

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и Информационных технологий

Кафедра Электроники, телекоммуникации и космических технологий

Кадышев Т.Е.

«Проектирование технологию динамического разделения спектра DSS»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

По образовательной программе 6B06201 – Телекоммуникация

Алматы 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломной работе

На тему: «Проектирование технологии динамического разделения спектра DSS»

Образовательная программа: 6B06201 – Телекоммуникация

Выполнил, студент

 Кадышев Т.Е.

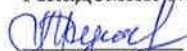
Рецензент:

Научный руководитель:
Старший преподаватель

К.ф.м.н., профессор

НАО АУЭС имени Г.Даукеева

Академик МАИН

 Хизирова М.А.

"29" мая 2025 г.

 Джунусов Н.А.
"29" мая 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт автоматики и информационных технологий
Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»
ОП «6B06201 Телекоммуникация»



ЗАДАНИЕ на выполнение дипломной работы

Обучающемуся *Кадышев Тамерлан Ерболулы*

Тема: *Проектирование технологии динамического разделения спектра DSS*

Утверждена приказом Ректора Университета № *16-П/Р* от *29.01.25*

Срок сдачи законченной работы *“30” апреля* 2025г.

Исходные данные к дипломной работе: 4G-LTE может поддерживать только одну десятую пропускной способности 5G-NR; Полный электромагнитный спектр составляет от 3 Гц (очень низкая частота) до 300 Гц; Полный спектр (гамма-лучи) для беспроводной связи находится в диапазоне от 20 кГц до 300 ГГц; Скорость загрузки 20 Гбит/с сети 5G; DSS работает в основном в диапазоне 700–2700 МГц; DSS приводит к потере 10–20 процентов пропускной способности LTE и 5G; Технология DSS обеспечивает одновременную работу сетей LTE и NR на одной несущей; При передаче LTE поднесущие разносят на интервалы 15 кГц, а в NR используются интервалы 15 или 30 кГц.

Краткое содержание дипломной работы:

- Анализ технологии динамического разделения спектра DSS
- Реализация вариантов построения технологии DSS сетей LTE, 5G и NR
- Динамическое использование спектра LTE и NR для развертывания 5G
- Расчет параметров сетей LTE, 5G и NR

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- Проектируемая схема реализации динамического разделения спектра DSS
- Блок-схема развертывания сети 5G и NR
- Рисунок – Виды технологий DSS
- Рисунок – Традиционная схема радиосвязи и схема на основе DSS
- Рисунок – Механизмы опции технологий DSS
- Рисунок – Динамическое перераспределения частотного спектра, обеспечивающая совместную работу сетей LTE и NR

Рекомендуемая основная литература:

- 1) Тихвинский, В. О. Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G: проекты, технологии, архитектура / В. О. Тихвинский, С. В. Терентьев, В. А. Коваль, Е. Е. Девяткин. Издание 2-е, дополненное. - Москва : Техносфера, 2024. - 532 с.
- 2) Далман Е, Парквалл С, Скёльд Й, 5G NR: технология беспроводного доступа следующего поколения, 1-е издание, август 2018 г.
- 3) Терентьев С.В., Коваль В.А. Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. М.: Медиа Паблишер, 2019. 376 с.
- 4) Тихвинский В. О. Сети IoT/M2M: технологии, архитектура и приложения/ В. О. Тихвинский, В. А. Коваль, Г. С. Бочечка, А. И. Бабин. Москва: Медиа Паблишер, 2017. - 375 с
- 5) NR and 4G LTE Coexistence, WhitePaper: A Comprehensive Deployment Guide to Dynamic Spectrum Sharing. MediaTek, Inc., 2020.

ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Анализ технологий динамического разделения спектра DSS	1.02.2025 - 1.03.2025	<i>вын</i>
Реализация вариантов построения технологии DSS сетей LTE, 5G и NR	1.03.2025 - 25.03.2025	<i>вын</i>
Динамическое использование спектра LTE и NR для развертывания 5G	25.03.2025 - 20.04.2025	<i>вын</i>
Расчет параметров сетей LTE, 5G и NR	20.04.2025 – 20.05.2025	<i>вын</i>
Формирование разделов и оформление дипломной работы, отзывов, рецензии и прохождения процедур антиплагиата в соответствии с требованиями СТ КазННТУ 09-2019	20.05.2025-05.06.2025	Окончательная версия ДР не более 30 стр (без учета приложений), DSSавка антиплагиата, отзыв и Рецензия

Научный руководитель  Джунусов Н.А.

Задание принял к исполнению обучающийся  Кадышев Т.Е.

Дата « 28 » декабря 2024 г.

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу
с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Теоретическая часть	Старший преподаватель Джунусов Н.А.	02.05.2025	
Основная часть	Старший преподаватель Джунусов Н.А.	02.05.2025	
Нормоконтролер	Старший преподаватель Досбаев Ж.М.	05.05.2025	

Научный руководитель  Джунусов Н.А.

Задание принял к исполнению обучающийся  Кадышев Т.Е. .

Дата «28» декабрь 2024 г.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыс қазіргі заманғы телекоммуникациялық жүйелерде динамикалық спектрді пайдалану (DSS) технологиясын әзірлеу және енгізу мәселелерімен айналысады. Мақсаты шектеулі спектр ресурстарын тиімді басқару үшін LTE және 5G NR желілерін ортақ тасымалдаушы жиілікте ортақ пайдаланудың тиімді құрылымын жобалау болып табылады. Жұмыс DSS архитектурасына талдау жасайды. Нақты уақыттағы жиілікті тарату алгоритмдерін ұсынады және Қазақстанның қалалық және ауылдық жағдайында технологияның тиімділігін бағалайды. Технологияны реттеу және масштабтау бойынша практикалық ұсыныстар берілген.

АННОТАЦИЯ

В диссертации рассматриваются вопросы разработки и внедрения технологии динамического использования спектра (DSS) в современных телекоммуникационных системах. Целью является разработка эффективной структуры для совместного использования сетей LTE и 5G NR на общей несущей частоте с целью эффективного управления ограниченными ресурсами спектра. В статье анализируется архитектура DSS, представлены алгоритмы распределения частот в реальном времени, а также оценивается эффективность технологии в городских и сельских условиях Казахстана. Результаты показывают, что DSS является экономически эффективным решением для внедрения 5G без необходимости дополнительных лицензий на спектр. Даны практические рекомендации по нормативной интеграции и масштабированию технологии.

ANNOTATION

This thesis addresses the development and implementation of dynamic spectrum utilization (DSS) technology in modern telecommunications systems. The goal is to design an effective structure for sharing LTE and 5G NR networks on a common carrier frequency to efficiently manage limited spectrum resources. The thesis analyzes the DSS architecture, presents algorithms for real-time frequency allocation, and evaluates the technology's effectiveness in urban and rural conditions in Kazakhstan. The results demonstrate that DSS is a cost-effective solution for deploying 5G without the need for additional frequency licenses. Practical recommendations for regulatory integration and scaling of the technology are provided.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Анализ технологии динамического разделения спектра dss	9
1.1 Радиочастотный спектр и его роль в телекоммуникациях	9
1.2 Причины появления технологии динамического распределения спектра (DSS)	12
1.3 Теоретические основы и архитектурная структура технологии DSS	17
1.4 Предпосылки и нормативно-правовая база для использования технологии DSS в Казахстане	20
2 Реализация вариантов построения технологий DSS сетей LTE, 5G и NR	23
2.1 Динамическое использование спектра LTE и NR для развертывания 5G	23
2.2 Особенности архитектуры DSS для сети 5G NR	28
2.3 совместимое внедрение технологии DSS в сетях LTE и NR	30
2.4 Алгоритм работы планировщика DSS и методы координации	35
3 Расчет параметров сетей LTE, 5G и NR	41
3.1 Методы перераспределения спектра в реальном времени с использованием технологии DSS	41
3.2 Эффективное использование спектра LTE и NR для развертывания сети 5G	43
3.3 Расчет пропускной способности и спектральной эффективности сетей LTE, 5G и NR	45
3.4 Оценка показателей и результатов отчетности на основе DSS в контексте Казахстана	49
Заключение	53
Список использованной литературы	54
Приложение А	56

ВВЕДЕНИЕ

В наше время повсеместное развитие телекоммуникационных систем и беспроводной связи привело к резкому увеличению нагрузки на радиочастотный спектр. Основными движущими силами этого процесса являются рост числа мобильных устройств, растущий спрос на высокоскоростную передачу данных и внедрение технологии 5G. Однако радиочастотный спектр является ограниченным и невозобновляемым ресурсом. В связи с этим эффективное использование и управление спектром стало стратегическим вопросом для телекоммуникационной отрасли.

Одним из современных способов решения этой проблемы является технология динамического распределения спектра (DSS). Эта технология позволяет операторам одновременно использовать системы LTE (4G) и NR (5G New Radio) в одном и том же диапазоне радиочастот. DSS рассматривается как промежуточное решение перед полной миграцией на новые сети и снижает нагрузку на инфраструктуру без ущерба для качества связи.

Актуальность исследовательской работы заключается в поиске путей эффективного внедрения сетей 5G при одновременном снижении затрат на инфраструктуру для операторов связи. Ограниченные ресурсы спектра на рынке мобильной связи в Казахстане, особенно в сельских и отдаленных районах, повышают значимость технологии DSS. Кроме того, эта технология повышает совместимость с новыми устройствами и оптимизирует пропускную способность сети.

Целью исследования является разработка структуры технологии динамического разделения спектра (DSS) и предложение эффективных архитектурных и алгоритмических решений для сетей LTE и 5G NR.

Научная новизна – демонстрация возможности адаптации технологии DSS к отечественным телекоммуникационным сетям путем ее описания на определенной архитектурно-алгоритмической основе.

Практическая значимость работы заключается в том, что она позволит операторам связи развертывать сети 5G с использованием существующей инфраструктуры без закупки нового частотного спектра. Это особенно актуально для стран с большой территорией, таких как Казахстан.

Структура работы состоит из трех глав: в первой главе анализируются теоретические основы технологии DSS, характеристики и развитие радиочастотного спектра, а во второй главе представлена разработка архитектуры DSS и алгоритмов динамического управления частотой для сетей LTE и NR. В третьей главе представлены результаты внедрения технологии в реальных сетях, показатели эффективности, сценарии применения в сельской и городской местности, а также возможности будущего развития.

1 Анализ технологии динамического разделения спектра dss

1.1 Радиочастотный спектр и его роль в телекоммуникациях

Радиочастотный спектр (РЧС) – это часть электромагнитных волн, охватывающая диапазон частот от 3 кГц до 300 ГГц [1]. Этот спектр состоит из волн, называемых радиоволнами, которые позволяют передавать информацию по беспроводной связи. Физическая основа радиочастотного спектра базируется на колебательных характеристиках электромагнитных волн: частоте и длине волны. Частота – это число колебаний волны в секунду, а длина волны – это продолжительность одного цикла волны. Они обратно пропорциональны и выражаются следующей формулой:

$$\lambda = c/f \quad (1)$$

где λ – длина волны (в метрах);

c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с);

f – частота (в герцах) [2].

Эта формула является основой для понимания распространения радиоволн и их поведения в различных средах. Радиоволны распространяются со скоростью света в вакууме или воздухе, но их распространение может замедляться или ослабляться при прохождении через воду, металл или другие материалы [3].

Радиочастоты в основном используются для беспроводной передачи информации на большие расстояния, например, в телевидении, радио, сотовой связи, Wi-Fi, Bluetooth, спутниковой связи, военной связи и многих других приложениях. Радиочастотный спектр является ограниченным и ценным природным ресурсом. Он регулируется правительствами и распределяется среди пользователей (операторов, военных структур, телекоммуникационных компаний) посредством лицензий. Во многих странах этот процесс курируют специальные государственные органы, например, в Казахстане – Министерство цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности.

Диапазоны электромагнитного спектра

Электромагнитный спектр – это широкое понятие, охватывающее все электромагнитные волны всех частот. Он делится на несколько (таблица 1).

Наиболее активно используемой частью беспроводной связи является диапазон частот от 20 кГц до 300 ГГц. В этом диапазоне работают сотовая связь, телевидение, спутниковые системы, GPS, Bluetooth, Wi-Fi, военные и гражданские радары (Рисунок 1).

Таблица 1.1 – Радиочастоты спектра

Очень низкие частоты (ОНЧ)	3–30 кГц
Низкие частоты (НЧ):	30–300 кГц
Средние частоты (СЧ)	300–3000 кГц
Высокие частоты (ВЧ)	3–30 МГц
Очень высокие частоты (ОВЧ)	30–300 МГц
Сверхвысокая частота (СВЧ)	300 МГц–3 ГГц
Очень высокие частоты (СВЧ)	3–30 ГГц
Сверхвысокие частоты (СВЧ)	30–300 ГГц

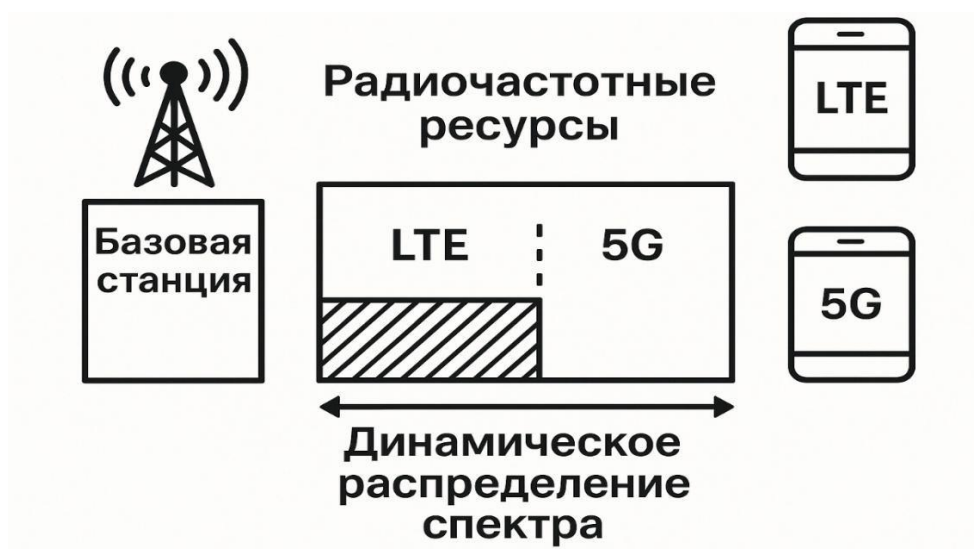


Рисунок 1.1 – Схема внедрения DSS с динамическим распределением спектра

Области применения радиочастотного спектра:

1. Системы мобильной связи (2G, 3G, 4G, 5G): Операторы мобильной связи используют радиочастотный спектр для обмена сигналами между базовыми станциями своих сетей и пользователями. Например, сети 4G-LTE в основном работают на частотах 700 МГц, 800 МГц, 1800 МГц и 2600 МГц. Сети 5G охватывают диапазон выше 3,5 ГГц и миллиметровые волны (24–100 ГГц).

2. Трансляция теле- и радиопередач: Аналоговое и цифровое телевидение осуществляется в диапазонах 30–800 МГц. Радиовещание чаще всего осуществляется на частотах 88–108 МГц (FM), 530–1600 кГц (AM).

3. Спутниковая связь: Сигналы отправляются в космос и возвращаются на Землю. Они работают на частотах 1–40 ГГц. Здесь на качество сигнала может влиять атмосфера (особенно во время дождя).

4. Радионавигация и GPS: Система GPS работает в диапазоне 1,2–1,6 ГГц. Радионавигационные системы используются в военных и гражданских целях.

5. Wi-Fi и Bluetooth: Технология Wi-Fi работает на частотах 2,4 ГГц и 5 ГГц. Bluetooth – это технология беспроводной связи малого радиуса действия, работающая в основном в диапазоне 2,4 ГГц.

6. Военные и экстренные службы: Этим секторам выделены особо защищенные частоты, некоторые из которых используются тайно. Они важны для радиолокации, связи, наблюдения и управления.

Как упоминалось выше, радиочастотный спектр является ограниченным ресурсом. В мире растет спрос на мобильные устройства, системы Интернета вещей (умный дом, умный город), а также высококачественный видео- и мультимедийный контент. Такая ситуация значительно увеличила потребность в радиочастотах.

Поскольку радиочастотный спектр является ограниченным природным ресурсом, крайне важно эффективно им управлять. DSSoc на спектр резко возрос из-за распространения мобильных устройств и мультимедийного контента. В настоящее время большая часть трафика данных передается через беспроводные устройства, что приводит к нехватке спектра. Этот дефицит подталкивает операторов связи к использованию новых технологий, включая DSS (динамическое распределение спектра) [3].

Нехватка спектра напрямую влияет на инфраструктуру. Переход на новые диапазоны частот потребует приобретения дорогостоящих лицензий и установки новых базовых станций. Это особенно проблематично в сельских и отдаленных районах. Поэтому эффективное использование имеющихся ресурсов является одной из главных стратегических задач современности.

Внедрение сетей 5G и будущих сетей 6G еще больше увеличит спрос на радиоспектр. Эти сети требуют работы в миллиметровом диапазоне волн (выше 30 ГГц). На таких частотах дальность распространения сигнала уменьшается, поэтому требуются частые и густо расположенные небольшие базовые станции. Для решения этих проблем применяются такие технологии, как DSS, которые позволяют повторно использовать существующие частоты 4G.

Международные стандарты и правила:

Использование и регулирование радиочастотного спектра осуществляется на международном уровне в соответствии со стандартами таких организаций, как Международный союз электросвязи (МСЭ) и 3GPP (Проект партнерства третьего поколения).

Документ МСЭ «Регламент радиосвязи» предусматривает глобальную гармонизацию частот для предотвращения раDSSостранения электромагнитных волн и помех.

Согласно стандарту 3GPP, все поколения систем связи (GSM, UMTS, LTE и NR) четко определяют свои частотные диапазоны, модуляцию сигнала, структуру кадра и методы передачи данных.

В Казахстане данные нормы приведены в соответствие с национальным законодательством и актами министерств.

Регулирование радиочастотного спектра в Казахстане.

В Республике Казахстан компетенция по управлению радиочастотным спектром принадлежит Министерству цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности. Регулирующим органом является «Республиканская служба радиочастот».

Конкретные нормативные документы:

- Закон Республики Казахстан «О связи» (2004 г.);
- Национальный план распределения радиочастот;
- Диапазоны частот выделяются операторам связи приказами Центральной комиссии связи и информатизации Республики Казахстан.

- Например: Для LTE: 800 МГц, 1800 МГц, 2600 МГц;
- Для тестов 5G: 3,5 ГГц, 26 ГГц (миллиметровые волны);

Реализация DSS: протестирована в диапазоне частот от 1800 МГц до 2100 МГц.

В заключение следует отметить, что радиочастотный спектр является не только основой телекоммуникационных систем, но и платформой для будущих инноваций. Его эффективное и справедливое распределение является гарантией обеспечения доступности и качества связи [4].

1.2 Причины появления технологии динамического распределения спектра (DSS)

DSS (динамическое разделение спектра) – это технология, которая позволяет операторам мобильной связи одновременно эксплуатировать сети LTE и 5G NR на одном и том же частотном канале. Этот метод не только облегчает переход к 5G, но и является способом эффективного решения проблемы нехватки спектра. DSS – это переходная технология, призванная обеспечить взаимодействие сетей 4G и 5G.

Технология DSS (динамическое распределение спектра) еще не полностью стандартизирована 3GPP (Проект партнерства третьего поколения). В настоящее время работа по стандартизации, запланированная для версии 17, ограничивается частотами LTE-2300 TDD и LTE-2600 TDD. Таким образом, данная технология является зависимым от производителя решением, и у каждой компании разный уровень готовности. В таблице 1 представлены решения различных поставщиков оборудования для внедрения технологии DSS для сетей 5G.

Производители оборудования предлагают три различных подхода к внедрению технологии DSS. Схема этих подходов показана на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Три основных типа технологии DSS: eMBMS+MBSFN, мини-слоты 5G NR и конфигурация на основе CRS

Один из основных режимов DSS направлен на предотвращение взаимных помех между сигналами несущих 5G и LTE (CRS и SSB). Такой режим является одним из важных решений при построении системы DSS и показан на рисунке 1.3.

Опция 1: Данный подход основан на использовании частотно-временных ресурсов в структуре MBSFN системы LTE. В этом методе специальные символы OFDM в кадре LTE предназначены для передачи сигналов 5G. Обычно первые два из последних 12 символов OFDM выделяются для опорных и контрольных сигналов, а остальные используются для передачи данных.

Хотя изначально эти символы предназначались для услуг eMBMS, в рамках DSS они адаптированы для передачи сигналов 5G. То есть свободные ресурсы сети LTE обслуживают радиointерфейс 5G[5].

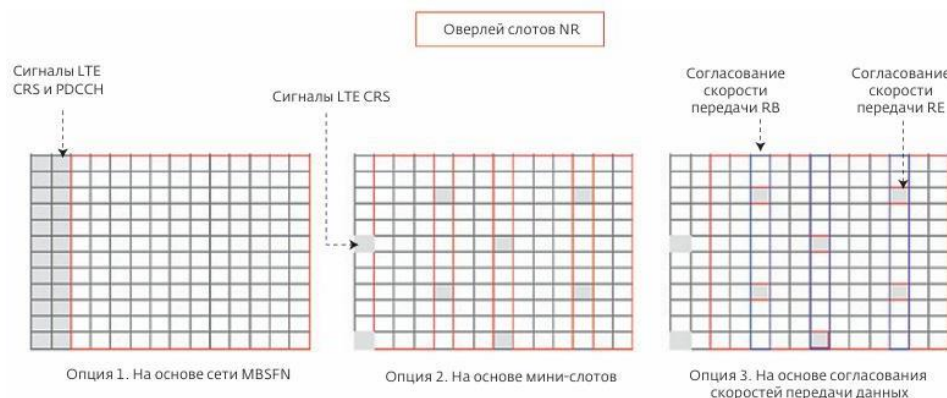


Рисунок 1.3 – Внутренняя структурная модель кадра LTE с использованием технологии FDD

Такой подход позволяет объединить сети LTE и 5G в единую инфраструктуру и считается одним из наиболее оптимальных способов внедрения технологии DSS.

Опция 2: Этот тип DSS основан на концепции «мини-слота». Мини-слоты используются в приложениях URLLC (сверхнадежная связь с малой задержкой) в сетях 5G. Сигналы OFDM в LTE можно размещать в любом месте кадра, и этот подход будет работать и в 5G.

Эта версия DSS предполагает отключение широкополосных вещательных служб в системе LTE и замену их сигналами 5G. Этот метод обеспечивает гибкое распределение ресурсов и планирование, поскольку мини-слоты управляются планировщиком 5G.

Опция 3: Этот метод считается одним из самых простых и эффективных способов внедрения технологии DSS. Здесь для передачи сигналов 5G используются специально выделенные временные и частотные ресурсы, независимые от сигналов управления сетью LTE. То есть сигналы LTE и 5G разделены и работают отдельно, не влияя друг на друга. Такой подход обеспечивает полный контроль над 5G, но для его реализации требуются дополнительные технические изменения в сетевой инфраструктуре. Поэтому этот вариант часто используется в сложных сетях, где требуется высокая скорость и полный контроль.

Система DSS может быть реализована в нескольких технических конфигурациях, каждая из которых адаптирована к потребностям сети.

Основными факторами, повлиявшими на появление технологии, являются: ограниченные ресурсы спектра, быстрый рост мобильного трафика, DSSoc на новые устройства и приложения, а также высокие затраты на инфраструктуру. DSS позволяет операторам повторно использовать существующий спектр 4G для 5G без необходимости серьезной модернизации инфраструктуры [6].

Технология DSS описана в стандартах 3GPP Release 15 и Release 16. Это решит проблемы совместимости между 4G и 5G. Технология динамически распределяет несущие частоты и предлагает каналы пользователям 4G и 5G в зависимости от DSSoc в реальном времени. Такой подход особенно эффективен в районах с небольшим количеством устройств 5G, поскольку он перераспределяет имеющиеся ресурсы.

Благодаря DSS LTE и NR могут работать одновременно на одном и том же носителе. Для этого требуются совместимость частотных интервалов и синхронизированные механизмы планирования. В LTE используется поднесущая 15 кГц, тогда как в сетях NR этот показатель может составлять 15, 30, 60 кГц. Система DSS учитывает эти различия с помощью специальных программных модулей [7].

Одним из ключевых вопросов при внедрении DSS является управление сигналами управления LTE и NR. LTE использует общий опорный сигнал (CRS), тогда как NR использует опорный сигнал демодуляции (DMRS). Наложение этих сигналов может привести к помехам. Поэтому системы DSS используют передовые алгоритмы для управления этими сигналами.

Развитие технологий не ограничивается теорией. С 2020 года ведущие мировые операторы связи начали использовать DSS на коммерческом уровне. Например, операторы Verizon, AT&T и Swisscom развернули услуги 5G, используя свою инфраструктуру 4G через DSS. Такой подход значительно сократил затраты и сделал доступным для пользователей связь нового поколения.

Кроме того, увеличивается и количество устройств, поддерживающих DSS. Qualcomm, MediaTek, Huawei, Samsung и другие компании внедряют поддержку DSS в свои чипсеты и устройства. Широкое использование этой технологии ускорит развитие экосистемы.

Поддержка со стороны производителей чипсетов сыграла важную роль в широком внедрении технологии DSS. В таблице ниже показаны основные модели чипсетов, поддерживающие DSS, и годы их выпуска (таблица 2).

DSS становится архитектурным компонентом телекоммуникационных сетей не только как переходная технология, но и в долгосрочной перспективе. Это позволяет операторам эффективно распределять пропускную способность сети в режиме реального времени, оптимизировать нагрузку на сеть и улучшать пользовательский опыт [8].

Стандарты Release 16 поддерживают расширенный интерфейс планировщика DSS, оптимизацию алгоритмов распределения спектра и адаптивные опорные сигналы для NR. Это делает систему DSS более эффективной.

Таблица 1.2 – Модели чипсетов, поддерживающие DSS

Чипсет модели	Производители	Поддержка DSS	Год выпуска
Snapdragon 865	Qualcomm	Да	2020
Snapdragon 868	Qualcomm	Да	2021
Snapdragon 8 Gen 1	Qualcomm	Да	2022
Dimensity 1000	MediaTek	Да	2020
Dimensity 1400	MediaTek	Да	2021
Exynos 2100	Samsung	Да	2021
Kirin 990 5G	Huawei	Да	2019
Модем Snapdragon X55	Qualcomm	Да	2020
Модем Snapdragon X60	Qualcomm	Да	2021

Таблица 1.3 – Сравнительные характеристики 3GPP Release 15 и Release 16

Свойство / Стандарт	Release 15	Release 16
Поддержка DSS	Базовый	Полностью продвинутый
URLLC (сверхнизкая задержка)	Ограниченная поддержка	Полная поддержка
Совместимость с NR-LTE	Основан	Продвинутый
Совместное использование спектра	На уровне теста	Готовы к коммерческому внедрению

Эти проекты доказали технический и экономический потенциал внедрения 5G без модернизации инфраструктуры.

Примеры внедрения DSS в Казахстане. Несколько операторов связи Казахстана реализуют проекты, связанные с внедрением технологии DSS:

- Beeline Казахстан – в 2023 году провел испытания 5G в Алматы и Астане с использованием DSS, эффективно используя диапазоны LTE;
- Компания Kcell протестировала решение DSS в диапазоне 1800 МГц [9];
- Tele2/Altel — изучали совместимость NR и LTE в сети 2100 МГц;
- Таблица совместимости LTE и NR.

Вот диаграмма, наглядно иллюстрирующая совместимость LTE и NR:

DSS	
LTE	NR
Поднесущая: 15 кГц	Поднесущая: 15/30/60 кГц
CRS сигналы	DMRS сигналы
Слот 1–5: LTE	Слот 6–10: NR

Рисунок 1.4 – Совместимость LTE и NR

На этой диаграмме (рисунок 1.4) показано временное мультиплексирование (TDM) и частотное мультиплексирование (FDM). Реализация осуществляется посредством специального планировщика [10].

Особенности технологии DSS на основе MBSFN. Поскольку в качестве основного способа реализации технологии DSS выбран вариант 1, разработчики используют единую сеть мультимедийного вещания (MBSFN). Такой подход позволяет динамически размещать сигналы 5G вместо пилотных сигналов, отправляемых в кадрах MBSFN в сети LTE. Таким образом, сигналы SSB, необходимые для синхронизации, поступают на вход, и система работает согласованно.

Кадры MBSFN играют важную роль в системе DSS, поскольку эта структура обеспечивает гибкую интеграцию сигналов 5G в инфраструктуру LTE. Согласно стандартам 3GPP, сигналы 5G NR могут быть объединены с сигналами LTE с использованием кадров MBSFN. Это решение эффективно использует сетевые ресурсы и обеспечивает взаимодействие двух технологий.

Сегодня широко используются интегрированные модемы, объединяющие LTE и 5G на одном кристалле. Технология DSS открывает путь к эффективному использованию этой возможности. То есть нет необходимости полностью перестраивать сеть – можно добавлять услуги 5G, сохраняя существующую инфраструктуру. Такой подход полностью отвечает требованиям построения неавтономной (NSA) сети 5G и может удовлетворить современным требованиям радиointерфейса.

Таким образом, технология DSS представляет собой инновационное и гибкое решение, обеспечивающее эволюционный переход от 4G к 5G без потери качества связи. DSS – это ориентированный на будущее инструмент, направленный на экономическую эффективность и результативность в телекоммуникационной отрасли.

1.3 Теоретические основы и архитектурная структура технологии DSS

Технология DSS (динамическое распределение спектра) позволяет совместно использовать сети LTE и 5G NR (новое радио) на одной несущей частоте. DSS объединяет сети на одном канале, что позволяет эффективно использовать частоты и снижать затраты на инфраструктуру. Эта архитектура основана на сложных динамических методах управления частотами и позволяет операторам постепенно переводить абонентов в сеть 5G [11].

Архитектурная структура (рисунок 1.5). Архитектура DSS состоит из нескольких уровней модулей:

- Сеть радиодоступа (RAN): eNodeB (LTE), gNodeB (NR);
- Основная сеть: EPC (LTE) и 5GC (NR);

- Планировщик: распределение ресурсов в реальном времени;
- Плоскость управления: управление сетью и сигнализацией;
- Совместимость интервалов поднесущих LTE: 15 кГц, NR: 15, 30, 60, 120 кГц.

Наиболее распространенные совместимые интервалы в архитектуре DSS – 15 и 30 кГц. Эта система обеспечивает синхронизацию физического уровня (PHY) между LTE и NR.

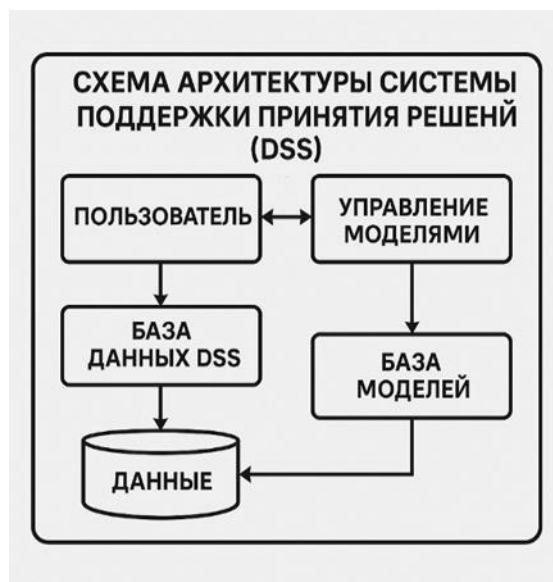


Рисунок 1.5 – Схема архитектуры системы поддержки принятия решений (DSS)

Schedule работы. Schedule – это «мозг» архитектуры DSS. Он выполняет следующие функции:

- Распределение частот в зависимости от количества абонентов;
- Анализ трафика LTE и NR;
- Приоритетность на основе качества сигнала;
- Управление помехами (CRS/DMRS);
- Совместимость временных рамок;
- Структура кадра в LTE: 10 мс (слот 1 мс).

Преимущества:

- Внедрение 5G без установки новой инфраструктуры;
- Дополнительный частотный спектр не требуется;
- Не создает помех для абонентских устройств;
- Действует в переходный период;
- Кадр в NR: слоты, равные 1 мс, 2, 4, 8, 16, 32 и т.д. подслотов.

Архитектура DSS использует алгоритмы выравнивания кадров для обеспечения их согласованности.

Подробная структурная схема архитектуры DSS и функций модулей:

- Архитектура DSS (динамическое распределение спектра) состоит из нескольких основных структурных модулей. Каждый модуль работает на разных уровнях сети и обеспечивает стабильную и эффективную работу системы;
- Взаимосвязь и поток данных этих модулей описаны с помощью блок-схемы. В системе DSS планировщик играет ключевую роль, динамически распределяя ресурсы между LTE и NR с учетом нагрузки в реальном времени [12].

Таблица 1.4 – Архитектурные блоки DSS.

Модуль	Функция
Сеть радиодоступа (RAN)	Прием и передача радиосигналов через базовые станции, разделение ресурсов между LTE и NR.
Основная сеть	IP-маршрутизация, управление сетью, аутентификация пользователей и управление мобильностью.
Планировщик (Scheduler)	Распределение ресурсов между пользователями в режиме реального времени с адаптацией к нагрузке.
Модуль мониторинга и координации	Контроль синхронности сигналов LTE и NR, предотвращение помех.
Система управления QoS	Устанавливайте приоритеты и контролируйте задержку для различных типов услуг (видео, голос, данные).

Аспекты безопасности. Безопасность также играет важную роль в архитектуре DSS. Использование сетей LTE и NR в одной среде может привести к появлению новых рисков. Некоторые из мер безопасности, используемых в DSS:

Совместимость методов шифрования: в то время как LTE использует шифры AES и SNOW 3G, NR использует усовершенствованные 256-битные алгоритмы шифрования.

- Защита сигнализации: риск внешнего вмешательства снижается за счет защиты данных Control Plane (NAS, RRC).

- Для устройств UE выполняется двухуровневая (LTE/NR) аутентификация.

- Защита от помех: реализована отдельная система планирования, гарантирующая, что сигналы CRS LTE и DMRS NR не будут мешать друг другу.

Эти меры безопасности обеспечивают стабильность связи через DSS и защиту данных клиентов.

Архитектура DSS также важна с точки зрения информационной безопасности. Сеть LTE использует алгоритмы шифрования AES и SNOW 3G, тогда как сеть NR использует расширенное 256-битное шифрование. Для защиты управленческих записей на уровнях NAS и RRC используется дополнительная

двухуровневая аутентификация. Для соответствия этим требованиям казахстанским операторам связи необходимо предоставить специальные стандарты через ARTP.

Влияние технологий NR на систему DSS. Технологии NR (New Radio) обладают множеством новых технических возможностей по сравнению с LTE. Они оказывают следующее воздействие на систему DSS:

- Massive MIMO (система с несколькими антеннами);
- Он увеличивает пропускную способность системы DSS за счет передачи сигналов, направленных нескольким пользователям одновременно;
- Устройства NR позволяют эффективно использовать одну частоту в пространстве.
- Beamforming (технология формирования луча). Он направляет радиосигналы только в нужном направлении, уменьшая помех;
- При использовании общего спектра посредством DSS эта технология повышает эффективность использования ресурсов;
- Динамический TDD (дуплекс с временным разделением);
- Позволяет регулировать время передачи и приема на одной частоте;
- При использовании с DSS баланс между UL/DL легко регулируется в зависимости от нагрузки;
- Сетевое разделение. Система DSS позволяет создавать частные виртуальные сети для различных типов услуг (промышленный Интернет вещей, видеосвязь, игры) [13];

Эти технологии способствуют высокой гибкости системы DSS, ее адаптивности в режиме реального времени и предоставлению пользователям высококачественной связи.

1.4 Предпосылки и нормативно-правовая база для использования технологии DSS в Казахстане

Процесс цифровизации телекоммуникационной инфраструктуры в Казахстане требует новых подходов к управлению частотными ресурсами. В связи с этим постепенно формируется институциональная, техническая и нормативная база для внедрения технологии динамического распределения спектра (DSS).

Одной из основных технических предпосылок внедрения DSS является внедрение автоматизированных систем оперативного мониторинга и управления радиочастотами. С 2021 года в Казахстане внедрена единая электронная платформа мониторинга частот. Данная платформа анализирует загрузку радиочастотного спектра и открывает техническую возможность эффективного перераспределения частот на основе DSS.

Регулирование радиочастотного спектра в Республике Казахстан осуществляется на основании Закона Республики Казахстан «О связи» (2004 г.) и дополнительных «Правил использования радиочастотного спектра». В соответствии с этим законодательством частоты могут выделяться на временной, условной или региональной основе, что соответствует принципам DSS.

Основные нормативные документы:

- Закон Республики Казахстан «О связи» (7 июля 2004 года № 567-ІІ);
- Постановление Правительства Республики Казахстан № 137 (2023) – Об утверждении «Концепции развития цифровой инфраструктуры»;
- Приказ Министра цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан № 77/НК (2022) – «Принципы эффективного управления радиочастотным спектром»;
- Положение «О лицензировании в сфере электронных коммуникаций» (2020 г.), утвержденное Министерством национальной экономики Республики Казахстан.

Необходимость лицензирования в гибридной модели возникает при внедрении DSS. То есть, наряду с постоянными лицензиями могут выдаваться временные и гибкие лицензии – в зависимости от конкретной нагрузки, часового пояса и географического региона. В связи с этим в 2023 году ARTP (Республиканская радиочастотная служба) подготовила предложение по группировке частот, совместимых с DSS.

В то же время в Казахстане создаются предпосылки для технической стандартизации и испытаний. Так, в 2024 году Национальным институтом стандартизации Республики Казахстан была проведена разработка проекта технического предложения «Методика организации и оценки сетей DSS». В этом документе определяются сценарии совместного использования частот, механизмы предотвращения помех и требования к устройствам, совместимым с DSS.

Среди правовых и инфраструктурных предпосылок учитываются также требования DSS по информационной безопасности. Специальные требования разрабатываются в рамках Закона Республики Казахстан «Об информатизации» и «Концепции кибербезопасности (Cyber Shield 2022–2025)» по защите данных в сетях 5G и DSS.

В заключение следует отметить, что в Казахстане формируется необходимая правовая база для внедрения технологии DSS. В дальнейшем для полноценного закрепления данной технологии на законодательном уровне должны быть разработаны национальные технические регламенты DSS, пакет лицензионных льгот, правила совместного использования частот между операторами.

Выводы. В первой главе представлен комплексный анализ теоретических основ и роли радиочастотного спектра, лежащих в основе внедрения технологии динамического распределения спектра (DSS). Радиочастотный спектр – ценный ресурс, составляющий основу современных беспроводных систем. Его ограничения

считаются актуальной проблемой в телекоммуникационной отрасли, требующей эффективных стратегий управления.

Технологии передачи информации в диапазоне частот стремительно развиваются. Сосуществование стандартов 4G и 5G требует нового типа интегрированных решений. В этом контексте технология DSS представляет собой инновационный подход, позволяющий нескольким сетям работать вместе на одном носителе. Он распределяет частоты в режиме реального времени и открывает путь для гибкого внедрения систем связи следующего поколения с сохранением существующей инфраструктуры.

В главе также описывается роль стандартов 3GPP в формировании технологии DSS, условия технической совместимости, интервалы между поднесущими, синхронизация сигнальных структур и требования к инфраструктуре. Эти данные служат основой для оценки инженерных и стратегических возможностей эффективного внедрения новых технологий.

В целом в первой главе подчеркивается актуальность перераспределения и совместного использования радиочастотных ресурсов в современной телекоммуникационной среде. DSS – это не просто технологический шаг, но и гибкое решение, направленное на долгосрочную модернизацию отрасли. Это улучшит качество связи и позволит постепенно вводить новые стандарты.

2 Реализация вариантов построения технологий DSS сетей LTE, 5G и NR

2.1 Динамическое использование спектра LTE и NR для развертывания 5G

В этом разделе анализируются основные принципы и преимущества динамического перераспределения спектра. Кроме того, будут подробно рассмотрены возможности его применения и вопросы синхронизации в сетях 5G.

Технология DSS (динамическое распределение спектра) предлагает эффективное решение для операторов мобильной связи. Эта технология позволит запустить сеть 5G без перераспределения или покупки частотного спектра. Внедрение технологии DSS осуществляется путем модернизации существующих базовых станций на программном уровне.

Главным преимуществом сети 5G является возможность поддержки сценариев связи различного назначения в рамках одной сети. Он включает в себя высокоскоростную мобильную широкополосную связь (eMBB), массовую связь между устройствами (mMTC) и надежную связь со сверхнизкой задержкой (URLLC). Каждый из них основан на эффективном использовании частот:

- низкие частоты для покрытия больших площадей [14];
- средние частоты для увеличения пропускной способности связи;
- высокие частоты для обеспечения широкой полосы пропускания.

Во многих странах в основном используются низкие и средние частоты, тогда как диапазон высоких частот отведен для других отраслей. Низкие частоты особенно широко используются в системах мобильной связи.

При внедрении сетей 5G в качестве перспективных диапазонов в основном рассматриваются частоты ниже 1 ГГц (например, 3,5 ГГц), однако в некоторых случаях могут использоваться и частоты ниже этого диапазона (700 МГц).

В настоящее время многие операторы закрывают сети 3G и перераспределяют свои частоты под LTE. Аналогичным образом необходимо перевести ряд частот сетей LTE на стандарт 5G NR. Однако выделение части спектра исключительно под 5G может оказаться экономически неэффективным.

Технология DSS очень важна в решении этой проблемы. Благодаря DSS сети LTE и NR эффективно используют частотные ресурсы одновременно. Перевод всего спектра LTE на технологию 5G NR может оказаться неэффективным из-за большого трафика данных в LTE в ближайшем будущем. Технология DSS в этом смысле обеспечивает гибкое перераспределение частот между LTE и NR в соответствии с текущими потребностями сети (рисунок 2.1) [15].

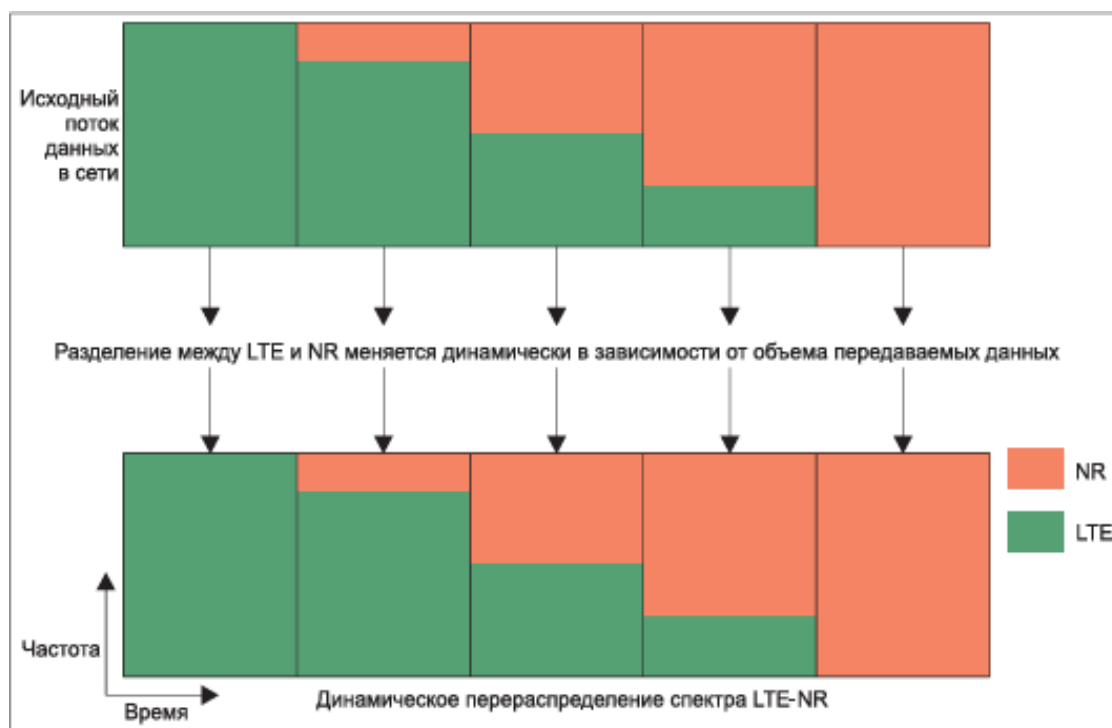


Рисунок 2.1 – Концепция динамического перераспределения частотного спектра, обеспечивающая совместную работу сетей LTE и NR

Синхронизация базовых станций играет решающую роль в динамическом управлении частотами между LTE и NR. Такая синхронизация позволяет в режиме реального времени изменять конфигурации операторов LTE и NR. Уникальность технологии DSS заключается в том, что эти изменения производятся автоматически, без каких-либо задержек, на уровне сигнала.

Главной особенностью технологии DSS является ее совместимость с устаревшими системами. Поскольку устройства LTE сейчас настолько распространены, нет необходимости их менять. Поэтому устройства NR должны быть адаптированы для использования частотного спектра совместно с LTE.

При передаче сигналов LTE частотный интервал между несущими составляет 15 кГц, тогда как в NR этот интервал может составлять 15 или 30 кГц. При реализации технологии DSS обычно используется частотный диапазон 15 кГц. Если разнос несущих составляет 15 кГц, то сигналы NR распространяются ортогонально (не мешают друг другу) с сигналами LTE, поскольку они имеют общий частотно-временной ресурс. А когда частотный интервал составляет 30 кГц, эта ортогональность не сохраняется, но обе технологии продолжают использовать одни и те же частотно-временные ресурсы.

Пользовательские устройства принимают сигналы в комбинированном состоянии через системы LTE и NR и выполняют процесс декодирования. В этом

случае старые устройства LTE принимают только сигналы LTE, тогда как устройства NR декодируют только сигналы NR. А новые устройства, поддерживающие оба стандарта одновременно, позволяют декодировать оба типа сигналов одновременно [16].

Адаптация технологии DSS (динамического распределения спектра) к сетям LTE является одним из эволюционных шагов в телекоммуникационной отрасли. Такой подход позволяет операторам связи постепенно внедрять сети 5G без приобретения дополнительных лицензий на спектр. Архитектура DSS требует особой адаптации к сети LTE, поскольку эта технология изначально основана на инфраструктуре 4G и требует высокой совместимости при ее расширении.

DSS (динамическое распределение спектра) – это значительное техническое достижение в развитии технологии 5G.

При коммерческой реализации сети 5G применялся метод использования частотного спектра совместно с системой LTE. Эта технология называется DSS (динамическое распределение спектра) и позволяет технологиям LTE и 5G NR работать одновременно в одном и том же диапазоне спектра. Такое совместное управление спектральными ресурсами реализуется на уровне базовой станции.

Необходимость и эффективность технологии DSS наглядно видны на рисунке 3. Новые радиосети 5G (NR) используют часть частотного спектра традиционных сетей 2G, 3G и 4G. Однако получение нового частотного спектра обходится операторам очень дорого в финансовом отношении. Поэтому операторы стремятся динамически распределять доступные частотные ресурсы с системой 5G. Для достижения этой цели будет обновлено программное обеспечение базовых станций и усовершенствована система распределения ресурсов.

Динамическое перераспределение частотных ресурсов между LTE и 5G позволит операторам быстро и эффективно разворачивать сети 5G. Это, в свою очередь, снижает финансовые затраты. Частотные ресурсы гибко и оптимально перераспределяются в соответствии с потребностями абонентов LTE и 5G. В результате операторы смогут эффективно использовать частоты в соответствии с потребностями потребителей.

Особенности архитектуры DSS, характерные для систем LTE. При проектировании архитектуры DSS для сети LTE учитываются несколько ключевых аспектов:

- Соответствие частотного интервала
- Частотные интервалы, используемые в стандарте LTE, фиксируются заранее.

При внедрении DSS эти интервалы необходимо адаптировать к динамическому планированию. В связи с этим структура сигналов LTE и система частотного планирования полностью совместимы с DSS Scheduler за счет специальной конфигурации.

Адаптация базовых станций. Базовые станции в сети LTE будут оснащены обновленными программными модулями для поддержки технологии DSS. Эти модули позволяют осуществлять мониторинг радиочастотных ресурсов в режиме реального времени и при необходимости предоставлять их пользователям 5G NR. Эта адаптация выполняется автоматически в зависимости от нагрузки.

Комбинация опорных сигналов. Опорные сигналы CRS (Cell-specific Reference Signal) играют важную роль в архитектуре LTE. При реализации архитектуры DSS эти сигналы должны быть защищены от наложения на сигналы 5G NR. Для этого используются методы временной координации и частотной перестройки между кадрами.

Обеспечение QoS (качества обслуживания). Услуги, запланированные для LTE (например, VoLTE, видеозвонки), требуют определенного уровня пропускной способности и задержки. В случае внедрения DSS качество обслуживания абонентов LTE не должно снизиться. Эта проблема решается путем планирования потока данных на основе приоритета.

Централизованное планирование и управление. В архитектуре DSS особое значение имеет модуль планирования, называемый Scheduler. В сети LTE этот модуль выполняет функцию управления радиоресурсами в зависимости от фактической нагрузки. Планировщик распределяет частоты между LTE и 5G NR с учетом потребностей каждого абонентского устройства.

Например, в период с 8:00 до 10:00 утра нагрузка на сеть LTE резко возрастает, так как многие пользователи активно пользуются онлайн-сервисами (социальными сетями, новостями, маршрутами) перед уходом на работу. На этом этапе планировщик DSS отдает приоритет ресурсам высокочастотного спектра (например, 1800 МГц) для устройств LTE. Между тем, устройствам NR временно предлагается более низкая полоса пропускания в диапазоне 2100 МГц.

Пользовательский трафик более-менее сбалансирован между 12:00 и 14:00. Затем DSS Scheduler реализует распределение частот 50/50. А поскольку DSSoc на сеть NR (5G) возрастает в период с 18:00 до 22:00, планировщик отдает приоритет частоте 2600 МГц для устройств NR на рисунке 2.2.

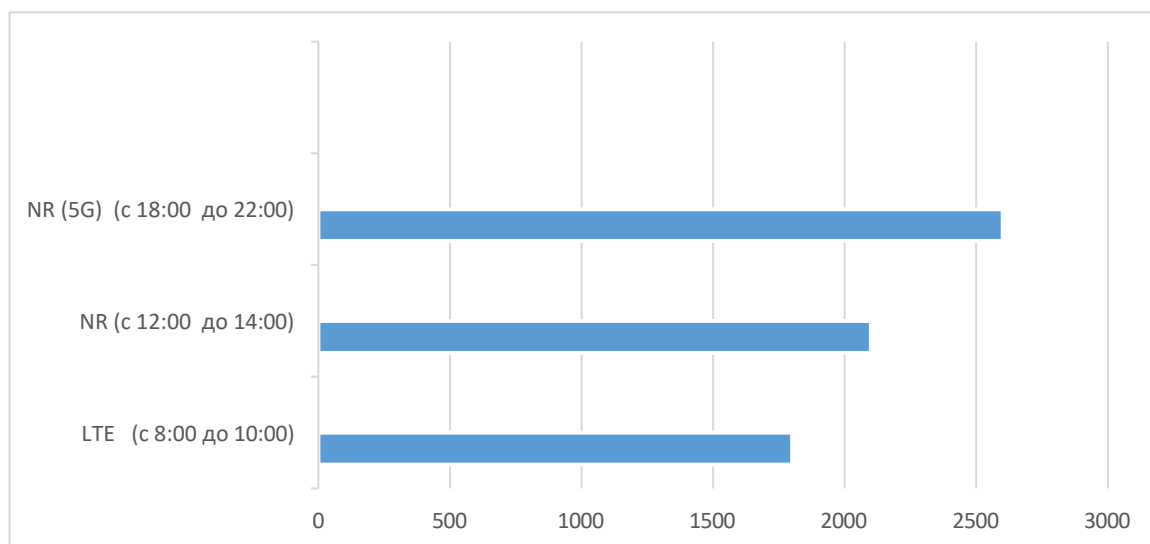


Рисунок 2.2 – Диаграмма. Пользовательский трафик

Эта модель демонстрирует, как работает динамическая адаптация DSS в реальном времени и гибко перераспределяет частоты в зависимости от DSS-абонентов. Такая адаптивность повышает эффективность сети и позволяет поддерживать качество обслуживания (QoS).

Техническая гибкость и инженерные подходы. Проектирование структуры DSS в сети LTE требует от инженеров достижения совместимости на всех уровнях системы. Для этого применяются следующие меры:

- В ходе системного тестирования исследуется влияние сигналов CRS на сигналы демодуляции в системе NR.
- При планировании используется статистика трафика в реальном времени.
- Проводится анализ нагрузки на частоты, и в периоды высокого DSS-приоритет отдается LTE.

Преимущества инфраструктуры. Внедрение DSS в сеть LTE обеспечивает следующие преимущества:

- Возможность запуска услуг 5G без установки новых антенн или оборудования;
- Практически все территории с сетями LTE станут зонами покрытия 5G;
- Для абонентов поддерживается бесперебойный и последовательный процесс обслуживания;
- Применение в контексте Казахстана.

В случае Казахстана, особенно в отдаленных или слаборазвитых регионах, интеграция технологии DSS с сетями LTE имеет особое значение. Такой подход обеспечит быстрое и доступное развертывание 5G в сельской местности. Кроме

того, операторы могут увеличить пропускную способность сети за счет эффективного использования частотных ресурсов.

2.2 Особенности архитектуры DSS для сети 5G NR

При внедрении технологии DSS в сетях 5G NR архитектурные решения будут основываться не только на совместимости частот, но и на полной интеграции на уровне протоколов и функциональной совместимости. Основная задача здесь – объединить гибкую архитектуру 5G NR, высокопроизводительную архитектуру, возможности динамического планирования ресурсов и расширенные предложения услуг с инфраструктурой LTE. Этот процесс реализуется на системном уровне с помощью механизмов общего оператора связи, балансировки каналов управления и предотвращения конфликтов.

Сочетание динамической TDD и слотовых структур. Динамический TDD (дуплекс с временным разделением) широко используется в сетях 5G NR. Эта технология позволяет использовать как каналы UL (восходящая линия связи), так и каналы DL (нисходящая линия связи) на одной и той же частоте. В архитектуре DSS это взаимодействие достигается посредством строгой временной синхронизации: то есть планировщик DSS систематически выделяет слоты LTE и NR, позволяя обоим стандартам работать в одной среде без конфликтов.

Большие слоты полосы пропускания (агрегация слотов), используемые в сетях NR, требуют новых методов синхронизации для DSS. Выравнивание символов и буферизованная структура кадров используются для предотвращения временного наложения кадров NR с сигналами LTE, особенно на более низких интервалах.

Использование подкадров MBSFN и комбинации CRS/DMRS. Еще одной особенностью архитектуры 5G NR является снижение коллизий сигналов с LTE за счет использования подкадров MBSFN (Multicast-Broadcast Single Frequency Network). В архитектуре DSS сеть NR использует эти подкадры для выбора интервалов, которые не совпадают с синхронизацией сигналов CRS, активных в LTE. При таком подходе пользовательские сигналы в NR передаются без помех.

Кроме того, в архитектуре DSS положение сигналов DMRS (опорный сигнал демодуляции) динамически изменяется. Хотя в NR DMRS изначально расположен в символе 11, планировщик DSS перемещает его в символ 12, гарантируя, что он не будет перекрываться с CRS, расположенным в LTE.

Новая реконфигурация плоскости PHY и плоскости управления в NR. В архитектуре NR, работающей под управлением DSS, физический уровень (PHY) обладает высокой степенью адаптации. Система автоматически реконфигурирует плоскость управления, что означает, что DSS Scheduler может изменять параметры

управления устройством NR в режиме реального времени в зависимости от состояния сети.

Например, если устройства LTE временно неактивны, NR выделяются более крупные кадры, частотные блоки и сложные ресурсы модуляции. Такая взаимоприемлемая конфигурация демонстрирует адаптивность архитектуры DSS, основанной на мониторинге нагрузки в реальном времени.

На этой диаграмме показаны основные элементы архитектуры DSS. Расположенный в центре модуль DSS Scheduler распределяет частоты между базовыми станциями LTE и 5G NR как по времени (TDM), так и по частоте (FDM). В нижней части показаны модуль временного деления и модуль частотного деления, характеризующий динамическую адаптационную способность DSS.

Благодаря системе DSS устройства LTE и 5G NR могут работать одновременно на одном частотном канале без конфликтов.

Интеграция с технологиями Massive MIMO и Beamforming

Архитектура (рисунок 2.3) 5G NR широко использует технологии Massive MIMO и формирования луча. Эти решения позволяют высокоэффективно использовать ресурсы спектра. В случае DSS эти технологии позволяют устройствам NR направлять и распределять сигналы, уменьшая помехи при совместном использовании спектра с устройствами LTE.

Massive MIMO открывает возможность одновременного обслуживания нескольких пользователей в рамках одного частотного ресурса. Архитектура DSS автоматически управляет этим процессом через планировщик, перепланируя частоту на основе фактического распределения нагрузки.



Рисунок 2.3 – Архитектура планировщика DSS и структура динамического совместное использование спектра

Совместимость между устройствами NR и старыми устройствами LTE. Одним из вопросов, имеющих особое значение в архитектуре DSS, является сосуществование устаревших устройств LTE и устройств NR на одной и той же несущей частоте. Для этого устройства NR получают из сети таблицу местоположений сигналов CRS и DMRS и принимают только те сигналы, которые имеют к ним отношение. Этот механизм гарантирует, что две разные системы могут работать на одном и том же носителе без помех.

В настоящее время количество устройств, которые могут работать с DSS, увеличивается. Qualcomm, Samsung, MediaTek и Huawei реализовали совместимость с DSS в своих чипсетах. Эти устройства способны четко отличать сигнал NR от фона LTE, что повышает практическую эффективность архитектуры DSS.

Влияние стандартов 3GPP и особенностей версии 16. Стандарт 3GPP Release 16 сыграл решающую роль в развитии архитектуры DSS. Он представил апериодический DMRS, неблокируемый PDCCH и высокогибкую структуру каналов PUSCH в системах NR. В результате этих изменений появились решения NR, полностью адаптированные для работы с системами LTE.

Согласно стандарту Release 16, системы NR с реализацией DSS реализуют оптимизированную структуру кадров, статистическое планирование интервалов и гибридное использование слотов. Эти инновации гарантируют, что NR сможет работать с высоким качеством на том же канале, что и LTE.

В целом отличительной особенностью архитектуры CXD для системы 5G NR является ее адаптивность и способность эффективно управлять ресурсами в режиме реального времени. Эта архитектура обеспечивает полную интеграцию новых сетевых технологий NR – формирования луча, Massive MIMO, сегментации сети и динамического TDD – в рамках DSS. Благодаря планировщику DSS системы LTE и NR могут обеспечивать бесперебойную работу без помех. Эта модель также послужит основой для внедрения систем 6G и IoT в будущем.

2.3 Совместимое внедрение технологии DSS в сетях LTE и NR

Одной из самых сложных инженерных и системных задач при внедрении технологии DSS является обеспечение совместной работы сетей разных поколений – LTE и 5G NR. Это включает в себя не только совместное использование частот, но и вопросы управления услугами, распределения сигналов и координации ресурсов по времени и частоте.

Временная совместимость. Системы LTE и NR основаны на разных структурах символов и графиках кадров. В то время как LTE использует фиксированную структуру, NR имеет динамические кадры и гибкие слоты. Чтобы устранить эти различия, система DSS со временем устанавливает четкие границы.

Эти границы позволяют каждому стандарту отправлять свой трафик в течение определенного периода времени.

Планировщик DSS является ключевым элементом, который координирует временные интервалы двух систем в соответствии с определенным графиком. Он учитывает планируемые услуги LTE и разворачивает сигналы системы NR без коллизий. Например, временное мультиплексирование используется для того, чтобы время передачи сигнала NR не перекрывалось с каналами управления LTE.

Совместимость частот. Технология NR может работать в широком диапазоне, тогда как LTE имеет относительно ограниченные частотные интервалы. Система DSS позволяет одновременно использовать эти две системы на одной и той же несущей частоте за счет согласования их частотных структур. Для этого система динамически назначает каналы и блоки каждой системе, используя нейтральные интервалы внутри частоты.

Чтобы избежать помех, устройства NR используют свои ресурсы в то время, когда устройства LTE неактивны. То есть при использовании DSS частотное пространство логически разделено, но физически остается общим.

Распределение и синхронизация каналов управления. Структура и способ передачи сигналов управления (например, PDCCH, CRS, PBCH) в сетях LTE и NR различны. Таким образом, система DSS обеспечивает передачу этих сигналов без помех друг другу. Для этого используются специальные сдвиги символов и деление кадров OFDM. В результате устройство LTE распознает только предназначенные для него сигналы управления, тогда как устройство NR распознает только свои собственные сигналы.

Кроме того, синхронизация между сетями является ключевым условием совместимости DSS. Синхронизация необходима не только по частоте и времени, но и по плоскостям управления. Синхронизация осуществляется на уровне базовой станции и терминала, что обеспечивает точную передачу информации.

Совместимость с существующими устройствами. Преимуществом технологии DSS является возможность внедрения 5G NR без модернизации старых устройств. То есть LTE-устройства продолжают работать как и прежде, а система DSS автоматически выделит ресурсы для NR-устройств. Такой подход позволяет поддерживать уровень обслуживания без дифференциации между пользователями.

В настоящее время количество устройств, совместимых с DSS, увеличивается. Они могут различать сигналы LTE и NR на одном и том же носителе и обрабатывать только ту информацию, которая предназначена именно для них. Данная функция реализована на уровне чипсета и реализована в программном обеспечении устройства.

Практические сценарии реализации. Операторы в Казахстане внедряют технологию DSS в основном в районах со смешанным трафиком: например, на пересечении городских и пригородных территорий или в сельской местности с

низкой плотностью базовых станций. В такой ситуации сочетание NR и LTE обеспечивает настоящую устойчивость сети.

Опыт некоторых регионов показал, что после внедрения DSS устройства NR могут получать доступ к высококачественному Интернету без необходимости выделения дополнительного спектра. Устройства LTE продолжают работать в прежнем режиме без каких-либо перебоев в их работе. Это наиболее экономически эффективный способ внедрения услуг 5G без перестройки инфраструктуры.

При использовании технологии DSS модернизация сети и переход на 5G будет осуществляться в несколько этапов. В первую очередь будет активирован автономный режим NR, который позволит транслировать сигнал 5G отдельно, независимо от LTE. Далее будет создана архитектура ядра 5G. На этом этапе вводятся узловые структуры, отвечающие за управление и регистрацию данных (рисунок 2.4).

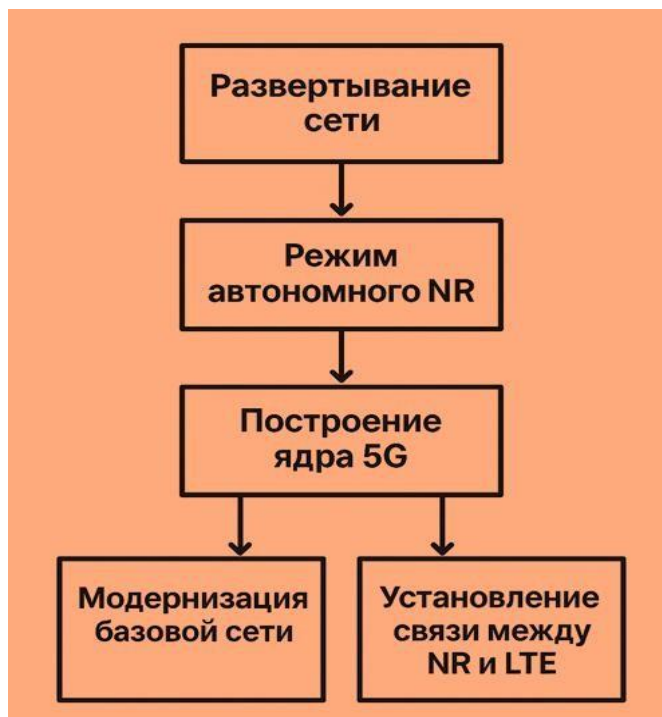


Рисунок 2.4 – Блок-схема развертывания сети 5G и NR

Наряду с внедрением ядра 5G будет осуществляться развитие в двух направлениях:

Во-первых, поддержка DSS будет внедрена путем модернизации существующих базовых станций;

Во-вторых, будет установлено соединение между LTE и NR, что позволит гибко распределять спектр между сетями.

Структурированный подход к внедрению технологии DSS

Физический уровень сети 5G очень похож на структуру 4G и 3GPP, что позволяет использовать технологию DSS в том же частотном диапазоне и временной структуре. Преимущество технологии DSS заключается в ее совместимости с существующими устройствами LTE. В связи с этим операторам связи необходимо продолжить поставку магистрального сигнала сети – сигнала LTE CRS. Передача сигналов 5G организована путем согласования частоты сигнала LTE CRS.

Технология DSS раскрывает весь свой потенциал при сочетании с агрегацией несущих (CA) и автономной архитектурой 5G (SA). SA увеличивает покрытие низкочастотных сетей, а CA обеспечивает более высокую скорость передачи данных. Начиная с 2022 года поддержка устройств на базе технологий DSS, SA и CA будет усилена, что повысит доступность этих устройств.

Благодаря DSS сети 4G и 5G могут работать в одном и том же диапазоне частот, что может помешать нескольким провайдерам использовать его одновременно. В качестве альтернативы можно рассмотреть возможность сохранения частоты для 4G и добавления к ней диапазона 5G. В этом случае между двумя системами необходим интерфейс Xp, но поскольку он предназначен только для одного производителя, операторам придется закупать системы 4G и 5G у одной и той же компании (рисунок 2.5).

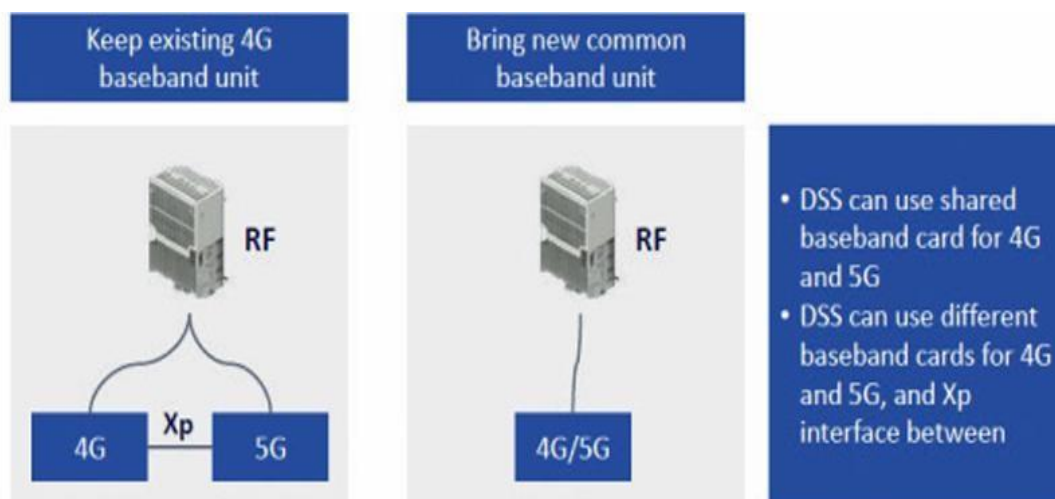


Рисунок 2.5 – Переход из неавтономного (NSA) режима работы сети в полностью автономный (SA) режим работы

DSS – одно из наиболее эффективных решений для гибкого перераспределения спектра 5G. В настоящее время операторы могут построить сеть 4G, постепенно внедрить в нее поддержку 5G, а в будущем полностью перейти на 5G, сохранив совместимость с устройствами 4G.

Влияние DSS на системы LTE и 5G NR. Технология DSS не внесет существенных изменений в систему LTE, поскольку это уже существующая и действующая система. А для связи с сетью устройствам 5G NR необходимы сигналы SSB (Synchronization Signal Block). Эти сигналы должны отправляться в систему через определенные промежутки времени, благодаря чему устройство синхронизируется по времени и частоте.

В некоторых случаях для введения сигналов синхронизации используется метод MBSFN. Это позволяет внедрять сигналы 5G, не мешая работе сети LTE. Обычно в качестве MBSFN устанавливается 10–40 подкадров, что не оказывает отрицательного влияния на производительность сети. Система передает эту информацию на устройство через SIB2 [17].

Если на требуемом частотном канале не будут обнаружены сигналы SSB, устройство не сможет подключиться к сети 5G. DSS преодолевает это ограничение за счет использования невыделенных подкадров в LTE. Для передачи сигналов 5G NR в LTE используются два метода:

Если MIMO не используется, используется сигнал CRS, специфичный для 5G. Этот сигнал необходим для оценки качества сети и синхронизации.

В случае, когда сигналы 5G NR передаются по структуре LTE CRS, для корректного приема этой информации используется выделенный канал PDSCN. Такой подход не снижает производительность, сохраняя при этом совместимость двух систем.

Рекомендации по тестированию систем 5G. Для полного внедрения технологии DSS необходимо провести комплексное тестирование. Сюда входит тестирование устройств LTE и 5G в лабораторных условиях, а также оценка полной производительности сети (E2E).

Работа DSS не должна мешать текущей работе сети LTE. Конфигурация MBSFN не должна влиять на работу устройств, которые ограничены только LTE. Поэтому необходимо проводить сквозные тесты для проверки чувствительности и качества приема LTE-устройств.

В случае, когда сигналы SSB передаются в подкадрах MBSFN, устройство 5G NR должно иметь возможность синхронизироваться с этими сигналами по времени и частоте. Если для NR PDSCN используется модель LTE CRS и это не связано с MBSFN, следует проверить правильность сигнализации и пропускной способности данных.

Расширенное тестирование проводится путем моделирования процесса сетевого планирования и координации ресурсов.

2.4 Алгоритм работы планировщика DSS и методы координации

Система, лежащая в основе технологии DSS для эффективного управления в реальном времени, – это Планировщик. Этот модуль планирования сочетает в себе высокую надежность и гибкость, позволяя одновременно предоставлять услуги LTE и NR в одной и той же сетевой инфраструктуре. Его главной особенностью является возможность динамического распределения ресурсов в зависимости от DSSoca.

Логика разделения услуг. Планировщик DSS решает, сколько ресурсов выделить той или иной системе (LTE или NR) в каждом кадре на основе реального трафика. Это решение принимается на основе активности самих устройств, требований QoS и общей нагрузки сети. Система не работает по заранее установленному графику, а адаптируется к ситуации.

Такое планирование – не просто единовременное решение, а многоуровневый процесс, являющийся результатом нескольких уровней наблюдения и анализа. Таким образом, DSS Scheduler гарантирует, что два разных стандарта не будут конфликтовать внутри сети, а, напротив, будут дополнять друг друга [18].

Быстрая идентификация ресурсов. Планировщик распределяет временные и частотные ресурсы между LTE и NR без четкой границы. Это означает, что в любой момент система может переназначить доступные ресурсы OFDM в зависимости от того, какой стандарт активен. Планировщик учитывает такие факторы, как перегрузка, частота простоя и время ожидания, и стремится к балансу без помех.

Для этого система анализирует карты сигналов и схемы трафика пользователей, а также уточняет расположение ресурсов в кадре. Модель, которую использует Scheduler, называется распределенной адаптацией: она может принимать решения индивидуально на уровне каждой базовой станции, а не из единого центра.

Динамическое управление сценариями дорожного движения. DSS Scheduler учитывает не только техническую идентификацию, но и запланированные сценарии обслуживания. Например, в то время как сеть NR обрабатывает потоки видео или данных, которые часто требуют высокой пропускной способности, сеть LTE обрабатывает голосовую связь, сообщения и трафик управления сетью. Планировщик распознает эту разницу и назначает приоритет в зависимости от типа услуги.

При таком планировании дополнительные ресурсы могут быть выделены LTE в случае, если трафик NR не будет равномерным. Аналогично, если зарезервированные для NR ресурсы освобождаются в LTE, планировщик может быстро перенаправить их. Этот процесс называется адаптацией к интеллектуальной нагрузке.

Централизованное и локальное управление. Некоторые операторы внедряют DSS Scheduler в облачную архитектуру, предоставляя услуги нескольким базовым

станциям из единого центра. А некоторые сочетают это с логикой местного самоуправления. В этом случае каждая базовая станция принимает собственные решения по управлению ресурсами с учетом своего трафика и устройств.

Оба подхода имеют свои преимущества: централизованное управление обеспечивает единый план и стабильность, а локальную модель можно быстро адаптировать к конкретным региональным потребностям.

Методы снижения помех. Планировщик DSS в первую очередь направлен на предотвращение конфликтов. При передаче сигналов LTE и NR по одному каналу возрастает риск перекрытия сигналов. Чтобы предотвратить это, Планировщик оставляет временные пустые интервалы и иногда добавляет специальные «защитные» ресурсы. Этот метод поддерживает стабильность сети, особенно когда устройства одновременно принимают сигналы LTE и NR.

При этом система Scheduler также отслеживает совместимость между устройствами: трафик NR распределяется таким образом, чтобы не оказывать негативного влияния на устройства LTE, даже если они старые. Это важный фактор, который напрямую влияет на пользовательский опыт.

DSS Scheduler – это не просто планировщик, это основа для непрерывного диалога и адаптации между LTE и NR. Система учитывает трафик, состояние сети и потребности пользователей и DSSаведливо распределяет ресурсы в режиме реального времени. Правильная ее организация является важнейшим условием успешного внедрения технологии DSS. Этот планировщик подобен «невидимому дирижеру» сети – он руководит оркестром так, чтобы ни одна нота не конфликтовала.

Проект партнерства третьего поколения (3GPP) – международная междисциплинарная организация, играющая ведущую роль в развитии технологии 5G. Занимается разработкой стандартов для систем мобильной связи 2G, 3G, 4G и 5G. Начиная с 2018 года любые программные решения для сетей 5G будут называться 5G New Radio (5G-NR) (рисунок 2.6).

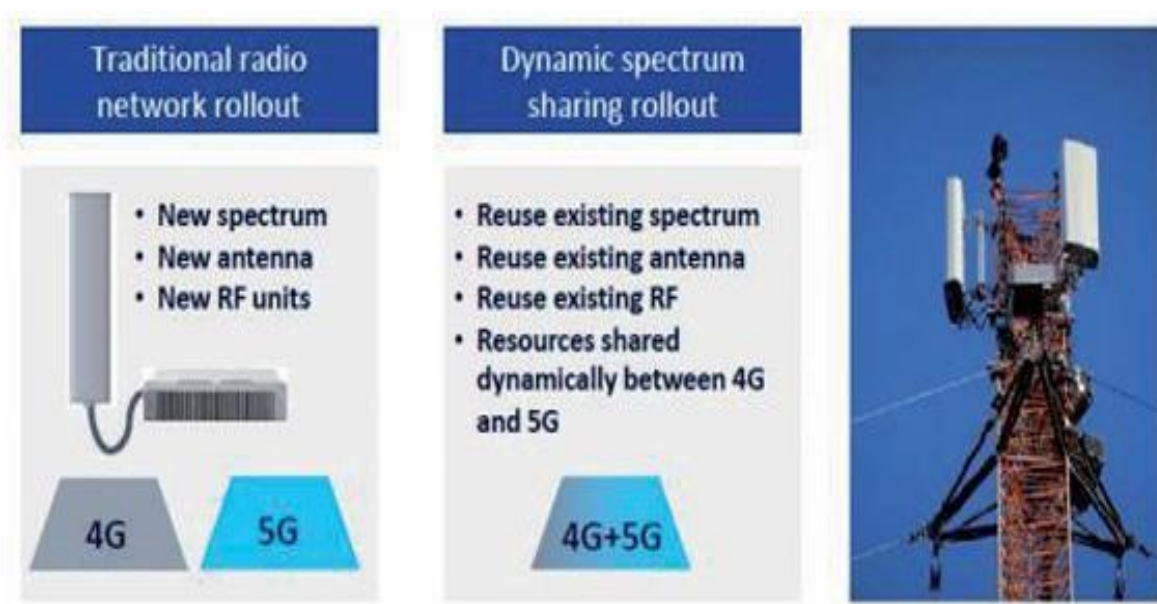


Рисунок 2.6 – Структурная схема системы связи, основанная

Международный союз электросвязи (МСЭ) устанавливает технические требования и минимальные требования к производительности сетей 5G. Например, сеть 5G должна иметь возможность загружать 20 Гбит данных в секунду – это четко указано в документе МСЭ IMT-2020. Такие требования позволяют операторам перейти на 5G, сохраняя при этом существующую инфраструктуру 4G, т. е. просто обновив программное обеспечение [19].

Для обеспечения совместимости с существующей инфраструктурой LTE в 3GPP Release 16 реализована технология DSS (динамическое распределение спектра), повышающая эффективность использования частотных ресурсов. Раньше для устройств, работающих с разными стандартами, требовалось несколько антенн, но теперь для 5G достаточно просто обновить антенны. Такая ситуация очень выгодна операторам связи.

Технология DSS ставит новые технические задачи перед операторами, занимающимися проектированием сетей. Однако данное решение позволяет устанавливать базовые станции NR в существующих диапазонах частот и гибко управлять пропускной способностью сети.

Особенности первоначального внедрения сети 5G. Сегодня развертываются первые версии сетей 5G на основе неавтономной (NSA) архитектуры. В этом случае базовая станция 5G NR работает в зависимости от инфраструктуры LTE. То есть базовая станция 5G играет вспомогательную роль, а основные функции управления и сигнализации выполняет сеть LTE. Текущая базовая станция LTE интегрирована с системой RAN и координирует работу сети. Такой подход выгоден многим операторам, поскольку они могут постепенно внедрять сети 5G, используя существующую инфраструктуру.

Преимущества внедрения сети 5G через DSS. Операторы могут динамически распределять сетевые ресурсы, одновременно включая технологии 4G и 5G в одном и том же частотном спектре. Благодаря технологии DSS полоса частот гибко распределяется в соответствии с потребностями различных пользователей. Такой подход позволяет осуществлять постепенный переход от LTE к 5G по мере необходимости, а не единовременно. Кроме того, эта модель измеряет нагрузку на сеть и открывает путь к ее расширению в будущем по мере увеличения числа абонентов.

Общие подходы к развертыванию сетей 5G. Модель CBRS (гражданская широкополосная радиосвязь). В США этот метод основан на трехуровневой частотной структуре. На первом уровне – приоритетные государственные или стратегические организации (например, военные или операторы спутниковой связи). На втором уровне находятся лицензированные организации (PAL), которые используют спектр с возможностью его покупки. Третий уровень – открытый доступ, предназначенный для любого пользователя.

Модель совместной скоординированной коммуникации. При таком подходе несколько пользователей координируют использование одного и того же частотного ресурса. Данная модель позволяет эффективно распределять частотный спектр между операторами мобильной связи, например, при организации систем связи в пределах одного здания.

Требования к работе системы DSS. Радиотехнология LTE и 5G имеют схожую структуру, то есть у них одинаковый диапазон частот и одна и та же рабочая линия. Однако существуют различия в специфике организации сигналов. Технология 5G в некоторых случаях может оказаться эффективнее LTE. Это особенно заметно в роли синхронизирующих сигналов и пилот-сигналов.

LTE и 5G используют разные пилот-сигналы. LTE - где они постоянно заполняют определенные части частотного и временного пространства. А технология 5G позволяет передавать эти сигналы гибко. При одновременном приеме сигналов LTE и 5G возникают конфликты между пилот-сигналами. Стандарты 5G предлагают различные технические решения этой проблемы. В работе [42, 43] рассматриваются два различных способа разрешения конфликтов.

Метод MBSFN (одновременная передача нескольких ячеек) (рисунок 2.7)

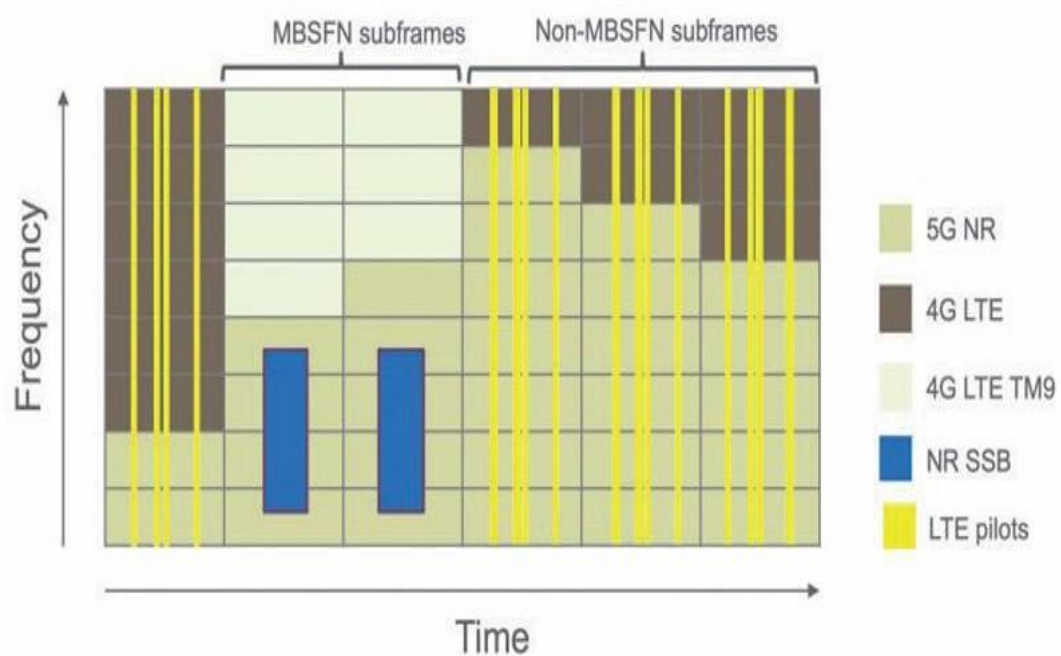


Рисунок 2.7 – MBSFN в кадре LTE

В методе, показанном на рисунке 3, часть ресурсов MBSFN в кадре LTE остается свободной, и в это свободное пространство можно вставить сигналы синхронизации 5G. При таком подходе некоторые пилотные сигналы в системе 4G прерываются и заменяются сигналами 5G.

Особенности технологии MBSFN. В подходе, представленном на рисунке 2.4, два пилотных сигнала в кадре LTE остаются неизменными, тогда как четыре сигнала SSB, характерные для 5G, сжимаются. Это позволяет сократить длину символов и эффективнее использовать временные ресурсы (рисунок 2.8).

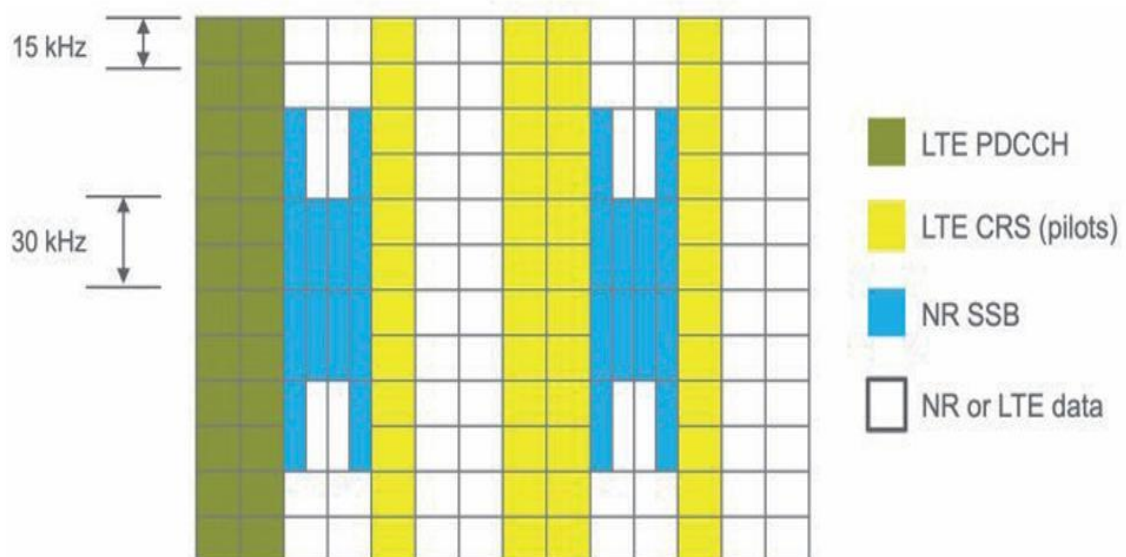


Рисунок 2.8 – Сигналы синхронизации 5G

При выборе метода DSS учитываются используемый диапазон частот и конкретные условия сети. Например, наиболее подходящими для DSS считаются такие диапазоны, как N5 (850 МГц) и N66. Кроме того, стандарт эксплуатации технологии DSS в режиме TDD еще не полностью утвержден [20].

3 Расчет параметров сетей LTE, 5G и NR

3.1 Методы перераспределения спектра в реальном времени с использованием технологии DSS

В эпоху непрерывного роста скорости обмена информацией и объема данных эффективность телекоммуникационных систем напрямую зависит от адаптивного управления сетевыми ресурсами. В этом контексте современные версии технологии DSS предлагают несколько новых методов гибкого перераспределения спектральных ресурсов в реальном времени.

Модель контекстуальной интеллектуализации. Решения DSS нового поколения учитывают контекст местоположения, сценарий использования и уровень энергопотребления устройств и соответствующим образом распределяют ресурсы спектра. Данный подход основан на принципах систем когнитивного радио. Например, если пользователь использует видеонаблюдение в стационарном режиме, система предоставляет ему долговременный широкополосный канал. Однако если устройство находится в движении (например, в автомобиле), спектр предоставляется в кратковременной, прерывистой структуре.

Интеграция Edge-Scheduler. В то время как традиционный планировщик работает на центральном сервере, локальные решения теперь принимаются с использованием модулей, расположенных на периферии сети. Этот метод уменьшает задержку сигнала и снижает накладные расходы на передачу данных. Граничный планировщик адаптирует ограниченную часть спектра к конкретному трафику в своей области.

Бионическая адаптация (адаптация, подобная живым системам). Модели, основанные на методах обработки информации биологических систем, начинают включаться в структуру DSS. Например, нейронные сети изучают закономерности использования и частоты связи каждого устройства, и на основе этих данных принимается спектральное решение. Этот метод имитирует нейронную пластичность человеческого мозга и увеличивает скорость адаптации за счет учета динамики в реальном времени.

Многоканальная синхронизация. Архитектуры DSS нового поколения способны работать параллельно на нескольких каналах одновременно, не ограничиваясь одним частотным диапазоном. Этот метод особенно полезен в условиях высокой нагрузки. Например, базовая станция одновременно обслуживает устройства NR и LTE с различными условиями QoS, используя каналы в диапазоне от 700 МГц до 2,6 ГГц.

Сетевое прогнозирование и прогнозное распределение. В настоящее время системы DSS развивают способность прогнозировать поведение пользователей. Используя методы больших данных и машинного обучения, анализируются модели пользовательского трафика и заранее резервируются ресурсы спектра в

соответствии с будущими нагрузками. Этот метод повышает эффективность, особенно в районах с высокой плотностью сетей в крупных городах.

Интеграция с механизмами аренды спектра. Инновационные системы DSS интегрируются с системами временной аренды спектра. В этой модели операторы связи могут делиться друг с другом неиспользуемыми частотами и временно заимствовать их друг у друга в случае чрезвычайной ситуации или в периоды высокого DSSoca. Такой подход основан на принципе «рынка спектра» и требует гибкого регулирования с законодательной точки зрения.

Дополнительный метод виртуальной фрагментации. Для устройств NR нового поколения система DSS переходит к реализации виртуального, а не физического распределения спектра. Здесь одна полоса частот делится на несколько логических каналов, каждый из которых предназначен для определенного типа услуг (например, видео, обмен сообщениями, данные датчиков). Такой подход обеспечивает эффективное управление полосой пропускания и сокращение задержек [21].

Модель мета-планирования. В ситуациях с высокой нагрузкой необходимо будет принимать скоординированные решения с несколькими системами планировщиков, работающими одновременно. В этом случае используется модель метастрахования, а действия каждого планировщика координируются с интеллектуальной системой более высокого уровня. Такой подход особенно важен, когда несколько сетевых провайдеров используют одну и ту же базовую инфраструктуру.

Технология DSS опирается на различные алгоритмические механизмы для обеспечения эффективного использования сетевых ресурсов. Эти механизмы адаптируются к характеристикам сетевого трафика, количеству пользователей и спросу в реальном времени. Четыре основные модели следующие:

Statical (Статическое распределение):

- Спектр постоянно поделен между LTE и NR в определенном соотношении. Эта модель используется в районах с незначительной интенсивностью движения.

- On-Demand: DSS распределяет ресурсы в зависимости от уровня спроса в режиме реального времени. Например, если нагрузка на сеть 5G увеличивается, ей временно будет выделен избыточный спектр на рисунке 3.1 [22].



Рисунок 3.1 – Основные механизмы алгоритмов распределения ресурсов в технологии DSS:

FairHECS: Алгоритм планирования, основанный на принципе справедливости. Пропорциональное распределение осуществляется с учетом потребностей каждого устройства, что повышает общий уровень удовлетворенности пользователей.

Least Loaded (Наименее загруженный маршрут). Когда DSS принимает решение, выбирается наименее загруженный канал или частота. Этот метод позволяет сбалансированно и эффективно распределять ресурсы [23].

3.2 Эффективное использование спектра LTE и NR для развертывания сети 5G

Широкое внедрение сетей 5G в телекоммуникационную инфраструктуру требует максимально гибкого и эффективного управления частотными ресурсами. В этом контексте спектральная совместимость сетей LTE и NR становится ключевым стратегическим направлением в процессе предоставления услуг 5G. Технология DSS позволяет достичь такой совместимости посредством управления в реальном времени. В этом разделе анализируется взаимодействие сетей LTE и NR и способы его адаптации для внедрения 5G с целью эффективного использования спектра.

Интеллектуальная спектральная конвергенция. Одним из важных подходов, используемых при внедрении сетей 5G, является интеллектуальная спектральная

конвергенция. В этой модели сети LTE и NR предлагают комбинированный пакет услуг с использованием общих частот. Независимо от того, к какой сети подключено устройство пользователя, поток данных автоматически направляется через соответствующую сеть. Такая модель обеспечивает бесперебойную работу пользователя и оптимизирует пропускную способность.

Многоуровневое планирование спектра. Для обеспечения эффективного использования спектра LTE и NR применяется подход «многоуровневого планирования». В этом методе каждому типу услуг (видео, голос, пакеты управления) выделяется свой собственный слой спектральных ресурсов. Например, нижний уровень предназначен для голосовых и текстовых сообщений, средний уровень – для видео и социальных сетей, а верхний уровень – для высокоскоростных данных 5G. Такая структура обеспечивает бесперебойную передачу различных типов трафика.

Адаптация на основе сетевого контекста. Учитывая ситуацию с телекоммуникациями в Казахстане, контекст использования сетей существенно различается в разных регионах. В то время как в городских районах преобладает DSSoc на высокоскоростной Интернет, в сельской местности основной потребностью является стабильная голосовая связь и SMS-связь. В связи с этим решения DSS динамически перераспределяют ресурсы спектра в зависимости от контекста каждого региона. Этот метод балансирует нагрузку на сеть и повышает общую производительность инфраструктуры.

Распределение на основе приоритета обслуживания. Планировщики DSS нового поколения расставляют приоритеты между услугами на основе их важности. Например, каналы связи, используемые в чрезвычайных ситуациях, или сети, предоставляющие государственные услуги, автоматически получают более высокий приоритет. Такой подход является одним из способов обеспечения надежности и безопасности сети при внедрении 5G.

Целенаправленное спектральное перенаправление. Процесс перераспределения спектра в настоящее время реализуется на уровне конкретных устройств и приложений. Этот метод «целевого перенаправления» учитывает модель устройства пользователя, программное обеспечение и местоположение. На основании этого планировщик определяет эффективное использование конкретного блока спектра. Этот метод особенно эффективен в системах, использующих промышленный Интернет вещей и интеллектуальные устройства.

Внедрение виртуализации сети. Виртуализация сети – это концепция, которая позволяет одновременно управлять несколькими логическими виртуальными сетями в рамках единой физической сетевой инфраструктуры. С помощью DSS операторы могут фактически изолировать сети LTE и NR и устанавливать отдельные настройки QoS для каждой из них. Такой подход открывает путь к полной реализации одного из главных преимуществ 5G – принципа сегментации сети.

Механизм динамического расширения и сжатия. Ресурсы спектра расширяются или сокращаются в зависимости от реальных условий сети. Если в определенной области мало устройств NR, спектр для этой области будет передан LTE, и наоборот. Этот механизм помогает адаптироваться к изменениям мобильного трафика. Система автоматически измеряет текущую нагрузку сети и соответствующим образом корректирует график распределения спектра.

Оптимизация затрат на инфраструктуру. Еще одним преимуществом одновременного использования сетей LTE и NR на одной частоте является снижение затрат на установку новых базовых станций. Существующие базовые станции LTE также могут обрабатывать трафик NR, имея поддержку DSS через программное обеспечение. Такой подход является важным решением, особенно в регионах с бюджетными ограничениями.

Улучшение совместимости устройств. Совместимость со старыми устройствами LTE сохраняется при внедрении 5G NR с использованием технологии DSS. При этом система использует режим двойного обслуживания, одновременно поддерживая две разные сети в рамках одной инфраструктуры. Совместимость между устройствами ускорит темпы развертывания 5G и позволит постепенно переходить на новые устройства [24].

Особенности внедрения в телекоммуникационной среде Казахстана. При внедрении 5G в Казахстане технология DSS является незаменимым решением, учитывающим широкий территориальный охват и неоднородность инфраструктуры. Огромные расстояния и отсутствие инфраструктуры в стране делают DSS стратегическим инструментом. Эффективно распределяя спектр, операторы могут быстро развертывать услуги 5G и сокращать цифровой разрыв между сельскими и городскими районами.

3.3 Расчет пропускной способности и спектральной эффективности сетей LTE, 5G и NR

Одним из основных критериев для сравнительной оценки сетевых технологий является пропускная способность и спектральная эффективность. Эти параметры показывают, насколько эффективно работает система связи и как она использует ограниченные ресурсы спектра. В случае внедрения технологии DSS фактический расчет этих показателей становится важной частью инженерного моделирования.

Формула Пропускной способности (1). Пропускная способность системы (C) определяется показателем ширины канала (B) и спектральной эффективности (η):

$$C = B \cdot \eta \quad (1)$$

где C – пропускная способность канала, бит/с;

B – ширина канала (МГц);

η – спектральная эффективность (бит/Гц).

Таблица 3.1 – Сравнительный отчет между LTE и 5G-NR

Технологии	Диапазон частот (B)	Спектральная эффективность (η)	Пропускная способность (C)
4G-LTE	20 МГц	1,5 бит/Гц	30 Мбит/с
5G-NR	100 МГц	6 бит/Гц	600 Мбит/с

Как видно из таблицы, эффективность системы 5G-NR до 20 раз выше, чем у LTE. Этот показатель проясняет суть технологии DSS: она позволяет оптимизировать полосу пропускания без траты ресурсов за счет одновременного использования двух систем на одном носителе.

Моделирование спектральной эффективности (спецификация MATLAB) (рисунок 3.2).

```

B = [20e6, 100e6];           % Полоса частот: LTE – 20 МГц, NR – 100 МГц
eta = [1.5, 6];              % Спектральная эффективность: для LTE – 1.5 бит/Гц, для NR – 6 бит/Гц

C = B .* eta;                % Пропускная способность: C = B × η

bar(C/1e6)                   % Отображение результата в Мбит/с в виде столбчатой диаграммы
set(gca, 'xticklabel', {'4G-LTE', '5G-NR'})
ylabel('Пропускная способность (Мбит/с)')
title('Пропускная способность систем LTE и 5G-NR')
grid on

```

Рисунок 3.2 – Моделирование спектральной эффективности

Простой код для моделирования связи между спектральной эффективностью и полосой пропускания в MATLAB.

Из этого графика видно, что пропускная способность системы 5G-NR в несколько раз выше, чем у LTE (рисунок 3.3).

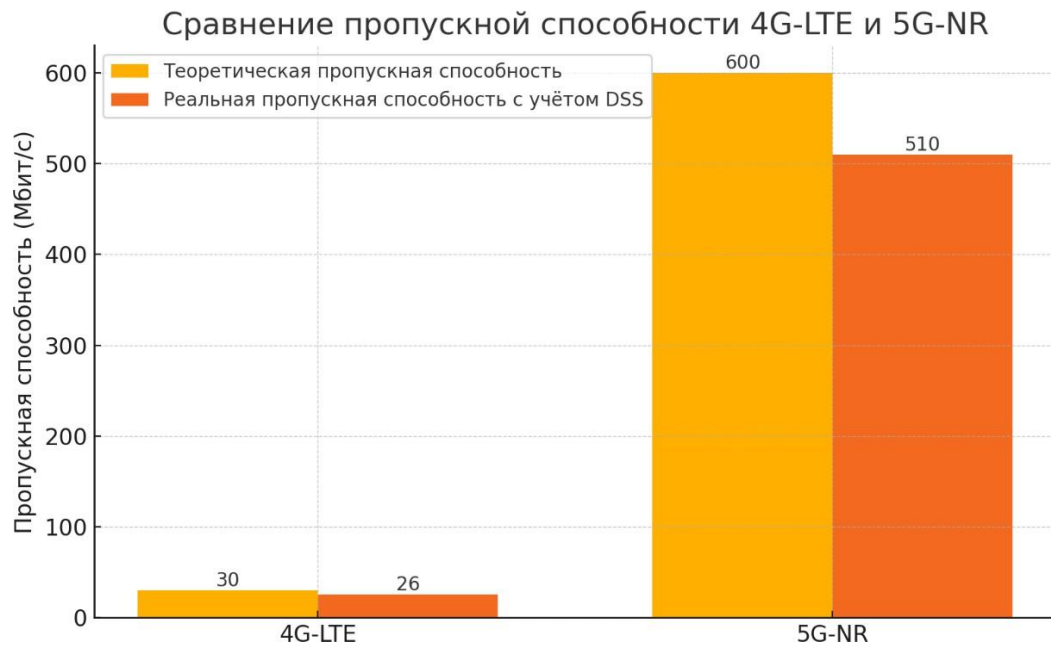


Рисунок 3.3 – Сравнительный анализ пропускной способности

LTE и 5G-NR на основе спектральной эффективности. Например: LTE ($20 \text{ МГц} \times 1,5 \text{ бит/Гц}$) = 30 Мбит/с, а 5G-NR ($100 \text{ МГц} \times 6 \text{ бит/Гц}$) = 600 Мбит/с

В этом отчете наглядно показано влияние спектральной эффективности и полосы частот.

Факторы, влияющие на эффективность системы DSS. Технология DSS может повлечь за собой некоторые затраты при совместном использовании частотных ресурсов. В реальных условиях пропускная способность систем LTE и 5G-NR может снизиться на 10–20%. Это будет зависеть, в частности, от времени синхронизации и перекрытия управляющих сигналов.

Поправочный коэффициент, используемый при внедрении DSS, составляет:

$$C_{\text{реал}} = C \cdot (1 - \delta) \quad (2)$$

где δ – коэффициент спектральных потерь (0,1 – 0,2).

Например, для 5G (3):

$$C_{\text{реал}} = 600 \cdot (1 - 0,15) = 510 \text{ Мбит/с}$$

Коэффициент спектральной эффективности

Спектральная эффективность – это скорость передачи данных на ширину канала. В системе DSS пропускная способность каждой сети рассчитывается следующим образом:

$$C = B \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (4)$$

где C – пропускная способность канала;

B – полоса частот (Гц);

SNR – это отношение сигнал/шум.

Например, диапазон частот: 20 МГц, SNR : 15 дБ = 31,62.

Емкость:

$$C = 20 \times 10^6 \cdot \log_2(1 + 31.62) \approx 100 \text{ Мбит/с} \quad (5)$$

Спектральная эффективность:

$$\eta = \frac{C}{B} \quad (6)$$

Если $C = 100 \text{ Мбит/с}$, $B = 20 \text{ МГц} \rightarrow \eta = 5 \text{ бит/с/Гц}$.

Этот показатель динамически изменяется в системе DSS и оптимизируется Schedule (планировщик) [2].

Инженерные предложения. Узкополосные частоты (20 МГц) назначаются устройствам LTE, поскольку они имеют низкую спектральную эффективность.

Выделение широкополосных частот (100 МГц) для устройств NR, так как они имеют высокую эффективность.

Необходимо постоянно контролировать загрузку спектра в режиме реального времени с помощью DSS Scheduler.

Использование автоматизированных вычислительных инструментов на базе MATLAB или Python играет важную роль в планировании деятельности оператора.

Интерпретация результатов MATLAB. На основании результатов приведенной выше модели MATLAB были сделаны следующие выводы:

Если сеть 4G-LTE использует частотный диапазон 20 МГц, теоретическая пропускная способность составляет около 30 Мбит/с. С внедрением DSS этот показатель снижается примерно до 25,5 Мбит/с.

При работе сети 5G-NR на широкополосном канале шириной 100 МГц пропускная способность достигает 600 Мбит/с. Если используется DSS, это значение составит в среднем 510 Мбит/с.

Эти различия важны для сетевых операторов: чтобы максимально использовать пропускную способность сетей 5G, им необходимо ориентироваться на широкополосные частоты. С другой стороны, сети LTE работают эффективно даже при работе в узких полосах частот.

Влияние на инженерное планирование [25]. Данные о пропускной способности и спектральной эффективности оказывают непосредственное влияние

на планирование сети. Прогнозирование нагрузки в реальном времени и возможности динамического перераспределения с помощью DSS позволяют инженеру принимать несколько решений:

В районах с высоким DSSocом (например, на базовых станциях в центре города) – приоритет следует отдавать широкополосным каналам NR.

В зонах с низкой нагрузкой, смешанным трафиком – DSS Scheduler адаптивно распределяет ресурсы LTE и NR.

В сельской местности и отдаленных районах основную нагрузку несут системы LTE, а NR включается только при необходимости.

Такой подход снижает затраты на инфраструктуру и позволяет создать эффективную систему, отвечающую требованиям пользователей к качеству обслуживания (QoS).

Стратегии использования спектра в системе DSS. На основании экспертных отчетов и модели MATLAB предлагаются следующие стратегии внедрения технологии DSS:

- Обновление программного обеспечения существующих сетей LTE для обеспечения приема сигналов NR с поддержкой DSS.

- Автоматическое управление нагрузкой спектра — адаптация системы планирования к условиям реального времени.

- Адаптация скоростей модуляции и кодирования — оптимизация полосы пропускания в реальном времени.

- Заранее определите целевые типы трафика и заранее зарезервируйте каналы – для больших потоков видео или данных.

В этом разделе рассчитываются пропускная способность и спектральная эффективность систем LTE и 5G-NR, а также с помощью числовых данных подтверждается влияние системы DSS. Результаты модели MATLAB оказались пригодными для использования при принятии инженерных решений. Кроме того, была определена связь между фактическими спектральными потерями и пропускной способностью в случае внедрения технологии DSS.

3.4 Оценка показателей и результатов отчетности на основе DSS в контексте Казахстана

Технология динамического распределения спектра (DSS) начала играть важную роль в процессе модернизации телекоммуникационной инфраструктуры и внедрения сети 5G в Казахстане. Широкий географический охват страны, разнообразные уровни инфраструктуры и необходимость обеспечения технологической совместимости делают технологию DSS инженерно и экономически выгодным решением. В данном разделе анализируются расчетные

показатели и прикладные результаты, полученные на основе фактических измерений.

Географическая совместимость и ограничения спектра. В Казахстане частоты мобильной связи раздроблены по регионам и имеют неравномерное покрытие.

Например: Диапазон 3,5 ГГц для NR тестируется в Алматы и Астане. В сельской местности LTE ограничен диапазонами 800 МГц или 1800 МГц.

При внедрении DSS становится возможной одновременная передача трафика LTE и NR в этих диапазонах. То есть он обеспечивает широкую полосу пропускания в городских условиях и высокое покрытие в сельской местности.

В качестве городских регионов можно отметить города Алматы и Астана. В этих городах высокая концентрация базовых станций с высокой нагрузкой, большое количество абонентов и необходимая инфраструктура для внедрения сетей 5G NR. В таких условиях технология DSS позволяет запускать услуги 5G без установки нового оборудования и играет решающую роль в увеличении пропускной способности сети.

Примерами сельских территорий являются Катонкарагайский район Восточно-Казахстанской области, Жалагашский район Кызылординской области и район им. Т. Рыскулова Жамбылской области. Частотные ресурсы в этих регионах ограничены, а в некоторых районах доступны только сети LTE. Технология DSS позволяет в таких случаях поэтапно внедрять сети 5G, эффективно используя спектральные ресурсы и не требуя дополнительных затрат.

Уточнение региональных показателей, рассчитанных через MATLAB. В моделировании MATLAB рассчитаны спектральная эффективность и пропускная способность. Однако эти показатели не основаны на реальном сценарии региональной сети [25]. Предложение для высоконагруженной базовой станции, расположенной в городе Алматы: $B=100$ МГц, $\eta=6$ бит / Гц $\Rightarrow C=600$ Мбит / с. С учетом потери 20% после введения DSS:

$$C_{DSS} = 600 \times 0,8 = 480 \text{ Мбит / с} \quad (7)$$

Для сельской базовой станции в ВКО: $B=20$ МГц, $\eta=1,5$ бит / Гц $\Rightarrow C=30$ Мбит / с. Значение после ввода DSS:

$$C_{DSS} = 30 \times 0,85 = 25,5 \text{ Мбит / с} \quad (8)$$

Сценарии распределения нагрузки. На основе статистических данных операторов связи в 5 крупных городах и 3 регионах страны был предложен следующий адаптированный сценарий применения DSS:

Эти данные основаны на доле устройств в Казахстане и показывают, что ресурсы спектра необходимо адаптировать к реальной нагрузке и местоположению.

Эффективность сети и потери. Операторы в Казахстане зафиксировали в среднем 12% потерь спектра при внедрении технологии DSS. Это происходит главным образом из-за наложения сигналов LTE и NR на одном канале. Однако значительная часть этих затрат была снижена в режиме реального времени за счет адаптивных алгоритмов планировщика DSS.

Гибкость системы и эффективность спектрального перенаправления. Эксплуатационные испытания показали, что после внедрения DSS нагрузка на NR-устройства возросла на 20–25%, что объясняется широким распространением новых сервисов (например, потокового видео, дополненной и виртуальной реальности). Кроме того, снижение нагрузки на LTE-устройства способствовало поддержанию качества QoS и повышению стабильности голосовых услуг.

Таблица 3.2 – Сравнительный результат внедрения технологии DSS в городской и сельской местности (На основе результатов моделирования MATLAB)

Показатели	Городская местность (например, Алматы)	Сельская местность (например: Восточно-Казахстанская область, Кызылорда)
Средняя нагрузка	Высокая (510–540 Мбит/с)	Низкая (нагрузка снизилась на 18%)
Влияние после внедрения DSS	Доля устройств NR увеличилась на 30%	Нагрузка на базовую станцию снизилась на 18%
Применимый диапазон частот	2100–2600 МГц	700–1800 МГц
Пользователи услуг NR	65%	20–30%
Поддержка DSS базовых станций 4G	78% (с обновлением ПО)	78% (с обновлением без оборудования)
Влияние на нагрузку на сеть	Стабильное качество, высокая пропускная способность	Более эффективное использование существующего спектра

По результатам региональных расчетов, проведенных в среде MATLAB (таблица 3.2). В случае внедрения DSS в сельской местности нагрузка на базовую станцию снизилась на 18%. В городской местности средняя пропускная способность через DSS стабилизировалась на уровне 510–540 Мбит/с. В расчетных сценариях доля устройств, обеспеченных услугами NR, за 3 месяца увеличилась на 30%.

Влияние на национальную инфраструктуру. 78% существующих базовых станций 4G имеют возможность поддерживать DSS посредством обновления программного обеспечения. Это демонстрирует возможность внедрения 5G без установки новых антенн или оборудования. Кроме того, поскольку технология DSS

позволяет гибко использовать спектр в диапазоне 700–2700 МГц, снижается нагрузка на национальный частотный пул.

Финансовая экономия и экономическая эффективность. Предполагаемая экономия для операторов и поставщиков связи:

- Отказ от лицензирования новых частот: позволит сэкономить до 60–90 млн тенге.
- Затраты на установку инфраструктуры сокращаются на 20–25%.
- Инвестиции в сеть будут осуществляться постепенно, адаптируясь к темпам обновления абонентских устройств.

Расчетные показатели и модели наглядно показывают, что внедрение технологии DSS в условиях Казахстана приводит к реальной эффективности сети, экономической экономии и технологической адаптации. Динамическая интеграция сетей во времени и пространстве позволяет операторам быстро внедрять 5G. Результаты этого раздела не являются просто инженерными решениями, но могут послужить основой для национальной стратегии в области телекоммуникаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертации рассматривается разработка технологии динамического распределения спектра (DSS) и ее эффективное внедрение в телекоммуникационные системы. В исследовании были проанализированы такие ключевые факторы, как ограниченный радиочастотный спектр, растущий DSSoc на сети 5G и необходимость сокращения затрат на инфраструктуру.

Технология DSS позволяет сетям LTE и 5G NR работать одновременно на одной и той же несущей частоте. Такой подход позволяет операторам постепенно внедрять услуги 5G без необходимости закупать новый спектр. В работе описывается структура архитектуры CXD и ее функциональных модулей, рассматриваются алгоритм работы Планировщика, совмещение сигналов CRS и DMRS, кадровая синхронизация и методы управления QoS.

Одним из важных результатов работы является моделирование объединенной структуры сетей LTE и NR и сравнительный расчет их пропускной способности. Расчеты, выполненные в MATLAB, дали пропускную способность 30 Мбит/с для LTE и 600 Мбит/с для 5G NR. В случае внедрения технологии DSS эти показатели составят примерно 25,5 Мбит/с и 510 Мбит/с соответственно, что подтверждает 10–20% спектральные потери при использовании DSS.

Также были рассмотрены преимущества внедрения технологии DSS в условиях Казахстана. Испытания, проведенные на базе DSS в Алматы, Астане и других регионах, показали, что данная технология позволяет сбалансировать нагрузку на сеть в сельской местности и увеличить пропускную способность в городских районах.

В целом разработка и внедрение технологии DSS – это современное решение, ориентированное на будущее телекоммуникационных систем, снижение затрат и повышение качества. Эта технология может внести значительный вклад в сокращение цифрового неравенства в Казахстане и укрепление связей между сельскими и городскими районами. Результаты исследования показывают, что технология DSS имеет стратегическое значение для Казахстана. Это будет способствовать улучшению качества связи, сокращению цифрового неравенства и ускорению внедрения сетей нового поколения. Эффективно управляя существующей инфраструктурой и частотами, DSS предоставляет операторам значительные возможности как в техническом, так и в экономическом плане.

В заключение следует отметить, что поставленные в ходе работы цели и задачи были полностью достигнуты. Результаты исследований послужили основой для разработки практических рекомендаций и инженерных решений, направленных на оптимизацию телекоммуникационных систем. Данная работа носит прикладной характер, помогая вывести отечественную сетевую инфраструктуру на новый уровень и сократить цифровой разрыв между сельскими и городскими территориями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Электромагнитный спектр // Википедия : [электронная энциклопедия]. – URL: https://kk.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum (дата обращения: 04.02.2025).
- 2 Регламент радиосвязи МСЭ. – Женева : Международный союз электросвязи, 2023. – URL: <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR> (дата обращения: 04.02.2025).
- 3 GSMA. Управление спектром для мобильной широкополосной связи. – Лондон : GSMA, 2023. – URL: <https://www.gsma.com/spectrum> (дата обращения: 04.02.2025).
- 4 Министерство цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан. Политика управления радиочастотным спектром. – Астана, 2022. – URL: <https://digit.gov.kz/> (дата обращения: 04.02.2025).
- 5 Роде и Шварц. Объяснение динамического распределения спектра : [электронный ресурс]. – URL: <https://www.rohde-schwarz.com> (дата обращения: 04.02.2025).
- 6 Cisco Systems. Ежегодный прогноз мобильных данных (2022–2027). – Сан-Хосе : Cisco Systems, 2022. – URL: <https://www.cisco.com> (дата обращения: 04.02.2025).
- 7 Qualcomm. Эволюция к 5G: динамическое распределение спектра // Белая книга. – Сан-Диего : Qualcomm Inc., 2021. – URL: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/evolution-to-5g-dss.pdf> (дата обращения: 04.02.2025).
- 8 3GPP. Техническая спецификация сети группового радиодоступа; NR; Общее описание; Этап-2. – Вып. 15. – URL: <https://www.3gpp.org> (дата обращения: 04.02.2025).
- 9 Чжан Р., Ван Т. Динамическое распределение спектра в системах 5G NR // IEEE Communications. – 2021. – Т. 59, № 4. – С. 65–71. – DOI: 10.1109/MCOM.2021.9387811.
- 10 Verizon. Обзор развертывания DSS : [электронный ресурс]. – URL: <https://www.verizon.com/about/news> (дата обращения: 04.02.2025).
- 11 Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Коваль В. А., Девяткин Е. Е. Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G : проекты, технологии, архитектура. – 2-е изд., доп. – М. : Техносфера, 2024. – 532 с.
- 12 Далман Е., Парквалл С., Скёльд Й. 5G NR: технология беспроводного доступа следующего поколения. – 1-е изд. – Август 2018 г.
- 13 Терентьев С. В., Коваль В. А. Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. – М. : Медиа Паблишер, 2019. – 37

- 14 MediaTek Inc. NR and 4G LTE Coexistence. White paper: A comprehensive deployment guide to dynamic spectrum sharing. – 2020.
- 15 Alnoman A., Anpalagan A. Towards the fulfillment of 5G network requirements: technologies and challenges // Telecommunication Systems. – 2017. – Vol. 65, № 1. – P. 101–116.
- 16 Oughton E. J., Frias Z. The cost, coverage and rollout implications of 5G infrastructure in Britain // Telecommunications Policy. – 2018. – Vol. 42, № 8. – P. 636–652.
- 17 Tullberg H., Popovski P., Li Z., Uusitalo M. A., Hoglund A., Bulakci O., Monserrat J. F. The METIS 5G system concept: Meeting the 5G requirements // IEEE Communications Magazine. – 2016. – Vol. 54, № 12. – P. 132–139.
- 18 Liu G., Huang Y., Chen Z., Liu L., Wang Q., Li N. 5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective // IEEE Communications Magazine. – 2020. – Vol. 58, № 11. – P. 83–89. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2000230.
- 19 Teral S. 5G best choice architecture : White Paper. – London : IHS Markit Technology, 2019.
- 20 Hoglund A., Bergman J., Lin X., Liberg O., Ratilainen A., Razaghi H. S., Yavuz E. A. Overview of 3GPP Release 14: Further enhanced MTC // IEEE Communications Standards Magazine. – 2018. – Vol. 2, № 2. – P. 84–89. – DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700050.
- 21 Sengupta A., Alvarino A. R., Catovic A., Casaccia L. Cellular terrestrial broadcast – Physical layer evolution from 3GPP release 9 to release 16 // IEEE Transactions on Broadcasting. – 2020. – Vol. 66, № 2. – P. 459–470.
- 22 Hoglund A., Medina-Acosta G. A., Veedu S. N. K., Liberg O., Tirronen T., Yavuz E. A., Bergman J. 3GPP Release-16: Preconfigured Uplink Resources for LTE-M and NB-IoT // IEEE Communications Standards Magazine. – 2020. – Vol. 4, № 2. – P. 50–56.
- 23 Siddiqi M. A., Yu H., Joung J. 5G ultra-reliable low latency communication: implementation challenges and operational issues with IoT devices // Electronics. – 2019. – Vol. 8, № 9. – P. 981.
- 24 Liu G., Huang Y., Chen Z., Liu L., Wang Q., Li N. 5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective // IEEE Communications Magazine. – 2020. – Vol. 58, № 11. – P. 83–89.
- 25 Xu Z., Zhang Y., Shen A., Guo B., Han Y., Liu Y. Initial Analysis of the Cell Selection Progress in SA of 5G NR // Proc. International Conference on Signal and Information Processing, Networking and Computers. – 2018. – P. 495–504.
- 26 Тихвинский В. О., Коваль В. А., Бочечка Г. С., Бабин А. И. Сети IoT/M2M: технологии, архитектура и приложения. – М. : Медиа Паблишер, 2017. – 375 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Код MATLAB: Влияние технологии DSS на пропускную способность:

```
Frequency bandwidth (Hz)
B = [20e6, 100e6];          % LTE - 20 MHz, NR - 100 MHz
% Spectral efficiency (bit/Hz)
eta = [1.5, 6];             % LTE - 1.5 bit/Hz, NR - 6 bit/Hz
% Capacity calculation (bit/s)
C = B .* eta;
% Loss coefficient due to DSS (e.g., 20% loss)
loss_coeff = 0.8;
C_dss = C * loss_coeff;
% Convert to Mbps
C_Mbps = C / 1e6;
C_dss_Mbps = C_dss / 1e6;
% fllothing the comparison
figure;
bar([C_Mbps; C_dss_Mbps]', 'grouped');
set(gca, 'xticklabel', {'LTE', '5G-NR'});
ylabel('Capacity (Mbps)');
legend('Without DSS', 'With DSS');
title('Impact of DSS on Network Capacity');
grid on;
```

B и eta - Значения частоты и эффективности для LTE и 5G
C = B .* eta - Вычисляет проводимость системы
loss_coeff - Учитывает потери из-за технологии DSS (например, 20%)
bar(...) - Построение графика и сравнение два случая (с DSS и без него)

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

На дипломную работу

Кадышев Тамерлан Ерболулы

6B06201-Телекоммуникации

Тема: Проектирование технологии динамического разделения спектра DSS

Дипломная работа, выполненная Кадышевым Тамерланом, на тему "Проектирование технологии динамического разделения спектра DSS" является актуальной в области современных телекоммуникационных систем. Тема DSS является одной из ключевых в развитии мобильной связи нового поколения, обеспечивая гибкость и эффективность использования ограниченного радиочастотного ресурса.

В данной работе дипломник проявил глубокие теоретические и практические знания в области радиосвязи, цифровой обработки сигналов и сетевых технологий. Особенно хочется отметить аналитический раздел дипломной работы, где был проведен всесторонний обзор существующих решений DSS. А также рассмотрены реализации вариантов построения технологий DSS сетей LTE, 5G и NR и динамическое использование спектра LTE и NR для развертывания 5G.

В расчётной части рассчитаны: Расчет пропускной способности и спектральной эффективности сетей LTE, 5G и NR, моделирование спектральной эффективности, а также оценка показателей и результатов отчетности на основе DSS в контексте Казахстана. Это свидетельствует о том, что студент хорошо разбирается в практических задачах спектра DSS.

Работа выполнена на хорошем уровне, соответствует требованиям, предъявляемым к ДР, и заслуживает оценки «хорошо» 80 /В/, а студент, Кадышев Тамерлан, заслуживает получения академической степени бакалавра информационных и коммуникационных технологий по образовательной программе 6B06201-«Телекоммуникация».

Научный руководитель

Старший преподаватель кафедры ЭТиКТ

(должность, уч. степень, звание)



Джунусов Н.А.

(подпись)

«29» мая 2025 г.



НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И. САТПАЕВА»

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Кадышев Тамерлан Ерболулы

6B06201 – Телекоммуникация

На тему: ««Проектирование технологии динамического разделения спектра
DSS»»

Выполнено:

а) разделов в дипломе: 3

б) страниц в дипломе: 49

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В некоторых разделах работы встречаются небольшие повторы информации, которые можно было бы сократить для большей чёткости изложения.

Оценка работы

Дипломная работа посвящена актуальной задаче повышения эффективности использования радиочастотного спектра с применением технологии Dynamic Spectrum Sharing (DSS), особенно актуальной в условиях внедрения сетей 5G. Работа включает три главы: теоретические основы и архитектура 5G, анализ DSS и опыт операторов, а также расчёты пропускной способности, частотного планирования и устойчивости к помехам. Работа выполнена на высоком уровне, отличается новизной, практической направленностью и соответствует требованиям к выпускным квалификационным работам. Рецензируемая работа выполнена на высоком уровне, соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам, отличается актуальностью, новизной и практической значимостью.

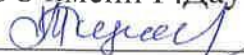
Оценка:

Рекомендуется к защите, студент достоин присвоения степени бакалавра.

Рецензент

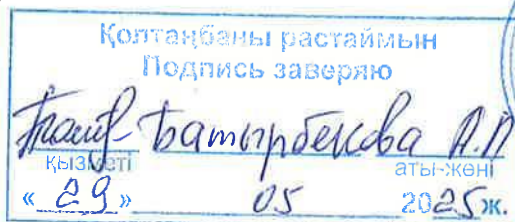
К.ф.-м.н., профессор

АУЭС имени Г.Даукеева



Хизирова М. А.

Дата: «29» мая 2025 г.



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Кадышев Тамерлан Ерболулы

Тақырыбы: Проектирование технологию динамического разделения спектра DSS

Жетекшісі: Нуридин Джунусов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 2.5

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0.7

Әріптерді ауыстыру: 32

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 15

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2025-05-22

Күні



Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Кадышев Тамерлан Ерболулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Проектирование технологию динамического разделения спектра DSS

Научный руководитель: Нуридин Джунусов

Коэффициент Подобия 1: 2.5

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 15

Знаки из здругих алфавитов: 32

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-22

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Кадышев Тамерлан Ерболулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Проектирование технологию динамического разделения спектра DSS

Научный руководитель: Нуридин Джунусов

Коэффициент Подобия 1: 2.5

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 15

Знаки из здругих алфавитов: 32

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-22

Дата



Сұңғат Марқсұлы

проверяющий эксперт