

А.З. Салахов

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ СРЕДСТВ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ 5G НА ЧЕЛОВЕКА ПУТЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ И ЭКСТРАПОЛЯЦИИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Технология пятого поколения (5G) была разработана для обеспечения многократного использования сценария от расширенной мобильной широкополосной связи до достижения сверхнадежной связи с малой задержкой (ССМЗ) в массовых средствах коммуникации. Однако внедрение этой новой технологии вызывает растущую озабоченность по поводу безопасности и возможного воздействия на здоровье электромагнитного поля, излучаемого системами 5G [8]. Поэтому разработка протоколов измерения электромагнитного поля (ЭМП) для оценки соблюдения пределов воздействия ЭМП является объектом международного регулирования данного вопроса. Основной принцип оценки заключается в измерении мощности, полученной от постоянного радиочастотного источника и применения соответствующего коэффициента экстраполяции [1]. Такой подход стандартизирован для технологий 2G, 3G и 4G, но все еще исследуется для технологии 5G. Действительно, использование расширенного дуплексного режима с временным разделением и пространственных методов мультиплексирования, таких как сдвиг луча и массивный множественный вход, множественный выход (МВМВ), требует определения новых процедур и протоколов для измерения ЭМП сигналов 5G [3]. В этой статье описана процедура точной оценки мгновенной максимальной мощности, полученной от источника 5G. Техника экстраполяции основана на введении соответствующих факторов, которые учитывают влияние таких параметров, как дуплекс с временным разделением (ДВР) и сдвиг луча на расчетное значение уровня сигнала 5G.

Ключевые слова: электромагнитное поле (ЭМП), векторный анализатор спектра (ВАС), дуплекс с временным разделением (ДВР), широкополосный канал управления (ШКУ), мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (МОЧР), сверхнадежная связь с малой задержкой (ССМЗ).

A.Z. Salahov

ASSESSMENT OF HUMAN EXPOSURE TO FIFTH-GENERATION 5G MOBILE COMMUNICATIONS THROUGH EXPERIMENTAL MEASUREMENT AND EXTRAPOLATION OF THE MAXIMUM ELECTROMAGNETIC FIELD STRENGTH

Fifth Generation (5G) technology has been developed to enable reusable scenarios from extended mobile broadband to ultra-reliable low-latency communications (URLLC) in mass media. However, the introduction of this new technology raises growing concerns about safety and possible health effects from exposure to the electromagnetic field emitted by 5G systems [8]. Therefore, the development of protocols for measuring the electromagnetic field (EMF) for assessing compliance with the exposure limits for EMF is an object of international regulation of this issue. The basic principle of the assessment is to measure the power received from a permanent radio frequency source and apply an appropriate extrapolation

factor [1]. This approach is standardized for 2G, 3G and 4G technologies, but is still being researched for 5G technology. Indeed, the use of extended time division duplex and spatial multiplexing techniques such as beam shift and massive multiple input multiple output (MIMO) requires new procedures and protocols to be defined for measuring EMF of 5G signals [3]. This article describes a procedure for accurately estimating the instantaneous maximum power received from a 5G source. The extrapolation technique is based on the introduction of appropriate factors that take into account the influence of parameters such as time division duplex (TDD) and beam offset by the calculated value of the 5G signal level. *Keywords:* electromagnetic field of EMF, vector spectrum analyzer VAS, time division duplex TDD, multiple input multiple output MIMO, ultra-reliable low-latency communications URLLC.

Введение

Излучаемая мощность современных систем сотовой связи изменяется со временем в зависимости от ряда факторов, включая изменение трафика данных и динамическое управление мощностью, используемое в канале связи. Простой и эффективный подход к учету этих факторов – использование методов экстраполяции.

Другими словами, оценка среднего или максимального значений изменяющегося во времени сигнала требует компонента сигнала, передаваемого с постоянным уровнем мощности, который используется в качестве эталона.

Оценка уровня ЭМП с использованием методов экстраполяции в предыдущих сотовых системах

В базовой станции глобальной системы мобильной связи (GSM) сигнал широкополосного канала управления (ШКУ) всегда транслируется с постоянной и максимальной мощностью. Следовательно, уровень ЭМП (например, измеренная величина электрического поля) является самым подходящим для оценки уровня ЭМП [2]. Максимальный уровень ЭМП в конкретном секторе соты GSM определяется как

$$E_{2G}^{\max} = \sqrt{\alpha E_{\text{ШКУ}}} , \quad (1)$$

где α – количество несущих частот (ШКУ плюс несущие трафика) в одном секторе соты. Уровень сигнала ШКУ можно измерить в частотной области с помощью скалярного анализатора спектра.

В случае универсальной системы мобильной связи (УСМС) та же процедура требует более сложного инструмента. Таким образом, в УСМС для экстраполяции используется П-ООК (первичный общий опорный канал), который всегда транслируется в каждом секторе ячейки сети УСМС в качестве опорного сигнала. Максимальный уровень ЭМП оценивается как

$$E_{3G}^{\max} = \sqrt{R_{\text{П-ООК}} E_{\text{П-ООК}}} , \quad (2)$$

где $E_{\text{П-ООК}}$ – измеренная величина электрического поля П-ООК; $R_{\text{П-ООК}}$ – коэффициент экстраполяции, как описано в стандарте ИЕС 62232: 2017 [7]. В П-ООК ($E_{\text{П-ООК}}$) кодируется в сигнале 3G, и его измерение требует декодирования сигнала с помощью векторного анализатора спектра (ВАС).

Тот же подход применяется и к сигналам длительного развертывания (ДР). Опорный уровень сигнала ДР получается из опорного сигнала для соты (ОСС). ОСС передает

ся в подкадрах совместно используемого физического канала нисходящей линии связи (ФКНЛС), и его уровень (E_{OCC}) может быть получен путем измерений в кодовой области с использованием ВАС. Максимальный уровень ЭМП оценивается с применением соответствующего коэффициента экстраполяции E_{OCC} как

$$E_{4G}^{\text{max}} = \sqrt{K_{\text{OCC}}} E_{\text{OCC}}. \quad (3)$$

Этот краткий обзор методов экстраполяции поколений от 2G до 4G ясно показывает критическую роль, которую играют опорные сигналы. Иными словами, определение опорного сигнала, а также оценка коэффициента экстраполяции становятся более сложными с введением нового поколения систем сотовой связи и необходимостью использования ВАС. В любом случае общая характеристика в предыдущих поколениях сотовых систем является эталоном постоянного уровня мощности принимаемого опорного сигнала.

Краткое введение в технологию 5G

В этом разделе представлено краткое техническое введение в основные сходства и различия между системами 4G и 5G с акцентом на то как оказывают влияние эти различия на определение эффективного метода экстраполяции для оценки мгновенной максимальной мощности, получаемой в заданной точке от источника 5G. Подробный анализ сигнала 5G выходит за рамки данной статьи. Заинтересованный читатель может найти подробности в [9]. Краткий обзор основных характеристик, влияющих на измерения ЭМП, также представлен в [5].

Некоторые общие характеристики 5G и 4G. В то время как 4G использует только частоты ниже 6 ГГц, 5G поддерживает две полосы пропускания – частотный диапазон 1 (FR1), обычно называемый ниже 6 ГГц, который находится в диапазоне 450 МГц ... 7125 ГГц, и частотный диапазон 2 (FR2), обычно называемый до миллиметрового диапазона, который находится в диапазоне 24... 50 ГГц. Максимальная полоса пропускания FR1 составляет 100 МГц, а максимальная полоса пропускания FR2 – 400 МГц. Эти значения намного больше по сравнению с полосой пропускания ДР, ограниченной 20 МГц. И 4G, и 5G используют мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (МОЧР). Однако в то время, как в ДР разнесение поднесущих является фиксированным и равным 15 кГц, в 5G вводится гибкая нумерология, которая позволяет использовать переменный разнос поднесущих частот. В частности разнесение поднесущих может быть выбрано равным $2^\mu - 15$ кГц, при $\mu = 0, 1, 2, 3, 4$, оно растет в 2 раза – из пространства поднесущих ДР. Схемы модуляции аналогичны ДР и включают двоичное кодирование с фазовым сдвигом (ДФС), квадратурное кодирование с фазовым сдвигом (КФС), квадратурную амплитудную модуляцию 16-го порядка (16 КАМ), 64 КАМ и 256 КАМ. Продолжительность фазы ДР в 5G равна 10 мс и состоит из 10 подставляющих фаз, каждая из которых имеет длительность 1 мс. Однако в 5G разные нумерации дают разное количество символов МОЧР в подкадре. Соответственно, в NR подкадр делится на интервал 2^μ по 14 символов МОЧР каждый (12 символов для расширенного циклического префикса) [9].

5G был задуман, чтобы как можно больше избегать сигналов «всегда включен». Следовательно, в 5G есть только один «всегда активный» сигнал – сигнал синхронизации/

физический широкополосный канал (СС/ФШК), также называемый пакетным сигналом синхронизации (ПСС), который включает в себя сигнал синхронизации (СС), физический широкополосный канал (ФШК) и опорный сигнал демодуляции (ОСД) физического широкополосного канала (ФШК-ОСД), который работает как опорный сигнал для декодирования ФШК. Стоит отметить, что векторные анализаторы сигналов (ВАС) обычно измеряют среднюю мощность на 5G сигнале ФШК-ОСД, усредняя мощность всех сигналов синхронизации в пакете ПСС. Что касается структуры ПСС, то она отображается на четырех символах МОЧР во временной области и 240 смежных поднесущих (20 ресурсных блоков (РБ)) в частотной области. Кроме того, он также сконцентрирован в пространстве, поскольку ПСС передается с использованием направляющих лучей. Иначе говоря, ПСС представляет собой направленную версию сигналов синхронизации, которые передаются с высокой периодичностью, тогда как ОСС в 4G распределяется в кадрах и передается во всем секторе сотовой системы. Этот момент будет лучше разъяснен в следующем подразделе.

Сравнение режимов доступа с двойным частотным разделением (ДЧР) и двойным временным разделением (ДВР). Реализуемый сигналом режим доступа играет решающую роль в определении метода экстраполяции. Системы 5G в основном реализуют режим ДВР, в котором передачи по нисходящей и восходящей линиям связи используют одну и ту же несущую частоту, разделенную жестким временным графиком. С другой стороны, предпочтительный режим доступа, используемый 4G SyStemS, – это дуплексирование с разделением частот (ДЧР) (хотя несколько конфигураций ДВР также разрешены для систем 4G и подробно изучены в [4]), где передачи по нисходящим и восходящим каналам занимают разные частоты. На рисунке 1 показан обзор нулевого диапазона измерения, то есть изменение во времени принимаемой мощности на заданной частоте для источников 4G (а) и 5G (б).

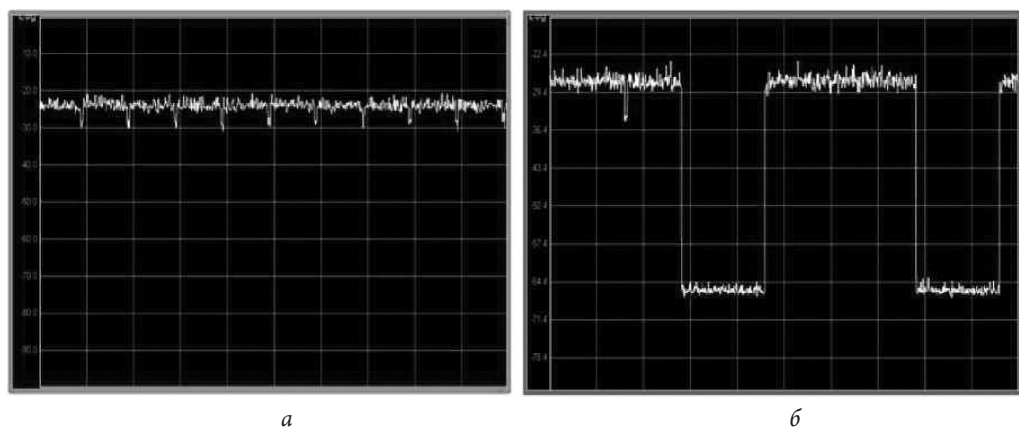


Рис. 1. Обзор нулевого диапазона измерения полосы для двойной связи с а – частотным разделением (ДЧР) четвертого поколения (4G); б – источник двойной связи с временным разделением (ДВР). Источник ДВР не передает в течение интервалов восходящей линии связи, что подразумевает общее снижение мгновенной максимальной принимаемой мощности

Воздействие электромагнитного поля, создаваемого источником ДЧР, существенно отличается от воздействия источника ДВР. Для системы ДЧР источник «всегда включен»,

то есть передача на несущей частоте является непрерывной. Вместо этого система ДВР чередует слоты нисходящей и восходящей линии связи, что приводит к прерывистой передаче и подразумевает общее снижение мгновенной максимальной принимаемой мощности. Как следствие режима доступа ДВР, в 5G к значению экстраполяция должен быть добавлен поправочный коэффициент, связанный с рабочим циклом, далее именуемый $F_{\text{ДКМ}}$ (ДКМ – детерминированный коэффициент масштабирования) [6].

Развертка луча при пассивных и активных антеннах. Основное улучшение, связанное с переходом с сети 4G на сеть 5G, – это использование активных антенн. Благодаря этим интеллектуальным устройствам операторы могут максимально эффективно использовать свои ценные ресурсы спектра для увеличения пропускной способности сети. До появления 5G антенны были связаны с фиксированной диаграммой направленности, форма и направление луча которой не менялись со временем. Системы 5G, оснащенные активными антеннами, способны синтезировать множество лучей, направленных в разные стороны, и динамически реконфигурируются в соответствии с электромагнитной средой. Эта функция значительно изменяет режим передачи широкополосных каналов 5G по сравнению с системами 4G. В качестве примера на рисунке 2, а показан фиксированный луч, используемый в базовых станциях 4G и соответствующее измерение нулевого диапазона (б) принимаемой мощности опорного сигнала соты (ОСС).

Из-за статического характера диаграммы направленности уровень принимаемой мощности ОСС практически постоянен во времени. Это очень привлекательная характеристика для опорного сигнала, используемого в качестве эталона мощности в методе экстраполяции.

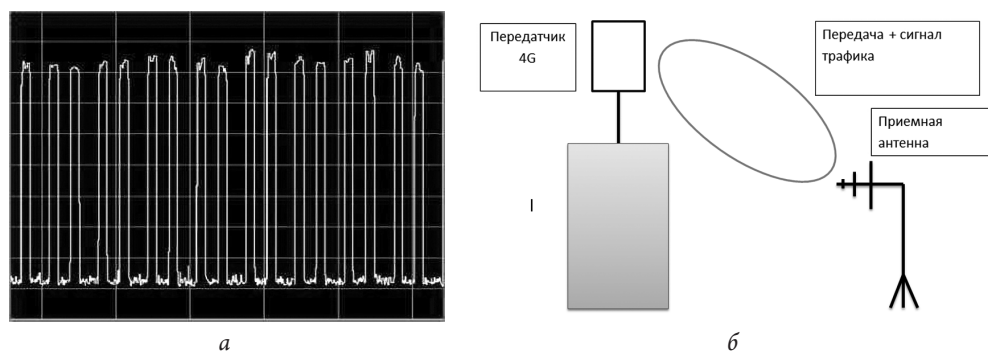


Рис. 2. а – статический луч, синтезированный пассивной антенной 4G; б – измерение уровня мощности принятого эталонного сигнала (ОСС) с нулевой полосой обзора. Из-за статического характера диаграммы направленности уровень принимаемой мощности ОСС практически постоянен во времени

На рисунке 3, а показана стратегия динамического развертывания луча, реализованная системами 5G для передачи пакетного сигнала синхронизации (ПСС). Каждый луч связан с передачей ПСС (в примере от ПСС1 до ПСС6). На рисунке 3, б показано соответствующее измерение нулевой полосы обзора принимаемой мощности ПСС. Благодаря стратегии развертывания луча принимаемая мощность для контрольных каналов, включенных в ПСС, больше не является постоянной во времени. Это означает, что необходимо серьезно подумать над тем, как определить канал, который больше подходит в каче-

стве эталона мощности для метода экстраполяции сигналов 5G. В дальнейшем проблема, касающаяся изменяющейся во времени принимаемой мощности ПСС, будет решена путем определения надлежащего фактора, именуемого R , на основе измерения ПСС, выполненного анализатором векторных сигналов [5]. Использование векторного анализатора сигналов является преимуществом, поскольку это позволяет точно идентифицировать ПСС, в том числе тогда, когда данные передаются в источники, расположенные в тех же временных интервалах, которые используются ПСС, что делает идентификацию уровня ПСС громоздкой с использованием измерений во временной области.

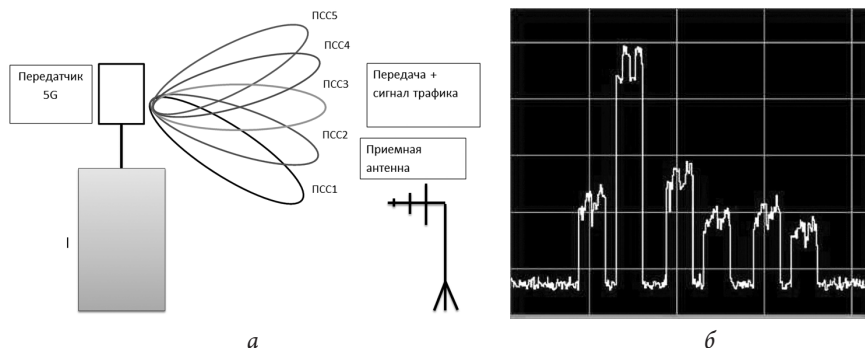


Рис. 3. *а* – развертка луча, синтезируемая активной антенной 5G; *б* – уровни принимаемой мощности блоков пакетного сигнала синхронизации (ПСС) с нулевого диапазона измерения. Принимаемая мощность не является постоянной во времени, поскольку каждый ПСС передается из определенного луча в течение выделенного временного интервала. Подробное объяснение ПСС обсуждается в [7]

Пассивные и активные антенны. Активные антенны, используемые для источников 5G, также могут реализовать формирование луча, то есть тут необходим метод обработки сигнала, используемый для направленной передачи сигнала с высоким коэффициентом усиления. Формирование луча достигается путем комбинирования элементов в антенной решетке таким образом, что сигналы под определенными углами испытывают конструктивные помехи, в то время как другие испытывают помехи деструкции. Благодаря функции произвольного изменения диаграммы направленности 5G передающая антенна способна формировать диаграмму направленности с высоким коэффициентом усиления по направлению к пользовательскому оборудованию для поддержки высокого трафика данных (рис. 4).

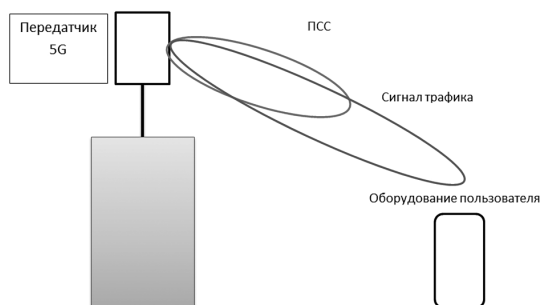


Рис. 4. Изображение эффекта формирования луча. Поток данных передается с использованием луча, сфокусированного на пользовательское оборудование

Эта особенность имеет большое значение при определении эффективного метода экстраполяции. Впервые с момента появления систем 2G мы столкнулись с изменением парадигмы мгновенной максимальной экстраполяции. Фактически для систем 5G принимаемая мощность, связанная с широкополосными каналами (то есть сигналы, упакованные в ПСС), больше не может быть эталоном для максимального уровня принимаемой мощности, поскольку информация может передаваться по выделенному шаблону, характеризующемуся более высоким усилением по сравнению с ПСС. Следовательно, принимаемая мощность широкополосного канала, выбранного в качестве эталона для системы 5G, должна быть скорректирована с помощью коэффициента формирования луча (далее $F_{\text{ЛВЧ}}$).

Влияние формирования диаграммы направленности можно оценить с помощью измерения нулевого диапазона, показанного на рисунке 5, где представлены как ПСС, так и данные трафика для сигнала 5G. На рисунке показано значение $F_{\text{ЛВЧ}}$ равное 5 дБ.

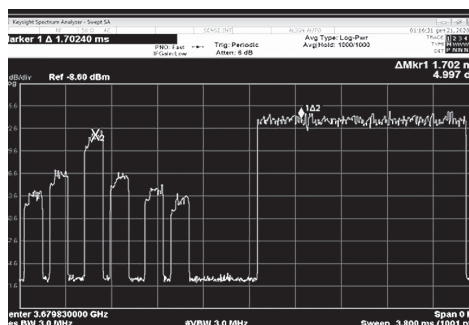


Рис. 5. Измерение в режиме нулевого диапазона: слева – ПСС, содержащий 6 блоков, справа – сигнал, связанный с пользовательскими данными; данные пользователя передаются с использованием луча с более высоким усилением на +5 дБ

Предлагаемый метод экстраполяции сигналов 5G

В этом разделе будет описан метод экстраполяции сигналов 5G. Максимальный уровень ЭМП в данном месте оценивается как произведение трех факторов:

$$E_{5G}^{\max} = \sqrt{N_{\text{ПН}}(B, \mu)} \cdot F_{\text{ДКМ}} \cdot E_{\text{РЭ}}^{\max} \quad (4)$$

где $N_{\text{ПН}}(B, \mu)$ – общее количество поднесущих несущей 5G сигнала, равное 12-кратному общему количеству ресурсных блоков $N_{\text{РБ}}$ (РБ), доступных для сигнала (напомним, что ресурсный блок состоит из 12 последовательных поднесущих в частотной области на отрезок времени, которое зависит от нумерации μ [5, 9]). Этот параметр зависит как от ширины полосы сигнала B , так и от нумерации μ , как указано в таблицах 5.3.2-1 и 5.3.2-2 в [10]; $F_{\text{ДКМ}}$ – детерминированный коэффициент масштабирования, представляющий рабочий цикл сигнала, то есть часть сигнала, зарезервированную для передачи по исходящей линии связи; $E_{\text{РЭ}}^{\max}$ – максимальный уровень ЭМП, измеренный для одного ресурсного элемента (РЭ), то есть наименьшую единицу ресурсной сетки, состоящую из одной поднесущей в частотной области и одного символа МОЧР во временной области.

Очевидно, что определение $E_{\text{РЭ}}^{\max}$ играет решающую роль в уравнении (4). Как уже обсуждалось, основной вопрос связан с выбором опорного канала, принимаемая мощность которого может использоваться в качестве эталона для метода экстраполяции. Кроме того,

необходимо должным образом учитывать влияние некоторых специфических характеристик 5G, которые влияют на принимаемую мощность опорного канала, – развертка луча и формирование луча, возникающие при использовании антенн ММВ – (миллиметровых волн).

Полученные результаты

В статье для согласования метода экстраполяции 4G и 5G предлагается использовать физический широкополосный канал и опорный сигнал демодуляции (ФШК-ОСД). Как обсуждалось, ФШК-ОСД является компонентом ПСС, и его физическое местоположение определяется идентификатором физической ячейки, как указано в таблице 7.4.3.1-1 из [11]. В соответствии с этим выбором максимальный уровень ЭМП для одного РЭ может быть определен как

$$E_{PЭ}^{\max} = \langle E_{PЭ}^{\text{ФШК-ОСД}} \rangle \sqrt{\frac{F_{\text{луч}}}{R}}, \quad (5)$$

где $E_{PЭ}^{\text{ФШК-ОСД}}$ – средний уровень принятого ЭМП в ФШК-ОСД для одного РЭ; R – отношение средней обнаруженной мощности всех ПСС в пакете к мощности более сильного ПСС [7]. Этот параметр учитывает влияние развертки луча (рис. 3) на уровень принимаемых ЭМП всех ПСС в пакете, что позволяет точно оценить максимальный уровень принимаемого ЭМП в ФШК-ОСД для одного РЭ, начиная с оценки непосредственно $\langle E_{PЭ}^{\text{ФШК-ОСД}} \rangle$; $F_{\text{луч}}$ – параметр, который учитывает эффект потенциального усиления луча трафика относительно максимального уровня ЭМП, принимаемого из контрольного канала, из-за эффекта формирования луча, создаваемого использованием антенн ММВ (рис. 4, 5).

Стоит отметить, что выбор $\langle E_{PЭ}^{\text{ФШК-ОСД}} \rangle$ в качестве эталонного уровня ЭМП для одного РЭ особенно эффективен, поскольку его можно напрямую измерить с помощью векторного анализатора спектра (ВАС). Он представляет собой средний уровень принятой ЭМП канала ФШК-ОСД от всех ПСС в пакете, измеренный на основе РЭ. Фактически, как следствие качания луча, уровень принимаемого ЭМП различается для каждого ПСС в соответствии с относительной ориентацией луча ПСС и приемной антенны (рис. 3).

Параметр $F_{\text{луч}}$ связан с функцией формирования луча 5G, которая позволяет синтезировать диаграмму направленности с высоким коэффициентом усиления в направлении пользовательского оборудования для поддержки высокого трафика данных (рис. 4). Параметр $F_{\text{луч}}$ представляет повышение уровня ЭМП РЭ, передаваемого потоком трафика, относительно уровня принятого ЭМП, соответствующего каналу ФШК-ОСД наиболее интенсивного ПСС.

Как обсуждалось ранее, выбор ФШК-ОСД в качестве измеряемого параметра для процедуры экстраполяции особенно значим, поскольку это один из параметров, непосредственно доступных на ВАС. На рисунке 6 показан пример сводки кадров предоставленной ВАС. Средняя мощность ФШК-ОСД является одним из стандартных параметров, оцениваемых программным обеспечением демодуляции 5G ВАС.

Измеренное значение поправочных коэффициентов, которые будут использоваться в уравнениях (4) и (5) для сигнала № 1, указано в первой строке таблицы 1. $\langle E_{PЭ}^{\text{ФШК-ОСД}} \rangle$ и значение E_{5G}^{\max} , полученное с учетом поправок, указаны в первых двух строках таблицы 2.

Салахов А.З. Оценка воздействия средств мобильной связи пятого поколения 5G...

Name	EVM (%rms)	Power per RE (dBm)	Modulation	Num. of RBs	RNTI
PSS	0.278	-46.84	BPSK	33	***
SSS	0.287	-46.84	BPSK	33	***
PBCH	0.502	-46.73	QPSK	60	***
PBCH_DMRS	0.307	-46.73	QPSK	60	***
PDSCH0	7085.963	-52.01	QAM64	5460	0x1
PDSCH0_DMRS	0.000	-52.04	QPSK	5397	0x1

Рис. 6. Сводка кадров со средней принимаемой мощностью для канала ФШК-ОСД

Таблица 1

Полученные поправочные коэффициенты для сигналов 5G

	Сигнал № 1	Сигнал № 2	Сигнал № 3
$N_{ПН}$	3300	3300	3300
$F_{ДКМ}$	1	0,744	0,746
R	1	1	0,285
$F_{Луч}$	1	1	0,162

Таблица 2

Сравнение мощности канала и мгновенного максимального уровня ЭМП, экстраполированного с помощью уравнения (4) и (5)

	Сигнал № 1	Сигнал № 2	Сигнал № 3
$\langle E_{PЭ}^{ФШК-ОСД} \rangle \left[\frac{V}{m} \right]$	$1,030 \cdot 10^{-3}$	$1,021 \cdot 10^{-3}$	$3,133 \cdot 10^{-4}$
$E_{SG}^{max} \left[\frac{V}{m} \right]$	$5,927 \cdot 10^{-2}$	$5,069 \cdot 10^{-3}$	$5,183 \cdot 10^{-2}$
Мощность канала $\left[\frac{V}{m} \right]$	$5,929 \cdot 10^{-2}$	$5,093 \cdot 10^{-2}$	$5,152 \cdot 10^{-2}$

Выводы

В статье предлагается процедура экстраполяции для сигналов 5G. Процедура включает комплексное воздействие сигналов, излучаемых базовыми станциями сотовой связи 5G, которые используются в настоящее время или развертываются, с помощью четырех параметров: $F_{\text{ДКМ}}$, $\langle E_{\text{РЭ}}^{\text{ФШХ-ОСД}} \rangle$, R и $F_{\text{ЛУЧ}}$. Процедуры оценки этих параметров с использованием ВАС такова. В частности $F_{\text{ДКМ}}$ и $F_{\text{ЛУЧ}}$ измеряются с использованием режима нулевого диапазона, в то время как $\langle E_{\text{РЭ}}^{\text{ФШХ-ОСД}} \rangle$ и R измеряются в области кода ресурса. Необходимо отметить, что оценка фактора $F_{\text{ЛУЧ}}$ в измерениях требует принудительного подключения канала данных к измеряемой точке. Возможное решение состоит в том, чтобы установить соединение с базовой станцией с использованием подходящего приемника рядом с точкой измерения, форсируя полностью загруженный трафик. Эта точка в настоящее время является объектом исследования.

В целом исследования, проведенные в контролируемых условиях с использованием сигналов, которые являются копиями сигналов, измеренных в диапазоне FR1, показывают отличное соответствие между измерениями мощности канала и экстраполированными значениями во всех тестируемых случаях. Все результаты предполагают, что предложенный метод экстраполяции является эффективным инструментом для правильной оценки мгновенного максимального уровня ЭМП, излучаемого источниками 5G.

Библиографические ссылки

1. Салахов А.З. Вспомогательные методы для вычисления поглощения мощности при высокочастотном излучении с помощью моделирования головы человека // Биомедицинская радиоэлектроника. 2018. № 11. С. 32–39.
2. Салахов А.З. Численное моделирование поглощения энергии высокочастотного радиоизлучения в тканях головы человека // Медицинская техника. 2019. № 5. С. 49–52.
3. Aerts S., Verloock L., Van Den Bossche M., Colombi D., Martens L., Törnevik C., Joseph W. In-situ Measurement Methodology for the Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure at Sub-6 GHz Frequencies. IEEE Access, 2019, 7, 184658–184667.
4. Franci D., Grillo E.S., Pavoncello, Coltellacci S., Buccella C., Aureli T. Extrapolation method for maximal and 24-h average LTE TDD exposure estimation. Radiat. Prot. Dosim, 2017, 178, 179–184.
5. Franci D., Coltellacci S., Grillo E., Pavoncello S., Aureli T., Cintoli R., Migliore M.D. An Experimental Investigation on the Impact of Duplexing and Beamforming Techniques in Field Measurements of 5G Signals. Electronics, 2020, 9, 223.
6. Franci D., Grillo E.S., Pavoncello, Coltellacci S., Buccella C., Aureli T. Extrapolation method for maximal and 24-h average LTE TDD exposure estimation. Radiat. Prot. Dosim, 2017, 178, 179–184.
7. IEC 62232:2017, Determination of RF Field Strength, Power Density and SAR in the Vicinity of Radio Communication Base Stations for the Purpose of Evaluating Human Exposure. https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62232%7Bed2.0%7Den.pdf (accessed on 30 January 2020).
8. Keller H. On the Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields Transmitted by 5G NR Base Stations. Health Phys, 2019, 117, 541–545.

9. Kottkamp M., Pandey A., Raddino D., Roessler A., Stuhlfauth R. 5G New Radio. Fundamental Procedures and Technical Aspects; Rhode & Schwarz GmbH & Co. KG: Muchen, Germany, 2019.
10. 3GPP TS 138 104 V15.4.0, 5G.; NR.; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/15.04.00_60/ts_138104v150400p.pdf (accessed on 30 January 2020).
11. 3GPP TS 38.211 V15.2.0, 5G.; NR.; Physical Channels and Modulation. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3213> (accessed on 30 January 2020).

References

1. Salakhov A.Z. [Auxiliary Methods for Calculating High Frequency Radiation Power Absorption Using Human Head Simulation]. *Biomedicinskaya radioelektronika*, 2018, no. 11, pp. 32–39 (in Rus.).
2. Salakhov A.Z. Numerical modeling of the absorption of high-frequency radio emission energy in the tissues of the human head. *Medicinskaya tekhnika*, 2019, no. 5, pp. 49–52 (in Russ.).
3. Aerts S., Verloock L., Van Den Bossche M., Colombi D., Martens L., Törnevik C., Joseph W. In-situ Measurement Methodology for the Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure at Sub-6 GHz Frequencies. *IEEE Access*, 2019, 7, 184658–184667.
4. Franci D., Grillo E.S., Pavoncello, Coltellacci S., Buccella C., Aureli T. Extrapolation method for maximal and 24-h average LTE TDD exposure estimation. *Radiat. Prot. Dosim*, 2017, 178, 179–184.
5. Franci D., Coltellacci S., Grillo E., Pavoncello S., Aureli T., Cintoli R., Migliore M.D. An Experimental Investigation on the Impact of Duplexing and Beamforming Techniques in Field Measurements of 5G Signals. *Electronics*, 2020, 9, 223.
6. Franci D., Grillo E.S., Pavoncello, Coltellacci S., Buccella C., Aureli T. Extrapolation method for maximal and 24-h average LTE TDD exposure estimation. *Radiat. Prot. Dosim*, 2017, 178, 179–184.
7. IEC 62232:2017, Determination of RF Field Strength, Power Density and SAR in the Vicinity of Radio Communication Base Stations for the Purpose of Evaluating Human Exposure. https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62232%7Bed2.0%7Den.pdf (accessed on 30 January 2020).
8. Keller H. On the Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields Transmitted by 5G NR Base Stations. *Health Phys*, 2019, 117, 541–545.
9. Kottkamp M., Pandey A., Raddino D., Roessler A., Stuhlfauth R. 5G New Radio. Fundamental Procedures and Technical Aspects; Rhode & Schwarz GmbH & Co. KG: Muchen, Germany, 2019.
10. 3GPP TS 138 104 V15.4.0, 5G.; NR.; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/15.04.00_60/ts_138104v150400p.pdf (accessed on 30 January 2020).
11. 3GPP TS 38.211 V15.2.0, 5G.; NR.; Physical Channels and Modulation. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3213> (accessed on 30 January 2020).