

# Особенности оценки условий ЭМС для сетей 5G/IMT-2020

**В. Г. Скрынников**, независимый эксперт, к. т. н.; [vskrynnikov@list.ru](mailto:vskrynnikov@list.ru)

**Д. А. Пальцин**, директор в сфере связи ФГУП ГРЧЦ; [d.paltsyn@rkn.gov.ru](mailto:d.paltsyn@rkn.gov.ru)

**Е. Е. Девяткин**, заместитель директора НТЦ Анализа ЭМС НИИР, к. э. н.; [edevyatkin@niir.ru](mailto:edevyatkin@niir.ru)

УДК 621.391.8

**Аннотация.** Рассмотрены основные особенности оценки условий ЭМС для сетей 5G. Эти особенности сформулированы на основе анализа уже известных сегодня технических решений, планируемых для построения радиointерфейсов 5G NR (New Radio).

**Ключевые слова:** 5G/IMT-2020, NewRAT, NR (New Radio), модели потерь, радиointерфейс, электромагнитная совместимость (ЭМС), радиоэлектронные средства (РЭС).

## ВВЕДЕНИЕ

Как любая новая технология, 5G/IMT-2020 привносит специфические особенности во все аспекты, касающиеся практики внедрения. Если судить по опыту прошлых лет, одним из таких особо важных аспектов для условий Российской Федерации является электромагнитная совместимость (ЭМС) радиосетей. На этапе подготовки к внедрению радиосетей новой технологии 5G под названием New Radio (NR) необходимо заблаговременно побеспокоиться о принятии мер, направленных на эффективную оценку условий ЭМС для этих сетей по результатам тщательного анализа особенностей технологии 5G, а затем, правильно и точно оценив эти условия, успешно обеспечить их электромагнитную совместимость с другими радиоэлектронными средствами (РЭС).

В статье рассматривается состояние разработок 5G и известных на сегодняшний день технических решений на их основе; сделан вывод о специфике ЭМС для сетей 5G.

## ОСОБЕННОСТИ РАДИОИНТЕРФЕЙСОВ 5G

Сегодня в преддверии окончательного принятия официальных стандартов для технологии 5G/IMT-2020 на разных форумах широко обсуждаются вопросы, имеющие отношение к этой технологии, в том числе по тематике ЭМС. Логично предположить, что особенности оценки ЭМС для новых сетей всецело должны определяться спецификой технических решений, которые будут применены в принятых радиointерфейсах системы 5G. Поэтому начнем с анализа того, в чем могут проявиться особенности ЭМС.

**Основная концепция 5G.** Необходимость появления нового поколения систем мобильной связи 5G/IMT-

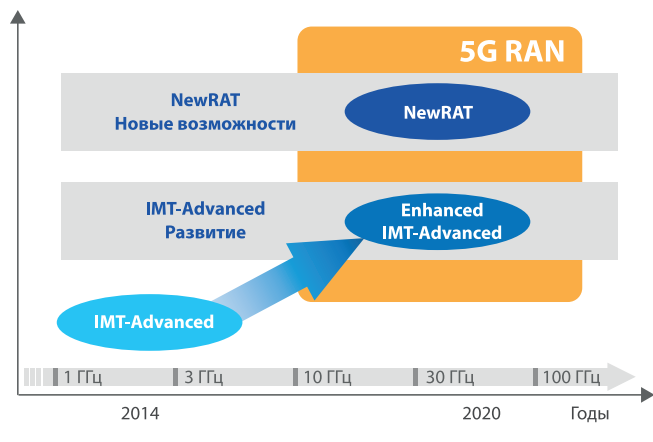
2020 продиктована целым рядом факторов. Главные из них: наличие совокупности приложений, которые требуют *очень малых временных задержек* в сети (дистанционные измерения, обеспечение безопасности дорожного движения, управление производственными процессами и т.д.), а также *высокого уровня надежности* сети (управление критической инфраструктурой, например сетями передачи электроэнергии; промышленный контроль и обеспечение жизненно важных социальных функций, таких как транспорт, телемедицина, управление «умным» городом и домом) и соответствующих форматов *быстрой передачи разных объемов данных* (больших объемов — при удаленном видеонаблюдении, малых объемов — при отслеживании движения грузов и т.д.).

Имеется ряд конкретных требований, которые не могут быть удовлетворены посредством существующих сетей мобильной связи:

- скорость доставки пользовательских данных в любой точке — сотни мегабит в секунду;
- сверхвысокая пропускная способность (до 20 Гбит/с) в определенных сценариях, которая может быть достигнута в сетях за счет создания сверхплотной сетевой архитектуры и формирования довольно широкой полосы радиоканала (сотни мегагерц и даже несколько гигагерц) благодаря использованию более высоких диапазонов радиочастот;
- эффективное использование потребляемой электроэнергии, что будет иметь еще большее значение в будущем и должно существенно повлиять на дизайн сети радиодоступа в 5G.

Перечисленные факторы служат основанием для

**Рисунок 1**  
Основная концепция 5G/IMT-2020



определения ключевых требований к системам 5G. Эти требования предварительно сформулированы в рабочих документах Бюро радиосвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-R) и ряда исследовательских проектов [1] в виде некой концепции.

В целом концепция 5G заключается в комплексном использовании действующей технологии 4G/IMT-Advanced в условиях ее непрерывного эволюционного развития (Enhanced IMT-Advanced), а также совершенно новой технологии NewRAT (New Radio Access Technologies) с новыми возможностями (рис. 1).

Характерными чертами концепции в отношении сети радиодоступа 5G/RAN являются: многообразие частотных диапазонов, включая используемые в действующих сетях радиочастоты и радиочастоты выше 6 ГГц (вплоть до 100 ГГц); применимость обоих видов дуплекса (FDD и TDD) практически для всех диапазонов радиочастот; использование как лицензионного, так и нелицензионного радиочастотного спектра (РЧС).

**IMT-Advanced.** В плане развития IMT-Advanced ключевой становится усовершенствованная технология LTE, получившая название Gigabit LTE. К основным ее особенностям можно отнести:

- агрегирование спектра (Carrier Aggregation: до 32 полос шириной до 20 МГц каждая); модуляция более высокого порядка (256QAM) в нисходящем направлении (Downlink, DL);
- 4x4 MIMO;
- скоординированная многоточечная передача данных CoMP (Coordinated Multi Point) [2];
- комбинирование дуплексов FDD и TDD при агрегировании спектра;
- использование нелицензионного РЧС в диапазоне 5 ГГц в качестве дополнительного ресурса.

Сравнительно новым в LTE является режим (технология) узкополосной передачи данных LTE NB-IoT (Narrow Band-IoT) для интернета вещей [3].

Особенности и процедуры оценки условий ЭМС для сетей LTE/IMT-Advanced с отмеченными выше компо-

нентами описаны в [4–7], а для LTE NB-IoT – в [3, 8].

**NewRAT.** Требования к сети радиодоступа NR 5G (New Radio 5G) представлены в табл. 1 [9]. В технологическом плане их можно разделить по нескольким доменам, а поскольку сегодня они находятся в стадии предварительного видения, то носят общий характер – «что примерно должно быть». Требования к NR 5G в таком формате составляют три домена (рис. 2) [10–12].

1. *Новый радиointерфейс* должен базироваться на новых формах сигнала (New waveform) и эффективных алгоритмах применения многоэлементных антенн MIMO:

- новые (неортогональные) формы сигнала (Non-Orthogonal Waveform), дающие выигрыш в спектральной эффективности по отношению к ортогональным сигналам OFDM;
- полный дуплекс (Full Duplex, FD) – одновременная передача и прием в общей полосе частот, преимущественно в коротких соединениях «точка–точка» (D2D) и «автомобиль–автомобиль» (V2V);
- так называемые массивные (многомерные) антенны MIMO (Massive MIMO);
- модуляция высокого порядка (до 1024 QAM);
- частотный канал с шириной до 400 МГц на одной несущей частоте с последующим его агрегированием до ширины 1–2 ГГц;
- неортогональный множественный радиодоступ – с компенсацией внутрисистемных помех (Non-orthogonal multiple access, NOMA) [13] и мультиплексированием каналов посредством прореженных кодов (Sparse Code Multiple Access, SCMA) [14].

Рассматриваемые для нового радиointерфейса неортогональные сигналы FBMC (Filter-Bank Multi-Carrier Modulation), GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) и UFMC (Universal Filtered Multicarrier) построены на базе сигналов OFDM, модифицированных посредством дополнительной фильтрации [15]. На рис. 3 приведены FBMC и GFDM – формы сигнала, полученные методом частотного мультиплексирования с множеством поднесущих частот, сформированных с использованием банка (гребенки) частотных фильтров, и UFMC – аналогичный неортогональный сигнал, отличающийся от предыдущих сигналов тем, что фильтрации подвергаются группы из нескольких поднесущих частот.

В многомерных антеннах massive MIMO благодаря использованию высоких диапазонов радиочастот эффективно реализуется режим динамического формирования направленных лучей для передачи 3D/Beamforming (рис. 4), позволяющий увеличить энергетический выигрыш, улучшить покрытие и спектральную эффективность в ультраплотных малых сотах и снизить временные задержки в сети радиодоступа.

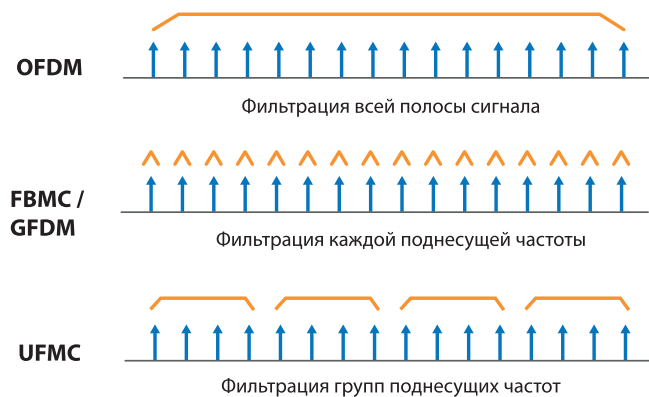
Применение таких антенн в ожидаемых высоких диапазонах радиочастот имеет некоторую специфику. Так, сдвиги фаз в антенных элементах используются

**Таблица 1**  
Количественные требования к сети радиодоступа 5G (NR 5G)

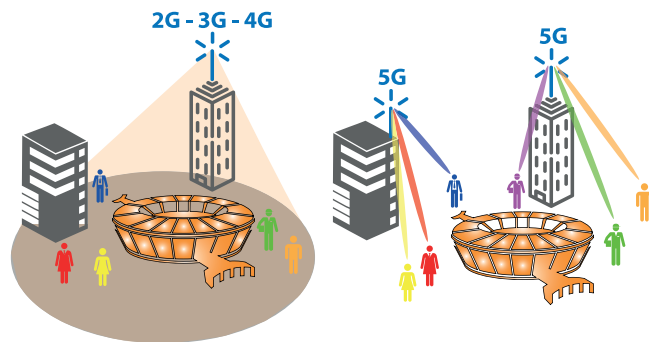
Показатели сети	Параметры	Значения
Показатели соты	Время автономной работы аккумуляторной батареи	До 1 недели
	Временная задержка	До 1 мс
Надежность	Вероятность потери пакетов данных	Не менее $10^{-9}$
Высокоскоростная передача данных	Плотность трафика	Линия вниз (DL): 100 Гбит/с/км <sup>2</sup> . Линия вверх (UL): 50 Гбит/с/км <sup>2</sup>
	Пропускная способность на одного пользователя	DL: 50 Мбит/с. UL: 25 Мбит/с
	Мобильность	500 км/час
При уличных мероприятиях	Плотность трафика	900 Гбит/с/км <sup>2</sup>
	Пропускная способность на одного пользователя	30 Мбит/с
	Плотность соединений	4 устройства/км <sup>2</sup>
Интернет вещей (Massive IoT)	Плотность соединений	$10^6$ устройств/км <sup>2</sup>
	Доступность	99,9% (покрытие)
	Время автономной работы аккумуляторной батареи	До 10 лет
Телемедицина	Временная задержка	<1 мс
	Надежность	99,999%
Умный город (Smart City)	Плотность трафика	700 Гбит/с/км <sup>2</sup>
	Пропускная способность на одного пользователя	DL: 300 Мбит/с DL: 300 Мбит/с
	Плотность соединений	$2 \times 10^5$ устройств/км <sup>2</sup>
Виртуальная и дополненная реальность	Пропускная способность на одного пользователя	4–28 Мбит/с
	Временная задержка	<7 мс
Широкополосное вещание (ТВ, радиовещание)	Плотность трафика	60 Гбит/с/км <sup>2</sup>
	Плотность соединений	$4 \times 10^3$ устройств/км <sup>2</sup>

для определения (задания) угла основного лепестка диаграммы направленности, амплитудное взвешивание (эффект различных весов амплитуды) влияет на ширину основного лепестка и уровни боковых лепестков. К примеру, уменьшение весов внешних (краевых) элементов

**Рисунок 3**  
Компоненты нового радиоинтерфейса 5G



**Рисунок 4**  
3D-излучение антенн massive MIMO



антенной системы приводит к расширению основного лепестка результирующей диаграммы направленности. Ожидается, что неравномерное взвешивание по амплитуде может являться важным инструментом для различения нескольких направлений (лучей) прихода сигнала.

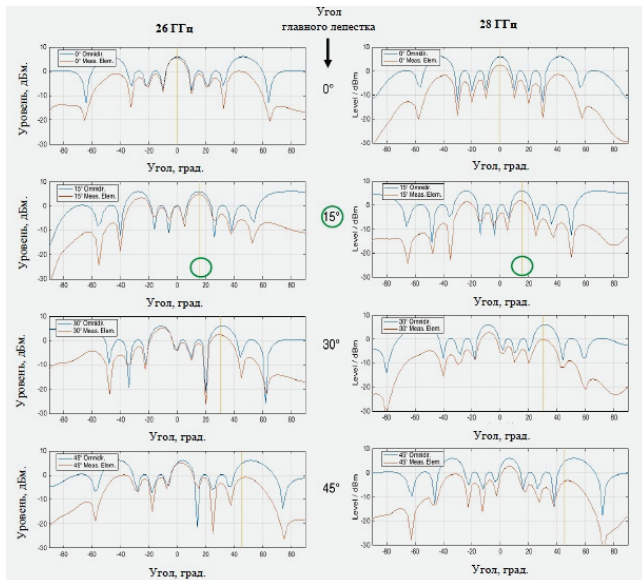
Кроме того, для рассматриваемых многоэлементных антенных систем в massive MIMO имеет место и частот-

**Рисунок 2**  
Компоненты нового радиоинтерфейса 5G



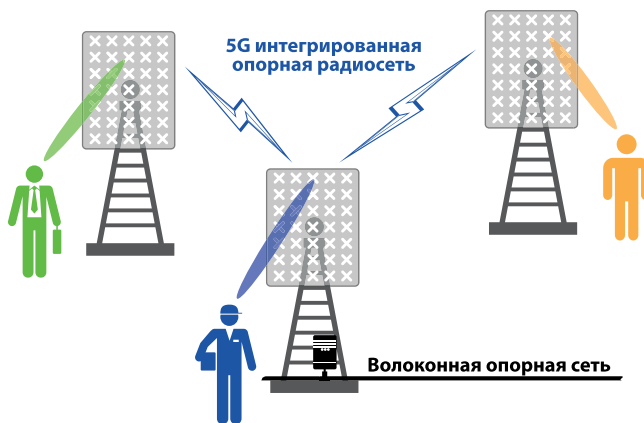
**Рисунок 5**

Поведение многоэлементных антенн 3D в разных диапазонах радиочастот при всенаправленных (— Omnidir) и реальных/измеренных (— Meas. Elem.) одиночных элементах многоэлементной антенны



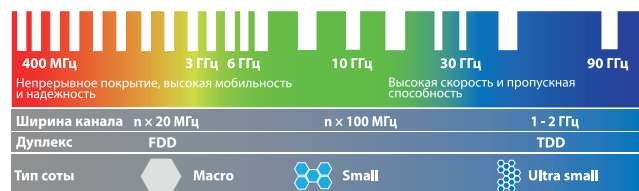
**Рисунок 6**

Интеграция сети радиодоступа и опорной сети



**Рисунок 7**

Интеграция сети радиодоступа и опорной сети



ная зависимость (рис. 5) [16].

Как следует из рис. 5, ширина и уровни лепестков диаграммы направленности зависят не только от направления главного лепестка, но и от диапазона рабочих частот. Увеличение весов амплитуды приводит к увели-

чению уровня главных лепестков по сравнению с боковыми лепестками. Увеличение угла поворота главного лепестка уменьшает его амплитуду (уровень).

2. Новая архитектура сети радиодоступа — смешанные соты с разными уровнями иерархии в гетерогенной архитектуре HetNet:

- централизованные и «облачные» сети радиодоступа RAN (Centralized RAN/Cloud RAN), реконфигурируемые радио- и сетевые элементы SDR и SDN (SW Defined Radio/Networks), совместное использование сетевой структуры (Network sharing);
- малые соты (Small Cell) со сверхплотным распределением (до нескольких тысяч маленьких сот), разгружающие макросоты с разделением сред передачи команд управления и пользовательского трафика между макро- и Small-сота́ми в разных полосах радиочастот;
- динамическая совместимость с сетями LTE в общей полосе радиочастот;
- спутниковый сегмент;
- интеграция сети радиодоступа с опорной сетью (backhaul) за счет организации опорной радиосети как в общей, так и в разных полосах радиочастот (рис. 6) [9].

Из-за ограниченного распространения радиоволн в высоких диапазонах радиочастот архитектура Small Cell будет сверхплотной (Ultra Small Cell) и охватит большое количество малых сот. Прогнозируется, что расстояние между малыми сотами будет варьироваться от 100 до 300 м во многих сценариях развертывания, типовое же значение составит 200 м. Для транзитных соединений таких сот потребуются каналы связи с пропускной способностью в несколько гигабит в секунду при комбинированном использовании оптоволоконна и радиосвязи в диапазонах миллиметровых волн.

3. Радиочастотный ресурс — использование высоких диапазонов частот, включая диапазон миллиметровых волн (Millimeter wave), и лицензионного и нелицензионного спектра (Licensed & unlicensed band operation), а также совместное использование спектра в сетях разных операторов (Spectrum sharing) и комбинированное использование спектра внутри помещений и в наружной среде (Indoor-Outdoor operation).

Таким образом, радиочастотный спектр для сетей 5G размещен в трех областях: ниже 1 ГГц; от 1 до 6 ГГц; выше 6 ГГц (вплоть до 100 ГГц). На рис. 7 показаны данные области и особенности их использования (виды дуплекса, ширина канала и типы сот).

В качестве главных особенностей этого спектра в отношении ЭМС можно выделить следующее: возможность использования широкой непрерывной полосы канала (суммарно до 1–2 ГГц); малые зоны обслуживания (дальность излучения) в малых (Small) и ультрамалых (Ultra Small) сотах; возможность задействовать малогабаритные многоэлементные антенны massive



**Таблица 2**  
Основные особенности оценки ЭМС для сетей 5G

Особенности радиоинтерфейсов 5G	Особенности ЭМС	Комментарии
Новые методы радиодоступа	Учет суммарной помехи	Уровень суммарной помехи будет определяться количеством одновременно излучающих РЭС, которое, в свою очередь, зависит от метода радиодоступа (аналогично GSM, 3G/WCDMA, 4G/OFDMA)
Новые (неортогональные) формы сигнала	Учет спектральных свойств излучаемых сигналов	Предлагаемые неортогональные сигналы обладают лучшими спектральными характеристиками (имеют меньший уровень внеполосных излучений)
Новые диапазоны радиочастот (см- и мм-волны)	Применение новых моделей потерь (моделей каналов)	Будут использоваться многомерные антенны MIMO (massive MIMO). Модели потерь должны быть пространственно-ориентированными и учитывать дополнительные факторы ослабления сигнала при его распространении, обусловленные более высокими диапазонами радиочастот
Широкие полосы канала (до 400 МГц)	Низкий уровень спектральной плотности мощности излучаемого сигнала в широкой полосе частот	В отличие от узкополосных каналов, где вся мощность излучаемого сигнала попадает в полосу приемника (рецептора помехи) большинства действующих РЭС, при широкой полосе излучения в полосу этого приемника попадает лишь некоторая доля мощности излучаемого сигнала, в результате условия ЭМС становятся менее жесткими
Многоэлементные антенны (massive MIMO)	3D-ориентированные модели канала. Оценка суммарной помехи с учетом остронаправленного пространственного излучения сигналов в сети радиодоступа. Применение моделей многоэлементных антенных систем	Излучение остронаправленными на взаимодействующее РЭС пространственными лучами (3D-Beamforming) требует особого подхода к оценке суммарной помехи с учетом динамики (приемлем стохастический метод). Необходим учет «усиленного» (сконцентрированного) уровня сигнала в направленном луче. Модели реальных антенн massive MIMO часто имеют значительные отличия (отклонения) от идеальных (теоретических) моделей
Сверхплотная архитектура малых сот (Ultra Smart Cell)	Учет суммарной помехи от большого количества малых сот при расстояниях между ними 100–300 м	В интересах ЭМС нередко приходится оценивать количество активных абонентских терминалов в конкретной соте. В подобном сценарии может оказаться затруднительным оценить этот показатель для мобильных абонентов, быстро перемещающихся между сотами малых размеров (D2D, V2V)
Динамический режим TDD (в малых сотах)	Учет суммарной помехи	При динамическом режиме TDD (Dynamic TDD) происходит адаптивное (непрогнозируемое) переключение направлений передачи DL/UL, что трудно прогнозируемо для оценки уровня суммарной помехи от базовых станций и абонентских терминалов
Интеграция сети радиодоступа с опорной (базовой) сетью backhaul	Оценка ЭМС как по сети радиодоступа, так и по опорной радиосети backhaul	Присуща архитектуре сети с малыми сотами (Small Cell, Ultra Small Cell)

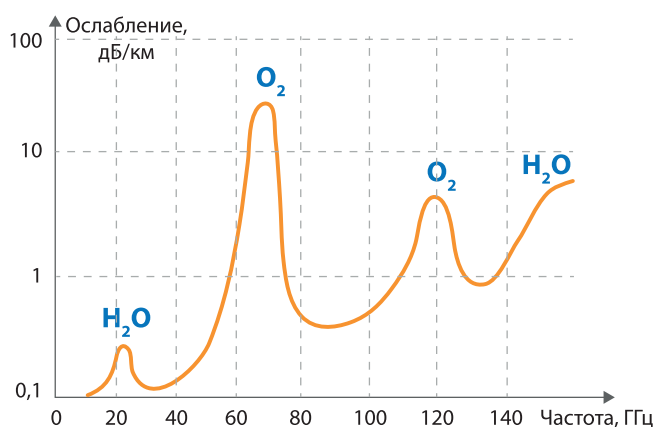
MIMO с узкими лучами как в базовых станциях, так и в абонентских устройствах; разный характер потерь при распространении сигнала, в частности значительное влияние на уровень потерь дополнительных факторов, ранее не учитываемых в сотовой связи (газы: кислород  $O_2$ , водяные пары  $H_2O$  и др.) (рис. 8).

В целом стратегия использования РЧС в сетях 5G будет ориентирована на сверхплотные архитектуры сетей радиодоступа с новыми видами сигнально-ко-

довых конструкций, рассмотренных выше. В этих условиях особую важность приобретает выбор моделей потерь (моделей канала) для оценок по ЭМС. Существующие модели, как правило, лишены трехмерных 3D-компонентов, но в рамках 3GPP уже разработана 3D-модель канала [17, 18].

Говоря о специфике условий ЭМС для 5G, необходимо упомянуть и такие особенности сетей, как динамический режим TDD с адаптивным переключением DL/UL в малых сотах — один из потенциальных источников групповой помехи; использование ретрансляторов в сочетании с многопользовательским MIMO — это пример снижения уровня пространственно-ориентированных помех, а также высокую динамику перемещения передающих станций при двойной мобильности: автомобиль—автомобиль (V2V), пользователь—пользователь (D2D).

**Рисунок 8**  
Потери (ослабление) сигнала в высоких диапазонах радиочастот



## ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАДИОИНТЕРФЕЙСА 5G НА ЭМС

Анализ отмеченных ключевых характеристик радиоинтерфейса 5G позволяет указать на ожидаемые особенности процедур оценки условий ЭМС для будущих сетей. Они будут касаться главным образом учета суммарной помехи от сети при ее специфической архитектуре и динамике изменений, выбора новых моделей потерь (моделей канала) при пространственно-распределенном излучении многомерных антенн MIMO и разно-

родной среде распространения сигнала, а также учета спектральных свойств новых форм сигнала и характера излучения при новых неортогональных методах радиодоступа (табл. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ известных сегодня технических решений для построения радиointерфейсов 5G позволяет указать на ключевые особенности процедур оценки условий электромагнитной совместимости для новых сетей 5G, которые необходимо учесть при заблаговременной подготовке методик расчетов ЭМС радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы с РЭС различного назначения.

Развитие сетей 5G должно стимулировать создание устойчивой и безопасной ИКТ-инфраструктуры высокоскоростной передачи больших объемов данных, внедрение цифровых технологий и платформенных решений в сферах государственного управления, бизнеса и общества, а также развитие рынка телекоммуникационных услуг. Это, в свою очередь, будет способствовать ускорению технологического развития РФ, более быстрому внедрению цифровых технологий в экономике и социальной сфере, что предусмотрено Указом Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скрынников, В.Г.** 5G: Облик будущих систем мобильной связи. Ч. 1 // Технологии и средства связи. – 2014. – № 6.
2. **Скрынников, В.Г.** Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика. – М.: Спорт и культура-2000, 2012.
3. **Скрынников, В.Г.** Условия внедрения технологии NB-IoT в сетях мобильной связи // Электросвязь. – 2017. – № 9.
4. **Скрынников, В.Г.** Научный обзор: проблемы обеспечения электромагнитной совместимости современных и перспективных радиосистем сотовой связи. Ч. 1 // Технологии и средства связи. – 2016. – № 5.
5. **Скрынников, В.Г.** Научный обзор: проблемы обеспечения электромагнитной совместимости современных и перспективных радиосистем сотовой связи. Ч. 2 // Технологии и средства связи. – 2017. – № 1.
6. **Скрынников, В.Г.** Научный обзор: проблемы обеспечения электромагнитной совместимости современных и перспективных радиосистем сотовой связи. Ч. 3 // Технологии и средства связи. – 2017. – № 2.
7. **Скрынников, В.Г.** Научный обзор: проблемы обеспечения электромагнитной совместимости современных и перспективных радиосистем сотовой связи. Ч. 4 // Технологии и средства связи. – 2017. – № 4.
8. Решение ГКПЧ от 28 декабря 2017 г. № 17-44-06 «Об использовании полос радиочастот радиоэлектронными средствами стандарта LTE и последующих его модификаций в режиме NB-IoT».
9. LTE to 5G // Rysavy Research: 5G Americas. – August 2018.
10. **Niri, Shahram G.** Toward 5G // LTE World Summit 2013. – 5G Innovation Centre, University of Surrey, June 2013.
11. **Hardouin, Eric.** 5G: an operator's perspective // LTE World Summit. – Orange Labs, 25 June 2013.
12. **Скрынников, В.Г.** 5G: Облик будущих систем мобильной связи. Ч. 2 // Технологии и средства связи. – 2015. – № 1.
13. **Saito, Y.** Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access / Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour et al. // Proc. IEEE Veh. Tech. Conf. – Germany, Dresden, June 2013.
14. **Taherzadeh, M.** SCMA codebook design / M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh, H. Baligh // Proc. IEEE Veh. Tech. Conf. – Las Vegas, NV, US, Sept. 2014.
15. **Jue, Greg.** Keysight Technologies. Implementing a Flexible Testbed for 5G Waveform Generation and Analysis / Greg Jue, Sangkyo Shin // White Paper. – Keysight Technologies, December 2017.
16. **Reil, M.** Millimeter-Wave Beamforming: Antenna Arrays & Characterization / M. Reil, G. Lloyd // White Paper. – Rohde & Schwarz, 2016.
17. 3GPP TR 25.996. Spatial Channel Model for MIMO Simulations (Rel' 15). – 2018.
18. 3GPP TR 36.873. Study on 3D channel model for LTE (Rel' 12). – 2017.

Получено 03.04.19