

А.С. Грачева, Б.М. Захир

АРХИТЕКТУРА СЕТЕЙ 5G

Целью данной работы является исследование частотных распределений спектра электромагнитных миллиметровых волн, предоставляемого для сетей 5-го поколения 5G. Предлагаемое в статье частотное распределение, ширина полос пропускания, а также представленные способы приема-передачи сигналов с помощью новых технических решений являются эффективным способом повышения качества приема-передачи информативных сигналов, уменьшения времени задержки и увеличения скоростей приема-передачи информативного электромагнитного сигнала в миллиметровом диапазоне. Анализ основывается на официальных данных консорциума 3GPP, разрабатывающего спецификации для сотовой телефонии, что обеспечивает высокий уровень достоверности данной работы.

Ключевые слова: сети 5G, сетевая архитектура, качество сигналов, время задержки, частотные диапазоны, поддиапазоны, ширина полос пропускания, сотовая телефония, параметры базовых станций, модули сетей радиодоступа, SVN, NVF, NRF, NG-RAN.

Введение. Сегодня набирают популярность различного рода гаджеты, сети, меняются способы передачи данных, увеличивается объем, скорость и дальность передачи сообщений. Ни один человек уже не может представить себя без своего мобильного телефона, планшета или компьютера. В современных реалиях скоростей, трафика и пропускной способности сетей поколения 4G (LTE) уже недостаточно, а технологии не стоят на месте, поэтому инженеры разработали новое поколение сетей, именуемую сетью пятого поколения 5G. Преимущества данного поколения состоят в том, что оно будет обеспечивать:

- более высокую пропускную способность по сравнению с технологиями 4G;
- большую доступность широкополосной мобильной связи, использование режимов;
- device-to-device («устройство к устройству», прямое соединение между абонентами);
- надёжные масштабные системы коммуникации между устройствами;
- меньшее время задержки (до 0,5 мс);
- скорость интернета 1-2 Гбит/с;
- экономный расход энергии батарей, по сравнению с 4G-оборудования.

В основу сетей поколения 5G положена технология SDN (сеть передачи данных, в которой уровень управления сетью отделен от устройств передачи данных и реализуется программным способом) и NVF (концепция сетевой архитектуры, использующая технологии виртуализации целых классов функций сетевых узлов в виде составных элементов, которые могут быть соединены вместе или связаны в цепочку для создания телекоммуникационных услуг (сервисов)).

Сеть 5G включает в себя следующие основные программные модули и сетевые функции NF:

- функция управления доступом и мобильностью (AMF - Access and Mobility Management Function);
- функция управления сессиями (SMF - Session Management Function);
- функция передачи данных пользователей (UPF - User Plane Function);
- модуль управления данными пользователей (UDM - Unified Data Management);
- унифицированная база данных (UDR - Unified Data Repository);
- система хранения неструктурированных данных (UDSF - Unstructured Data Storage Function);
- функция выбора сетевого слоя (NSSF - Network Slice Selection Function);
- функция управления политиками (PCF - Policy Control Function);
- функция обеспечения взаимодействия с внешними приложениями (NEF - Network Exposure Function);
- хранилище сетевых функций (NRF - NF Repository Function);
- прикладная функция (AF - Application Function);
- функция поддержки обмена короткими текстовыми сообщениями посредством протокола NAS (SMSF - SMS Function);

- функция взаимодействия с не-3GPP сетью доступа (N3IWF - Non-3GPP InterWorking Function);
- функции управления безопасностью сетей 5G.

Таким образом, базовые станции будут взаимодействовать между собой по интерфейсу Xn, а с базовой сетью «5G Core» по интерфейсам NG2 и NG3.

Формирование луча к базовой станции и от базовой станции осуществляется при помощи MIMO антенн с помощью AAS (Active Antenna System - активная антенная система). AAS MIMO антенна, установленная на вышке, позволяет разбить зону покрытия на статические ячейки, чем увеличивает эффективность использования спектра. Это позволяет увеличить количество каналов.

Применение концепции MIMO антенн в миллиметровом диапазоне FR2 необходимо из-за хороших показателей направленности миллиметровых волн. За счет увеличения количества антенных элементов на антенну, массив антенных элементов (256 и более) можно соединить в одну антенну Massive MIMO. Контролируя фазу и амплитуду сигналов, такая антенна способна динамически формировать множество сильных и острых лучей в направлениях конкретных пользователей.

С Massive MIMO можно получить:

- мощный сигнал на выходе в направлении к UE;
- сильный уровень сигнал/шум в направлении от UE;
- отсутствие межсотовой интерференции;
- значительное увеличение количества каналов связи на одну соту.

Данная технология позволяет базовой станции узнать о качестве канала через специальный пакет, посылаемый от UE. Обычно большинство UE могут поддерживать отправку SRS только через свою основную передающую антенну. Следовательно, базовая станция получает информацию канала только для этой антенны. Однако, используя технологию выбора передающей антенны, можно получить полную информацию о каналах всех антенн UE. Так базовая станция может генерировать луч в направлении UE наилучшим образом. Как результат, пропускная способность UE увеличится до +40%, особенно в точках на дальнем и среднем удалении от базовой станции.

Ключевые принципы архитектуры сети 5G

В архитектуре 5G взаимодействие между сетевыми функциями представлено двумя способами:

- сервис-ориентированное (одни сетевые функции (например, AMF) позволяют другим авторизованным сетевым функциям получать доступ к их сервисам);
- интерфейсное, (показывает, какое взаимодействие существует между сервисами сетевых функций, описанных как взаимодействие «точка-точка» (например, интерфейс N11) между любыми двумя сетевыми функциями (например, AMF и SMF)).

Сетевые функции на плоскости управления 5G должны использовать только сервис-ориентированные интерфейсы для их взаимодействия.

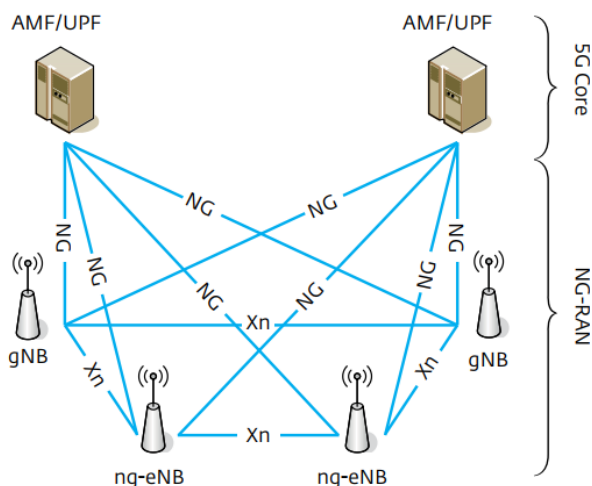


Рис. 1. Архитектура сети радиодоступа NG-RAN.

Принципы архитектуры сети 5G заключаются в следующем:

- разделение сетевых узлов на элементы, обеспечивающие работу протоколов «плоскости пользователя» (UP - User Plane) и элементы, обеспечивающие работу протоколов «плоскости управления»

(CP - Control Plane). Это значительно увеличивает гибкость в части масштабирования и развертывания (допуская централизованное и децентрализованное размещение отдельных составляющих сетевых узлов);

- разделение сетевых элементов на сетевые слои (Network Slicing), основываясь на услугах, предоставляемых конкретным группам конечных пользователей;
- реализация сетевых элементов в виде виртуальных сетевых функций - VNF (Virtual Network Functions);
- поддержка одновременного доступа к централизованным и локальным службам, что позволяет реализовывать концепции облачных и пограничных вычислений;
- определение конвергентной архитектуры, объединяющей различные типы сетей доступа (AN - Access Network) - 3GPP (New Radio - NR) и не-3GPP (WiFi и пр.) с единой опорной сетью (CN - Core Network);
- поддержка единых алгоритмов и процедур аутентификации (в независимости от типа сети доступа);
- поддержка сетевых функций без сохранения состояния (stateless), где вычислительный ресурс отделен от ресурса хранения;
- поддержка роуминга с маршрутизацией трафика как через домашнюю сеть (Home routed), так и с локальным приземлением (Local breakout) в гостевой сети (VPLMN).

Особенности построения сети радиодоступа

К особенностям построения сети радиодоступа NG-RAN 5G следует отнести сценарии использования базовых станций, при которых:

- базовые станции gNB поддерживают режим FDD, TDD или совмещенный режим dualmode;
- базовые станции типа gNB взаимодействуют между собой при помощи Xn-интерфейса;
- базовые станции типа gNB имеют распределенную архитектуру, включающую центральный модуль gNB-CU и один или несколько распределенных модулей gNB-DU;
- распределенный центральный модуль gNB-CU состоит из модуля gNB-CU-CP плоскости управления сетью и одного или нескольких gNB-CU-UP плоскости данных пользователей.

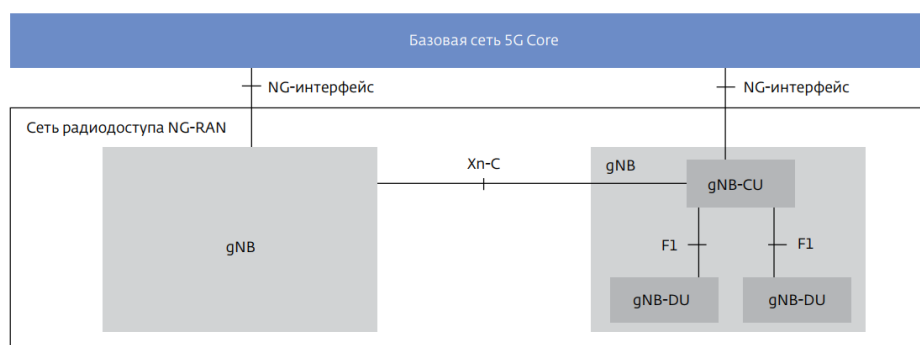


Рис. 2. Архитектура базовой станции gNB.

Центральный модуль gNB-CU представляет собой логический узел, в котором размещены протоколы уровня RRC, SDAP и PDCP, которые управляют работой одного или нескольких распределенных модулей gNB-DU. Модуль gNB-CU обеспечивает терминацию интерфейса F1, подключенного к модулю gNB-DU.

Распределенный модуль gNB-DU представляет собой логический узел, в котором размещаются протоколы уровня RLC, MAC и PHY, который поддерживает одну или несколько сот. Одна сота сети радиодоступа поддерживается только одним модулем gNB-DU. gNB-DU терминирует (завершает) интерфейс F1, подключенный к модулю gNB-CU. Модули распределенной базовой станции gNB-CU и gNB-DU соединены F1-интерфейсом.

Модуль gNB-DU может поддерживать одну или несколько сот и присоединен только к одному модулю gNB-CU.

В сети 5G используются интерфейсы сети радиодоступа 5G F1, Xn, NG2 и NG3, являющиеся открытыми логическими интерфейсами.

F1-интерфейс поддерживает обмен данными пользователя и сигнализации, выполняет разделение плоскости пользователя и плоскости управления и обеспечивает разделение уровня сети радиодоступа и транспортного уровня сети. F1 должен обеспечивать возможность сетевого взаимодействия между gNB-CU и gNB-DU базовых станций 5G различных производителей и оборудования.

Xn-интерфейс обеспечивает обмен данными пользователя (Xn-U) и сигнализации (Xn-C) между двумя базовыми станциями и узлами сети NG-RAN. Этот интерфейс поддерживает режимы внутрисетевой мобильности и двойного присоединения (dual connectivity) для базовых станций. Интерфейс Xn построен по принципу "точка-точка" и должен осуществляться даже при отсутствии прямого физического соединения между двумя базовыми станциями – узлами NG-RAN. Так же, как и интерфейс F1, интерфейс Xn обеспечивает взаимную совместимость подключения оборудования базовых станций 5G различных поставщиков. При развертывании сети радиодоступа 5G могут быть использованы следующие сценарии развертывания gNB, которые определены в TS 38.401:

- на основе gNB, которая не имеет распределенной структуры;
- на основе gNB, состоящей из элементов gNB-CU и gNB-DU (s);
- на основе gNB с распределенной структурой, которая состоит из трех видов элементов gNBCU-CP, gNB-CU-UP (s) и gNB-DU (s).

В сценариях 3GPP базовые станции 5G для задания требований и использования в сетях радиодоступа классифицированы на четыре типа (1-C, 1-H, 1-O, 2-O) по частотным диапазонам, компоновке модулей базовых станций и антенным системам, а также зонам обслуживания, которые делятся на широкие, средние и локальные.

Характеристики базовых станций по указанным параметрам представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Описание диапазонов разделения спектра сети 5G.

Тип базовой станции	Участок спектра, МГц	Конструктивное исполнение
1-C	FR1 (450 – 6000)	Разделительное исполнение антенны, фильтров передатчика и приемника, усилителя мощности и т.д.
1-H		Разделительное исполнение только композиционной решетки, совмещенной с радиораспределительной сетью и модулем приемопередатчиков антенной решетки
1-O		Совместная компоновка композиционной антенной решетки, радиораспределительной сети, модуля приемопередатчиков антенной решетки
2-O	FR2 (24250 – 52600)	

Таблица 2

Характеристики зон обслуживания

Зона обслуживания	Сценарий 5G для базовой станции	Минимальные потери соединения	Территориальный разнос между базовыми станциями
Широкая	Макросотовые	70	35
Средняя	Микросотовые	53	5
Локальная	Пикосотовые	45	2

Анализ данных таблиц 1 и 2 позволяет сделать вывод о том, что рассматриваемые сети радиодоступа в диапазоне миллиметровых длин волн будут выпускаться только один класс базовых станций – 2-O с широкой зоной обслуживания до 35 м. Архитектурно базовые станции 5G типа 1-C будут иметь распределенную структуру передающей и приемной части, показанную на рисунке 3.

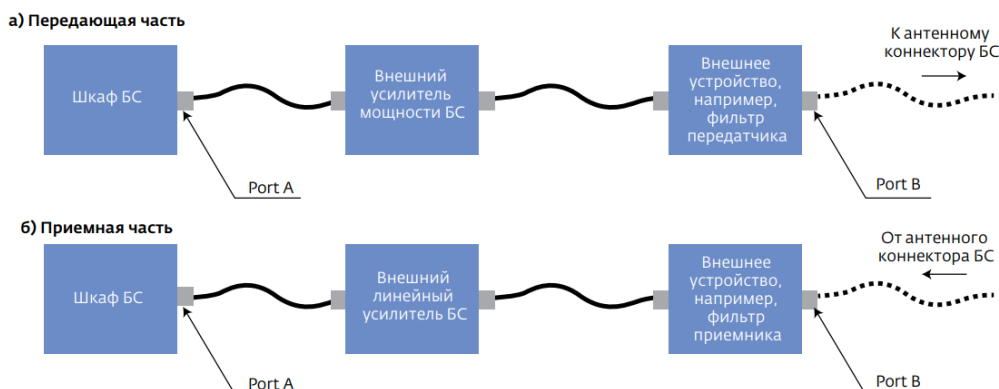


Рис. 3. Структура распределения приемной и передающей части базовой станции 1-C

Базовые станции типа 1-N архитектурно будут иметь структуру, показанную на рисунке 4.

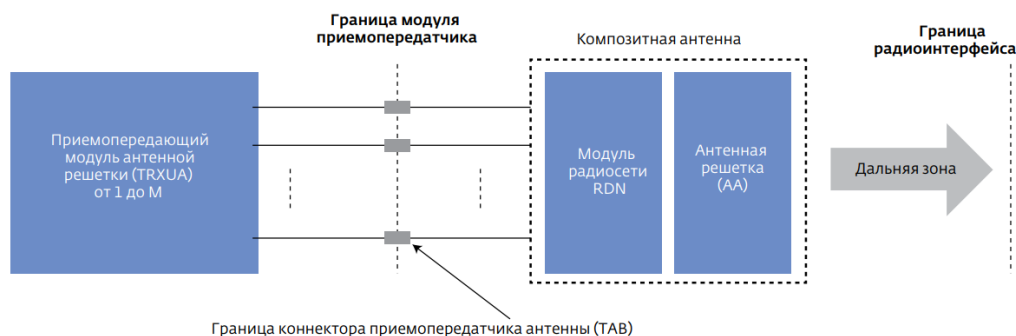


Рис. 4. Структура базовой станции 1-N

Как видно из рисунка 4, композитная антенна содержит модуль RDN (radio distribution network) и антенную решетку типа AA.

Модуль RDN представляет линейную пассивную сеть, которая передает высокочастотный сигнал, генерируемый приемопередающим модулем решетки TRXUA для антенной решетки базовой станции, и принимает сигналы, получаемые с приемных элементов антенной решетки типа AA.

Базовые станции типа 1-О и 2-О архитектурно будут иметь структуру, показанную на рисунке 5.



Рис. 5. Структура базовой станции 1-О и 2-О

Таким образом, базовые станции типа 1-О и 2-О имеют моноблочную архитектуру, объединяющую модули решетки TRXUA, модуль RDN и антенную решетку типа AA.

Базовая станция типа 1-О должна содержать не менее восьми передающих и восьми приемных антенн.

Частотные аспекты функционирования сети радиодоступа 5G

Доступность спектра для совместного использования и совместимости в частотных диапазонах должна быть определена администрациями связи в полосах 24,25–27,5 ГГц, 37–40,5 ГГц, 42,5–43,5 ГГц, 45,5–47 ГГц, 47,2–50,2 ГГц, 50,4–52,6 ГГц, 66–76 ГГц и 81–86 ГГц, основываясь на распределении мобильной подвижности службой на первичной основе; и в полосах 31,8–33,4 ГГц, 40,5–42,5 ГГц и 47–47,2 ГГц, необходимые для дополнительного распределения мобильной подвижности службой на первичной основе.

Характеристики использования спектра радиооборудованием сети радиодоступа 5G RAN в части разделения частотных каналов и значения ширины каналов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Разделение частотных каналов		
№	Параметры	NG-RAN/IMT-2020
1.	Метод разделения каналов	TDD
2.	Ширина частотного канала	200 МГц
3.	Ширина используемого канала	>90% от ширины частотного канала

Администрациями связи при исследовании доступности спектра для совместного использования и обеспечения электромагнитной совместимости в планируемых частотных диапазонах могут использоваться только частотные каналы с шириной 200 МГц.

Используемые частотные поддиапазоны приемников и передатчиков базовых и абонентских станций сети радиодоступа 5G разделены на поддиапазоны FR1 (0,450–6 ГГц) и FR2 (24,25–52,6 ГГц). Данные представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

Частотное распределение

Тип рабочего диапазона	Рабочий диапазон линий вверх	Рабочий диапазон линий вниз	Режим дуплекса
n1	1920 – 1980 МГц	2110 – 2170 МГц	FDD
n2	1850 – 1910 МГц	1930 – 1990 МГц	FDD
n3	1710 – 1785 МГц	1805 – 1880 МГц	FDD
n5	824 – 849 МГц	869 – 894 МГц	FDD
n7	2500 – 2570 МГц	2620 – 2690 МГц	FDD
n8	880 – 915 МГц	925 – 960 МГц	FDD
n20	832 – 862 МГц	791 – 821 МГц	FDD
n28	703 – 748 МГц	758 – 803 МГц	FDD
n38	2570 – 2620 МГц	2570 – 2620 МГц	TDD
n41	2496 – 2690 МГц	2496 – 2690 МГц	TDD
n50	1432 – 1517 МГц	1432 – 1517 МГц	TDD
n51	1427 – 1432 МГц	1427 – 1432 МГц	TDD
n66	1710 – 1780 МГц	2110 – 2200 МГц	FDD
n70	1695 – 1710 МГц	1995 – 2020 МГц	FDD
n71	663 – 698 МГц	617 – 652 МГц	FDD
n74	1427 – 1470 МГц	1475 – 1518 МГц	FDD
n75	1432 – 1517 МГц	1432 – 1517 МГц	SDL
n76	1432 – 1517 МГц	1427 – 1432 МГц	SDL
n77	3300 – 4200 МГц	3300 – 4200 МГц	TDD
n78	3300 – 3800 МГц	3300 – 3800 МГц	TDD
n79	4400 – 5000 МГц	4400 – 5000 МГц	TDD
n80	1710 – 1785 МГц	1710 – 1785 МГц	SUL
n81	880 – 915 МГц	880 – 915 МГц	SUL
n82	832 – 862 МГц	832 – 862 МГц	SUL
n83	703 – 748 МГц	703 – 748 МГц	SUL
n84	1920 – 1980 МГц	1920 – 1980 МГц	SUL

Таблица 5

Рабочие диапазоны для поддиапазона FR2

Тип рабочего диапазона	Рабочий диапазон для базовой станции поддиапазона FR2	Режим дуплекса
n257	26 500 – 29 500 ГГц	TDD
n258	24 250 – 27 500 ГГц	TDD
n260	37 000 – 40 000 ГГц	TDD

Можно сделать вывод о том, что в диапазоны ниже 6 ГГц включены не все из 46 диапазонов частот, определенных ранее 3GPP для сетей LTE, и впервые в число рабочих диапазонов включен диапазон 600 МГц (n71). Диапазоны выше 6 ГГц используются только для режима TDD с ограничением до 40 ГГц и ширина рабочего диапазона полос достигает 2,5–3 ГГц. Кроме того, ряд полос поддиапазона FR2 имеет частичное перекрытие между собой, как пример, диапазоны n257 и n258, а частотный разнос между диапазонами n257 и n260 составляет 7,5 ГГц.

Технические характеристики радиооборудования сети радиодоступа 5G

Для сети радиодоступа NG-RAN Партнерским проектом 3GPP определено, что в «линии вниз» используется технология CP-OFDM, основывающаяся на ортогональном частотном мультиплексировании с использованием циклического префикса, а для «линии вверх», помимо CP-OFDM, должна использоваться технология DFT-S-OFDM, основывающаяся на ортогональном частотном мультиплексировании с преобразованием на базе дискретного преобразования Фурье.

Формируемые базовые и абонентские станции должны состоять из определенного числа радиоблоков. Каждый радиоблок формируется из поднесущих (SCS) с различной шириной: 15, 30, 60 кГц для поддиапазона спектра FR1 и 60, 120 кГц для поддиапазона FR2.

Максимальные конфигурации радиоблоков NRB при формировании частотных каналов базовых и абонентских станций поддиапазонов FR1 и FR2 для различных разносов между поднесущими SCS представлены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6

Разнос между SCS, кГц	Ширина полосы частотного спектра 5G для FR1												
	Ширина полосы частотного спектра 5G для FR1												
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц	25 МГц	30 МГц	40 МГц	50 МГц	60 МГц	70 МГц	80 МГц	90 МГц	100 МГц
	Максимальная конфигурация NRB для полосы канала передачи для FR1												
15	25	52	79	106	133	160	216	270	--	--	--	--	--
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	189	217	245	273
60	--	11	18	24	31	38	51	65	79	93	107	121	135

Таблица 7

Разнос между SCS, кГц	Ширина полосы частотного спектра 5G для FR2			
	Ширина полосы частотного спектра 5G для FR2			
	50 МГц	100 МГц	200 МГц	400 МГц
	Максимальная конфигурация NRB для полосы канала передачи для FR2			
60	66	132	264	--
120	32	66	132	264

Из таблиц 6 и 7 видно, что в диапазоне FR1 предусмотрено использование полос частот, близких по ширине к агрегированным полосам частот предыдущего поколения (4G), а в диапазоне FR2 – к полосам шириной 200 и 400 МГц. Максимальное количество радиоблоков может достигать 273 для FR1 и 264 для FR2.

Мощностные характеристики основного и побочного излучений передатчиков базовых станций сети радиодоступа 5G приведены в таблице 8.

Таблица 8

Зона обслуживания	Мощностные характеристики			
	Мощность передатчиков базовой станции			
	1-С	1-Н	1-О и 2-О	Уровни ограничения
Широкая	Без верхних ограничений	Без верхних ограничений	--	-15 дБм
Средняя	< 38 дБм	< 38 дБм + 10 log(<i>NTXU, counted</i>)	--	-25 дБм
Локальная	< 24 дБм	< 24 дБм + 10 log(<i>NTXU, counted</i>)	--	-32 дБм

Делая вывод, можно сказать, что мощность передатчиков базовых станций сети радиодоступа 5G будет определяться типом базовой станции и лежать в пределах 24–38 дБм.

Характеристики чувствительности приемников базовых станций в диапазоне FR2 для ширины частотного канала 50 МГц показаны в таблице 9.

Таблица 9

Зона обслуживания	Чувствительность приемников базовых станций			
	Чувствительность приемников базовых станций			
	1-С	1-Н	1-О и 2-О	Уровни ограничения
Широкая	Не определена	Не определена	-95,3 – (-101,7)	-96 – (-119)
Средняя	Не определена	Не определена	-90,3 – (-96,7)	-91 – (-114)
Локальная	Не определена	Не определена	-87,3 – (-93,7)	-86 – (-109)

Из таблицы 9 следует, что чувствительность приемников базовых станций сети радиодоступа 5G определяется типом базовой станции и лежать в пределах от –86 до –119 дБм.

Для базовых станций, относимых к типу 1-С и 1-Н, чувствительность приемников определена и представлена для диапазона 3300–3800 МГц (n78) в таблице 10.

Таблица 10

Чувствительность приемников базовой станции										
Рабочий диапазон	SCS, кГц	Чувствительность приемников базовой станции для различных частотных каналов								Режим дуплекса
		10 МГц	15 МГц	20 МГц	40 МГц	50 МГц	60 МГц	80 МГц	100 МГц	
n78	15	-95,8	-94	-92,7	-89,6	-88,6	--	--	--	TDD
	30	-96,1	-94,1	-92,9	-89,7	-88,7	87,9	-86,6	-85,6	
	60	-96,5	-94,4	-93,1	-89,9	-88,8	-88	-86,7	-85,7	

Заключение. Характеристики носят индикативный характер для администраций связи, исследующих возможности выделения спектра, а также в центре внимания обязательства по созданию и предъявлению рынка коммерческих образцов оборудования. При проведении оценок эффективности использования радиочастотного спектра и ЭМС для получения непротиворечивых результатов следует учитывать специфику и целевую направленность опубликованных технических и ЭМС-характеристик радиооборудования сети радиодоступа NG-RAN (базового и абонентского), четко оговаривая, какие характеристики использовались при проведении исследований для разработки оборудования и подготовки вкладов и расчетов в рабочие органы международных организаций связи.

Библиографический список:

- 1.«Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги», авторами которой являются Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А.;
- 2.«5G-стандарт сотовой связи. Суммарная радиобиологическая оценка опасности планетарного электромагнитного облучения населения» Ю.Г. Григорьев, А.С. Самойлов;
- 3.«Обзор беспроводной технологии 5G» Васильев И. Н., Перевозчиков Д. Е., Альмакеев Ф. И.;
- 4.«Защита персональных данных в организациях здравоохранения» А. Г. Сабанов, В. Д. Зыков, Р. В. Мещаряков, С. П. Рылов, А.А. Шелупанов
- 5.«Net. Сетевое программирование» В. Кумар, Э. Кровчик, Н. Логари, А. Мунгале, К. Нагел, Т. Паркер, Ш. Шивакумар.

ГРАЧЕВА АЛЕКСАНДРА СЕРГЕЕВНА – студент, Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана, Россия.

ЗАХИР БОРИС МАКСИМОВИЧ – студент, Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана, Россия.