

ЧАСТОТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ СЕТЕЙ 5G В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ С ДРУГИМИ РАДИОТЕХНОЛОГИЯМИ

Н.В. Лемешко, нач. отд. АО «Корпорация «Комета», д-р техн. наук, nlem83@mail.ru
С.С. Захарова, преподаватель НИУ Высшая школа экономики, канд. техн. наук, zaharovasvetlana@ya.ru

Рецензент: В.И. Соловьев, декан, ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», д-р экон. наук, visoloviev@yandex.ru

В статье рассматривается проблема проведения измерений в обеспечении ЭМС для сетей 5G NR. Рассматриваются принятая последовательность внедрения новой технологии радиосвязи, особенности предусмотренного для нее частотного плана и ее физического уровня, из которых следуют важнейшие особенности проведения измерений в обеспечении межсистемной ЭМС.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, частотный план, физический уровень сети радиодоступа, циклический префикс, CP-OFDM-модуляция, MIMO.

FREQUENCY PLANNING OF 5G NETWORKS IN THE RUSSIAN FEDERATION AND ENSURING THEIR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY WITH OTHER RADIO TECHNOLOGIES

N.V. Lemeshko, Head of the Department of JSC Corporation «Comet», Ph.D., nlem83@mail.ru

S.S. Zakharova, Lecturer, Higher School of Economics, Doctor of Engineering, zaharovasvetlana@ya.ru

The article deals with the problem of measurements in the provision of EMC for 5G NR networks. The accepted sequence of the introduction of a new radio communication technology, the features of the frequency plan provided for it and its physical level are considered, from which follow the most important features of measurements to ensure intersystem EMC.

Keywords: electromagnetic compatibility, frequency plan, physical level of radio access network, cyclic prefix, CP-OFDM modulation, MIMO.

Введение

Развитие общества, внедрение инноваций, повышение качества жизни людей и научно-технический прогресс всегда были связаны с повышением объемов информационного обмена. Потребности автоматизации производственных и транспортных процессов, информационного обмена между индивидуальными абонентскими терминалами привели к настоятельной необходимости внедрения сетей беспроводного доступа пятого поколения 5G, которые при некоторых сходствах с 4G в части кодовых конструкций имеют значительные отличия на физическом уровне. Именно по этой причине в литературе, например [1], новую технологию связи обозначают как new radio (NR), подчеркивая тем самым ее революционный характер.

Сферы будущего использования сетей 5G во многом определяются техническим развитием конкретных государств, и чем он выше, тем больший охват они могут иметь. На текущий момент для 5G принято выделять три основных направления.

1. Расширенный широкополосный мобильный доступ (eMBB) предполагается реализовать в соответствии с действующими стандартами мобильной связи. Это применение ориентировано на людей как потребителей мультимедийного контента и телекоммуникационных услуг, в том числе в виде передачи больших объемов данных. Такое приложение требует одновременной поддержки значительного количества пользователей и предусматривает два сценария использования, первый из которых характеризуется локальностью, предельными скоростями передачи данных и низкой мобильностью, а второй – более широким охватом, меньшей плотностью пользователей и их более высокой мобильностью при пониженной скорости передачи данных.

2. Обеспечение массового взаимодействия между человеком и техническими средствами, а также между техническими средствами без участия людей (mMTC) направлено на реализацию концепции интернета вещей (IoT) [2], согласно которой охват бытовых технических средств информационной сетью позволяет качественно улучшить жизнь людей и достигнуть значимого синергетического эффекта. Уже скоро общий трафик таких устройств превысит совокупный трафик, порождаемый людьми. Такие абоненты сетей 5G будут характеризоваться массовостью, малым потреблением энергии и низкими объемами передачи информации без критичности к задержке и надежности ее доставки.

3. Сверхнадежная связь с минимальной задержкой (URLCC) предназначена для управления средствами промышленной, транспортной и медицинской автоматизации, узлами информационных сетей. Это приложение характеризуется умеренным трафиком, но высокой ответственностью и локальностью мест его доставки.

В сетях 5G будут передаваться беспрецедентно большие объемы данных при одновременно возрастающей их ответственности. При этом частотные планы, разработанные для сетей 4G в отдельных регионах мира, оказываются несостоятельными, так как не предусматривают выделение достаточного для всех названных приложений частотного ресурса. Выходом здесь могло бы стать использование цифровой модуляции высоких порядков, однако такое решение требует заметного повышения мощности передатчиков базовых станций и абонентских терминалов при одновременном ухудшении электромагнитной обстановки [3]. Это определило переход к активному использованию миллиметрового диапазона волн, длин волн с достаточным частотным ресурсом, которое сопровождается проявлением новых радиофизических эффектов, например большими потерями на поглощение и – в некоторых интервалах частот – активным поглощением радиоволн в атмосферных газах.

Многодиапазонность работы устройств 5G, их предполагаемая массовость, а также когнитивный характер использования спектрального ресурса требуют учета при подходах к частотному планированию радиосети 5G и тестирования на соответствие нормам межсистемной электромагнитной совместимости (ЭМС). Оптимальность и продуманность решений в этой части во многом определяют возможность получения всех инновационных предпочтений, связанных с 5G: высокой скорости передачи, охвата всех категорий абонентов в зоне обслуживания, гарантированной передачи информации.

Особенности частотного плана сетей 5G

Невозможность заимствования частот у более ранних радиотехнологий, например 3G/4G, предопределили переход 5G в сантиметровый и миллиметровый диапазоны, в которых имеются свободные полосы частот шириной до нескольких гигагерц. Уже в первых редакциях спецификации консорциум 3GPP, развивающий технологию 5G, принял решение о поддержке диапазона от 1 до 52,6 ГГц [4]. Использование миллиметрового диапазона сопровождается следующими проблемами:

– затруднено использование широконаправленных антенн из-за значительного увеличения потерь на распространение электромагнитных волн, что в ряде случаев требует применения антенных решеток для формирования диаграмм направленности с узким лучом;

– для частот выше 50 ГГц наличие гидрометеоров, в том числе тумана, увеличивает потери на распространение электромагнитных волн на десятки децибел;

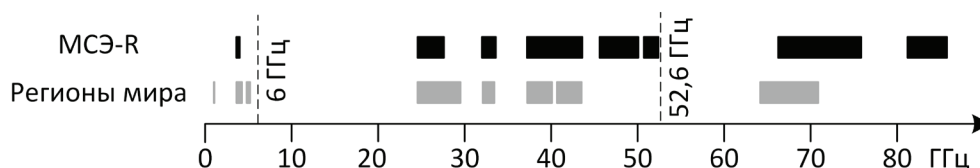
– частоты в интервале 55...65 ГГц характеризуются высоким поглощением радиоизлучений молекулярным кислородом в составе воздуха с максимумом потерь в 15 дБ/км на частоте 60 ГГц [5];

– радиооборудование миллиметрового диапазона длин волн при прочих равных условиях имеет более высокие фазовые шумы и более низкую выходную мощность;

– использование базовых станций миллиметрового диапазона ограничено вблизи некоторых объектов, например станций спутниковой связи, из-за проблем ЭМС.

Как следствие этого, технология 5G предусматривает гибкое использование полос частот в зависимости от плотности распределения абонентов и их потребностей в трафике. Работа сетей 5G на частотах ниже 6 ГГц, как предполагается, будет обеспечивать надежной связью небольшое количество абонентов, в то время как миллиметровый диапазон будет задействован преимущественно в городах для обеспечения высоких скоростей передачи.

На рисунке графически представлено распределение частотного ресурса для сетей 5G в глобальном масштабе и на региональном уровне.



Глобальное и региональное распределение частотного ресурса для сетей 5G

Полоса 3,3...3,6 ГГц была определена МСЭ-R в качестве глобальной. В зависимости от региона мира в диапазоне частот ниже 6 ГГц для работы сетей 5G дополнительно рассматриваются полосы частот 3,3...4,2 ГГц (США, Япония, Южная Корея, Китай) и 4,4...5,0 ГГц (Китай, Япония и другие страны Азиатско-Тихоокеанского региона). Примечательно, что для первичной отработки технологии 5G многие страны, включая США, планируют использовать либо уже используют полосу 0,6...0,7 ГГц, крайне недостаточную для полноценной работы, но позволяющую обойтись без применения многоантенных методов передачи радиоволн. Во многих случаях эта полоса занята радиосетями LTE, а в будущем она может быть задействована для обеспечения связи стандарта 5G с подвижными объектами.

На частотах выше 6 ГГц глобальное и региональное распределение частот в целом совпадает. По результатам обсуждения на Всемирной конференции радиосвязи МСЭ-R минимальная потребность в частотном ресурсе для 5G оценена на уровне 20 ГГц [6]. Однако в настоящее время выделить такую полосу, в особенности по всему миру, невозможно из-за действующего распределения частот между радиослужбами, в первую очередь спутниковой фиксированной связью. По этой причине для сетей 5G на частотах выше 6 ГГц предполагается выделение нескольких полос частот, причем для каждой из них необходимо использовать индивидуальные приемо-передающие устройства. Но здесь определяющим фактором является снижение эффективности работы передающих устройств с увеличением частоты, препятствующее освоению миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

Ввиду того что загруженность спектра в значительной степени зависит от региона мира и даже от государства, в дополнение к глобальным частотам 5G, выделенным МСЭ-R, некоторые из них, так же как и для диапазона ниже 6 ГГц, рассматривают использование

дополнительных полос частот 26,5...29,5 ГГц (США, Южная Корея, Канада), 37...40 ГГц (США, Канада); 64...71 ГГц (Канада). В Европе для сетей 5G планируется использовать диапазоны 31,8...33,4 и 40,5...43,5 ГГц. Однако отсутствие отлаженной технологии радиосвязи с множественным доступом для частот выше 30 ГГц значительно замедляет освоение названных полос частот.

В Российской Федерации выделение частот для радиослужб осуществляется Государственной комиссией по радиочастотам. Недавно ГКРЧ приняла решение № 20-54-02 [7], согласно которому полосы частот 0,694...0,790; 2,3...2,4; 2,57...2,62; 4,4...4,99; 24,25...27,5 ГГц являются перспективными для построения сетей связи стандарта 5G. Согласно этому же решению для развертывания сетей 5G в РФ будут использоваться частоты 4,4...4,99 и 24,25...24,65 ГГц, однако приоритет отдается последней из них, что идет вразрез с порядком внедрения 5G в других странах. Использование полосы частот 3,3...4,2 ГГц, применяемой во многих странах на начальном этапе развертывания сетей 5G, признано ГКРЧ невозможным из-за использования радиотехническими системами военного назначения и спутниковой связью.

Физический уровень сетей 5G

Ключевыми аспектами физического уровня сетей 5G являются принципы модуляции, организация передачи и приема в восходящем и нисходящем каналах, а также многоантенная передача. В конечном счете все они и определяют критерии обеспечения межсистемной ЭМС с другими службами. Технология 5G во многом повторяет способы передачи информации сетей 4G LTE с учетом необходимого им нелинейного масштабирования, а также изменений, определяемых переходом в миллиметровый диапазон.

В сетях 5G планируется использовать OFDM-модуляцию, а для несущих будут поддерживаться QPSK, 16QAM, 64QAM и 256QAM, как и в сетях LTE. В восходящих каналах будет поддерживаться $\pi/2$ -BPSK-модуляция для уменьшения отношения пиковой мощности к средней, что улучшает эффективность работы усилителей мощности при более низких скоростях передачи. В будущем номенклатура поддерживаемых схем модуляции может быть расширена в целях повышения эффективности использования спектра, – например, рассматривается вариант применения модуляции 1024QAM для связи между неподвижными точками. Характеристики OFDM-модуляции в зависимости от диапазона частот представлены в таблице.

Характеристики OFDM-модуляции для 5G (3GPP, rel.15)

Разнос несущих, кГц	15	30	60	120
Диапазон частот, ГГц	0,45...6	0,45...6	0,45...6 24...52,6	24...52,6
Длительность передачи OFDM-символа, мкс	66,67	33,33	16,67	8,33
Длительность циклического префикса, мкс	4,69	2,34	1,17	0,59
Длительность передачи OFDM-символа с циклическим префиксом, мкс	71,35	35,68	17,84	8,91
Максимальная полоса сигнала, МГц	50	100	200	400

С учетом значительного влияния многолучевости в каналах радиосвязи, снижающегося с увеличением рабочих частот радиолиний, в сетях 5G используется циклический префикс (CP-OFDM) как в восходящих, так и в нисходящих каналах, по крайней мере до частоты 52,6 ГГц, в то время как в технологии LTE циклический префикс используется только для передач по нисходящей линии, а для передачи в обратном направлении применяется модуляция DFTS-OFDM [1]. Как предполагается, после отработки технологии 5G на опытных сетях базовые станции смогут задавать тип передачи данных – CP-OFDM или DFTS-OFDM – в зависимости от формируемого пространством канала распространения радиоволн, соответственно, абонентские терминалы должны поддерживать оба этих варианта.

Как следует из таблицы, в сетях 5G может применяться модуляция с минимальным разном несущих, равным 15 кГц, что соответствует технологии LTE. Масштабирование реализуется с коэффициентом $2n$, где $n = 1, 2$ или 3 в зависимости от диапазона частот. Загрузка циклическим префиксом составляет 7% от физической пропускной способности. Максимальное количество несущих в одном канале для сетей 5G составляет 3300 шт. В перспективе дополнительное повышение пропускной способности может быть достигнуто объединением до 16 таких каналов, как это предусматривает 15-е издание спецификации NR.

Для решения проблем межсистемной ЭМС для сетей LTE и 5G предусмотрены некоторые ограничения по использованию крайних несущих сигналов CP-OFDM. Если в первом случае допускается использование до 90% спектрального ресурса каналов, то для 5G, как ожидается, оно составит от 94 до 99% за счет применения новых, более эффективных технологий цифровой фильтрации.

Значительные различия между LTE и 5G имеются в части подходов к передаче и приему электромагнитных волн. Использование нескольких антенн предусматривалось и в LTE, но для 5G оно имеет фундаментальное значение, поскольку концепция этой радиотехнологии разрабатывалась с учетом использования направленного излучения и приема для достижения приемлемого размера зон покрытия, а также для достижения требуемой пропускной способности с учетом значительного расширения спектра. Это позволяет значительно уменьшить необходимую мощность передающих устройств при прочих равных условиях, компенсируя и повышенные потери на распространение. При этом управление угловым положением максимума диаграммы направленности должно осуществляться как базовыми станциями, так и абонентскими терминалами. Для этого в 5G реализуется передача информации о состоянии канала (CSI). По такому же принципу передаются широкополосные сообщения и выполняется первичная идентификация в радиосети.

Особенности тестирования устройств сетей 5G на соответствие нормам межсистемной ЭМС

Классические подходы к обеспечению межсистемной ЭМС предусматривают использование двух разновидностей радиоизмерений, различающихся по ожидаемому результату и назначению. Первая из них относится к испытаниям абонентских устройств и базовых станций, в ходе которых оценивается совокупность характеристик для сопоставления с выработанными нормами, соблюдение которых в совокупности является комплексным критерием обеспечения ЭМС [3]. Вторая разновидность радиоизмерений реализуется в ходе эксплуатации радиосетей при проведении радиоконтроля уполномоченными организациями и охватывает те характеристики излучений базовых станций, которые позволяют проверить соблюдение разрешений на использование радиоэлектронных средств. Согласно справочнику по радиоконтролю [8] в типовом случае по излучениям радиопередающих объектов оцениваются напряженность электромагнитного поля, центральная частота и занимаемая полоса. При этом используются классические подходы к испытаниям, которые должны быть дополнены обеспечением требуемых режимов работы тестируемого узла радиосети. Однако такие понятия, как центральная частота и занимаемая полоса, должны применяться с осторожностью к излучениям 5G, отличающимся высокой нестационарностью спектрального состава.

Указанная совокупность параметров недостаточна для оценки соблюдения межсистемной ЭМС в сетях 5G, и для ее расширения целесообразно обратиться к документам 3GPP, определяющим содержание соответствующих испытаний для базовых станций и абонентских устройств. Учитывая предпосылки развития и назначение сетей 5G, можно заранее предположить, что при измерениях в обеспечение ЭМС должны оцениваться их интегральные выходные эксплуатационные показатели.

Спецификация [9], действие которой распространяется на базовые станции (БС) сетей 5G и работающее совместно с ними вспомогательное оборудование, рассматривает эти

технические средства как объекты многопортового подключения. В рамках межсистемной ЭМС испытания БС проводятся на антенных и телекоммуникационных портах; на других их видах выполняются стандартизированные измерения для оценки помехоустойчивости и помехоэмиссии [10].

При тестировании БС конфигурируются для работы в заданном частотном диапазоне и в заданной полосе. Для БС формируется особая испытательная среда, включающая канал связи с некоторым ответным устройством, а также измерительные средства, позволяющие оценить качество работы. В большинстве случаев ими являются телекоммуникационные тестеры. Дополнительно создаются условия для предотвращения действия посторонних радиопомех на объект испытаний, и для этого могут использоваться безэховые камеры, в том числе настольного исполнения. В среду испытаний также встраивается источник сторонних электромагнитных воздействий, для которых оценивается помехоустойчивость БС.

В качестве мешающих воздействий спецификация [9] предусматривает использование только узкополосных сигналов (с полосой, много меньшей ширины канала). При этом считается допустимым появление узкополосных откликов, проявляющихся в снижении выходных показателей работы БС ниже установленных значений. Их сохранение при отстройке в интервале до удвоенной полосы рабочего канала считается широкополосным откликом, недопустимым для БС.

Большая часть испытаний БС проводятся при номинальной выходной мощности. Для уменьшения количества варьируемых параметров и упрощения тестовой процедуры спецификация [9] определяет, что БС 5G, предназначенные для работы в одноканальном режиме, испытываются при наиболее узкой рабочей полосе и минимальном разnose несущих; при этом оцениваются помехоустойчивость и помехоэмиссия БС в сечении, соответствующем антенным портам. Станции, способные работать одновременно в нескольких каналах, тестируются с разным частотным разnoseм несущих. Дополнительно условия тестирования БС по ЭМС конкретизируются спецификациями [11–13].

В качестве критерия обеспечения ЭМС при воздействии помех на антенные порты БС спецификация [9] устанавливает снижение пропускной способности БС не более чем на 5 % от значения, соответствующего отсутствию помех в среде передачи. Данный критерий применяется для всех сочетаний полос частот канала, всех разnoseв поднесущих, а также частотных диапазонов работы сетей 5G. Если БС тестируется в связке с абонентским устройством, то допускается двукратное снижение пропускной способности.

Методы испытаний в части межсистемной ЭМС для абонентских терминалов сетей 5G устанавливаются спецификацией [14] и принципиально не отличаются от аналогичных для БС. При наличии технической возможности испытательная среда локализуется в коаксиальном либо ином закрытом тракте, и здесь в большей степени целесообразно применение настольных безэховых камер, если учитывать небольшие размеры АТ. Ответное устройство, работающее при испытаниях с АТ, должно полностью эмулировать функции БС или, по крайней мере, обеспечивать вызов АТ и другие важнейшие функции. Однако, в отличие от спецификации [9] на БС, здесь отсутствует явное указание на критерий обеспечения межсистемной ЭМС при наличии внешних помех. Однако допускаемое в [14] распределение снижения производительности при тестировании БС в паре с АТ предполагает сходные критерии обеспечения межсистемной ЭМС. Таким образом, для определения условия сохранения ЭМС при наличии внешних помех, в том числе от других радиослужб, следует ориентироваться на снижение скорости обмена между БС и АТ.

Методические проблемы тестирования узлов радиосетей 5G на соответствие нормам межсистемной электромагнитной совместимости

Как видно из изложенного, основной особенностью сетей 5G является широта используемых частотных диапазонов. Применительно к межсистемной ЭМС это порождает две важнейшие проблемы методического характера.

Первая из них состоит в фактическом отсутствии частных критериев совместимости 5G с другими радиослужбами, которых к настоящему времени насчитывается более сорока. Критерии, установленные спецификациями [9, 14], состоят в минимальном ухудшении пропускной способности канала и в отсутствии разрывов связи с абонентскими терминалами. Сложность организации протокола передачи данных в сетях 5G не позволяет осуществить однозначную трансформацию этого критерия в категории частотного, пространственного или временного разнеса [3], а также энергетики электромагнитного поля. Традиционное понятие защитных отношений здесь также малоприменимо.

Ввиду этого внедрение сетей 5G должно сопровождаться выработкой частных критериев межсистемной ЭМС для различных радиослужб, которые при необходимости могли бы быть проверены экспериментально для конкретных сочетаний электромагнитно совмещаемых радиоэлектронных средств.

Второй проблемой методического характера является выработка базового подхода к воспроизведению условий эксплуатации узлов радиосетей 5G для целей тестирования. Для 5G, в отличие от сетей LTE, реализуются алгоритмы обеспечения направленных передачи и приема электромагнитных волн, что напрямую влияет как на помехоэмиссию, так и на помехоустойчивость. Это не позволяет непосредственно сопоставлять их показатели, полученные при испытаниях в сечениях до и после антенных устройств. Между тем такое сопоставление важно для достижения однозначности трактовки критериев межсистемной ЭМС узлов сетей 5G с радиосредствами других служб.

Использование направленного излучения и приема играет важнейшую роль и в обеспечении ЭМС за счет ограничения эмиссии по незадействованным направлениям в соответствии с уровнем боковых лепестков, а также уменьшением вероятности дуэльных ситуаций между узлами радиосети. Опытная и штатная эксплуатация сетей 5G показала возможность появления проблем межсистемной ЭМС на довольно больших расстояниях от базовых станций. Уровень помех между 5G и другими радиослужбами планируется рассчитывать при размещении базовых станций на основе существующих моделей распространения радиоволн [15], однако для этого с учетом перехода в миллиметровый диапазон должны быть усовершенствованы модели прохождения излучения через растительность и городскую застройку, а также его проникновения в помещения. Как отмечается в [1], распространение сигналов миллиметрового диапазона в городе сопровождается их существенным ослаблением, что улучшает ситуацию с помехами, но в то же время требует уменьшения радиусов зон покрытия, в том числе перехода к пикосотам, границы которых определяются пределами конкретного помещения. По-видимому, для выработки критериев обеспечения межсистемной ЭМС потребуются и корректировка моделей прохождения электромагнитных излучений в здания через проемы для определения потребности в применении пикосот, существенно повышающей стоимость развертывания радиосетей 5G.

Заключение

Как следует из изложенного, достижение и использование всех преимуществ, присущих сетям 5G, может быть достигнуто при условии достаточности выделяемого частотного ресурса и грамотного, обоснованного управления им. Задача обеспечения межсистемной ЭМС сетей радиодоступа пятого поколения имеет значительные отличия от аналогичной для сетей LTE. В первую очередь это определяется потребностью в выделении крайне значительного спектрального ресурса, обусловленного сферами планируемого применения новой технологии и определяющего использование частот миллиметрового диапазона. Важной особенностью тестирования в обеспечение ЭМС сетей 5G является необходимость создания тестовой среды, которая качественно имитировала бы реальные условия эксплуатации.

Решение выявленных методических проблем тестирования узлов 5G в обеспечение межсистемной ЭМС необходимо для разработки частотных планов федерального и регио-

нального уровня, правильного размещения БС 5G, а также минимизации общих затрат на внедрение новой радиотехнологии, включая работы по конверсии радиочастотного спектра.

Список литературы

1. Zaidi A., Athley F., Medbo J. 5G Physical Layer. Principles, Models and Technology Components. Academic Press, 2018. 302 p.
2. Гингард С. Интернет вещей: будущее уже здесь. М.: Альпина Паблишер, 2016. 180 с.
3. Бузов А.Л., Быховский М.А., Васехо Н.В. и др. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем / под ред. М.А. Быховского. М.: Эко-Трендз, 2006. 376 с.
4. Parkvall S., Dahlman E., Furuskar A., Frenne M. NR: the new 5G radio access technology. NR – IEEE Communications Standards Magazine (2017, Dec.). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8258595> (дата обращения: 09.11.2022).
5. Бартенев В.А., Болотов Г.В., Быков В.Л. и др. Спутниковая связь и вещание. 2-е изд. / под ред. Л.Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.
6. ITU-R, Liaison statement to task group 5/1-spectrum needs and characteristics for the terrestrial component of IMT in the frequency range between 24.25 GHz and 86 GHz. ITU-R, WP 5D, Doc. TG5.1/36, 2017. URL: <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0036/es> (дата обращения: 09.11.2022).
7. Решение ГКРЧ № 20-54-02 «Об определении диапазонов радиочастот для создания сетей связи стандарта 5G/IMT-2020 на территории Российской Федерации». Протокол заседания № 20-54дсп от 14.04.2020. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/7154> (дата обращения: 09.11.2022).
8. Справочник по управлению использованием спектра на национальном уровне / Бюро радиосвязи МСЭ, 2002. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-21-2005-PDF-R.pdf (дата обращения: 09.11.2022).
9. TS 38.113. 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) ElectroMagnetic Compatibility (EMC). Rel. 15. URL: <http://www.3gpp.org> (дата обращения: 09.11.2022).
10. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / пер. с англ.: Кармашева В.С., Кечиева Л.Н. М.: Издательский дом «Технологии», 2003. 540 с.
11. TS 38.141-1. 3GPP. NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing. URL: <http://www.3gpp.org> (дата обращения: 09.11.2022).
12. TS 38.141-2. 3GPP NR; Base Station (BS) conformance testing Part 2: Radiated conformance testing. URL: <http://www.3gpp.org> (дата обращения: 09.11.2022).
13. TS 38.104. 3GPP. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception. URL: <http://www.3gpp.org> (дата обращения 07.09.2022).
14. TS 38.124. 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; NR; ElectroMagnetic Compatibility (EMC) requirements for mobile terminals and ancillary equipment. Rel. 15. URL: <http://www.3gpp.org> (дата обращения: 09.11.2022).
15. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П. и др. Распространение радиоволн / под ред. О.И. Яковлева. М.: Ленанд, 2009. 496 с.

References

1. Zaidi A., Athley F., Medbo J. (2018) 5G Physical Layer. Principles, Models and Technology Components. Academic Press. P. 302.
2. Gingard S. (2016) *Internet veshchey: budushchee uzhe zdes'* [Internet of things: the future is already here] *Al'pina Pablisher* [Alpina Publisher]. Moscow. P. 180.
3. Buzov A.L., Bykhovsky M.A., Vasekho N.V. et al. (2006) *Upravlenie radiochastotnym spektrom i elektromagnitnaya sovместimost' radiosistem* [Radio frequency spectrum management and electromagnetic compatibility of radio systems] *Eko-Trendz* [Eco-Trends]. Moscow. P. 376.

4. Parkvall S., Dahlman E., Furuskar A., Frenne M. (2017) NR: the new 5G radio access technology. NR – IEEE Communications Standards Magazine. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8258595> (date of access: 09.11.2022).

5. Bartenev V.A., Bolotov G.V., Bykov V.L., etc. (1997) *Sputnikovaya svyaz' i veshchanie. 2-e izd.* [Satellite communications and broadcasting. 2nd ed.] *Pod red. L.Ya. Kantora* [Edited by L.Ya. Kantor] *Radio i svyaz'* [Radio and Communications]. Moscow. P. 528.

6. *Reshenie GKRCh No. 20-54-02 «Ob opredelenii diapazonov radiochastot dlya sozdaniya setey svyazi standarta 5G/IMT-2020 na territorii Rossiyskoy Federatsii».* *Protokol zasedaniya No. 20-54dsp ot 14.04.2020* [ITU-R, Liaison statement to task group 5/1-spectrum needs and characteristics for the terrestrial component of IMT in the frequency range between 24.25 GHz and 86 GHz. ITU-R, WP 5D, Doc. TG5.1/36 2017]. Available at: <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0036/es> (date of access: 09.11.2022).

7. Decision of the SCRC No. 20-54-02 «On the definition of radio frequency ranges for the creation of communication networks of the 5G/IMT-2020 standard on the territory of the Russian Federation». Protocol of the meeting No. 20-54dsp dated 14.04.2020. Available at: <https://digital.gov.ru/ru/documents/7154> (date of access: 09.11.2022).

8. *Spravochnik po upravleniyu ispol'zovaniem spektra na natsional'nom urovne* [Handbook on Spectrum Management at the National Level] *Byuro radiosvyazi MSE* [ITU Radio Bureau] (2002). Available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-21-2005-PDF-R.pdf (date of access: 09.11.2022).

9. TS 38.113. 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) Electro-Magnetic Compatibility (EMC). Rel. 15. Available at: <http://www.3gpp.org> (date of access: 09.11.2022).

10. Williams T. (2003) *EMS dlya razrabotchikov produktsii* [EMS for product developers] *Per. s angl.: Karmasheva V.S., Kechieva L.N.* [Translated from English Karmasheva V.S., Kechieva L.N.] *Izdatel'skiy dom «Tekhnologii»* [Publishing House «Technologies»]. Moscow. P. 540.

11. TS 38.141-1. 3GPP. NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing. Available at: <http://www.3gpp.org> (date of access: 09.11.2022).

12. TS 38.141-2. 3GPP NR; Base Station (BS) conformity testing Part 2: Radiated conformity testing. Available at: <http://www.3gpp.org> (date of access: 09.11.2022).

13. TS 38.104. 3GPP. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception. Available at: <http://www.3gpp.org> (date of access: 07.09.2022)

14. TS 38.124. 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; NR; ElectroMagnetic Compatibility (EMC) requirements for mobile terminals and ancillary equipment. Rel. 15. Available at: <http://www.3gpp.org> (date of access: 09.11.2022).

15. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., etc. (2009) *Rasprostranenie radiovoln* [Propagation of radio waves] *Pod red. O.I. Yakovleva* [Edited by O.I. Yakovlev] *Lenand* [Lenand]. Moscow. P. 496.