МРНТИ 49.39.31,

УДК 621.396.93:614.8

**СЕТЕВЫЕ АСПЕКТЫ СОТОВОЙ (МОБИЛЬНОЙ) СВЯЗИ И ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

**С.В.Коньшин, К.С.Чежимбаева, Ж.С.Абдимуратов, Ж.Д.Манбетова**

НАО «Алматинский университет энергетики и связи им.Гумарбека Даукеева»

e-mail: s.konshin@aues.kz,Katipa67@yandex.ru, zh.abdymuratov@aues.kz , zmanbetova@inbox.ru

***Аннотация****. Беспроводная связь развивается стремительно в силу массовости ее использования для предоставления Интернета, для пересылки данных с встроенных портативных устройств и фотокамер, и др. В зависимости от протокола передачи абонентам предоставляются различные услуги сотовой связи. Сегодня внутри сетей параллельно функционирует радиоэлектронная аппаратура (РЭА), использующая радиотехнологии разных поколений, например, в сетях сотовой связи одновременно действуют РЭА радиотехнологий 2G, 3G и 4G. Преимущества 5G глобальны: сети 5G должны обеспечить сетевое покрытие в сложных ситуациях - при высокой мобильности абонентов, в районах с высокой плотностью населения, многолучевости вследствие развитой инфраструктуры. Приближается массовое освоение технологий 5G. В статье актуализированы некоторые основные аспекты сетей 5G, а также тренды в построении данных сетей. Рассмотрены инновационные радиочастотные компоненты для сетей 5G и продвигаемые сотовые антенны частотного диапазона 5G в целях их глобального развертывания, а также одна из альтернативных новых архитектур сетей 5G - O-RAN. В качестве антенн в 5G используются антенные решетки, реализующие метод MIMO (Multiple Input Multiple Output). При анализе, моделировании и проектировании сетей мобильной связи необходимо учитывать особенности IoT-трафика. В статье приведены классические подходы к оценке воздействия ЭМИ радиочастот на человека, установлена наиболее подходящая практическая методика определения средней электромагнитной нагрузки на территорию (ЭМНТ) (генерируемой базовыми станциями (БС) и мобильными (абонентскими) станциями (МС)), адекватно отражающая современное состояние электромагнитной обстановки и учитывающая уровень развития сотовой связи.*

***Ключевые слова:*** *базовая станция, предельно допустимый уровень электромагнитной энергии, 4G****,*** *5G, IoT-трафик, электромагнитная совместимость.*

**Применяются общенаучные методы исследования**

**Введение**

Компьютеризация сотовых сетей – развивающаяся усовершенствованная парадигма, обеспечивающая пользователям доступ к услугам и данным «в любое время и в любом месте». В настоящее время широкополосный Интернет – один из главных сервисов в области связи, и конечные пользователи (частные компании, охранные фирмы, др.) данного сервиса требуют роста пропускной способности беспроводных сетей. В силу этого рынок гигабитных беспроводных сетей доступа расширяется. Протокол – стандартный способ коммуникации по сети, представляющий собой «язык» сети, которым могут «общаться» две различные системы. Системы 4G для удовлетворения потребностей пользователей поддерживают самые разнообразные услуги с определенным качеством (например, управление трафиком в условиях перегрузки, управление потоками данных и надежность передачи данных).

Планируемое резкое увеличение скоростей передачи информации по каналу от сотового телефона к БС в системах 4G, 5G сопряжено со значительным ростом необходимой мощности электромагнитных излучений (ЭМИ) сотового телефона и, как следствие, недопустимым ростом экологических рисков для населения. В связи с освоением и развертыванием сетей и средств 5G, проводимых по разным направлениям (включая модернизацию действующих 2G-, 3G- и 4G-радиосетей до уровня 5G) тенденция экспоненциального роста объема обрабатываемых и хранимых данных будет усиливаться, что потребует все больше серверов для хранения и обработки этих данных. В «массивных» (многомерных) антеннах MIMO эффективно реализуется режим динамического формирования направленных лучей для передачи (3D/Beamforming), позволяющий увеличить энергетический выигрыш в ожидаемых высоких диапазонах частот и улучшить покрытие и спектральную эффективность в ультра-плотных малых сотах.

Сегодня IoT-трафик оказывает значительное влияние на беспроводные сети. Технологии 5G призваны расширить функциональность 4G-LTE (Long Term Evolution), снизить число прерванных по техническим причинам вызовов и увеличить скорость загрузки данных. Миллиметровый диапазон – важный фактор освоения 5G-технологий, несмотря на недостатки его линий связи.

Увеличение рабочей частоты БС сотовой связи требует тщательного анализа допустимых уровней электромагнитных полей (ЭМП) для населения.

**Основная часть**

Привлекательным для абонентов систем сотовых телекоммуникаций 4G служит приложение мультимедиа (например, голос, текст и изображение), соответствующее всем ограничительным требованиям (например, к времени задержки, емкости памяти и ширине полосы). Для обеспечения связи с мобильными абонентами следует отслеживать их положение с тем, чтобы сеть могла направлять пакеты информации в текущую точку нахождения абонента в соответствии с используемым им типом связи. Ассоциации с передачей данных по сетям реализуют при помощи протоколов транспортного уровня UDP (User Datagram Protocol) и TCP (Transmission Control Protocol), ориентированных на установление соединения.

При использовании протокола UDP для сотовых сетей из-за затухания в беспроводных каналах возникают серьезные ошибки данных в силу чувствительности беспроводных трактов к сбоям символов, недостаточной эффективности традиционной семантики UDP и пр. Поэтому некоторые протоколы были целенаправленно разработаны для мобильной связи, например, протоколы Mobile-TCP (M-TCP), Mobile-UDP (M-UDP), протокол передачи в реальном времени Real-Time Transport Protocol (RTP), протокол передачи изображений Image Transport Protocol (ITR), мультимедийный протокол передачи с уплотнением каналов Multimedia Multiplexing Transport Protocol (MMTP).

Преимущество протокола М-ТСР заключается в обеспечении сквозной семантики и работы в условиях длительных и частых отключений [1]. Однако у данного протокола есть недостатки, обусловленные плохой изоляцией от беспроводного тракта и затратами на обработку информации, связанные с управлением шириной полосы. Если совокупность имеющихся каналов не имеет необходимой ширины полосы, пакеты, которые не могут быть доставлены вовремя, отбрасываются и приложение оповещает об отсутствии требуемых ресурсов.

В протокол MMTP вводятся доступная ширина полосы и контроль перегрузки сети, и выполняется оценка полосы и ожидаемой задержки [2]. Протокол RTP популярен во всех типах коммуникаций в реальном времени (РВ) (таких как групповые аудиоконференции, аудио/видео конференции, микшеры/ретрансляторы) и обеспечивает услугу сквозной доставки данных с характеристиками РВ, такими как аудио- и видеоинформация [3]. Однако в протоколе не предусмотрена повторная передача, а для потоковой передачи 3D требуется специальный протокол RTP. Для реализации сложных требований, обусловленных режимом РВ, сотовая связь предъявляет высокие требования к вычислительным мощностям.

В настоящее время в городской застройке пространственная плотность составляет 3–5 БС/км2. Внедрение 5G приведет к росту пространственной плотности РЭА (до 106 РЭС/км2) (рис. 1) и территориальной плотности мобильного трафика (до 10 Мбит/с/см2) [4].

****

Рисунок 1 - Частота работы и пространственная плотность РЭС в сетях 1G-4G, 5G

Эффективность доступного спектра частот, т.е. максимальная пропускная способность достижимая на Гц спектра, близка к насыщению. Спектральная эффективность 4G LTE приближается к (в пределах ≈ 20%) пределу по Шеннону. Малая сота служит более эффективным средством, чем макросоты, для разгрузки данных сетей 3G и средством управления спектром LTE Advanced. Малая сота (ячейка) – узел радиодоступа с малой потребляемой мощностью, работающий в лицензируемом и нелицензируемых спектрах и имеющий диапазон радиопокрытия от 10 до 1-2 км. К малым сотам относятся микросоты, пикосоты, фемтосоты. По данным экспертов, плотность базовых станций надо будет увеличить в 20 раз, чтобы справиться с экспоненциальным ростом трафика. Так как невозможно будет равномерно увеличить плотность покрытия в 20 раз и более, то БС придется развертывать там, где это возможно, т.е. хаотично [5].

Относительно безопасный мобильный Интернет с высокой скоростью передачи данных в обратном канале (от МС к БС), декларируемой для сетей мобильной связи 4G/5G – это Интернет минимальных расстояний между БС и МС. Он может быть безопасным только при использовании пико-БС при дальностях связи от нескольких метров до нескольких десятков метров, т. е. при размещении этих БС в помещениях [6].

Переход значительной части будущих мобильных сетей на сотовую технологию 5G будет сложным, с компромиссами по ширине диаграммы направленности (ДН), соотношению усиления потерь передатчика к приемнику через окружающую среду, мобильности и стоимости. Использование миллиметровых волн в мобильной среде осложняет формирование узких главных лепестков ДН антенны при приемлемых затратах.

Любые помехи в радиочастотном (РЧ) канале могут нарушить узкую направленность. Миллиметровые БС по уровню создаваемой выходной мощности (не более 10 Вт в любой конфигурации) существенно проигрывают сотовым радиостанциям с более низкими частотами. Создаваемая выходная мощность – средняя мощность сигнала, отправляемого передатчиком в фидер антенны в течение периода времени, достаточно продолжительного по сопоставлению с периодом наиболее низкой частоты модуляции при нормальных условиях функционирования.

Для решения проблемы выходной мощности 5G-радиосигнала вендоры стали использовать архитектуры массовых MIMO-систем с большим (от 64 и более) количеством антенных элементов, что дает высокие коэффициенты усиления антенн. MIMO – метод пространственного кодирования сигнала, приводящий к увеличению полосы пропускания канала, в котором передача и прием данных выполняется системами из нескольких антенн. При этом передающие и приемные антенны разносят так, чтобы минимизировать корреляцию между соседними антеннами.

Вместе с различными вариантами MIMO в 5G возможно применение метода формирования лучей «Beamforming», дающий возможность ориентировать лучи от БС на МС без влияния на другие лучи, направленные на эти же станции.

Одним из трендов сетевой отрасли служит переход от традиционного (закрытого) подхода к построению сетей, базирующегося на применении проприетарного оборудования одного вендора, к новым открытым архитектурам. Второй ключевой тренд – переход к программно определяемым сетям SDN (Software Defined Networks). Фирмы Ericsson, Huawei, Nokia поставляют высокоинтегрированное оборудование и программное обеспечение в комплекте. Также используются альтернативные новые архитектуры, например, виртуальные архитектуры vRAN (Radio Access Network, сеть радиодоступа мобильной связи), использующие стандартные открытые интерфейсы RAN, и архитектура O-RAN (Open-RAN), позволяющая операторам сетей применять при их формировании принцип смешивания и подгонки, то есть использовать продукты разных вендоров. Однако внедрение новых и дополнительных точек соприкосновения в новой архитектуре O-RAN, наряду с разделением программного и аппаратного обеспечения, может расширить количество угроз и интенсивность атак (общее число возможных уязвимых мест в конкретной сети или устройстве) [7]. Специалисты Ericsson утверждают, что стороннему оборудованию может потребоваться дополнительный уровень обеспечения безопасности. А по мнению представителей компании Mellanox, закрытый подход ограничивает инновации и гибкость сетевой инфраструктуры, исключает возможность выбора.

Решения корпорации Keysight Technologies поддерживают проверку соответствия блоков стандарта O-RAN и радиоблоков, гарантируя, что сетевые элементы 5G отвечают спецификациям, установленным стандартами 3GPP (3 Generation Partnership Project, проект партнерства 3-го поколения) и O-RAN (рис. 2) [8]. Также они имеют реальные сценарии для тестирования протоколов и нагрузки с интегрированными сложными возможностями эмуляции каналов, позволяющие проверять производительность RAN, функционирующих в сложной радиосреде.

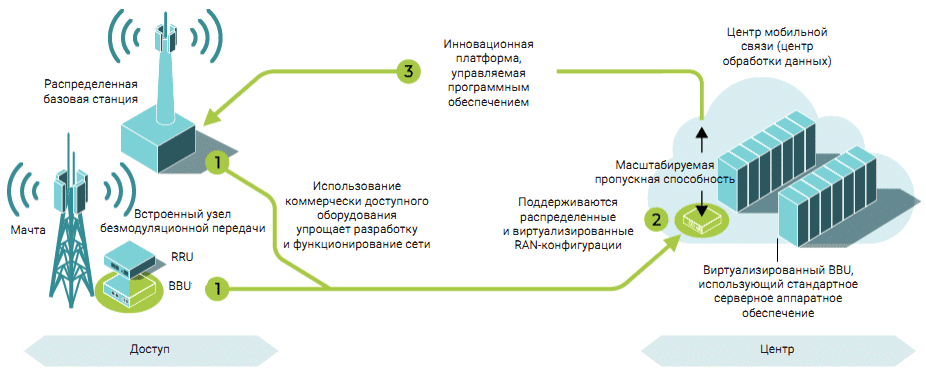


Рисунок 2 - Обобщенная структура сети открытого радиодоступа OpenRAN: RRU (Remote Radio Unit) – выносной радиоблок; BBU (Base Band Unit) – блок безмодуляционной передачи.

Фирмы-флагманы разрабатывают новые варианты использования технологий 5G, которые способны привести к созданию уникальных решений. Архитектура передающей решетки с множественными передающими элементами минимизирует толщину антенны, сохраняя при этом стабильность коэффициента усиления антенны по всей полосе пропускания и управляя уровнями боковых лепестков. Возможность точного высокоскоростного подключения, низкого времени ожидания, устойчивой передачи данных и вычислений в РВ зависит от надежности антенны. Например, антенна РА740 фирмы Taoglas охватывает диапазон существующих полос LTE и включает в себя новый 5G С-диапазон (4-8 ГГц), обеспечивает точное позиционирование, отслеживание местоположения [9].

Всплеск роста числа сверхплотных инфраструктурных систем 5G, необходимых для пропуска высокоскоростного мобильного трафика данных и данных IoT (Internet of Things), поднимает спрос на дешевые и надежные РЧ-подсистемы (например, компактные и реконфигурируемые антенны, которые легко интегрируются в уличную мебель или городские здания с малыми издержками на развертывание). Инфраструктура сети 5G имеет следующие особенности [10]:

- использование облачных технологий в базовой сети и в сетях радиодоступа;

- полная виртуализация сетевых функций;

- возможность использования подвижных БС и подвижных транспортных сетей, когда элементы сетевой инфраструктуры размещаются на автомобилях (подвижных единицах) и интегрируются в mesh-сети.

Для реализации сложных требований, обусловленных режимом РВ, сотовая связь предъявляет высокие требования к вычислительным мощностям. IoT-трафик, представляющий поток сообщений (пакеты межмашинного взаимодействия), оказывает влияние на беспроводные сети и их эксплуатацию, а также на качество обслуживания. Сети 5G в мм диапазоне требуют высокой скорости двухточечной связи (point-to-point connection), при которой каждые две точки (например, устройства IoT) соединены одним путем или напрямую взаимодействуют друг с другом (без участия сервера-посредника, то есть не требуется выделенный сервер, обрабатывающий взаимодействие), используя маленькие пакеты данных. Такие устройства используют протоколы Bluetooth, Z-wave, ZigBee и др. для прямого соединения друг с другом. Однако такая автономная система/модель имеет ограниченность в интерфейсе взаимодействия, так как он должен однозначно совпадать у всех устройств в такой сети для оптимального корректного взаимодействия [11]. Оборудование должно работать стабильно и обеспечить согласованное взаимодействие IoT-трафика (объем которого увеличивается по экспоненциальному закону) с другими видами трафика сети.

С каждым годом вместе с объемом трафика растет и плотность трафика, измеряемая в GkM (Гбит/с/км2/МГц - гигабит в секунду на квадратный километр и мегагерц спектра) (рис. 3). Пандемия COVID-19 вызвала рост активности в сфере удаленной работы и обучения, внесший свою лепту в всплеск трафика.

Ранее насыщенность макросети достигалась на уровне 0,02 GkM, и за счет малых сот (small cell) наращивалась емкость сети. Сегодня сети имеют плотность выше 0,1 GkM, поэтому для дальнейшего наращивания емкости следует применять массовые MIMO-системы.

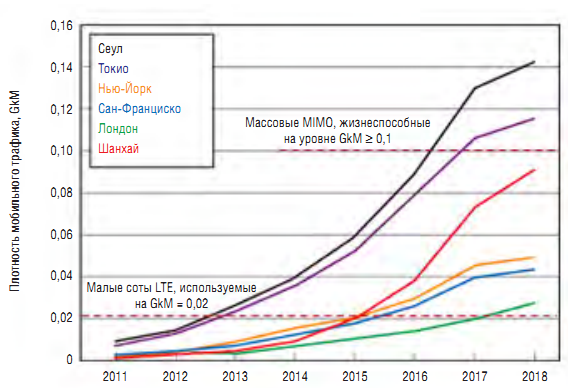


Рисунок 3 - Результаты эталонного тестирования плотности мобильного трафика в некоторых мегаполисах планеты

В технологии 5G ожидаются высокие возможности подключения – до миллиона устройств на км2. 5G mmWave (крайне высокие частоты) становится альтернативой для подключения огромного числа устройств к серверам, расположенным на краю сети (оконечные серверы, серверы краевых вычислений) – вблизи источника данных, и этот вариант лоббируется телекоммуникационными компаниями, поставщиками облачных услуг и вендорами интегральных схем. Использование частот до 60 ГГц в системах 5G способствует снижению размера антенны по сравнению с антеннами БС 4G-LTE. Типичный узел мобильной связи 4G-LTE применяет 8 антенн для передачи и 4 для приема, а узел 5G состоит из 100 и более антенн для разных частот, в том числе из малых антенн для частот миллиметрового диапазона, обеспечивающих расширенное покрытие с использованием активных способов формирования луча [12].

В частности, сверхширокополосное (СШП) ЭМИ – класс сверхкоротких электромагнитных импульсных сигналов длительностью менее 1 нс (Ultra-Wide Band (UWB) Short Pulse) из-за значительной ширины спектра рабочих частот может эффективно воздействовать на все виды РЭА, включенной в состав телекоммуникационных сетей. В силу увеличения интеграции элементной базы и повышения ее быстродействия возрастает восприимчивость РЭА к воздействию СШП ЭМИ. Поэтому актуальным становятся разработки методов защиты от его возможного применения. Для испытания РЭА на устойчивость к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов можно воспользоваться стандартом IEC 6100-4-36 [13]. Данный стандарт определяет: диапазон испытательных уровней; испытательное оборудование и установки; методы испытаний. В таблице 1 представлены амплитудно-временные параметры воздействующих импульсов.

Таблица1- Амплитудно-временные параметры испытательных сверхкоротких электромагнитных импульсов

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр импульса | IEC 61000-4-36 |
| Амплитуда (электрическая составляющая), В/м | 60-3∙104 |
| Длительность фронта (0,1-0,9), нс | 0,1-0,5 |
| Длительность (0,5), нс | 0,2-5,0 |
| Частота следования, Гц | 1-103 |
| Длительность пачки, с | 1-10 |

Если электромагнитные импульсы имеют субнаносекундную длительность и отсутствуют переотражения, то магнитные и электрические поля СШП ЭМИ связаны соотношением



Инновационным трендом в развитии средств измерений импульсных напряжений, токов, ЭМП служит использование элементов радиофотоники.

РЭА подвергается не только техногенным электромагнитным помехам/воздействиям, но и помехам естественного происхождения. Практически в каждом помещении есть дополнительные ЭМИ, например, от Wi-Fi, излучения теле- и радиовещания, спутниковой связи, линий электропередач, передатчиков такси, радаров, микроволновых печей и т.д., которые суммируются с излучением БС сотовой связи и МС, но не учитываются в основных расчетах при строительстве БС сотовой связи. Эти источники испускают ЭМИ, способные нарушить работу электронных устройств. Для избежания этого устройства должны соответствовать многочисленным стандартам ЭМС, обеспечивающих их корректное функционирование в типичных условиях электромагнитной среды и стойкость к случайному ЭМИ. Электромагнитные импульсы, создаваемые с мощностью, превышающей существующие стандарты ЭМС, способны привести к повреждению цифровых устройств или к сбоям/нарушениям в их работе. ЭМП на производстве (для рабочих мест) и на улице (для санитарно-[селитебной](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B8) зоны) нормируются законодательством РК [14]. Для определения санитарно-защитных зон БС радиосвязи, проводится определение биологически-опасной зоны (БОЗ). БОЗ - зона, образующаяся вокруг направления луча, на границе которой уровни электромагнитной энергии равны предельно допустимому уровню (ПДУ).

Оценка воздействия радиочастотного ЭМП передающего радиотехнического оборудования на население осуществляется в диапазоне частот 300 МГц-300 ГГц по средним значениям плотности потока энергии (ППЭ) [15, 16]. Расчет БОЗ для диапазона частот 300 МГц-3 ГГц (ПДУ плотности потока энергии нормируемого диапазона Ппду - 10 мкВт/см²):

(1)

Расчет БОЗ для диапазона частот 3-30 ГГц (ПДУ плотности потока энергии нормируемого диапазона Ппду - 0,10 Вт/м²):

(2)

где R(θ, ) – расчетная дальность до границ БОЗ в полярных координатах, м; P – мощность передатчика, Вт; η – ослабление сигнала передатчика в антенно-фидерном устройстве, раз; G(θ) – коэффициент усиления антенны, раз; θ – угол отклонения от оси основного излучения антенны, град; Ппду – предельно-допустимая плотность потока мощности ЭМП; К – коэффициент влияния подстилающей поверхности; F(θ) – нормированная по мощности ДН антенны в вертикальной поверхности; F() – нормированная по мощности ДН антенны в горизонтальной поверхности.

При одновременном излучении нескольких источников суммарная интенсивность ЭМП в точке наблюдения определяется как сумма ППЭ от каждого источника. При этом должно соблюдаться условие:

ППЭi < ППЭПДУ,

где ППЭi - плотность потока энергии i-того излучателя; ППЭПДУ - предельно допустимое значение плотности потока энергии.

В работе [4] предложена методика, позволяющая практически оценить интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого радиосетями сотовой связи на обслуживаемой территории, непосредственно на основе анализа ЭМНТ, создаваемой БС и МС сотовой связи (СС). Средняя ЭМНТ – средняя интегральная территориальная плотность энергии ЭМП всех источников ЭМП (размещенных на обслуживаемой/рассматриваемой территории), достигающей земной поверхности.

При равномерном случайном распределении МС по территории со средней плотностьюρ[МС/м2], если каждая МС принимает поток со скоростью V[бит/с], то средняя территориальная плотность трафика информационного обслуживания населения по прямым каналам БС будет равна

Str= ρV[бит/(с∙м2)], и создаваемая БС СС средняя ЭMHT B[Вт/м2] составит

(3)

где k - постоянная Больцмана;

- коэффициент шума радиоприемника;

- температура окружающей среды K;

- спектральная эффективность радиоканала БС [бит/с/Гц];

m - коэффициент, характеризующий, во сколько раз реальная спектральная эффективность радиоканала ниже потенциальной;

- коэффициент, характеризующий необходимый запас по уровню принимаемого сигнала МС для реализации хендовера (4-10раз);

Q - системный параметр направленности ЭМИ БС;

- необходимый запас по уровню принимаемого сигнала МС для компенсации потерь на затухание радиоволн в зданиях (14-20дБ или 25-100 раз);

- необходимый запас по уровню принимаемого сигнала МС для компенсации потерь на замирания при РРВ в "каньонах" городской застройки (17-20дБ или 50-100 раз);

- радиус зоны обслуживания БС, на границе которой требуется максимальная энергия на бит передаваемой информации;

- параметр внутрисетевой ЭМС, отражающий превышение уровнем внутрисетевой помехи уровня теплового шума приемника МС; при отсутствии этой помехи , при низком качестве обеспечения внутрисетевой ЭМС ;

- территориальная плотность трафика информационного обслуживания населения (АТС- area traffic capacity ) [бит/с/м2].

Условия оценки должны привязываться к характеристикам ЭМП, присутствующим на селетибных территориях и полностью определяющихся передающим оборудованием БС сотовой связи и их режимами работы.

Одним из основных требований к сетям 5G служит повышение спектральной эффективности до 30 бит/с/Гц и пиковой пропускной способности БС в канале «вниз» (от БС к МС), равной 20 Гбит/с, требуется полоса не менее 667 МГц (линия «вниз») и 333 МГц (линия «вверх» (от абонента к БС)). В этой ситуации общая полоса частот составляет не менее 1 ГГц, поэтому предпочтение отдается диапазону выше 6 ГГц [17].

В США для 5G-миллиметрового диапазона применяется полоса S (2-4 ГГц), а в остальных частях мира – более низкие полосы частот миллиметрового диапазона. В США наиболее востребованные варианты применения 5G связаны с автоматизацией промышленных предприятий и автомобилей; автоматизацией производства, позволяющей отказаться от сетей Ethernet [18]. Это продиктовано преимуществом аппаратного обеспечения данного стандарта беспроводной связи 5G, не создающего помехи Wi-Fi-системам, в отличие от многих индустриальных установок, в ходе функционирования которых создается электрическая дуга.

В сотовых сетях используются дуплексные каналы с частотным разделением FDD (Frequency Division Duplex), в котором прием и передача сигналов выполняется на разных частотах одновременно, и с временным разделением TDD (Time Division Duplex), где передача и прием сигналов реализуется на одной частоте в разное время. В сетях 5G использование метода «полного дуплекса» («full duplex») – организация одновременного приема и передачи сигналов на одной и той же частоте – позволяет вдвое увеличить спектральную эффективность, а в сочетании с крупными антенными решетками будет способствовать росту пропускной способности [12]. Но для реализации этого метода следует обеспечить существенное подавление собственной помехи.

Для борьбы с многолучевым распространением сигналов в 4G используется метод OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), которому присущи недостатки, вызванные высокой чувствительностью к смещению частоты и флуктуациям фазы принимаемого сигнала относительно опорного гармонического колебания приемника, а также снижение энергетической эффективности передатчика. Поэтому наряду с оптимизированным методом OFDM в 5G возможно применение метода FBMC (Filter Bank Multi-Carrier), снижающего уровень внеполосных излучений и повышающий устойчивость сигнала к интерференции между поднесущими, и метода UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier), имеющего меньшие задержки при передаче, чем FBMC.

Особенностью 4G/5G/6G при сопоставлении с 1G/2G является конвергенция и расширение услуг, преобладание режимов передачи данных с максимальной мощностью ЭМИ мобильных станций при резком сокращении доли услуг телефонии.

Наиболее перспективными антенными системами для базовых станций мобильной связи служат цифровые адаптивные антенные решетки, позволяющие работать в любом из существующих на сегодняшний день стандартов мобильной связи (GSM; семейство, так называемых, стандартов 3G (UMTS); 4G (LTE); WiMAX; Wi-Fi), в том числе в сетях, использующих MIMO [19]. Одной из основных задач разработчиков служит построение высокоэффективных фазированных антенных решеток (ФАР) с совмещением частотных диапазонов и динамическим управлением их характеристиками направленности.

Антенная решетка с возможностью управления амплитудой и фазой или задержкой в каналах (ФАР, адаптивная ФАР, гибридные схемы, др.) позволяет синтезировать ДН заданной формы. Для этого нужно найти амплитудно-фазовое распределение (АФР) в каналах. Фазовое распределение можно пересчитать в соответствующие задержки сигнала, если в системе используются не фазовращатели, а аналоговые или, что чаще, цифровые линии задержки [20]. В реальной системе с ФАР, уже практически всегда, применяются различные методы адаптации, и непосредственная информация об АФР становится не столь актуальной.

**Обсуждение**

Сегодня основными типами РЭА, генерирущими ЭМИ на селитебных территориях, служат БС, ретрансляторы и пользовательские устройства для сетей мобильной связи.

Система коммуникаций должна быть комплексной, способной к анализу внешних условий, имеющей функции сбора и анализа статистики. Ортогональный метод OFDMA был принят в LTE по соображениям снижения внутрисистемных помех и простоты обработки сигналов в абонентских устройствах, но имеет недостаток. Этот недостаток связан в основном с невозможностью достичь максимальных пользовательских скоростей передачи данных при одновременном обслуживании нескольких абонентов, а в контексте новых требований для 5G – становится особенно существенным. Кроме того, распределение ортогонального ресурса требует строгой синхронизации, что сопряжено с дополнительными временными задержками в радиоинтерфейсе, неприемлемыми в случаях многочисленных соединений в РВ [21]. Использование в 5G антенных решеток, диаграммами направленности которых можно управлять, позволяет в требуемом направлении компенсировать некоторые потери на пути распространения волны, а более узкая ширина луча ДН антенны позволяет снизить помехи в одной соте. Однако наложение излучений разных стандартов и радиотехнологий с разными вариантами частот и модуляции сигналов, относящихся к разным поколениям, формирует многочастотный спектральный состав радиоизлучений в окружающей среде. Так как имеются ограничения по мощности и особенностям прохождения электромагнитных волн миллиметрового диапазона, то для заданного уровня мощности важна способность антенных решеток контролировать направление максимального излучения, что позволит значительно повысить уровни эффективной мощности изотропного излучения EIRP (Effective Isotropically Radiated Power) в направлениях связи [22]. Из этого следует, что необходимо принятие мер по эффективной оценке условий ЭМС для сотовых сетей связи на базе тщательного анализа особенностей технологии 5G, правильно и точно оценить эти условия с целью успешного обеспечения ЭМС РЭА новых сетей с существующими типами РЭА. Сегодня РЭА функционирует при малых значениях электрического тока и напряжения, а это делает РЭА восприимчивой к непреднамеренным электромагнитным воздействиям. Необходим системный комплексный подход к проблемам ЭМС РЭА, поскольку нарушение ЭМС может привести к отказам сложных радиотехнических систем мобильной связи или снижению качества их функционирования. Оценка условий ЭМС должна учитывать суммарную помеху от сети при особенностях ее архитектуры, при имеющихся моделях потерь (моделях канала) и пространственно-распределенном излучении многомерных (массивных) антенн MIMO, разнородной среде распространения сигнала, а также учитывать спектральные свойства новых форм сигнала (например, UFMC и FBMC) и характер излучения при новых методах радиодоступа (например, vRAN и О-RAN).

Стандартные испытания в условиях электромагнитных помех помогают оценить способность отдельных устройств противостоять помехам, которые находятся в пределах установленных норм. Одной из мер противодействия данной ситуации может стать замена медных кабелей на оптоволоконные, которые оснащены защитой от электромагнитных помех.

**Выводы**

Сектор коммуникационных технологий увеличивается с каждым годом из-за значительного роста числа абонентов и времени использования услуг. К проблемам обработки данных примыкают и проблемы безопасности протоколов связи. Сетевая безопасность имеет первостепенное значение в любой новой архитектуре.

Высокочастотные сигналы теряют мощность на расстоянии быстрее, чем низкочастотные. Более короткие миллиметровые волны дают возможность использования больше направленных антенн на БС и на оборудовании пользователя (смартфонах). В диапазоне миллиметровых частот 30-300 ГГц потери в тракте передачи должны быть нейтрализованы высоким коэффициентом усиления антенны, интегрированной в передающий блок.

Проблему загруженности сети 4G, вызванную огромными объемами трафика от IoT-устройств, решают сети 5G, обладающие сверхвысокой плотностью, ультрамалыми задержками, высокими скоростями в десятки Гбит/с. Использование высоких радиочастот и сочетание нескольких полос – отличия 5G от предыдущих поколений сотовой связи, а применение сигналов миллиметрового диапазона для ближней высокоскоростной передачи данных в сетях 5G потребует разработки множества небольших маломощных сотовых станций. В архитектуре сети 5G типа O-RAN совмещаются продукты многих производителей. Технология 5G вносит изменения в способы генерации и распределения электромагнитной энергии, изменяет способ формирования персональной электромагнитной дозы. Это продиктовано применением активной фазированной решетки для формирования «луча», фокусировкой основного луча непосредственно на приемном устройстве.

Рост объема мобильного трафика и перманентно растущее число их потребителей, повышение концентрации радиотехнического оборудования на определенной территории приводят к непрерывному уплотнению РЧ спектра и бросают вызов существующим классическим подходам по оцениванию результатов их воздействия на человека и определению степени опасности воздействий ЭМИ по действующим методикам проведения расчетов по известным теоретическим положениям. Из анализа открытых источников в работе установлены простые соотношения, дающие возможность интегральной оценки интенсивности ЭМФ, генерируемого радиосетями СС на обслуживаемой/исследуемой территории, которые могут быть использованы при анализе ЭМФ, создаваемого современными системами и сетями сотовой (мобильной) связи в новой/изменившейся сложной электромагнитной обстановке.

Результаты данных исследований могут быть использованы при испытании и внедрении нового оборудования/технологии в сетях сотовой (мобильной) связи.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

[1] Brown K., Singh S. // ASM SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 1997. V. 27. № 5. Р.19.

[2] Magalhaes L., Kravets R. // ASM SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 2001. V. 31. № 2. Р. 220.

[3] Boukerche A., Huang T., Pazzi R.W.N. // proc. 8-th ACM/IEEE Int. Symp. Modeling, Analyses, and Simulation of Wireless and Mobile. Montreal. 2005. N.Y.: IEEE. 2005. P.333.

[4] Мордачев В.И. Оценка электромагнитного фона, создаваемого системами сотовой (мобильной) связи **//** Сборник докладов Всероссийской научной конференции 12-13 ноября 2019 г. «Актуальные проблемы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений». М.: Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений, 2019. – С.120-123.

[5] Смелянский Р.Л. Проблемы современных компьютерных сетей. <https://docplayer.ru/26313075-Problemy-sovremennyh-kompyuternyh-setey.html>

[6] Мордачёв В.И. Электромагнитная безопасность широкополосных систем мобильной связи новых поколений // Доклады БГУИР. 2018, № 3 (113). – С. 39-46.

[7] Walko John. Ericsson Warns that Open RAN Compromises Security, EE Times magazine, September 24, 2020: <https://www.eetimes.com/ericsson-warns-that-open-ran-compromises-security/>

[8] Keysights 5G Test Platforms Selected by Mavenir to Accelerate Software Development. Microwave Journal, Jule 22, 2020:

[https://www.microwavejournal.com/articles/34308- keysights-5g-test-platforms-selected-by-mavenir-to-accelerate-software-development](https://www.microwavejournal.com/articles/34308- keysights-5g-test-platforms-selected-by-mavenir-to-accelerate-software-development9)

[[9](https://www.microwavejournal.com/articles/34308- keysights-5g-test-platforms-selected-by-mavenir-to-accelerate-software-development9)] Taoglas Cellular Antennas Include Latest LTE, 5G Bands for Global Deployments. Microwave Journal, Jule 1, 2019: <https://www.microwavejournal.com/articles/32524-taoglas-cellular-antennas-include-latest-lte-5g-bands-for-global-deployments>.

[10] Плеханов П.А., Роенков Д.Н. Возможности использования подвижной связи 5G на железнодорожном транспорте // 74-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. – СПб.: АНО ДПО «Аничков мост»; ООО «Триста точек», 2019. – С. 204-206.

[11] Internet of Things Global Standards Initiative [Электронный ресурс]/ITU – URL: <http://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>

[12] Browne Jack. Can 5G Handle Next-Gen Data? Electronic Design, May 21, 2019:

[https://www.electronicdesign.com/industrial-automaion/can-5g-handle-next-gen-data.]( https://www.electronicdesign.com/industrial-automaion/can-5g-handle-next-gen-data.13. IEC 6100-4-36 EMC Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems. – IEC. – 2014. – 88 c. 14. Санитарно-эпидемиологические требования к радиотехническим объектам. Постановление Правительства Республики Казахстан от 15 ноября 2011 г. №1341.)

[[13] IEC 6100-4-36 EMC Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems. – IEC. – 2014. – 88 c.]( https://www.electronicdesign.com/industrial-automaion/can-5g-handle-next-gen-data.13. IEC 6100-4-36 EMC Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems. – IEC. – 2014. – 88 c. 14. Санитарно-эпидемиологические требования к радиотехническим объектам. Постановление Правительства Республики Казахстан от 15 ноября 2011 г. №1341.)

[[14] Санитарно-эпидемиологические требования к радиотехническим объектам. Постановление Правительства Республики Казахстан от 15 ноября 2011 г. №1341.]( https://www.electronicdesign.com/industrial-automaion/can-5g-handle-next-gen-data.13. IEC 6100-4-36 EMC Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems. – IEC. – 2014. – 88 c. 14. Санитарно-эпидемиологические требования к радиотехническим объектам. Постановление Правительства Республики Казахстан от 15 ноября 2011 г. №1341.)

[15] «Методика расчетов биологически-опасных зон (БОЗ) радиотехнических объектов», утвержденный Главным врачом РСЭС (№ 41-2/2-2938 от 10.09.2001 г.)

[16] СТРК 1151-2002. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни и требования к проведению контроля.

[17] Пономарев О.П., Мойсейченков А.Н., Бахтин А.А., Омельянчук Е.В., Семенова А.Ю., Михайлов В.Ю. Базовые станции 5G: возможности реализации в России // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 334-348.

[18] Sperling Ed. From Cloud to Cloudlets. Semiconductor Engineering. August 17, 2020:<https://semiengineering.com/from-cloud-to-cloudlets/>

[19] [<https://euroasia-science.ru/tehnicheskie-nauki/>](https://euroasia-science.ru/tehnicheskie-nauki/)Антенны базовых станций в сотовых сетях мобильной связи. современное состояние и перспективы развития // Евразийский Союз Ученых. Технические науки.

[20] Кузьмин С.В., Коровин К.О., Космынин А.Н. Методы и инструменты синтеза ДН многоэлементных ФАР // 74-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. - СПб.: АНО ДПО «Аничков мост»; ООО «Триста точек», 2019. – С.17-19.

[21] <http://sneg5.com/nauka/tehnika-i-tehnologii/5g.html>

[22] Лэнгдон С. Использование ИФР (Cumulative Distribution Function) ЭИИМ для оценки диаграммы направленности антенны миллиметрового диапазона // СВЧ-электроника. № 4. 2019.- С. 58-60.

**REFERENCE LIST**

[1] Brown K., Singh S. // ASM SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 1997. V. 27. № 5. Р.19.

[2] Magalhaes L., Kravets R. // ASM SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 2001. V. 31. № 2. Р. 220.

[3] Boukerche A., Huang T., Pazzi R.W.N. // proc. 8-th ACM/IEEE Int. Symp. Modeling, Analyses, and Simulation of Wireless and Mobile. Montreal. 2005. N.Y.: IEEE. 2005. P.333.

[4] Mordachev V.I. Assessment of the electromagnetic background generated by cellular (mobile) communication systems // Collection of reports of the All-Russian Scientific Conference November 12-13, 2019 "Actual problems of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation." M .: Russian National Committee for Protection against Non-Ionizing Radiation, 2019. - P.120-123.5.

[5] Smelyansky R.L. Problems of modern computer networks.<https://docplayer.ru/26313075-Problemy-sovremennyh-kompyuternyh-setey.html>

[6] V. I. Mordachev Electromagnetic safety of new generations of broadband mobile connection systems // Reports of BSUIR. 2018, No. 3 (113). - S. 39-46.

[7] Walko John. Ericsson Warns that Open RAN Compromises Security, EE Times magazine, September 24, 2020: <https://www.eetimes.com/ericsson-warns-that-open-ran-compromises-security/>

[8] Keysights 5G Test Platforms Selected by Mavenir to Accelerate Software Development. Microwave Journal, Jule 22, 2020:

[https://www.microwavejournal.com/articles/34308- keysights-5g-test-platforms-selected-by-mavenir-to-accelerate-software-development](https://www.microwavejournal.com/articles/34308- keysights-5g-test-platforms-selected-by-mavenir-to-accelerate-software-development9)

[9] Taoglas Cellular Antennas Include Latest LTE, 5G Bands for Global Deployments. Microwave Journal, Jule 1, 2019: <https://www.microwavejournal.com/articles/32524-taoglas-cellular-antennas-include-latest-lte-5g-bands-for-global-deployments>.

[10] Plekhanov P.A., Roenkov D.N. Possibilities of using 5G mobile connection in railway transport // 74th Scientific and Technical Conference of the St. A.S. Popov dedicated to Radio Day: Sat. reports. - SPb .: ANO DPO "Anichkov Most"; LLC "Three hundred points", 2019. - S. 204-206.

[11] Internet of Things Global Standards Initiative [Electronic resource]/ITU – URL: <http://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>.

[12] Browne Jack. Can 5G Handle Next-Gen Data? Electronic Design, May 21, 2019:

[https://www.electronicdesign.com/industrial-automaion/can-5g-handle-next-gen-data.](https://www.electronicdesign.com/industrial-automaion/can-5g-handle-next-gen-data.13 IEC 6100-4-36 EMC Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems. – IEC. – 2014. – 88 c.                                                                        14 Санитарно-эпидемиологические требования к радиотехническим объектам. Постановление Правительства Республики Казахстан от 15 ноября 2011 г. №1341.)

[[13] IEC 6100-4-36 EMC Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems. – IEC. – 2014. – 88 c. [14] Sanitary and Epidemiological Requirements for Radio Engineering Facilities. Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan dated November 15, 2011 No. 1341.](https://www.electronicdesign.com/industrial-automaion/can-5g-handle-next-gen-data.13 IEC 6100-4-36 EMC Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems. – IEC. – 2014. – 88 c.                                                                        14 Санитарно-эпидемиологические требования к радиотехническим объектам. Постановление Правительства Республики Казахстан от 15 ноября 2011 г. №1341.)

[15] "Methodology for calculating biologically hazardous zones (BHO) of radio engineering facilities", approved by the Chief Physician of the RSES (No. 41-2 / 2-2938 of 10.09.2001)

[16] STRK 1151-2002. Electromagnetic fields of radio frequencies. Acceptable levels and requirements for control.

[17] Ponomarev O.P., Moiseichenkov A.N., Bakhtin A.A., Omelyanchuk E.V., Semenova A.Yu., Mikhailov V.Yu. 5G base stations: opportunities for implementation in Russia // Infoconnection and radio-electronic technologies. - 2019. - T. 2, No. 3. - S. 334-348.

[18] Sperling Ed. From Cloud to Cloudlets. Semiconductor Engineering. August 17, 2020: <https://semiengineering.com/from-cloud-to-cloudlets/>

[19] <https://euroasia-science.ru/tehnicheskie-nauki/> Antennas for base stations in cellular mobile networks. current state and development prospects // Eurasian Union of Scientists. Technical science.

[20] Kuzmin S.V., Korovin K.O., Kosmynin A.N. Methods and tools for the synthesis of MDs for multielement PAA // 74th Scientific and Technical Conference of the St. A.S. Popov dedicated to Radio Day: Sat. reports. - SPb .: ANO DPO "Anichkov Most"; LLC "Three hundred points", 2019. - P.17-19.

[21] <http://sneg5.com/nauka/tehnika-i-tehnologii/5g.html>

[22] Langdon S. Using the Cumulative Distribution Function of the EIRP to assess the radiation pattern of a millimeter-wave antenna // Microwave electronics. No. 4. 2019.- S. 58-60.

**ҰЯЛЫ БАЙЛАНЫСТЫҢ ЖЕЛІЛІК АСПЕКТІЛЕРІ ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК СӘУЛЕЛЕНУ ДЕҢГЕЙІН БАҒАЛАУ**

**С.В.Коньшин, К.С.Чежимбаева, Ж.С.Абдимуратов, Ж.Д.Манбетова**

«Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КеАҚ

e-mail: s.konshin@aues.kz,Katipa67@yandex.ru, zh.abdymuratov@aues.kz, zmanbetova@inbox.ru

**Аңдатпа.** Сымсыз байланыс өзінің ауқымдылығымен және Интернетті, портативті құрылғылар мен камераларды және басқаларын пайдаланудың арқасында тез дамып келеді. Тарату хатаммасына байланысты абоненттерге әртүрлі ұялы байланыс қызметтері ұсынылады.

Бүгінгі таңда әр түрлі буындардың радиотехнологиялары бір типтегі радиоэлектрондық жабдықтың (РЭЖ) желілерінде қатар жұмыс істейді, мысалы, ұялы байланыс желілерінде, 2G, 3G және 4G радиотехнологиялары РЭЖ бір уақытта жұмыс істейді. 5G-дің артықшылықтары жаһандық болып табылады: 5G желілері күрделі жағдайларда - абоненттердің жоғары ұтқырлығымен, халықтың тығыздығы жоғары аудандарда дамыған инфрақұрылымға байланысты көпжолды қамтуды қамтамасыз етуі керек. 5G технологияларын жаппай енгізу жақын қалды. 5G желілерінің кейбір негізгі аспектілері, сондай-ақ осы желілер құрылысының тенденциялары жаңартылды. Инновациялық 5G радиожиіліктік компоненттері және жаһандық орналастыруға арналған 5G ұялы антенналары, сондай-ақ 5G желісінің альтернативті жаңа құрылымдарының бірі - O-RAN қарастырылған. 5G антенналары ретінде MIMO (Multiple Input Multiple Output) әдісін жүзеге асыратын антенналық массивтер қолданылады. Мобильді желілерді талдау, модельдеу және жобалау кезінде IOT трафигінің ерекшеліктерін ескеру қажет. Радиожиіліктердің ЭМСР-нің адамға әсерін бағалаудың классикалық тәсілдері келтірілген. Электромагниттік ортаның ағымдағы күйін жеткілікті түрде көрсететін және ұялы байланыстың даму деңгейін ескеретін аумақтағы орташа электромагниттік жүктемені (базалық станциялар (БС) және жылжымалы (абоненттік) станцияларды (МС) қалыптастыратын) анықтайтын ең қолайлы практикалық әдіс белгіленді.

**Кілт сөздер**: электромагниттік энергияның рұқсат етілген шекті деңгейі бар базалық станция, 4G, 5G, IoT трафигі, электромагниттік үйлесімділік.

**NETWORK ASPECTS OF CELLULAR (MOBILE) CONNECTION AND EVALUATION OF THE LEVEL OF ELECTROMAGNETIC RADIATION**

**S.V. Konshin, K.S.Chezhimbayeva, Zh.S.Abdimuratov, Zh.D.Manbetova**

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications

named after Gumarbek Daukeev

e-mail s.konshin@aues.kz,Katipa67@yandex.ru, zh.abdymuratov@aues.kz, zmanbetova@inbox.ru

**Annotation**. Wireless connection is developing rapidly due to its massiveness and the use of the Internet, built-in portable devices and cameras, etc. Depending on the transmission protocol, subscribers are provided with various cellular network services. Today, radio technologies of different generations operate in parallel in networks of the same type of radio electronic equipment (REE). For example, in cellular networks, REE of 2G, 3G and 4G radio technologies operate simultaneously. The benefits of 5G are global: 5G networks must provide network coverage in difficult situations - with high mobility of subscribers, in areas with high population density, multipath due to developed infrastructure. Mass adoption of 5G technologies is approaching. Some basic aspects of 5G networks have been updated, as well as trends in the construction of these networks. Considered are innovative radio frequency components for 5G networks and advanced 5G cellular antennas for their global deployment, as well as one of the alternative new 5G network architectures - O-RAN. As antennas in 5G, antenna arrays are used that implement the method of MIMO (Multiple Input Multiple Output). When analyzing, modeling and designing mobile networks, it is necessary to take into account the peculiarities of IoT traffic. The classical approaches to assessing the impact of EMR of radio frequencies on a person are presented. The most suitable practical method for determining the average electromagnetic load on the territory (ELOT) (generated by base stations (BS) and mobile (subscriber) stations (MS)), which adequately reflects the current state of the electromagnetic environment and takes into account the level of development of cellular communications, has been established.

**Key words:** base station, maximum permissible level of electromagnetic energy, 4G, 5G, IoT traffic, electromagnetic compatibility.