

# ВВЕДЕНИЕ

Анализ эволюции сетей подвижной связи (СПС) предыдущих поколений 1G–4G показал, что сетевое позиционирование традиционно рассматривалось как одна из дополнительных возможностей в процессе стандартизации, построения и эксплуатации сетей, которая была востребована тогда, когда сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) оказывались недоступны; определение местоположения (ОМП) в СПС осуществлялось при этом преимущественно в интересах экстренных служб и обеспечения правопорядка. Однако развитая инфраструктура СПС открывала широкие возможности для сетевой геолокации устройств, поэтому в процессе эволюции, начиная с аналоговых СПС 1G, совершенствовались методы и средства сетевого позиционирования. Цифровые СПС 2G GSM способствовали развитию сетевого позиционирования с точностью до десятков метров по требованию регулятора. Глобализация СПС связана с образованием партнерского проекта 3GPP (3rd Generation Partnership Project) для стандартизации сетей 3G UMTS. Начиная с поколения 3G в процессе стандартизации СПС в спецификациях 3GPP стали предъявляться технические требования к сетевому ОМП. Данная тенденция получила продолжение в сетях 4G LTE и дальнейшее развитие в сетях 5G NR.

Для сетей 5G в последних спецификациях 3GPP, в отличие от СПС предыдущих поколений, впервые были формализованы требования к точности сетевого позиционирования до одного метра для различных сценариев. При этом, помимо традиционных для СПС 2G–4G случаев экстренного вызова, были описаны различные сценарии сетевого позиционирования для народного хозяйства: услуги на основе позиционирования LBS (Location-based service), позиционирование в промышленности и здравоохранении, при управлении дорожным движением, для железнодорожных и морских грузоперевозок, а также позиционирование с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Особенности новых требований к сценариям позиционирования 5G являются ключевые показатели эффективности KPI (Key Performance Indicators), среди которых, помимо точности оценки координат (ОК) по горизонтали и вертикали, выделяют точность оценки скорости и направления движения, до-

ступность ОК, задержка в ее предоставлении, частота обновления ОК, энергопотребление на сеанс ОМП и др.

Для достижения амбициозной задачи позиционирования с точностью до одного метра, что примерно на порядок меньше, чем в СПС предыдущих поколений, в сетях 5G планируется использовать новые технологии сетевого позиционирования, а также комбинирование первичных измерений и оценок координат различных существующих технологий ОМП, как входящих в спецификации 3GPP, так и сторонних: ГНСС (BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS), системы наземного позиционирования с использованием маяка TBS (Terrestrial Beacon Systems), инерциальные измерительные модули IMU (Inertial Measurement Unit), сети радиодоступа (СРД) WiFi/Bluetooth и др. Существующие технологии позиционирования удовлетворяют достаточно широкий спектр требований в различных сценариях, особенно при их совместном использовании. Однако остаются и такие сценарии, в которых они не обеспечивают требуемой точности, например внутри помещений, при отсутствии прямой видимости, в условиях плотной застройки, в сценариях с использованием БПЛА и зонах повышенной точности ОМП. Поэтому вопросы сетевого позиционирования для нужд народного хозяйства, несомненно, актуальны.

С народно-хозяйственной точки зрения актуальность сетевого позиционирования подтверждается рядом руководящих документов. Во-первых, развитие новых типов беспроводной связи, геоинформационных и навигационных систем обозначены среди приоритетных направлений в области информационных технологий «Стратегии развития отрасли информационных технологий в РФ на 2014–2020 годы и на перспективу до 2025 года». Во-вторых, переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, а также создание интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, реализация которых потребует использования данных позиционирования, являются приоритетами «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». В-третьих, в рамках Федерального проекта «Информационная инфраструктура» национальной программы «Цифровая экономика РФ» утверждены: «Концепция создания и развития сетей 5G/ИМТ-2020 в Российской Федерации» Минцифры; «Концепция и технические требования покрытия транспортной инфраструктуры сетями связи для систем передачи данных, включая координатно-временную информацию ГЛОНАСС, дифференциальных поправок, автоматического зависимого наблюдения и многопозиционных систем наблюдения» Минтранса. Все это подтверждает

актуальность и востребованность сетевого позиционирования в перспективной экосистеме пятого и последующих поколений.

С технической точки зрения сетевое позиционирование устройств в СПС, являющихся источниками радиоизлучения (ИРИ), можно рассматривать как ОМП в многопозиционных системах пассивной радиолокации (МПСПР), когда множество позиций представлено базовыми станциями (БС) СРД, являющимися опорными пунктами приема (ПП) первичных измерений. Позиционирование ИРИ в МПСПР осуществляется по измерениям на пространственно разнесенных ПП времени и/или направления прихода сигналов, излучаемых ИРИ. Наиболее распространенными пассивными измерениями являются разностно-дальномерные (РДМ) и угломерные (УМ). Разработка комплекса моделей и методов ОМП с точки зрения МПСПР как предмета исследования в контексте новых особенностей построения и функционирования СПС пятого и последующего поколений как объекта исследования позволяет подчеркнуть принципиально важные отличия и новые возможности сетевого позиционирования, отличающие его от предыдущих поколений, особенно учитывая переход технологий 5G на качественно новый уровень.

С одной стороны, новый радиоинтерфейс 5G, включая более широкие полосы частот, многоантенные системы Massive MIMO (mMIMO) с возможностью адаптивного диаграммообразования (ДО), диапазон миллиметровых волн (ММВ, mmWave), а также новая архитектура СРД 5G, в том числе непосредственная радиосвязь устройств друг с другом D2D (Device-to-Device) в сверхплотных СРД UDN (Ultra Dense Network), открывают новые возможности, а также порождают новые проблемы и задачи для сетевого позиционирования. Данные обстоятельства требуют совершенствования известного в МПСПР комплекса моделей и методов ОМП в новых условиях функционирования СРД 5G и, таким образом, выделяют сетевое позиционирование 5G как новое научное направление исследований.

С другой стороны, использование данных о местоположении (МП) устройств способствует реализации новых механизмов установления и ведения радиосвязи на основе геолокации; в зарубежной литературе данный подход получил название LAC (Location-Aware Communication). Известным примером LAC является маршрутизация в самоорганизующихся СРД на основе МП соседних ретрансляторов. Относительно новым примером геолокации в когнитивных СРД является совместное использование спектра первичными и вторичными ИРИ за счет их предварительного позиционирования для исключения помех. В последние годы второе дыхание обрели исследования, посвященные ДО на основе позициониро-

вания LAB (Location-Aware Beamforming), что особенно актуально для пространственного уплотнения SDMA (Space-Division Multiple Access) в сетях UDN при переходе в диапазон ММВ с миниатюризацией устройств Massive MIMO. Таким образом, в СРД 5G сетевое позиционирование будет уже не только одной из дополнительных услуг, а средством достижения качественно нового уровня функционирования сети. Изложенные обстоятельства позволяют рассматривать позиционирование в сетях пятого и последующих поколений, как предмет исследования, с двух сторон: во-первых, как целевая задача непосредственного географического ОМП сетевых устройств в СПС; во-вторых, как инструмент повышения эффективности построения и функционирования СРД на основе данных о МП устройств.

В отличие от традиционных в своей постановке вопросов построения, функционирования и управления СПС с целью повышения эффективности предоставления услуг телекоммуникаций, в настоящей монографии впервые предпринимается попытка создания методологии постановки и решения задач позиционирования устройств с использованием инфраструктуры СРД при предоставлении новых услуг сетей связи пятого поколения, связанных с определением местоположения.

На сегодняшний день в части разработанности темы исследования можно констатировать следующие предпосылки для противоречия гносеологического характера. С одной стороны, имеется достаточно зрелый методологический аппарат постановки и решения задач ОМП устройств с использованием теории МПСРП. С другой стороны, на рубеже очередного десятилетия при переходе к сетям пятого поколения и новый радиointерфейс, и новая архитектура СРД 5G открывают принципиально новые возможности для сетевого позиционирования, которых не было в сетях предыдущих поколений:

- на порядок более широкие полосы частот от сотен МГц до десятков ГГц позволяют существенно повысить точность сбора и корреляционной обработки первичных ДМ и РДМ измерений;
- распространение многоантенных систем с числом элементов от десятков до тысяч позволяют гораздо более широко использовать УМ измерения не только в оборудовании ВС, но и в портативных устройствах;
- условия сверхплотного распределения в СРД с плотностью до 1 устройства на  $1 \text{ м}^2$  обуславливают необходимость перехода от плоскостных к пространственным оценкам координат;

- возможность непосредственной радиосвязи устройств друг с другом способствуют развитию систем кооперативного позиционирования в условиях сетевой самоорганизации.

Таким образом, суть гносеологического противоречия заключается в назревшей необходимости создания методологического аппарата постановки и решения задач позиционирования сетевых устройств с использованием инфраструктуры СПС 5G при предоставлении новых услуг сетей связи пятого и последующих поколений для нужд цифровой экономики.

В отличие от известных в сетях предыдущих поколений технических решений ОМП, в настоящей монографии разработана методология сетевого позиционирования, учитывающая специфику радиоинтерфейса и архитектуры СРД пятого и последующих поколений, для верификации известных и перспективных сценариев, различающихся географической протяженностью, подвижностью и плотностью позиционируемых и опорных устройств, а также комплексированием первичных измерений гетерогенной СРД. Предложенный в настоящей монографии комплекс моделей и методов позиционирования при отсутствии прямой видимости позволил решить проблему ОМП в условиях МРРВ с использованием единого подхода как для стационарных ПП в составе наземного сегмента, так и для подвижных ПП на ВПЛА в составе воздушного сегмента.

*Объектом исследования* является инфраструктура сетей пятого и последующих поколений. *Предметом исследования* является комплекс моделей и методов позиционирования устройств средствами инфраструктуры сетей пятого и последующих поколений и организация радиосвязи на основе местоположения.

*Научной проблемой*, имеющей важное хозяйственное значение, является разработка комплекса моделей и методов позиционирования устройств средствами инфраструктуры сетей 5G для реализации новых услуг сетей связи пятого и последующих поколений. *Целью работы* является разработка моделей и методов, сценариев и решений для позиционирования устройств в сетях пятого и последующих поколений. Для достижения цели решаются следующие задачи исследования.

1. Формализация и систематизация комплекса сценариев и методов позиционирования устройств для реализации новых услуг сетей пятого и последующих поколений.

2. Разработка методологии оценки и визуализации точности позиционирования устройств средствами инфраструктуры сетей 5G для комплекса сценариев в сетях пятого и последующих поколений.

3. Исследование и разработка комплекса моделей и методов позиционирования при отсутствии прямой видимости путем сравнения дисперсий промежуточных оценок координат в обрабатываемых наборах пунктов приема в сетях радиодоступа.

4. Исследование и разработка комплекса моделей и методов обработки разностно-дальномерных и угломерных измерений для различных топологий стационарных пунктов приема в составе наземного сегмента и траекторий движения пунктов приема на борту БПЛА в составе воздушного сегмента.

5. Исследование и разработка комплекса моделей и методов диаграммообразования на основе текущего местоположения передатчика/приемника полезного сигнала и других одновременно работающих источников помех.

6. Разработка и экспериментальная апробация прототипа системы локального позиционирования внутри помещений и на основе программно-конфигурируемого радио для совмещенной телекоммуникационной и измерительной системы.

# 1 КОМПЛЕКС СЦЕНАРИЕВ СЕТЕВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

---

## 1.1. Эволюция услуг и технологий при переходе к сетям 5G

### 1.1.1. Эволюция услуг и поколений сетей 1G–5G

На сегодняшний день сотовым сетям подвижной радиосвязи (СПС), принципам их построения, использования и особенностям функционирования, как объекту исследования, посвящено достаточное количество фундаментальных и прикладных исследовательских работ отечественного и зарубежного происхождения.

Определяющий вклад в развитие теории СПС и их контента внесли отечественные ученые: А.С. Аджемов [1], С.Д. Андреев [2], В.Ю. Бабков [3], В.В. Вутенко [4], В.М. Вишнеvский [5], Ю.В. Гайдамака [6], т А.А. Гоголь [7], Б.С. Гольдштейн [8], Ю.А. Громаков [9], В.Г. Карташевский [10], Ю.А. Ковалгин [11], Р.В. Киричек [12], В.В. Крейнделин [13], А.Е. Кучеряvый [14], Е.А. Кучеряvый [15], Д.А. Молчанов [16], А.И. Парамонов [17], А.Е. Рыжков [18], К.Е. Самуйлов [19], М.А. Сиверс [20], В.О. Тихвинский [21–23], И.А. Цикин [24], И.В. Шахнович [25] и др. Существенный вклад в теорию построения сетей радиодоступа внесли также российские ученые В.А. Галкин [26], А.И. Ляхов [27], В.Г. Скрынников [28], Е.М. Хоров [29], Ю.С. Шинаков [30] и др.

Среди зарубежных научных школ и ученых, внесших основополагающий вклад в развитие сетей мобильной связи и радиодоступа, следует отметить исследовательские группы под руководством J.G. Andrews [31], M.-S. Alouini [32], E. Dalmann [33], M. Dohler [34], A. Goldsmith [35], C. Hoymann [36], W.C.Y. Lee [37], T.S. Rappaport [38], G. Stuber [39], D. Tse [40] и др.

В отличие от традиционных в своей постановке вопросов построения, функционирования и управления сотовыми сетями подвижной радиосвязи с целью повышения эффективности предоставления услуг телекоммуникаций, в настоящей монографии впервые предпринимается попытка создания методологии позиционирования устройств с использованием инфраструктуры сетей связи пятого и последующих поколений для предоставления новых услуг геолокации.

Сети 5G/IMT-2020 (International Mobile Telecommunications) [41], продолжающие эволюцию 4G, являются закономерным этапом развития СРД.

В 1990-е годы переход от аналоговых СРД первого поколения 1G AMPS (Advanced Mobile Phone Service) с частотным разделением каналов FDMA (Frequency Division Multiple Access) к СРД 2G GSM (Global System for Mobile Communications) с частотно-временным FDMA/TDMA (Time Division Multiple Access), CDMA One с кодовым CDMA (Code-Division Multiple Access) и D-AMPS (Digital Advanced Mobile Phone System) с временным разделением каналов означал переход к цифровым технологиям на техническом уровне и к первым сервисам передачи данных на уровне пользователя [3].

В 2000-е годы переход к 3G UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) открыл техническую возможность передачи данных на скоростях, необходимых для просмотра мультимедийного контента [11], что явилось качественно новым этапом эволюции с точки зрения пользователя. С технической точки зрения этот этап основан на прорыве в разработке и массовом производстве компонентов микроэлектроники субмикронного уровня (65...45 нм и ниже), обеспечивших радикальное снижение энергопотребления и увеличение функциональности [25]. Глобализация СРД связана с образованием партнерского проекта 3GPP (3rd Generation Partnership Project) для стандартизации сетей 3G UMTS [42].

В эволюции СРД очередное поколение отличается от предыдущего качественно как на техническом, так и на уровне потребления услуг. Важным обстоятельством перехода к 4G являлось то, что несмотря на наличие в СРД 3G технологий высокоскоростной передачи HSPA (High Speed Packet Access), они не смогли конкурировать с LTE (Long-Term Evolution) [43]. Определяющим явилось и массовое распространение портативных устройств с отображением видеоконтента, приближавшимся по качеству к стационарным компьютерам. Смартфоны явились тем элементом 4G, без которого новые скорости были ранее не востребованы, так как экраны аппаратов 3G не могли в полной мере реализовать просмотр видеоконтента.

В 2010-е годы переход к 4G LTE-A (LTE-Advanced) [43] имел своей целью достижение требований ITU-R M.1645 [44] комитета IMT-Advanced Международного союза электросвязи МСЭ/ITU (International Telecommunication Union): скорость в нисходящем канале до 100 Мбит/с для мобильных и 1 Гбит/с для малоподвижных абонентов. Такая скорость сделала доступными просмотр качественно видео контента и использование других сервисов, которые ранее пользователь получал только дома или в офисе. Чтобы перейти к

СРД 4G, потребовалось принципиальное изменение архитектуры сетей радиодоступа (СРД) и опорных сетей. В СРД было покончено с «телефонным наследием» сотовой связи: ведь даже системы 3G, по сути, являлись радиоудлинителями, связывающими абонентов с автоматическими телефонными станциями (АТС): сеть 4G — это плоская IP-сеть с пакетной передачей данных, возможностью распределенной архитектуры и каналами прямого обмена между базовыми станциями [25]. LTE-A эволюционировали в LTE-A Pro, однако взрывной рост трафика и ограниченность спектра традиционных для СРД дециметровых волн (ДМВ), обусловили переход к новым СРД 5G.

Помимо увеличения потребностей в пропускной способности для отдельных абонентов, растет число самих абонентов и активных устройств Интернета вещей [45]. С одной стороны, частотный ресурс ДМВ и нижней части сантиметрового (СМВ) диапазона уже перегружен существующими СРД. С другой стороны, производители полупроводниковых приборов подошли к созданию сверхмалопотребляющих устройств, а элементная база диапазона миллиметровых волн ММВ (с длиной волны от 10 мм до 1 мм, что соответствует частоте от 30 ГГц до 300 ГГц) стала промышленной реальностью [25]. Таким образом, экспоненциальный рост трафика на уровне СРД как один из стимулов построения СРД 5G, поддерживается и распространением портативных устройств высокой производительности, и качественным отображением не только видео, но и тактильных ощущений [46].

В 2020-е годы СРД 5G призваны обеспечить сверхскорость (1...10 Гбит/с), сверхмалые задержки (менее 1 мс), сверхбольшое число активных физических соединений и их сверхвысокую плотность, энергетическую и спектральную сверхэффективность, что не реализуемо в рамках концепции СРД 4G [25].

### 1.1.2. Сети 5G как основа цифровой экономики и трансформации

Требования к ключевым показателям эффективности KPI (Key Performance Indicators) сетей 5G/IMT-2020 определены в 3GPP TR 38.913 [47]:

- пиковая скорость передачи данных: в канале вниз (DL) — 20 Гбит/с; в канале вверх (UL) — 10 Гбит/с;
- пиковая спектральная эффективность: DL — 30 бит/с/Гц; UL — 15 бит/с/Гц;
- сквозная задержка на уровне пользователя (user plane latency): 4 мс в UL/DL для услуг типа eMBB, 0,5 мс для услуг типа

URLLC в UL/DL; сквозная задержка на уровне управления (control plane latency) 10 мс; надежность передачи данных (вероятность потери пакета):  $10^{-5}$  для пакета 32 байт со сквозной задержкой в сети в 1 мс для услуг URLLC;

- плотность подключенных устройств: 1 млн на 1 км<sup>2</sup>;
- срок работы батареи устройства: 10...15 лет для устройств IoT/M2M/D2D;
- скорость передвижения абонентского устройства — до 500 км/ч; непрерывное обслуживание при хэндовере.

Таким образом, можно констатировать, что требуемые показатели сети KPI, достижение которых позволяет отнести ее к 5G, говорит:

- об увеличении пропускной способности в 10 раз;
- росте спектральной эффективности до 3 раз;
- уменьшении сквозной задержки передачи в 10 раз до 1 мс;
- увеличении количества подключаемых устройств в соте в 10...100 раз — до  $10^6$  на 1 км<sup>2</sup>;
- увеличение времени автономной работы устройств IoT/M2M/D2D — до 10 лет.

Сценарии использования сетей 5G классифицированы МСЭ на три группы [41].

Усовершенствованная подвижная широкополосная связь eMBB (Enhanced Mobile Broadband) охватывает сценарии использования, ориентированные на человека и обеспечивающие доступ к мультимедийному контенту, услугам и данным. К таким услугам относятся: 3D видео, в том числе в реальном времени, онлайн-игры, виртуальная реальность (в образовании, развлечениях, здравоохранении), расширенные сервисы социальных сетей, облачные сервисы (в государственных услугах, бизнес-приложениях, вычислениях), голос, в том числе потоковый, вещание, музыка в реальном времени. Для eMBB важны пользовательская скорость передачи данных, трафик на единицу площади, мобильность, энергоэффективность и эффективность использования спектра.

Крупномасштабные системы межмашинной связи mMTC (massive Machine Type Communications) характеризуются большим количеством подключенных устройств, передающих небольшой объем данных, не столь чувствительных к задержке. Для качественной поддержки этих услуг необходимо обеспечить низкую стоимость абонентских устройств при поддержке большой зоны охвата и продолжительного времени работы от батареи. Основные области применения: энергетика, транспорт, здравоохранение, торговля, общественная безопасность, промышленность, ЖКХ, беспилотные транс-

портные средства. Сценариям МIoT свойственны высокая плотность соединений и необходимость функционирования большого числа устройств [48].

Сверхнадежная передача данных с малой задержкой URLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communications) предъявляет жесткие требования к пропускной способности, задержке и готовности. Примерами могут служить беспроводное управление промышленными и производственными процессами (роботизация), дистанционная хирургия, автоматизация распределения энергии в «умных» электросетях, безопасность на транспорте. В некоторых сценариях URLLC высокое значение имеет низкая задержка для того, чтобы обеспечить работу критически важных служб безопасности, а также мобильность в сфере услуг безопасности перевозок.

Сети 5G/IMT-2020 — это также и новая парадигма инфокоммуникационных технологий (ИКТ) с внедрением принципиально новых услуг [48]:

- услуги на основе голограмм и мультимедиа с эффектом присутствия, включая трансляции спортивных матчей и интерактивные фильмы с охватом в 360°;
- полномасштабные услуги виртуальной и дополненной реальности VR/AR (Virtual Reality/Augmented Reality), включая услуги AR при навигации и вождении автомобиля, управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), диагностику и хирургическое вмешательство на расстоянии с помощью робота;
- услуги со сверхнизкой задержкой, включая дистанционное управление спасательным роботом, автономное вождение автомобиля;
- услуги Интернета вещей IoT на основе массового подключения устройств;
- интеллектуальные услуги на основе технологий больших объемов данных Big Data;
- тактильный Интернет.

В национальной программе «Цифровая экономика Российской Федерации» определены задачи создания глобальной конкурентоспособной инфраструктуры передачи, обработки и хранения данных преимущественно на основе отечественных разработок и преобразования приоритетных отраслей экономики и социальной сферы, включая здравоохранение, образование, промышленность, сельское хозяйство, строительство, городское хозяйство, транспортную и энергетическую инфраструктуру, финансовые услуги, посредством внедрения цифровых технологий [49].

Решение указанных задач предполагает развитие сетей 5G/ИМТ-2020, которые позволят упростить внедрение новых ИКТ в традиционные отрасли промышленности и народного хозяйства и использовать инновационные высокоскоростные услуги и сервисы во всех отраслях экономики [48]. Перспективные цифровые технологии, в том числе, сети 5G/ИМТ-2020, искусственный интеллект и Интернет вещей являются одним из основных стимулов экономического роста и цифровой трансформации DT (Digital Transformation) в масштабах государства.

Четвертая промышленная революция «Индустрия 4.0» и цифровая трансформация основаны на ИКТ и искусственном интеллекте (ИИ) [4]. Первыми областями, осваивающими новые цифровые технологии, предположительно станут коммунальное хозяйство, транспорт, производство, здравоохранение, сельское хозяйство и финансы. Цифровая трансформация подразумевает изменения в производственных и социальных процессах путем принятия цифровых технологий.

Цифровая экономика представляет собой хозяйственную деятельность, в которой ключевыми факторами являются данные в цифровом виде, обработка результатов анализа которых позволяют существенно повысить, по сравнению с традиционными формами хозяйствования, эффективность различных видов производства, технологий, оборудования, хранения, продажи, доставки товаров и услуг [50, 51].

Цифровая трансформация современной экономики как составляющая «Индустрии 4.0» и программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная на государственном уровне и являющаяся одним из национальных проектов, диктуют необходимость создания современной инфраструктуры сетей передачи, обработки и хранения данных, поэтому развитие радиотехнологий становится одной из важнейших составляющих процесса цифровизации традиционных отраслей промышленности и народного хозяйства, который, невозможен без внедрения сетей 5G/ИМТ-2020&IoT [4]. Развертывание сетей 5G/ИМТ-2020 является одной из приоритетных задач Национального проекта «Цифровая экономика Российской Федерации», а сами сети 5G/ИМТ-2020 станут частью критически важной инфраструктуры для обеспечения цифровой трансформации [21–23].

Технологии 5G/ИМТ-2020, облачные и сенсорные сервисы, IoT и ИИ, будут консолидироваться и развиваться совместно, стимулируя тем самым экономический рост. Основными разработчиками и эксплуатантами новых сетей, на базе которых будут внедряться ин-

теллектуальные технологии, становятся операторы подвижной радиосвязи [4]. Операторы используют решения Big Data в рекламных кампаниях, в том числе, для анализа потоков населения при оценке эффективности размещения новых офисов банков, салонов связи, фитнес-клубов. Технология позволяет анализировать обезличенные данные о пешеходном трафике, времени нахождения абонентов в конкретном районе. Инфраструктурной основой для реализации задач цифровой экономики определены также такие сквозные технологии, как промышленный интернет вещей IIoT (Industrial IoT), беспроводная связь, виртуальная и дополненная реальность. Их полномасштабное использование невозможно без создания и развития сетей 5G/IMT-2020 [4].

Новые возможности сети 5G открывают и перед людьми с ограниченными возможностями. Портативные устройства типа умных часов, умных очков и умных гарнитур станут серьезной интеллектуальной поддержкой для этой группы населения. Так, внедрение роботов-поводырей в сочетании с расширением возможностей облачных сервисов позволит слепыми и слабовидящим зажить полноценной жизнью. Уже сегодня некоторые компании работают над созданием умной навигационной гарнитуры, которая поможет получать информацию о своем местонахождении, направлении движения и препятствиях с высокой точностью в режиме реального времени [4].

Далее рассмотрим новые особенности диапазона частот ММВ и его влияние на архитектуру сетей пятого и последующих поколений для последующего анализа влияния этих факторов на *технологии сетевого позиционирования*.

### 1.1.3. Новые диапазоны частот сетей 5G

По спецификациям 3GPP диапазоны 5G/ IMT-2020 разделены на два поддиапазона (Frequency Range) FR1 (450...6000 МГц) и FR2 (24,25...52,6 ГГц), а документами GSMA — на 3 группы [48, 52]: ниже 1 ГГц (частотный диапазон FR1), в полосе 1...6 ГГц (частотный диапазон FR1) и свыше 6 ГГц (частотный диапазон FR2).

Частоты ниже 1 ГГц имеют наилучшие характеристики распространения радиоволн (РРВ) в условиях городской, пригородной и сельской местности, обеспечивают эффективное радиопокрытие больших территорий и актуальны для использования IoT устройствами. В качестве ключевого диапазона радиочастот для внедрения сетей 5G/IMT-2020 ниже 1 ГГц рассматривается полоса 694...790 МГц.

Частоты 1-6 ГГц имеют как хорошие характеристики РРВ в условиях городской, пригородной и сельской местности, так и достаточную ширину полос для организации высокоскоростных каналов с

шириной до 100 МГц. В этой полосе радиочастот для сетей 5G/ИМТ-2020 рассматриваются диапазоны 3400...3800 МГц, 4400...4990 МГц и 5,9 ГГц. Полоса частот 5,855...5,925 ГГц Решениями ГКРЧ и СЕРТ выделена системам ITS (Intellectual Transport Systems) [48].

Частоты выше 6 ГГц предназначены для организации сверхвысокоскоростных каналов на небольших расстояниях за счет использования полос до 400 МГц, обеспечения сверхмалых задержек на радиоинтерфейсе. Частоты свыше 6 ГГц имеют значительное ослабление. 3GPP определены четыре NR диапазона в полосах выше 6 ГГц: 26,5...29,5 ГГц, 24,25...27,5 ГГц, 37...40 ГГц, 27,5...28,35 ГГц [48].

Всемирная конференция радиосвязи 2019 (WRC-19) [52] определила для сверхвысокоскоростных услуг подвижной связи с малой задержкой в сетях 5G полосы частот ММВ: 24,25...27,5 ГГц, 37...43,5 ГГц, 45,5...47 ГГц, 47,2...48,2 и 66...71 ГГц.

Для увеличения пропускной способности сетей 5G/ИМТ-2020 целесообразно применять следующие новые способы его выделения и использования [48].

1. Licensed-Assisted Access (LAA) основан на применении участков нелицензируемого спектра со свободным доступом для формирования вторичных несущих SCC (Secondary Component Carrier) в групповом агрегируемом сигнале [48].

2. Licensed Sharing Access (LSA) основан на совместном использовании участков лицензируемого спектра, выделенных операторам, для реализации которого в сетях 5G/ИМТ-2020 будет использоваться новый функциональный сетевой элемент — спектральный менеджер HSM (Horizontal Spectrum Manager). Менеджер HSM будет рассматривать только те частотные ресурсы, которые доступны для повторного использования, и распределит их между вторичными пользователями частотного ресурса LSA. Операторы могут достичь взаимного согласия через менеджера спектра HSM для того, чтобы иметь общий ресурс спектра, дополненный спектральными ресурсами каждого из операторов и доступный для всех шеринговых операторов. Недостатками LSA в сетях 5G/ИМТ-2020 является накопление задержки при принятии решения HSM об использовании полос LSA за счет необходимости обращения к геолокационной базе данных (БД), что делает их неприменимыми для критических услуг 5G/ИМТ-2020 RLLC [48]. Последнее обстоятельство подтверждает важность технологий сетевого позиционирования для повышения эффективности построения, функционирования и управления сетями 5G.

Диапазон миллиметровых волн ММВ является определяющим аспектом построения и функционирования перспективных сетей

радиодоступа пятого и последующих поколений на уровне радиointерфейса [53–63] и включает сантиметровые (3...30 ГГц) и миллиметровые волны (30...300 ГГц). Строго говоря, к миллиметровым волнам (ММВ) или крайне высоким частотам (КВЧ) относится диапазон радиоволн с длиной волны 10 мм — 1 мм (30...300 ГГц), однако иногда в зарубежных публикациях [53] к ММВ относят также и сантиметровые волны (СМВ) или сверхвысокие частоты (СВЧ) с длиной волны 10...1 см (3...30 ГГц). Устройства поколений 2G — 4G работают преимущественно с дециметровыми волнами (ДМВ) или ультравысокими частотами (УВЧ) с длиной волны 1 м...10 см (300 МГц...3 ГГц). Микроволновое излучение включает в себя ДМВ, СМВ и ММВ диапазоны 300 МГц...300 ГГц (1 м...1 мм). Устройства 5G, помимо УВЧ, будут работать также в диапазонах СВЧ и КВЧ. Для удобства дальнейшего анализа будем под ММВ понимать радиоволны диапазонов СВЧ (3...30 ГГц) и КВЧ (30...300 ГГц).

Диапазон ММВ определяет революционный этап при построении нового радиointерфейса 5G. Если в диапазоне ниже 6 ГГц речь идет преимущественно об эволюционном развитии (переход от OFDM к N-OFDM — Non-Orthogonal Frequency Division Multiplexing), то в диапазоне от 28 до 95 ГГц есть все основания говорить о революционном подходе за счет следующих факторов:

- значительно более широкие полосы частот свыше 1 ГГц, что обеспечивает скорость передачи 1...10 Гбит/с и выше;
- активные/адаптивные антенные системы (ААС) с адаптивно формируемыми диаграммами направленности антенны (ДНА) для компенсации потерь распространения радиоволн (РРВ) в диапазоне ММВ по сравнению с энергетикой традиционных ДМВ радиолиний;
- значительно меньшие физические размеры ААС за счет меньшей длины волны диапазона ММВ: шаг между элементами антенной решетки (АР) составляет половину длины волны, т. е. несколько миллиметров (5 мм — для 30 ГГц, 2,5 мм — для 60 ГГц); антенные решетки (АР) можно формировать на подложках микросхем, и благодаря малым физическим размерам их можно встраивать в АТ;
- высокая пространственная селективность достигается за счет высокой направленности ААС диапазона ММВ: соседние радиостанции могут работать на одной частоте, не мешая друг другу, за счет пространственного уплотнения одновременных передач SDMA;
- высокое затухание ММВ естественным образом решает проблему интерференции, в том числе для организации опорной сети.

Радиоканал диапазона ММВ определяет необходимость разработки новых моделей РРВ для радиointерфейса 5G. В [61] для радиоканала ММВ предлагаются параметры: потеря, проникновения сигнала, многолучевого распространения радиоволн (МРРВ) и доплеровского сдвига. Потери в свободном пространстве FSL (Free Space Loss) на расстояние  $R$  при длине волны  $\lambda$  определяются как  $FSL = (4\pi R/\lambda)^2$ ,  $R$  и  $\lambda$  выражены в одинаковых единицах; потери в дБ определяются как  $L_{FSL} = 32,4 + 20 \lg f + 20 \lg R$ , где  $f$  — несущая частота в МГц,  $R$  — расстояние в км [66]. Потери РРВ повышаются с ростом  $f$  и ограничивают дальность радиосвязи, однако одновременно снижается и длина волны  $\lambda$ , что позволяет повышать плотность расположения элементов АР, которые, за счет узконаправленной передачи/приема увеличивают дальность радиосвязи.

Проникновение радиоволн ММВ диапазона при работе снаружи помещений через препятствия строительных материалов (стекло, гипсокартон, двери) существенно слабее по сравнению с ДМВ [57]; при работе внутри помещений через стены проникновение радиоволн ММВ диапазона также ограничено [59]; тело человека тоже является препятствием для ММВ [60]. Вследствие существенного ограничения проникновения есть основания полагать, что при организации радиосвязи с использованием диапазона ММВ снаружи помещений, помехи внутри помещений при работе на той же частоте будут минимальными. Таким образом, имеет место так называемый эффект indoor-outdoor isolation с локализацией зон радиопокрытия, когда для обслуживания пространства снаружи и внутри помещения требуются разные БС; это, в свою очередь, приводит к разделению обслуживания на зоны снаружи и внутри помещений.

Многолучевое распространение радиоволн (МРРВ) и сценарий отсутствия прямой видимости NLOS (Non-Line Of Sight) приводят к частотно-селективным замираниям и характеризуется статистическим параметром среднеквадратического расширения RMS (Root Mean Square) профиля мощности задержек PDP (Power Delay Profile). При соответствующей пространственной обработке (ПОС) многолучевые компоненты (МЛК) могут повысить надежность радиосвязи [58]. Для сценария подвижной радиосвязи условия LOS возможны не всегда, даже при сверхплотном распределении БС, поэтому сигналы, принятые по отраженным лучам, также могут быть обработаны при тщательном подборе ширины и направления ДНА антенной системы. Между выбором ширины ДНА БС и АТ существует компромисс. С одной стороны, широкая ДНА предпочтительна при оценке угла прихода сигнала. С другой стороны, узкая ДНА предпочтительна для организации направленных сеансов

радиосвязи и пространственного уплотнения одновременных передач.

Доплеровский сдвиг характеризуется смещением частот принятых сигналов вследствие движения передатчика и/или приемника и вызывает замирания во временной области. Для компенсации замираний вследствие доплеровского сдвига используется подбор размера кадра в пределах времени когерентности радиоканала [58] и направленный прием узким лучом для уменьшения пространственного разброса МЛК [61].

#### 1.1.4. Новые технологии и архитектура сетей 5G

В отличие от СПС предыдущих поколений (2G, 3G, 4G), для каждого из которых разрабатывался новый радиointерфейс, в 5G/IMT-2020 планируется применять как новый радиointерфейс NR (New Radio), так и существующий LTE-A, в ходе эволюции приближающийся по характеристикам к NR. Новый радиointерфейс NR изначально разрабатывался для более высоких скоростей передачи, меньших задержек и более эффективного использования частотного ресурса за счет [48]: сигналов с большей шириной спектра; минимальных задержек на радиointерфейсе посредством увеличения частоты следования временных слотов; адаптивного к нагрузке временного дуплекса; более эффективных помехоустойчивых кодов; активных/адаптивных антенных систем (ААС) с большим количеством элементов, узкой ДНА и высокой пространственной избирательностью; индивидуальных сценариев использования полосы канала NR для терминалов различных типов.

С точки зрения оператора сеть 5G/IMT-2020 должна обеспечить [48]: реализацию услуг с разнообразными требованиями к сети; автоматическое конфигурирование услуг, виртуальных и физических ресурсов и их мониторинг; поддержку большого количества выделенных сетей, в том числе для предоставления услуг IoT; гарантированное качество обслуживания; эффективное использование сетевых ресурсов, включая радиочастотный спектр (РЧС) и пропускную способность (ПС).

Технологически обеспечение перечисленных требований оператора в сетях 5G/IMT-2020 должно достигаться посредством следующих новых подходов:

- программно-определяемых сетей SDN (Software-Defined Networks — сеть передачи данных, в которой уровень управления сетью отделён от устройств передачи данных и реализуется программно) с переходом от использования оборудования к использованию программного обеспечения, включая реализацию

функций обработки данных и сигнализации, конфигурирование услуг, виртуальных и физических ресурсов сети;

- облачных вычислений (Cloud Computing) с переносом процедур сложной обработки и хранения больших объемов данных в центры обработки данных (ЦОД), обеспечивающих эмуляцию сетевых элементов посредством IaaS (Infrastructure as a Service) «Инфраструктуры как услуги»;
- четкого логического отделения функций уровня управления от уровня данных пользователя, что позволит независимо друг от друга развивать и масштабировать программные и физические ресурсы, относящиеся к этим уровням;
- логических сетевых слоев, которые позволяют автоматизировать конфигурирование сетевых ресурсов и адаптировать архитектуру сети к требованиям услуг;
- внедрения технологий виртуализации NFV (Network Functions Virtualization — виртуализация физических сетевых элементов, когда сетевые функции исполняются программными модулями, работающими на серверах и виртуальных машинах в них);
- реализации функций хранения и предоставления контента для услуг, чувствительных к задержкам, в том числе пограничных вычислений MEC (Mobile Edge Computing).

*Облачная сеть радиодоступа C-RAN* (Cloud Radio Access Network) реализует новые подходы облачных вычислений и SDN на уровне СРД и опорной сети в высокоскоростном канале передачи «сырых» данных от радиомодуля (вплоть до квадратурных составляющих) в ЦОД, где выполняется их обработка; термин Fronthaul определяет интерфейс между базовыми блоками BBU (Base band unit) и удаленными выносными радиомодулями RRU (Remote Radio Unit). Если Fronthaul определяет радиолинии на уровне СРД (BS-AT, AT-AT), то Backhaul определяет радиолинии между BS и между BS и опорным сетевым оборудованием. При сверхплотном расположении BS принципиально иную роль начинают играть связывающие их опорные сети; это могут быть сети диапазона ММВ; более того, сама граница между опорными и СРД начинает стираться [25]. C-RAN призвана справиться с возрастающими требованиями новых скоростей передачи в СРД 5G. Концепция C-RAN предусматривает централизованную обработку сигналов для нескольких сот и позволяет повысить производительность за счет координации между сотами CoMP, а также оптимизировать эксплуатацию затрат за счет объединения аппаратных ресурсов подсистемы радиодоступа. Изначально BS СРД 2G конструктивно представляли собой достаточно большой железный шкаф, высотой 1,5...2 м, установленный в кон-