотный транспорт (полнофункциональная интеллектуальная поддержка транспортной системы, в том числе автоматизация вождения)	Сверхвысокая надежность и высокая скорость радиосоединения, сверхнизкая задержка, работа на коротких и длинных дистанциях, функционирование в условиях чрезвычайных ситуаций.	Только сети 5G/IMT-2020	Региональное или республиканское

