

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.419

Динамическое использование спектра в LTE и NR для развертывания 5G

Нидхи Шарма, Приянка Ахлават, Раджеш К. Аггарвал

Национальный технологический институт Курукшетра, <https://www.nitkkr.ac.in/>

Курукшетра-136119, Харьяна, Индия

E-mail: scholar.nidhisarmanidhi@gmail.com, priyanka.ablawat@nitkkr.ac.in, rka15969@gmail.com

Поступила 14.08.2023, рецензирована 21.08.2023, принята 28.08.2023

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

Аннотация: Как статическое распределение частотного спектра, развернутое в 4G-LTE, так и динамически настраиваемые каналы физического уровня 5G NR не удовлетворяют требованиям текущего экспоненциального роста числа пользователей беспроводной связи. Поскольку 5G NR будет работать лучше в сценариях прямой видимости (LOS), в то время как 4G-LTE обеспечивает замечательную производительность в сценариях отсутствия прямой видимости (NLOS). Динамическое совместное использование спектра (DSS) позволяет операторам одновременно запускать LTE и 5G NR в одном диапазоне. Эта статья иллюстрирует взаимосвязь и рабочую теорию динамического разделения спектра, чтобы понять, как последний стандарт 5G приведет к существенному улучшению средней пропускной способности пользователя и повышению эффективности сети. Это попытка предложить общую структуру для первоначального развертывания сети 5G.

Ключевые слова: динамическое совместное использование спектра, реформирование, орган по стандартизации, включение спектра, развертывание 5G, клубное лицензирование
UDC 004.03

Для цитирования: Нидхи Шарма, Приянка Ахлават, Раджеш К. Аггарвал. Динамическое использование спектра LTE и NR для развертывания 5G. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):419-432. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.419.

Dynamic Spectrum Sharing: A Quick fix to 5G deployment

Nidhi Sharma, Priyanka Ahlawat, Rajesh K. Aggarwal

National Institute of Technology Kurukshetra, Department of Computer Engineering, <https://www.nitkkr.ac.in/>

Kurukshetra-136119, Haryana, India

E-mail: scholar.nidhisarmanidhi@gmail.com, priyanka.ablawat@nitkkr.ac.in, rka15969@gmail.com

Received August 14, 2023, peer-reviewed August 21, 2023, accepted August 28, 2023

Abstract: Both Static allocation of the frequency spectrum as deployed in 4G-LTE as well as dynamically configured 5G NR physical layer channels does not satisfy the demand of current exponential growth of wireless users. As 5G NR will perform better in Line of Sight (LOS) scenarios while 4G-LTE provides remarkable performance in non-Line of sight (NLOS) scenarios. Dynamic Spectrum Sharing (DSS) allows operators to run LTE and 5G NR on the same band simultaneously. This paper illustrates the relationship and working theory of Dynamic Spectrum Sharing to comprehend how the latest 5G standard will result in a substantial improvement in average user throughput and improved network efficiencies. This is an effort to propose a generic framework to initial Deployment of 5G network.

Keywords: Dynamic Spectrum Sharing, Reframing, Standardization Authority, Spectrum Actuation, 5G deployment, club licensing

UDC 004.03

For citation: Nidhi Sharma, Priyanka Ahlawat, Rajesh K. Aggarwal. Dynamic Spectrum Sharing: A quick fix to 5G deployment. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2024, 16(3):419-432e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.419.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (420)
 2. ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ 5G (421)
 3. СПЕКТР ИЛИ КАНАЛ (421)
 - 3.1. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА (422)
 - 3.2. ПРОБЛЕМЫ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕКТРА (422)
 - 3.3. СПЕКТР АУКЦИОН (422)
 - 3.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ 5G, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯМ К СПЕКТРУ И ИНФРАСТРУКТУРЕ (423)
 - 3.5. ВЕРОЯТНЫЙ ПОДХОД К СОВМЕСТНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СПЕКТРА ДЛЯ 5G (423)
 4. СТАНДАРТИЗАЦИЯ 3GPP (424)
 - 4.1. ПЕРВОНАЧАЛЬНОЕ РАЗВЕРТЫВАНИЕ 5G (424)
 - 4.2. ДИНАМИЧЕСКОЕ СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА (DSS) КАК УНИКАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВЕХА В РАЗВИТИИ 5G (424)
 - 4.3. ВОЗМОЖНОСТИ 5G ОТ DSS (424)
 - 4.4. ОБЫЧНО ОБСУЖДАЮТСЯ ТРИ СХЕМЫ РАЗВЕРТЫВАНИЯ 5G (425)
 - 4.5. ТРЕБОВАНИЯ К РАДИОЧАСТОТАМ DSS И ПРОБЛЕМЫ ПРОВЕРКИ (425)
 5. ПРИНЦИП РАБОТЫ DSS (425)
 - 5.1. ТЕХНИКА MBSFN (МНОГОАДРЕСНАЯ ТРАНСЛЯЦИЯ ОДНОЧАСТОТНОЙ СЕТИ) (426)
 - 5.2. ТЕХНИКА НЕ-MBSFN (426)
 6. ПЕРСПЕКТИВЫ ДИНАМИЧЕСКОГО СОВМЕСТНОГО СПЕКТРА И СООБРАЖЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕТИ (426)
 7. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СХЕМА РЕАЛИЗАЦИИ DSS (427)
 - 7.1. ВЛИЯНИЕ DSS НА LTE И 5G NR (428)
 - 7.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕСТИРОВАНИЮ 5G (429)
 8. АНАЛИЗ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ (429)
 - 8.1. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПОСТАВЩИКОВ (429)
 - 8.2. DSS – ЭТО РАННЯЯ ФУНКЦИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ СЕТЕЙ 5G (429)
 9. БУДУЩИЕ ОБЪЕМЫ (430)
 - 9.1. СЕТЕВОЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОМАТИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА (430)
 - 9.2. СЕТЕВОЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗА СЧЕТ ИНТЕГРАЦИИ BLOKCHAIN-5G (430)
- ЛИТЕРАТУРА (431)

1. ВВЕДЕНИЕ

5G — это технология связи пятого поколения, способная обеспечить сверхвысокие скорости с улучшенной масштабируемостью, уменьшенной задержкой и более высокой надежностью. 5G-NR способен обрабатывать до одного миллиона устройств на км², тогда как 4G-LTE может поддерживать только одну десятую пропускной способности 5G-NR. 5G-NR будет использоваться для промышленного интернета вещей (IoT) для обеспечения тактильных ощущений в обычных случаях использования в повседневных приложениях.

Основным преимуществом сетей 5G-NR является более высокая пропускная способность и более высокая скорость загрузки до 10 Гбит/с за счет использования спектра миллиметровых волн (30–300 ГГц). Ожидается, что из-за увеличения пропускной способности сети 5G-NR будут обслуживать не только сотовые телефоны, но также могут использоваться в качестве обычных интернет-провайдеров (ISP) на ноутбуках и настольных компьютерах.

Сети 5G в настоящее время работают в трех диапазонах частот — низком, среднем и высоком — для широкого спектра приложений. Сеть 5G будет включать в себя до трех различных типов сотовых сетей, каждая из которых требует определенной конструкции антенны, каждая из которых имеет свой компромисс между загрузкой, расстоянием и зоной обслуживания [3]. Самая высокоскоростная антенна в пределах диапазона текущей сети подключается к мобильным телефонам 5G и беспроводным устройствам.

Начальные полосы частот для 5G во многих странах ниже 6 ГГц (часто в полосах 3.3–3.8 ГГц) и на частотах, аналогичных частотам современных мобильных сетей и сетей Wi-Fi. По сравнению с современными технологиями подвижной связи дополнительный мобильный спектр выше 6 ГГц, особенно диапазоны 26–28 ГГц, часто известные как миллиметровые (мм) волны, обеспечит гораздо большую пропускную способность. Будет возможно больше пользователей, больше данных и более быстрые соединения.

Раздел I этой статьи призван продемонстрировать необходимость и использование динамического совместного использования спектра (DSS) для начального развертывания сети связи 5G. В разделе II

объясняется принцип работы связи 5G при использовании существующей инфраструктуры 4G-LTE на основе аргументов, приведенных в разделе III (рассмотрение использования спектра) и разделе IV (стандартизация 3GPP). Затем в разделе VI проводится конструктивный сравнительный анализ всех перспектив динамического разделения спектра для соображений производительности сети. В разделе VII предлагается схема реализации DSS для будущей сети связи 5G. Наконец, в разделе VIII проводится анализ общих физических проблем для реализации подхода DSS, прежде чем перейти к заключению. Раздел IX дал представление о клубных методах искусственного интеллекта для повышения производительности, чтобы уменьшить задержку в будущих коммуникационных сетях.

2. ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ 5G

Сети связи 5G — это беспроводные сотовые сети, которые делят свою зону покрытия на небольшие региональные соты. В беспроводной ячейке беспроводные устройства 5G обмениваются данными с помощью радиоволн через назначения частотных приемопередатчиков через пул частот, которые будут повторно использоваться в другой ячейке. Локальные антенные решетки подключены к электронным передатчикам, подключенным к коммутации телефонной сети и высокоскоростным оптоволоконным или беспроводным транспортным соединениям с интернет-центрами и маршрутизаторами, как показано на **Рис. 1** [1]. Устройство, перемещающееся из ячеек в ячейки, автоматически передается в существующую ячейку, как и в других сотовых сетях.

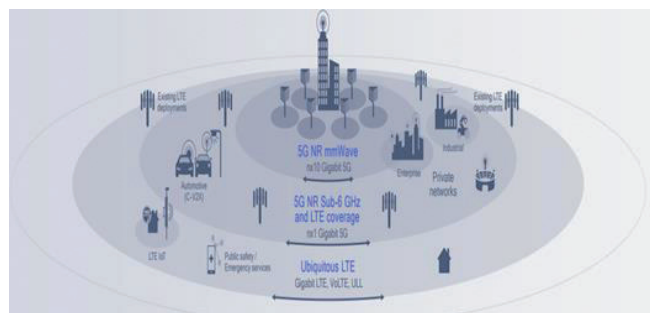


Рис. 1. Плотность сети 5G-NR и разнообразие развертываний.

На Рис. 1 показано, как данные передаются по сети 4G при сохранении соединения в районах с неравномерным покрытием 5G. Беспроводные устройства 5G могут быть оснащены 4G-LTE, поскольку сети связи 5G-NR используют 4G-LTE для первоначального установления сотового соединения в тех регионах, где доступ 5G не существует.

Все беспроводные устройства 5G в сети подключаются по радиоволнам с помощью локальной антенны сотовой связи [2]. По сути, сеть 5G является дополнением к существующей сети 4G с описанной выше конструкцией, как показано на Рис. 1. Как показано на Рис. 1, в сетях 5G используются различные макросоты, минисоты и специализированные системы внутри зданий, чтобы они могли сосуществовать с сетями 4G:

Малые соты — это миниатюрные базовые станции, созданные для заполнения более крупной макросети с очень локальным покрытием, обычно от 10 до нескольких сотен метров. Из-за чрезвычайно ограниченного диапазона частот миллиметрового диапазона малые соты имеют решающее значение для сетей 5G.

Новые сети, для которых требуются беспроводные устройства с поддержкой 5G, не могут использоваться мобильными телефонами 4G. Радиологические волны более высокой частоты, чем в предыдущих сотовых сетях, частично используются для достижения повышенной скорости. Однако более высокочастотные радиоволны имеют более короткий физический диапазон, что требует меньших географических ячеек. Из-за ограниченного рабочего диапазона расширенный спектр миллиметрового диапазона обеспечивает только ограниченное покрытие. В будущем возможно развертывание миллиметровых частот в диапазонах до 86 ГГц.

3. СПЕКТР ИЛИ КАНАЛ

Спектр или канал — это невидимые радиочастоты, передаваемые беспроводными сигналами. Участки электромагнитного спектра сгруппированы в "полосы" в зависимости от длины волны — расстояния, на котором повторяется длина волны. Полный спектр составляет от 3 Гц (очень низкая частота) до 300 Гц. Полный спектр (гамма-лучи). Этот раздел для беспроводной связи находится в

диапазоне от 20 кГц до 300 ГГц и находится в этом пространстве. Для целей беспроводной связи спектр подразделяется на низкочастотный, среднечастотный и высокочастотный. Все три категории используются в надежных сетях 5G [8]. Это связано с тем, что для различных типов связи и вариантов использования важна каждая полоса спектра:

1) Низкочастотный спектр (менее 3 ГГц) с низким уровнем прерывания сигнала распространяется на большие расстояния. Этот диапазон использовался рынком беспроводной связи для создания высокоскоростных беспроводных сетей.

2) Частота выше 24 ГГц классифицируется как высокочастотный спектр, который обеспечивает высокую пропускную способность и высокую скорость из-за низкого трафика в этом диапазоне.

3) В диапазоне от 3 до 24 ГГц смешиваются характеристики спектра низких и высоких частот, поэтому он называется спектром среднего диапазона.

Эта частота спектра передается между нашими мобильными устройствами и нашими сотовыми узлами. В настоящее время наиболее распространенными сотовыми площадками являются 150-футовые вышки сотовой связи, но в настоящее время быстро развертываются небольшие соты – небольшие антенны, чтобы уплотнить покрытие сети и часто обеспечивать соединения 5G в диапазоне средних и высоких частот [5].

3.1. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА

Функция Spectrum Sharing позволяет пользователям нескольких категорий безопасно использовать одни и те же полосы частот, чтобы оптимизировать использование каналов беспроводной связи. Из-за растущего спроса необходимо совместное использование спектра. Одни и те же диапазоны частот электромагнитного спектра используются для обмена данными, голосом и изображениями со смартфонов, Интернета вещей, общественных и военных радиоприемников, носимых устройств, беспилотных автомобилей и множества других устройств [6].

Совместное использование спектра в сельской местности может быть особенно полезным, поскольку операторы могут создавать более широкие каналы, основанные на отдельных узких блоках спектра в диапазонах «покрытия» ниже 1

ГГц. Этот подход также может поддерживать сверхбыстрые услуги 5G, работающие в миллиметровом диапазоне, поскольку покрытие часто невелико, поэтому операторы могут использовать спектр друг друга, когда другие операторы не используют этот подход. Это может включать концепцию «клубного лицензирования», согласно которой операторы покупают права доступа к части спектра, но также могут использовать спектр других операторов, если он не используется. Для целей связи спектр может быть выделен в миллиметрах (от 3 ГГц до 300 ГГц), в основном для "короткого" диапазона и, следовательно, лучше всего подходит как для внутренних приложений, так и для малых сот. Совместное использование спектра не должно подрывать долгосрочную эволюцию спектра [7].

3.2. ПРОБЛЕМЫ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕКТРА [8,9,10,11]

1. Совместное использование спектра может привести к спорам о частоте как во времени, так и в пространстве.
2. Большинство новых полос частот, выделенных для 5G, относятся к среднему и верхнему диапазону. 5G также необходимо использовать в нижних диапазонах частот, чтобы обеспечить экономически эффективное покрытие 5G и увеличить использование спектра средних и высоких частот. Однако в этих нижних диапазонах у многих операторов теперь есть технология долгосрочного развития (LTE).
3. Полная переработка несущих LTE-NR в настоящее время недостижима из-за высокого проникновения и объема трафика, генерируемого существующими устройствами LTE.

3.3. СПЕКТР АУКЦИОН

Метод, с помощью которого спектр распределяется между коммерческими пользователями, которые, скорее всего, эффективно и результативно используют ограниченный ресурс. FCC уполномочена проводить аукцион по продаже лицензированного спектра с 1994 года [12,13].

Спектр может быть лицензирован, а может и не быть. Нелицензионные диапазоны используются для подключения устройств Bluetooth и Wi-Fi. Оба спектра были выделены Федеральной комиссией по связи (FCC). Однако спектр — это ресурс, и мы не можем сделать

больше. Совместное использование спектра все чаще рассматривается политиками как средство открытия дополнительных мобильных услуг для 4G и 5G. Глобальная гармонизация спектра для 5G является ключом к успеху новой технологии 5G для поставщиков сетевого оборудования и устройств [14,15]. В диапазонах частот мм-волн, где произошло значительное технологическое развитие, позволяющее использовать частоты 5G, гармонизация спектра особенно важна [16].

3.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ 5G, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯМ К СПЕКТРУ И ИНФРАСТРУКТУРЕ

Основные методы и технологии, которые лягут в основу сетей 5G, соответствующие требованиям к спектру и инфраструктуре, включают [17,18,19,20]:

1) Новый радиointерфейс 5G NR, который можно использовать либо в качестве интерфейса, либо в качестве автономного развертывания с базовой сетью 4G. Использование существующей базовой сети 4-G LTE может ускорить первоначальное развертывание автономного режима (NSE).

2) Использование сред со смешанным спектром, включая лицензированные и нелицензированные приложения использования спектра. Нелицензируемый спектр миллиметровых волн в диапазоне от 60 до 70 ГГц для 5G принимается во внимание регулирующими органами на нескольких рынках.

3) Виртуализация сети, обеспечивающая гибкое предоставление и развертывание сетевых мощностей. Нарезка сети позволяет сети использовать ресурсы, необходимые для видеопотока с срезом более высокого разрешения, чем устройство IoT с низкой пропускной способностью.

В начале 2016 года MIMO использовался в 4G, обычно с использованием от 32 до 128 небольших антенн в каждой из ячеек (несколько входов и несколько выходов). Ожидается, что использование сложных технологий антенных решеток (например, Massive MIMO) в сочетании с базовой станцией в среднем диапазоне Massive (например, 3.5 ГГц) и в более высоком диапазоне станет ключевыми особенностями развертывания 5G NR (например, 26 ГГц) или 28 ГГц). В более высоких диапазонах из-за меньшего физического размера антенн возможно

большее количество комбинаций антенн. Комбинации MIMO 4x4 теперь доступны уже сегодня.

Малые соты могут сыграть важную роль в программе развития операторов 5G. Это уже расширяет сети 4G на нескольких рынках и использует малые соты самыми разными способами, в том числе для увеличения покрытия на открытых площадках и для покрытия внутренних помещений, а также для наложения сайтов макросот для увеличения пропускной способности, если это необходимо (например, внутри городская среда). В эпоху 5G можно будет снизить барьеры за счет возможности подключения к существующим структурам, модернизированного одобрения и разумной платы за использование сот.

3.5. ВЕРОЯТНЫЙ ПОДХОД К СОВМЕСТНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СПЕКТРА ДЛЯ 5G

Чтобы изменить опыт конечных пользователей, необходимо предпринять следующие шаги для совместного использования спектра для развертывания 5G [21,22].

Первый шаг: открыть широкое покрытие 5G для расширенных вариантов использования 5G, чтобы предоставить конечным пользователям беспрецедентный доступ.

Второй шаг: включить программирование с задержкой 1 мс для обеспечения максимальной эффективности использования спектра и разрешить использование новых вариантов автономного использования 5G с низкой задержкой.

Последний шаг: разрешить более высокие максимальные тарифы на большей территории в сочетании с агрегацией операторов связи.

5G должен работать в низкочастотных диапазонах, где большинство операторов в настоящее время используют технологию LTE, чтобы обеспечить экономичное покрытие 5G на большой территории. Полностью перефармить операторов связи невозможно из-за высокого проникновения и большого объема трафика, генерируемого существующими пользователями LTE. Непрерывное покрытие необходимо для внедрения 5G, которое предлагает все преимущества разделения сети и меньшую задержку. Координация устройств с частотой

1 мс является ключевой функцией для поддержки случаев с низкой задержкой.

4. СТАНДАРТИЗАЦИЯ 3GPP

Партнерский проект третьего поколения (3GPP) — это отраслевой консорциум по 5G. 3GPP — глобальный орган по стандартизации мобильных сетей 2G, 3G, 4G и 5G. В 2018 году любая система, использующая программное обеспечение 5G New Radio, определяется как "5G-NR". Международный союз электросвязи (МСЭ) устанавливает минимальные стандарты. Сети 5G — это системные сети, которые обеспечивают скорость загрузки 20 Гбит/с, как указано в документе ITU IMT-2020. Это позволяет провайдерам беспроводной связи использовать спектр, который в настоящее время используется 4G, для запуска национального покрытия 5G, просто обновляя сетевое программное обеспечение [23,24].

Совместимость с существующими устройствами LTE также гарантирует, что абоненты LTE будут поддерживать такое же качество обслуживания. Также продолжается развитие спецификаций 3GPP. Версия 3GPP 16 повысит эффективность ресурса DSS (динамическое совместное использование спектра). Для работы с разными стандартами мобильных телефонов требовалось как минимум две антенны. Теперь все, что нужно для работы 5G, — это модернизация антенны [25,26]. Эти преимущества слишком привлекательны для операторов мобильной связи. DSS ставит новые задачи перед сетевыми операторами при проектировании и тестировании, но предлагает мощную функцию, которая позволяет развертывать NR в уже доступном спектре.

4.1. ПЕРВОНАЧАЛЬНОЕ РАЗВЕРТЫВАНИЕ 5G

Чтобы совместно использовать управление и сигналы при работе в автономном режиме (NSA), первоначальным сетям 5G NR требуется привязка LTE. Сеть радиодоступа (RAN) должна быть настроена, расширена, модифицирована и доступна для подключения 5G NR. В этой топологии базовая станция LTE действует как основная группа ячеек, а базовая станция 5G выступает в качестве вторичных ячеек. Существующая базовая сеть LTE [27] соединяет обе сети RAN. На данный

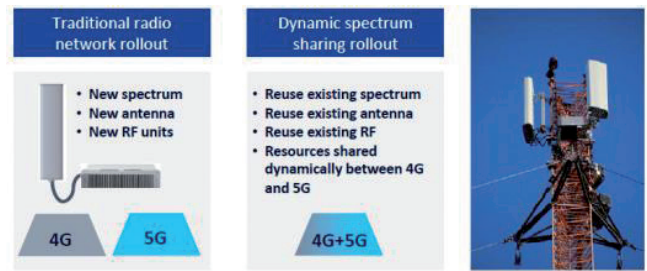


Рис. 2. Традиционная схема радиосвязи и схема на основе DSS.

момент установки 5G объединяют множество операторов LTE с оператором 5G NR [28,29].

Парный спектр, который составляет более 90% спектра ниже 8 ГГц и использует разные частоты для восходящей и нисходящей линии связи, станет основой для предстоящего этапа установки 5G NR [30].

4.2. ДИНАМИЧЕСКОЕ СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА (DSS) КАК УНИКАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВЕХА В РАЗВИТИИ 5G

С коммерческим переходом на 5G, а совместное использование спектра — заманчивой вариант для провайдеров, которые хотят быстро развернуть 5G в диапазонах дуплексной связи с частотным разделением без перераспределения спектра [31].

На Рис. 2 показана потребность и потребность в DSS в традиционных радиосетях. Новые технологии радиодоступа традиционно развертываются в сфере 2G, 3G и 4G, на отдельных блоках спектра. Таким образом, операторы будут покупать или перераспределять спектр у существующего поколения мобильной связи (4G), чтобы передать его новому будущему поколению (5G). Для этого потребуются операторы. Этот процесс очень медленный и дорогой. Перераспределение спектра может занять десять лет, но это можно сделать в одночасье с помощью совместного использования спектра [32]. Совместное использование динамического диапазона революционизирует внедрение и прорывную технологию, позволяя развертывать как 5G, так и 4G в одном диапазоне и динамически назначать диапазон ресурсам 5G/4G в зависимости от спроса пользователя.

4.3. ВОЗМОЖНОСТИ 5G ОТ DSS (DYNAMIC SPECTRUM SHARING)

Операторы могут развернуть 4G и 5G в одном блоке спектра с динамическим разделением спектра в 5G и динамически распределять нужный объем между различными типами пользователей по мере необходимости. Это позволяет им

уйти от перехода LTE на 5G до того, как в этом появится острая необходимость. Вместо этого вы можете измерить свои возможности 5G, увеличив число последователей [33].

Динамическое совместное использование спектра позволяет текущему оператору LTE одновременно использовать 5G New Radio (NR) и LTE – с помощью простого обновления программного обеспечения. Это решение основано на использовании алгоритмов интеллектуального планирования, которые обеспечивают оптимальную производительность при смене/переключении устройств 4G и 5G в сети связи [34]. Именно так новая технология DSS улучшит способ использования одного из наиболее ограниченных ресурсов (т.е. спектра) в сетях мобильной связи.

Динамическое совместное использование спектра ускоряет работу приложений 5G за счет устранения необходимости повторного фарминга. В настоящее время при развертывании 5G по всему миру используется оператор связи 5G, дополняющий ядро LTE и сеть радиодоступа. Первым шагом на пути к полноценному автономному 5G с выделенным ядром и RAN является отказ от сценария автономного 5G. В то же время операторы могут использовать программное обеспечение 5G для работы 5G при динамическом совместном использовании спектра высокого уровня в одном и том же диапазоне в зависимости от потребностей конечного пользователя [35].

4.4. ОБЫЧНО ОБСУЖДАЮТСЯ ТРИ СХЕМЫ РАЗВЕРТЫВАНИЯ 5G

1) Подходы для граждан типа службы широкополосной радиосвязи (CBRS): В США планируемый подход CBRS направлен на поддержку использования динамического совместного использования на трех уровнях. Верхний уровень состоит из тех, кто имеет наибольшую защиту (например, радары, поставщики услуг спутникового и беспроводного Интернета (ISP)). Второй уровень состоит из держателей лицензий приоритетного доступа (PAL), которые платят за права покупки в случае отсутствия возможности использования части доступного спектра на высшем уровне. Третий уровень включает в себя общий доступ (GAA) и открыт для всех, но имеет наименьшую защиту.

2) Лицензионный общий доступ: Лицензиаты имеют контроль над кругом дополнительных пользователей. Традиционная концепция диапазона 2.3 ГГц была создана в Европе. Он

разделен на два уровня: первичные пользователи (например, операторы мобильной связи), которым разрешено использовать спектр на открытых территориях, и вторичные пользователи (например, действующие пользователи).

3) Параллельный общий доступ. В отличие от описанных выше подходов, только один класс пользователей может совместно использовать спектр скоординированным образом. Это помогает повысить скорость передачи данных и эффективность использования спектра между операторами мобильной связи, например, при лицензировании клубов.

4.5. ТРЕБОВАНИЯ К РАДИОЧАСТОТАМ DSS И ПРОБЛЕМЫ ПРОВЕРКИ

Синхронизация систем 4G и 5G — один из ключевых элементов, который следует учитывать при измерении DSS. Чтобы предотвратить рассогласование блоков ресурсов, их необходимо синхронизировать по полям времени и частоты. Еще одним ключевым аспектом, который следует учитывать здесь, является быстрая скоординированная скорость между программистами пакетов LTE и NR, что важно для динамического распределения ресурсов. Декодирование пользовательского оборудования завершится неудачей, если будут выделены одни и те же ресурсы.

Синхронизация систем LTE и NR важна с точки зрения измерений. Параллельные измерения LTE и NR являются ключевым моментом для проверки работоспособности в лабораторных условиях перед тестированием оборудования на земле. Важно, чтобы сигналы LTE и NR были отделены от объединенного сигнала при тестировании передатчика DSS. При высокой корреляции синхронизации можно добиться успешной синхронизации. Также важно проверить функциональность существующих устройств LTE, поскольку на них это не должно повлиять. Для реализаций физических уровней необходимо выполнить проверку прохождения/отказа, чтобы контролировать величину вектора ошибок (EVM) и циклическую избыточность.

5. ПРИНЦИП РАБОТЫ DSS

Формы радиоволн LTE и 5G имеют много общего, что позволяет сосуществовать один и тот же спектр обеих форм сигналов. Однако существует множество отличий, которые делают 5G более эффективным, чем LTE. Пилот-сигналы и сигналы синхронизации работают с

LTE и 5G. Единственное отличие заключается в том, как они работают. Мобильный телефон использует пилот-сигналы для создания общего эталона для синхронизации сети. Для доступа к сети и связи решающее значение имеют пилот-сигналы и сигналы синхронизации.

Пилотные сигналы LTE и 5G различаются. Конкретные места в частотно-временном континууме занимают пилот-сигналы LTE. С другой стороны, 5G обладает большей гибкостью в распределении пилот-сигналов. Комбинация сигналов LTE и 5G приводит к конфликту сигналов синхронизации 5G с сигналами LTE. Стандарт 5G определил различные методы предотвращения конфликтов пилот-сигналов, чтобы решить эту проблему. Двумя из них являются [42, 43] следующие техники.

5.1. Техника MBSFN (МНОГОАДРЕСНАЯ ТРАНСЛЯЦИЯ ОДНОЧАСТОТНОЙ СЕТИ)

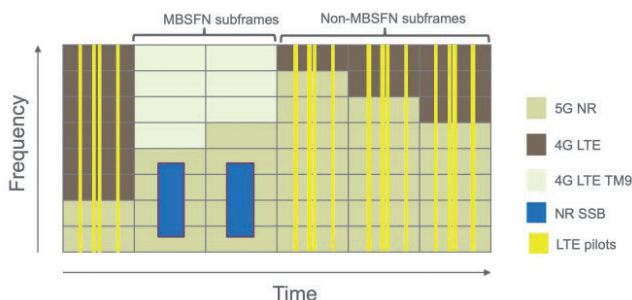
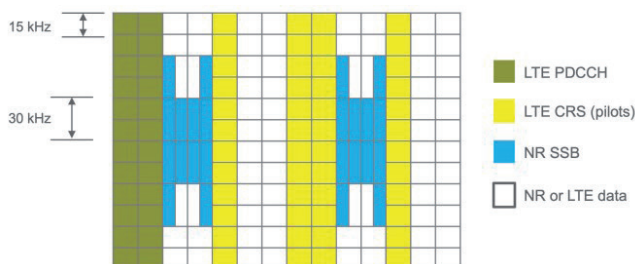


Рис. 3. Методика MBSFN для DSS2.

5.2. ТЕХНИКА НЕ-MBSFN

Как показано на Рис. 4, эта Система использует два символа LTE в кадре и сжимает 4 символа SSB (сжимает их), чтобы уменьшить продолжительность этих символов.



Множество факторов, включая рабочий диапазон частот, будут определять выбор того или иного метода. Это важно, поскольку некоторые полосы, такие как N5 (850 МГц) и N66, лучше определены для DSS. Определение DSS в режиме TDD не было завершено 3GPP.

Как показано на Рис. 3, решение иногда блокирует пилот-сигналы 4G и заменяет заблокированную передачу ресурса MBSFN, в которую вставляются сигналы синхронизации 5G.

6. ПЕРСПЕКТИВЫ ДИНАМИЧЕСКОГО СОВМЕСТНОГО СПЕКТРА И СООБРАЖЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕТИ

DSS нацелен на диапазоны, в которых уже работает LTE, в основном в диапазоне 700–2700 МГц. Поскольку DSS снижает пропускную способность, хорошей идеей является использование больших каналов LTE, таких как 20 и 10 МГц. Некоторые из перспектив DSS и соображения производительности сети:

1) В DSS один и тот же частотный спектр может использоваться LTE и 5G. Базовая станция назначает динамические ресурсы телефонам на базе LTE или 5G. С помощью DSS операторы могут активировать 5G без расширения для включения нового спектра, что полезно для провайдеров с ограниченным спектром. Это также понравится поставщикам услуг, которые хотят быстро получить статус 5G, используя существующую инфраструктуру и частотный спектр.

2) В LTE DSS полезен на ранних стадиях развертывания 5G, если проникновение устройств 5G невелико и реформирование LTE недоступно. Развертывание сетей 5G будет сосредоточено в первую очередь на использовании спектра средней полосы частот в городах. Таким образом, DSS можно использовать в районах с низкой плотностью населения для обеспечения покрытия 5G

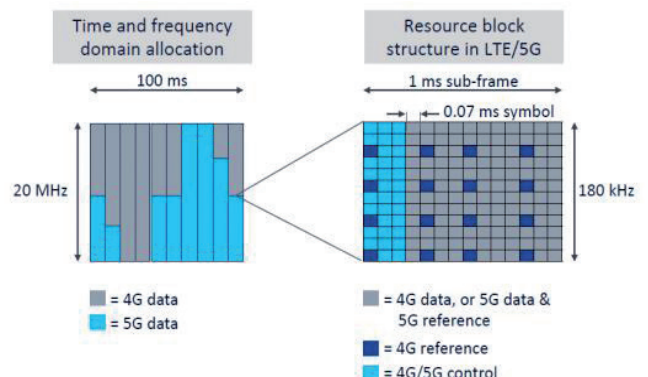


Рис. 5. Изменение традиционной структуры блоков ресурсов с использованием подхода DSS.

всего рынка поставщиков услуг. В этом случае поставщик услуг должен взвесить преимущества и стоимость перехода на оборудование 5G (Fig. 5).

3) Использование DSS для утверждения возможностей 5G будет интересно операторам с большими объемами частотного спектра. Это особенно актуально в США, где ранее был доступ к среднему спектру, в основном 290 МГц в спектре С-диапазона, который будет продан позже на аукционе. Эти две категории — AT&T и Verizon. Помимо учета 5G на частоте 600 МГц, T-Mobile/Sprint уже внедряет 5G на 2.5 ГГц, так что смысла в DSS у них нет. Некоторые операторы утверждают, что DSS будет предоставлять абонентам услуги 5G в более широком масштабе в низкочастотных диапазонах. Но существенной разницы в производительности в низкочастотных диапазонах между LTE и 5G нет.

4) Оператор небольшого спектра не может позволить себе потерять пропускную способность и предпочтет подождать, пока не будет приобретен средний диапазон частот. Некоторые поставщики услуг выиграют от DSS, если мы посмотрим на карту мира для распределения спектра средней полосы. В качестве основной части стратегии 5G поставщиков мобильных услуг становится динамическое разделение спектра (DSS). При использовании базовых станций сотовой связи DSS общая стоимость владения (ТОВ) для запуска 5G в диапазонах, используемых в настоящее время для 4G, обеспечивает самую низкую совокупную стоимость владения.

5) DSS — это элегантный способ, позволяющий операторам постепенно привлекать новых пользователей 5G, одновременно поддерживая традиционных клиентов 4G. Если в прошлом операторы хотели перейти на новую технологию, им нужно было оживить спектр, то есть удалить старых пользователей из части диапазона и зарезервировать блок для новых пользователей.

6) С точки зрения совместного использования статического спектра, когда LTE и 5G используются отдельно для определенного объема полосы пропускания и некоторого количества радиоборудования.

Если обеспечить статическое совместное использование и пропускную способность и удалить высоконагруженный диапазон LTE, это не только приведет к удалению пропускной способности определенных пользователей LTE, но также увеличит нагрузку и увеличит помехи в сети LTE, что снизит производительность пользователя.

7. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СХЕМА РЕАЛИЗАЦИИ DSS

Физический уровень 5G может быть настолько похож на 4G в 3GPP, что DSS возможен с тем же интервалом поднесущей и той же структурой во временной области. DSS может быть обратно совместим со всеми уже используемыми устройствами LTE. Следовательно, поставщикам услуг связи (CSP) необходимо поддерживать передачу опорного сигнала соты LTE (CRS). Передача 5G спроектирована так, чтобы скорость CRS соответствовала скорости LTE CRS.

DSS с агрегацией несущих (CA) 5G, особенно в сочетании с автономной архитектурой (SA), иллюстрирует все возможности этой технологии. SA максимизирует покрытие низкочастотной сети и услуги доступа 5G, в то время как CA предлагает самые высокие скорости передачи данных. В течение 2022 года будет обеспечена широкая поддержка устройств с DSS, SA и CA за счет увеличения количества устройств 5G. Таким образом, внедрение функции DSS соответствует повышению доступности устройств. Для DSS доступна одна общая плата основной полосы частот для 4G и 5G, что явно исключает решение 4G и 5G с участием нескольких поставщиков. Другая возможность — сохранить существующую полосу частот 4G и добавить новую полосу частот 5G. График основан на быстром Xr-интерфейсе между 4G и 5G между двумя базовыми функциями. Этот интерфейс не открыт и работает только для одного поставщика, поэтому поставщики услуг связи должны использовать одного и того же поставщика 4G и 5G при использовании DSS.

DSS — отличное решение для гибкого изменения структуры спектра 5G. Сегодня операторы могут построить сеть 4G с поддержкой 5G и частично или полностью перейти на 5G в любой момент в будущем, не теряя при этом обратной совместимости для пользователей устройств 4G.

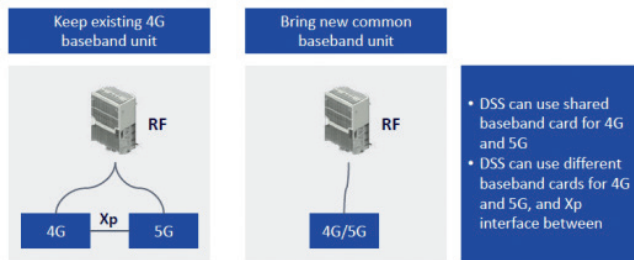


Рис. 6. Переключение ч/б неавтономного (NSA) режима в автономный (SA) режим.

Беспроводная мобильная связь приведет к увеличению скорости передачи данных, снижению задержек и увеличению пропускной способности системы в 5G NR (Новое радио). Как показано на **Рис. 6**, первая реализация 5G NR использует существующую инфраструктуру 4G LTE в автономном режиме (NSA), а позже за ней последует полностью независимый автономный режим (SA), который не зависит от LTE. Внедрение DSS позволит сосуществовать 5G NR и 4G LTE, а также обеспечит плавный переход между сетевыми операторами.

Не каждый поставщик услуг имеет лицензию на использование радиоволн TDD. Чтобы получить выгоду от оптимизированного качества обслуживания 5G и продолжить работу на новых вертикальных рынках, сетевой оператор должен перейти в автономный режим (SA), в котором 5G RAN подключается к базовой сети 5G (например, автомобильной и промышленной). Автономное развертывание достигается после ряда промежуточных шагов, и каждый оператор может выбрать свой собственный план 5G. Поставщики услуг должны выбирать между двумя дорогостоящими вариантами из-за использования их активов спектра в зависимости от FDD, т.е. покупки нового спектра и изменения структуры существующего спектра.

Однако стандарт 5G NR дает возможность адаптироваться к текущим приложениям LTE и использовать тот спектр, который в настоящее время используется исключительно LTE. Этот механизм позволяет DSS сосуществовать с одним и тем же спектром, позволяя использовать 5G NR и 4G LTE. В долгосрочной перспективе DSS позволит сетевым операторам обеспечивать 5G нижними частотными диапазонами с покрытием. Некоторые сетевые операторы уже используют DSS, и ожидается, что масштабное развертывание будет реализовано к концу 2021– началу 2022 года.

7.1. Влияние DSS на LTE и 5G NR

Влияние DSS на LTE незначительно, поскольку успешную технологию трудно изменить ее преемнику. Для доступа к сети устройство 5G NR должно обнаружить блоки синхронизации сигналов (SSB). SSB должны время от времени отправляться сетью с определенным интервалом для перевода SSB на уже занятый канал частот, используемых LTE, чтобы поддерживать синхронизацию по времени и частоте. В идеале использование одночастотных мультимедийных подкадров (MBSFN) позволяет сделать этот разрыв в непрерывной передаче LTE возможным [38].

Обычно только три из 40 подкадров устанавливаются как подкадры MBSFN, чтобы минимизировать их влияние на производительность LTE. Применяемая конфигурация передается через сеть LTE с информацией о блоках системного типа 2 (SIB2). Тот же SIB сообщает, что терминал с поддержкой 5G может подключить телефон к 5G RAN из обслуживающей соты LTE. Конфигурация MBSFN стандартного терминала LTE будет читать и игнорировать ширококвещательные подкадры.

Таким образом, телефон 5G будет иметь два активных радиомодуля: LTE и NR 5G. Первоначально DSS будет проводить тестирование в режиме АНБ. Часть LTE основана на тех же принципах, что и само устройство LTE. Часть 5G NR обнаружит передаваемый SSB в открытом подкадре LTE на желаемом частотном канале, когда целевая полоса частот проверяется на возможность совместного использования. Технология работает в рамках своего потенциала: для 5G NR доступны только три подкадра. DSS также позволяет использовать выделенные ненастроенные подкадры LTE для MBSFN посредством двух отдельных функций [39,40,41]:

1. Стандартные подкадры LTE, в зависимости от режима MIMO, включают CRS (специфичный для соты опорный сигнал), сопоставленный с определенными элементами ресурса частотно-временной сетки. Терминал LTE использует CRS для оценки канала и поддержания полной временной и частотной синхронизации. Соответствие скоростей вокруг LTE CRS было принято, чтобы позволить NR использовать эти подкадры.
2. Поддерживается альтернативный дополнительный пост для отображения опорного сигнала демодуляции (DMRS) на общий канал физических данных (PDSCH),

опять же для предотвращения коллизии с LTE CRS. Это возможность устройства; во время процесса первоначальной регистрации устройство сигнализирует о поддержке этой функции в сети.

Обсуждение сосредоточено на полустатической конфигурации, которая позволяет использовать определенные подкадры NR, если LTE отсутствует или когда NR передает компоненты основных сигналов LTE в подкадрах, не относящихся к LTE. Отображение карты определяется относительно начала PDSCH в слоте, и LTE и NR могут совместно использовать подкадр и передавать управление и детали.

7.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕСТИРОВАНИЮ 5G

Для внедрения DSS требуется обширное тестирование. Это включает в себя тестирование лабораторного пользовательского оборудования LTE, 5G и производительности сети с использованием сканеров и устройств для оценки покрытия и сквозной (E2E) производительности.

Активация DSS не должна создавать помех для текущего развертывания LTE в сети. Конфигурация подструктур MBSFN не должна влиять на устройства, поддерживающие только LTE. Прохождение E2E-тестов необходимо для минимального влияния на производительность LTE с активным MBSFN. Хотя подкадры MBSFN содержат 5G NR, включая SSB, следует отдавать предпочтение тестам чувствительности приема для устройств LTE, чтобы гарантировать соответствие требованиям. При передаче SSB в подкадрах, настроенных MBSFN, устройство с поддержкой 5G NR должно иметь возможность синхронизироваться с 5G RAN по времени и частоте. Когда шаблон LTE CRS для NR PDSCH используется для отправки 5G NR в подкадры, не относящиеся к MBSFN, достаточно проверить правильную реализацию функций стекирования с помощью теста пропускной способности данных. Расширенное тестирование устройств включает процессы динамического планирования, которые имитируют процесс NR для координации ресурсов.

8. АНАЛИЗ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Технически 5G не является независимой сетью, но добавляется к дополнительной емкости соты 4G. Помимо частоты 2,1 ГГц, 5G работает и на частоте 3,6 ГГц. Частота 2,1 ГГц обеспечивает высокоскоростную связь на больших расстояниях.

Это делает его идеальным для расширения сети 5G в этом районе. Частота 3,6 ГГц очень высока в более коротком диапазоне. Помимо спектра, прежде чем переходить к выводу, необходимо учитывать следующие моменты:

8.1. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПОСТАВЩИКОВ

DSS — относительно сложная функция, поскольку она предполагает планирование двух сетей. Расписание — это мозг базовой станции. Очень важно, как поставщики используют планировщик для определения приоритетов доступа к трафику 4G и 5G для оптимизации производительности. Поэтому тестирование DSS в действующих сетях важно в различных условиях. Другим аспектом дифференциации является степень детализации, над которой работает DSS. Значения находятся в диапазоне от 1 до 100 мс. Низкая степень детализации обеспечивает более быструю реакцию, чем высокая степень детализации, на изменение требований к трафику и повышает производительность.

DSS приводит к потере 10–20 процентов пропускной способности LTE и 5G [44]. Потеря емкости зависит от метода и способа реализации поставщика. Поэтому разница между поставщиками должна быть сосредоточена на сокращении потерь мощности. Накладные расходы в LTE потребляют около 20–25% пропускной способности канала, чтобы можно было учитывать потерю пропускной способности. 5G более эффективен и снижает нагрузку на канал примерно до 14 процентов. В контексте своего владения спектром и стратегии развития технологий поставщики услуг, стремящиеся максимизировать пропускную способность, должны рассмотреть DSS. Положительным моментом является то, что DSS позволяет сети динамически удовлетворять запросы пользователей LTE и 5G. Принимая решение о развертывании, операторам необходимо будет сопоставить эту выгоду с потенциальной потерей пропускной способности. В процессе принятия решений ключевое значение будет иметь владение спектром.

8.2. DSS – ЭТО РАННЯЯ ФУНКЦИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ СЕТЕЙ 5G

На более поздних стадиях это принесет мало пользы. С ростом проникновения 5G операторы LTE преобразуют 5G в 5G. Ожидается, что LTE достигнет своего пика через два года. Динамическое расширение спектра (DSS),

позволяющее операторам мобильной связи (MNO) расширять покрытие 5G без постоянной необходимости переосмысления спектра долгосрочного развития (LTE) или приобретения спектра 5G, может принести значительные преимущества. Обновление программного обеспечения существующих базовых станций позволяет развернуть DSS.

9. БУДУЩИЕ ОБЪЕМЫ

Развитие 5G, Интернета вещей и промышленной цифровизации обусловлено сетевым интеллектом и автоматизацией. Операторам придется увеличивать пропускную способность своей сети по мере развития технологий с поддержкой 5G. Однако существует дополнительная сложность с дополнительной емкостью.

9.1. СЕТЕВОЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОМАТИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Скорость передачи данных резко возрастет с появлением 5G, поскольку он в 10 раз быстрее, чем нынешние сети LTE. Коммуникации, Интернет вещей и приложения искусственного интеллекта претерпят радикальные изменения в результате этих непостижимых скоростей передачи данных. Существование передовых и устаревших технологий, гибридных сетей, широкого диапазона частотных диапазонов и спектров, а также распространение подключенных устройств — все это усложняет сетевые операции. Кроме того, сеть нуждается в дальнейшей оптимизации и оптимизации производительности из-за растущих требований со стороны Интернета вещей и промышленного использования. Ниже приведены некоторые из них:

1) *Управление трафиком с помощью 5G*

Направляя устройства с поддержкой 5G в оптимальные соты 5G с помощью искусственного интеллекта, включенного в программное обеспечение RAN Compute, пользователи телефонов 5G могут оставаться в зоне покрытия 5G. Ячейки ранжируются на основе моделей искусственного интеллекта и возможности двойного подключения.

2) *Улучшенный режим сна MIMO*

В радиосистеме алгоритмы искусственного интеллекта основной полосы используются для прогнозирования характера трафика и автоматического отключения антенн при необходимости для экономии энергии. Для еще большей экономии средств его также можно

объединить с решениями Cell Sleep и Low Energy Scheduler.

3) *Автономные сети*

Масштабируемая оптимизация кластера ячеек с использованием процедур упреждающей и реактивной оптимизации с поддержкой искусственного интеллекта. Для определения топологии сети используются методы неконтролируемой кластеризации, основанные на машинном обучении.

ИИ предлагает сектору мобильной связи потрясающие возможности, поскольку его можно использовать для создания более персонализированного подхода к клиенту, помогая при этом управлять сетевыми расходами. Экономия эксплуатационных расходов и обеспечение рентабельности сети являются основными приоритетами, которых должны достичь поставщики услуг с помощью искусственного интеллекта. 70 процентов считают, что их сетевое планирование принесет наибольшую потенциальную отдачу от внедрения ИИ, тогда как 64 процента хотят сосредоточить усилия ИИ на управлении производительностью сети. Сетевые провайдеры ищут эффективные механизмы, необходимые для сбора, структурирования и анализа огромных объемов данных, которые может собрать ИИ.

9.2. СЕТЕВОЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗА СЧЕТ ИНТЕГРАЦИИ BLOKCHAIN-5G

Интеграция блокчейна с 5G может дать новое определение развивающемуся обществу. Чтобы оправдать всеобъемлющие ожидания 5G, необходимо изучить множество структурных и технических аспектов. Для реализации различных соглашений, таких как смарт-контракты, необходимо определить и обнаружить четкую нормативную базу. Самое главное — необходимо улучшить масштабируемость блокчейна для адресации большого количества устройств, поскольку каждому устройству нужны свои адреса.

Вредоносные устройства также могут нарушить работу сети и затруднить распространение вирусов. Благодаря глобальному внедрению 5G все машины и гаджеты, независимо от их разнородности, будут подключены. Мир сходит с ума от высоких скоростей, низкой задержки и улучшенной пропускной способности сети, и ему не терпится воспользоваться такой фантастической возможностью подключения. Но есть некоторые трудности, которые

необходимо решить, и их нельзя игнорировать. Перегруженность и перегрузка могут быть вызваны слишком большим количеством людей. Низкая пропускная способность может потребовать устранения в зависимости от количества имеющихся точек доступа.

Контролируемый рынок не будет реальным решением, поскольку в телекоммуникационном секторе существует ожесточенная конкуренция. На централизованном рынке надежная третья сторона отвечает за принятие окончательных решений о распределении ресурсов и запрашиваемой цене. Телекоммуникационный сектор может извлечь выгоду из концепции децентрализованного рынка, созданного с использованием смарт-контрактов и частного блокчейна.

Поскольку блокчейн необратим и использует децентрализованные реестры транзакций, он может обеспечить обширную коммуникацию без ущерба для безопасности, поддерживая доверие между предприятиями и организациями. По оценкам, комбинация блокчейна и 5G к 2030 году будет творить чудеса, соединяя около 500 миллионов мобильных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Frecassetti MG, Mazzanti A, Sevellano JF, Del Rio D, Ermolov V. D-band transport solution to 5G and beyond 5G cellular networks. *Proc. European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2019, pp. 214-218.
2. Ratasuk R, Mangalvedhe N, Bhatoolaul D, Ghosh A. LTE-M evolution towards 5G massive MTC. *Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2017. pp. 1-6.
3. Kim S, Visotsky E, Moorut P, Bechta K, Ghosh A, Dietrich C. Coexistence of 5G with the incumbents in the 28 and 70 GHz bands. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 2017, 35(6):1254-1268.
4. Violette EJ, Espeland RH, DeBOLT RO, Schwering FK. Millimeter-wave propagation at street level in an urban environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 26(3):368-380.
5. Salcedo A, Martinez E. Analysis of the electromagnetic spectrum under the Extremely Low Frequency band: frequency sub-bands classification. *Proc. International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)*, 2017, pp. 157-162.
6. Zhang L, Liang YC, Xiao M. Spectrum sharing for Internet of Things: A survey. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 26(3):132-139.
7. Carciofi C, Faccioli M, Grazioso P, Petrini V. Analysis of 5G Outdoor and Indoor Coexistence Scenarios for Spectrum Sharing with Active Antenna System. *Proc. International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2020, pp. 1-6.
8. Manganelli A, Nicita A. The Evolution of Mobile Communications and Spectrum Policy. In: *The Governance of Telecom Markets*, 2020, pp. 137-154. DOI: 10.1007/978-3-030-58160-2_7.
9. Wang H, Wang J, Ding G, Xue Z, Zhang L, Xu Y. Robust spectrum sharing in air-ground integrated networks: Opportunities and challenges. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(3):148-155.
10. Attiah ML, Isa AAM, Zakaria Z, Abdulhameed MK, Mohsen MK, Ali I. A survey of mm Wave user association mechanisms and spectrum sharing approaches: an overview, open issues and challenges, future research trends. *Wireless Networks*, 2020, 26(4):2487-2514.
11. Bhattarai S, Park JM, Gao B, Bian K, Lehr W. An overview of dynamic spectrum sharing: Ongoing initiatives, challenges, and a roadmap for future research. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2016, 2(2):110-128.
12. McMillan J. Why auctions the spectrum?, *Telecommunications policy*, 1995, 19(3):191-199.
13. Bichler M, Goeree JK (eds.). *Handbook of spectrum auction design*. Cambridge University Press, 2017. DOI: 10.1017/9781316471609.
14. Wang T, Li G, Huang B, Miao Q, Fang J, Li P, Wang Y. Spectrum analysis and regulations for 5G. In: *Xiang, W., Zheng, K., Shen, X. (eds) 5G Mobile Communications*. Springer, Cham., doi: 10.1007/978-3-319-34208-5_2.
15. Ali F, Yigang H, Shi G, Sui Y, Yuang H. Future generation spectrum standardization for 5G and Internet of Things. *Journal of Communications*, 2020, 15(3):276-282.
16. Wu T, Rappaport TS, Collins CM. Safe for generations to come: Considerations of safety for millimeter waves in wireless communications. *IEEE microwave magazine*, 2015, 16(2):65-84.
17. Oughton EJ, Frias Z, van der Gaast S, van der Berg S. Assessing the capacity, coverage and cost of 5G infrastructure strategies: Analysis of the Netherlands. *Telematics and Informatics*, 2019, 37:50-69.
18. Alnoman A, Anpalagan A. Towards the fulfillment of 5G network requirements: technologies and challenges. *Telecommunication Systems*, 2017, 65(1):101-116.
19. Oughton EJ, Frias Z. The cost, coverage and rollout implications of 5G infrastructure in Britain. *Telecommunications Policy*, 2018, 42(8):636-652.
20. Tullberg H, Popovski P, Li Z, Uusitalo MA, Høglund A, Bulakci O, Monserrat JF. The METIS 5G system concept: Meeting the 5G requirements. *IEEE Communications magazine*, 2016, 54(12):132-139.
21. 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, 58(11):83-89. DOI:10.1109/MCOM.001.2000230.
22. Teral S. *5G best choice architecture: White Paper*. IHS Markit Technology, London, UK, 2019.
23. Høglund A, Bergman J, Lin X, Liberg O, Ratilainen A, Razaghi HS, Yavuz EA. Overview of 3GPP release 14 further enhanced MTC. *IEEE Communications*

- Standards Magazine*, 2018, 2(2):84-89. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700050.
24. Sengupta A, Alvarino AR, Catovic A, Casaccia L. Cellular terrestrial broadcast—Physical layer evolution from 3GPP release 9 to release 16. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2020, 66(2):459-470.
 25. Hoglund A, Medina-Acosta GA, Veedu SNK, Liberg O, Tirronen T, Yavuz EA, Bergman J. 3GPP Release-16 Preconfigured Uplink Resources for LTE-M and NB-IoT. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2020, 4(2):50-56.
 26. Siddiqi MA, Yu H, Joung J. 5G ultra-reliable low-latency communication implementation challenges and operational issues with IoT devices. *Electronics*, 2019, 8(9):981.
 27. 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, 58(11):83-89.
 28. 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, pp. 495-504.
 29. Giordani M, Mezzavilla M, Barati CN, Rangan S, Zorzi M. Comparative analysis of initial access techniques in 5G mm Wave cellular networks. *Proc. Annual Conference on Information Science and Systems (CISS)*, 2016, pp. 268-273.
 30. Ganame H, Yingzhuang L, Ghazzai H, Kamissoko D. 5G base station deployment perspectives in millimeter wave frequencies using meta-heuristic algorithms. *Electronics*, 2019, 8(11):1318.
 31. Budić D, Skračić K, Bodrušić I. Optimizing Mobile Radio Access Network Spectrum Refarming Using Community Detection Algorithms. *Proc. 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 2019, pp. 475-479.
 32. Lee H, Vahid S, Moessner K. A survey of radio resource management for spectrum aggregation in LTE-advanced. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013. 16(2):745-760.
 33. Jeon J, Ford RD, Ratnam VV, Cho J, Zhang J. Coordinated dynamic spectrum sharing for 5G and beyond cellular networks. *IEEE Access*, 2019, 7:111592-111604. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2934385.
 34. Papageorgiou GK, Voulgaris K, Ntougias K, Ntaikos DK, Butt MM, Galiotto C, Papadias CB. Advanced dynamic spectrum 5G mobile networks employing licensed shared access. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(7):21-27.
 35. Jacob S, Menon VG, Joseph S, Vinoj PG, Jolfaei A, Lukose J, Raja G. A novel spectrum sharing scheme using dynamic long short-term memory with CP-OFDMA in 5G networks. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 6(3):926-934.
 36. Botterman M, Cave J. Opening Towards a New Reality, together. In: *ICT Policy, Research, and Innovation: Perspectives and Prospects for EU-US Collaboration*, 2020, pp. 365-438. Piscataway, NJ 08854, IEEE Press. DOI: 10.1002/9781119632481.
 37. Sokullu R, Akkaş MA. Unmanned Aerial Vehicle and IoT as Enabling Technologies for 5G: Frameworks, Applications and Challenges. In: *Internet of Things, Smart Computing and Technology: A Roadmap Ahead*, 2020, pp. 217-239.
 38. Tullberg H, Popovski P, Li Z, Uusitalo MA, Hoglund A, Bulakci O, Monserrat JF. The METIS 5G system concept: Meeting the 5G requirements. *IEEE Communications magazine*, 2016, 54(12):132-139.
 39. Barb G, Otesteanu M, Roman M. Dynamic Spectrum Sharing for LTE-NR Downlink MIMO Systems. *Proc. International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, 2020, pp. 1-4.
 40. Tikhvinskiy V, Deviatkin E, Aitmagambetov A, Kulakaeva A. Provision of IoT Services for CO-Located 4G/5G Networks Utilisation with Dynamic Frequency Sharing. *Proc. International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, 2020, pp. 1-4.
 41. Mihovska A, Prasad R. Overview of 5G New Radio and Carrier Aggregation: 5G and Beyond Networks. *Proc. 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2020, pp. 1-6.
 42. Wibowo FA, Bangun AA, Kurniawan A. Multimedia broadcast multicast service over single frequency network (MBSFN) in LTE based femtocell. *Proc. International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, 2011, pp. 1-5.
 43. Jotten CA, Sgraja C, Blanz JJ. On the Impact of Coarse Synchronization on the Performance of Broadcast/Multicast Single Frequency Network Operation in WCDMA, *Proc. IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, 2008, pp. 1-6.
 44. Holma H, Kalyanasundaram S, Venkatesan V. 5G Performance, 5G Technology: 3GPP New Radio, John Wiley & Sons Ltd. Publ., 2020, pp. 239-303; doi:10.1002/9781119236306.ch10.

Шарма Нидхи

PhD

Нац. технологический институт Курукшетра

Курукшетра-136119, Харьяна, Индия

E-mail: scholar.nidhisharmanidhi@gmail.com

Ахлават Приянка

PhD

Нац. технологический институт Курукшетра

Курукшетра-136119, Харьяна, Индия

E-mail: priyanka.ahlawat@nitkkr.ac.in

Аггарвал Раджеш К.

PhD

Нац. технологический институт Курукшетра

Курукшетра-136119, Харьяна, Индия

E-mail: rka15969@gmail.com.

Сдано в набор 24.05.2024. Подписано в печать 26.05.2024. Формат 60×88/8.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Печ.л. 15,6. Тираж 100 экз. Зак. 531-21.

Компьютерный набор, верстка, графика, фотоработы – Редакция журнала РЭНСИТ.