



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-35-45>

УДК 621.396.218:614.89.086.5

РАДИОЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФОН В ХОТ-СПОТАХ 5G

В. И. МОРДАЧЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Декларируемое увеличение территориальной плотности трафика мобильной связи до 10^7 бит/с/м² в сетях 5G и до 10^9 бит/с/м² в сетях 6G может быть причиной недопустимого роста уровня электромагнитного фона, особенно в хот-спотах внутри помещений, где интенсивность беспроводного информационного обслуживания населения максимальна. Предложена методика анализа и выполнены оценки средних уровней электромагнитного фона в различных конфигурациях типового сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G диапазонов частот FR1 и FR2, свидетельствующие о существенном вкладе излучений абонентских терминалов в средние уровни создаваемого радиочастотного электромагнитного фона. Проанализированы возможности безопасной для населения реализации этого сценария, связанные с использованием технологии MIMO и антенн базовых станций, обеспечивающих адаптивное формирование узких лучей в направлении на обслуживаемые абонентские терминалы.

Ключевые слова: мобильная связь, 5G, eMBB, хот-спот, базовая станция, абонентский терминал, территориальная плотность трафика, спектральная эффективность, электромагнитный фон.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Радиочастотный электромагнитный фон в хот-спотах 5G // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 35–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-35-45>.

RADIO FREQUENCY ELECTROMAGNETIC BACKGROUND IN 5G HOT SPOTS

VLADIMIR I. MORDACHEV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The declared increase in area traffic capacity of mobile communications to 10^7 bit/s/m² in 5G systems and to 10^9 bit/s/m² in 6G systems may cause an unacceptable increase in the level of electromagnetic background, especially in indoor hot spots, where the intensity of wireless public information services is maximum. A methodology for analyzing and assessing the average electromagnetic background levels in various configurations of the typical 5G scenario Indoor Hotspot-eMBB at frequency ranges FR1 and FR2 is proposed, indicating a significant contribution of subscriber terminal radiations to the average levels of the generated radio frequency electromagnetic background. The possibilities of safe implementation of this scenario for the population are analyzed, associated with the use of MIMO technology and base station antennas that provide adaptive formation of narrow beams in the direction of the subscriber terminals being served.

Keywords: mobile communications, 5G, eMBB, hot spot, base station, users' equipment, area traffic capacity, spectral efficiency, electromagnetic background.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Mordachev V. I. (2025) Radio Frequency Electromagnetic Background in 5G Hot Spots. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 35–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-35-45> (in Russian).

Введение

Планируемый рост средней территориальной плотности трафика мобильной связи (area traffic saracity) до 10^7 бит/с/м² в сетях 5G и до 10^9 бит/с/м² в сетях 6G [1–3] определяет актуальность разработки практической методики анализа и выполнения оценок ожидаемой интенсивности создаваемого при этом электромагнитного фона (ЭМФ), в первую очередь в хот-спотах внутри зданий, где интенсивность беспроводного информационного обслуживания максимальна. Подобная методика может быть разработана на основе подхода [4, 5] к изучению статистических характеристик ансамблей электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых пространственно распределенными источниками излучений, используемого при анализе характеристик электромагнитной обстановки (ЭМО), создаваемой излучениями базовых станций (БС) и абонентских терминалов (АТ) сотовой связи, распределенных по территории.

Цель исследований – применение подходов [4, 5] к анализу характеристик ЭМО в хот-спотах внутри помещений при реализации типового сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G, предложенного в [1], в диапазонах FR1 и FR2, а также выполнение оценок средней интенсивности и безопасности создаваемого при этом ЭМФ.

Статистические характеристики ансамбля радиочастотных электромагнитных полей базовых станций в точке наблюдения

При типовом сценарии Indoor Hotspot-eMBB в системах 5G [1] БС размещаются на потолке помещения площадью $S_{HP} = 120 \text{ м} \times 50 \text{ м} = 6000 \text{ м}^2$ на высоте $H_{BS} = 3 \text{ м}$, а АТ и точка наблюдения (ТН) располагаются на высоте $H_{UE} = 1,5 \text{ м}$ над полом (рис. 1), так что расстояние между условными плоскостями размещения БС и АТ $H = H_{BS} - H_{UE}$ составляет 1,5 м.

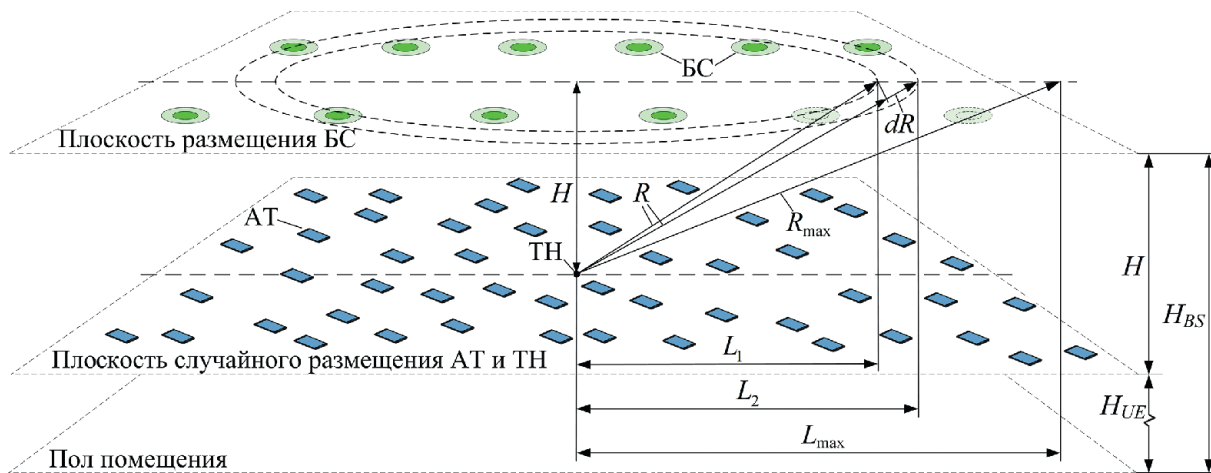


Рис. 1. Пространственное размещение базовых станций, абонентских терминалов и точек наблюдения при типовом сценарии Indoor Hotspot-eMBB реализации услуг сверхширокополосной мобильной связи 5G в помещении

Fig. 1. Spatial placement of base stations, subscriber terminals and observation points in a typical Indoor Hotspot-eMBB scenario for the implementation of 5G ultra-broadband mobile communication services indoors

При данном сценарии БС располагаются регулярно двумя рядами вдоль помещения с шагом 20 м и с расстоянием 20 м между рядами, их количество $N_{BS} = 12$. АТ располагаются случайно, на каждую БС приходится 10 АТ; их общее количество в помещении $N_{UE} = 10N_{BS}$. Координаты расположения ТН на условной плоскости расположения АТ случайны, так что расположение БС и АТ относительно ТН также является случайным. Это позволяет воспользоваться подходом [4] к определению статистических характеристик ЭМО, создаваемой в ТН радиочастотными ЭМП этих БС и АТ.

Рассмотрим пессимистическую модель формирования ЭМО в ТН, при которой условные плоскости пространственного размещения БС и АТ с плотностями $\rho_{BS} = N_{BS}/S_{HP}$ и $\rho_{UE} = N_{UE}/S_{HP}$ соответственно не ограничиваются размерами помещения, а выходят за его пределы и ограничиваются размерами области радиовидимости БС и АТ из ТН. В качестве критерия радиовидимости

из ТН источника ЭМП с эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ) P_e принимается некоторое пороговое значение плотности потока мощности (ППМ) ЭМП Z_0 , соответствующее, например, чувствительности радиоприема «по полю» в радиосети 5G и связанное с радиусом R_{\max} (для БС на рис. 1) области радиовидимости этого источника из ТН при распространении радиоволн (РРВ) в свободном пространстве:

$$Z_0 = \frac{P_e}{4\pi R_{\max}^2}. \quad (1)$$

Под ЭМО в ТН будем понимать присутствующий в ней некоторый ансамбль N ЭМП БС и/или АТ с уровнями, превышающими пороговое значение (1). Исследуемой интегральной характеристикой ЭМО в ТН является интенсивность Z_Σ ЭМФ, определяемого в виде скалярной суммы ППМ Z_1, Z_2, \dots, Z_N присутствующих в ней N ЭМП:

$$Z_\Sigma = \sum_{n=1}^N Z_n, \quad Z_n \geq Z_0. \quad (2)$$

Если в пессимистической модели пространственная плотность БС – точечных источников ЭМП на условной плоскости, поднятой на высоту H над плоскостью размещения ТН и АТ, постоянна ($\rho_{BS} = \text{const}$), то их среднее число в круговой области над ТН, ограниченной некоторым радиусом R_{\max} , определяется по формуле

$$N_{\Sigma BS} = \rho_{BS} \pi L_{\max}^2 = \rho_{BS} \pi (R_{\max}^2 - H^2),$$

где L_{\max} – соответствует области расположения БС, ЭМП которых учитываются в уровне (2) суммарного ЭМФ.

БС – точечные источники ЭМП, удаленность которых от ТН не превышает R , распределены равномерно по круговой области радиуса L_1 плоскости на высоте H . Их среднее число N_1 определяется из выражения

$$N_{1BS} = \rho_{BS} \pi L_1^2 = \rho_{BS} \pi (R^2 - H^2).$$

БС, удаленность которых от ТН не превышает $R + dR$, располагаются в круге радиусом L_2 ; их среднее число:

$$N_{2BS} = \rho_{BS} \pi L_2^2 = \rho_{BS} \pi ((R + dR)^2 - H^2) = \rho_{BS} \pi (R^2 + 2RdR + (dR)^2 - H^2) = N_{1BS} + \rho_{BS} \pi (2RdR + (dR)^2).$$

БС, попадающие в элементарный интервал шириной dR значений удаленности от ТН, находящийся на расстоянии R от этой точки, располагаются в узкой кольцевой области, ограниченной радиусами L_1 и L_2 ; их среднее число в данной области:

$$dN = N_{2BS} - N_{1BS} = \rho_{BS} \pi (2RdR + (dR)^2).$$

Вероятность $p(R, dR)$ попадания значения удаленности некоторой БС (точечного источника ЭМП, произвольно выбранного из $N_{\Sigma BS}$) в интервал $\{R, R + dR\}$ определяется из выражения

$$p(R, dR) = \frac{dN}{N_{\Sigma BS}} = \frac{\rho_{BS} \pi (2RdR + (dR)^2)}{\rho_{BS} \pi (R_{\max}^2 - H^2)} = \frac{2RdR + (dR)^2}{L_{\max}^2}, \quad H \leq R \leq R_{\max} = \sqrt{L_{\max}^2 + H^2}.$$

Плотность распределения вероятности (п.р.в.) $w(R)$ удаленности R произвольно выбранной БС от ТН определится соотношением

$$w(R) = \lim_{dR \rightarrow 0} \frac{p(R, dR)}{dR} = \lim_{dR \rightarrow 0} \frac{2RdR + (dR)^2}{L_{\max}^2 dR} = \lim_{dR \rightarrow 0} \frac{2R + dR}{L_{\max}^2} \approx \frac{2R}{L_{\max}^2}, \quad H \leq R \leq R_{\max}.$$

Иногда удобнее это распределение использовать в следующем виде:

$$w(R) = 2R / (R_{\max}^2 - H^2), \quad H \leq R \leq R_{\max}. \quad (3)$$

Таким образом, для модели случайного равномерного распределения источников ЭМП на плоскости, располагаемой на некоторой высоте над плоскостью расположения ТН, вид п.р.в. удаленности источников от ТН не зависит от этой высоты; от нее зависят лишь область определения и нормирующий множитель этой п.р.в.

Для последующего определения п.р.в. ППМ ЭМП, создаваемых излучениями БС в ТН, необходимо оценить возможность использования в рассматриваемой пространственной модели на рис. 1 зависимости (1), характерной для условий РРВ в свободном пространстве. Эта зависимость теряет адекватность при многолучевом РРВ, характерном при расположении БС за пределами брейкпойнт-окрестности ТН радиусом $R_{BP} = 4H_{BS}H_{UE}/\lambda$ [6], где λ – длина волны ЭМП. Поскольку для сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G рекомендуется рассматривать полосы частот 4, 30 и 70 ГГц [1, 2], для которых $R_{BP} \geq 240$ м, что существенно превышает размеры пространственной области этого сценария (120×50 м), условия РРВ в анализируемой модели можно считать соответствующими условиям РРВ в свободном пространстве с зависимостью (1) между ППМ ЭМП Z в ТН и ее удаленностью R от БС – источника ЭМП с ЭИИМ P_e .

При монотонной функциональной зависимости (1) $Z = \Phi(R)$, характерной для условий РРВ в свободном пространстве, и при одинаковой ЭИИМ БС – источников ЭМП в нижней полусфере (квазиизотропные источники ЭМП, $P_e = \text{const}$) п.р.в. $w(Z)$ в ансамбле ЭМП БС в ТН определяется из (1) и (3) следующим образом [4]:

$$w(Z) = w(R = \Phi^{-1}(Z)) \left| \frac{dR}{dZ} \right|, Z = \Phi(R) = \frac{P_e}{4\pi R^2}, R = \Phi^{-1}(Z) = \left(\frac{P_e}{4\pi Z} \right)^{\frac{1}{2}}, \left| \frac{dR}{dZ} \right| = \left(\frac{P_e}{16\pi} \right)^{\frac{1}{2}} Z^{-\frac{1}{2}}; \quad (4)$$

$$w(Z) = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{(Z_{\max} - Z_{\min}) Z^2}, Z_{\min} < Z < Z_{\max}. \quad (5)$$

Очевидно, что область определения значений $Z \in [Z_{\min}, Z_{\max}]$ однозначно связана с областью определения R и зависимостью $Z = \Phi(R)$:

$$Z_{\min} = \frac{P_e}{4\pi R_{\max}^2}, Z_{\max} = \frac{P_e}{4\pi H^2} \rightarrow R_{\max} = \left(\frac{P_e}{4\pi Z_{\min}} \right)^{1/2}, H = \left(\frac{P_e}{4\pi Z_{\max}} \right)^{1/2}.$$

В рассматриваемом сценарии антенны БС могут представлять собой достаточно сложные системы – активные фазированные антенные решетки (АФАР) с числом элементов до 2^8-2^{10} [1, 2]. Поэтому можно предположить их реализацию с ослаблением задних и боковых лепестков и равномерным усилением G_{0BS} в телесном угле, охватывающем основную часть нижней полусферы, и принять значение P_e БС в этой полусфере, равной $G_{0BS} P_{TRP}$, где P_{TRP} – полная излучаемая мощность БС (параметр Total Radiated Power в [7]).

Первый начальный момент распределения (5) определяется следующим соотношением:

$$m_1(Z) = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} Z w(Z) dZ = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} \frac{dZ}{Z} = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}}, Z_{\min} < Z < Z_{\max}. \quad (6)$$

Для рассматриваемой модели пространственного распределения БС:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\min} Z_{\max} &= \frac{P_e^2}{16\pi^2 R_{\max}^2 H^2}; & Z_{\max} - Z_{\min} &= \frac{P_e (R_{\max}^2 - H^2)}{4\pi R_{\max}^2 H^2}; & \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} &= 2 \ln \frac{R_{\max}}{H}; \\ m_1(Z) &= \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} = \frac{P_e}{2\pi (R_{\max}^2 - H^2)} \ln \frac{R_{\max}}{H}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Таким образом, соотношение для средней интенсивности $Z_{\Sigma BS}$ ЭМФ, создаваемого в ТН множеством БС из области радиовидимости, приобретает следующий вид:

$$Z_{\Sigma BS} = N_{\Sigma BS} m_1(Z) = \frac{\rho_{BS} P_e}{2} \ln \frac{R_{\max}}{H} \approx \frac{B_{BS}}{2} \ln \frac{R_{\max}}{H}; \quad (8)$$

$$B_{BS} = \rho_{BS} P_e \approx \rho_{BS} P_{TRP} G_{0BS}, \quad (9)$$

где R_{\max} – параметр, не обязательно связанный с пороговым уровнем ППМ ЭМП в ТН, а лишь ограничивающий радиус круговой области размещения БС с квазиизотропным излучением в нижнюю полусферу, ЭМП которых учитываются при формировании ЭМФ в ТН; B_{BS} – средняя электромагнитная нагрузка на территорию (ЭМНТ) [5], создаваемая излучениями БС в помещении; G_{0BS} – коэффициент направленного действия (КНД) антенны БС в главном лепестке.

Соотношения (8), (9) позволяют оценить среднюю ЭМНТ B_{BS} и среднюю интенсивность ЭМФ $Z_{\Sigma BS}$, создаваемых излучениями БС на условной плоскости размещения АТ и ТН при известных ρ_{BS} , G_{0BS} и P_{TRP} , но не обеспечивают возможности этих оценок для анализа реализуемости в данных условиях декларируемых системных характеристик рассматриваемого сценария 5G. Такой анализ возможен с применением иного подхода к определению ЭМНТ, опирающегося не на фактические данные о мощности излучения БС, а на определение минимально необходимой энергии излучения каждого бита информации по радиоканалам БС→АТ для обеспечения требуемой средней территориальной плотности мобильного трафика (area traffic sarasity) S_{tr} с учетом их широкополосности и реальной спектральной эффективности, а также необходимого запаса в излучаемой мощности БС для реализации системообразующих функций сотовой радиосети и учета особенностей условий РРВ.

При известных коэффициенте K_N шума радиоприемника АТ, ширине полосы частот ΔF и реальной средней спектральной эффективности W_{ER} радиоканала БС→АТ, в m раз худшей по отношению к потенциальной W_{EP} , определяемой в соответствии с известной теоремой Шеннона – Хартли, при длине волны ЭМП БС λ , КНД антенны БС G_{0BS} (при использовании направленных антенн БС), радиусе зоны обслуживания БС R_{\max} , ограниченной чувствительностью радиоприема АТ, и средней S_{tr} , создаваемой множеством БС на условной плоскости размещения АТ и ТН, на этой плоскости создается следующая ЭМНТ [5]:

$$B(R_{\max}, S_{tr}, K_{CC}, W_{ER}, m, \lambda) = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N D_{\Sigma} (2^{m W_{ER}} - 1) R_{\max}^2 S_{tr}}{\lambda^2 W_{ER} G_{0BS}}; \quad (10)$$

$$S_{tr} = \rho_{BS} W_{ER} \Delta F, W_{ER} = \frac{W_{EP}}{m} \approx \frac{\log_2 CNIR_R}{m^2}, \quad (11)$$

где k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T_0 – температура окружающей среды, $T_0 = 290$ К; K_N – коэффициент шума радиоприемника АТ, ед.; D_{Σ} – совокупный запас мощности излучения БС в сети 5G, связанный с необходимостью преодоления внутрисистемных помех, компенсации потерь на затухание радиоволн в зданиях, потерь на замирание при РРВ в «каньонах» городской застройки вследствие многолучевости и дифракции, а также с необходимым запасом в уровне принимаемого сигнала АТ для реализации хендвера, ед.; $CNIR_R$ – отношение «сигнал/ (шум+внутрисистемная помеха)» (carrier-to-noise plus intrasystem interference ratio) в реальном радиоканале БС→АТ, ед.

Средняя интенсивность $Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемая в ТН излучающими АТ с ЭИИМ P_{eUE} , распределенными случайно со средней плотностью ρ_{UE} [АТ/м²] по условной плоскости на высоте H_{UE} (рис. 1), определяется следующим соотношением [5]:

$$Z_{\Sigma UE} \approx \frac{B_{TUE}}{2} \ln \left(\frac{13,2\pi H_{UE}^2}{\lambda^2} \right), H_{UE} \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}}, B_{TUE} = \rho_{UE} P_{eUE}, \quad (12)$$

где B_{TUE} – средняя ЭМНТ, создаваемая излучениями АТ в помещении, Вт/м².

Соотношение (12) получено в предположении, что излучения АТ являются изотропными ($G_{0UE} = 1$). При их существенной направленности средняя ЭМНТ, создаваемая излучениями АТ, может быть определена аналогично (9).

Результаты исследований и их обсуждение

Соответствующие [1, 2] значения технических параметров рассматриваемого сценария, содержащихся в (7)–(11), приведены в табл. 1. С использованием этих данных выполнены оценки средней ЭМНТ, создаваемой совокупностями БС и АТ в условной плоскости размещения АТ и ТН, а также следующие оценки средней интенсивности ЭМФ в этой плоскости (для интерва-

ла значений R_{\max} , обеспечивающих различную степень перекрытия зон обслуживания отдельных БС, и интервала значений ρ_{BS} , учитывающих неравномерность распределения БС по потолку помещения):

- оценки с использованием (8), (9) среднего уровня $Z_{\Sigma BS}$, определяемого значениями основных параметров ρ_{BS} , P_{TRP} , G_{OBS} , R_{\max} и H сценария Indoor Hotspot-eMBB (вариант 1);
- оценки с использованием (12) среднего уровня $Z_{\Sigma UE}$, определяемого значениями основных параметров ρ_{UE} , P_{eUE} , H_{UE} , а также средней суммарной интенсивности $Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma BS} + Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями БС и АТ, и отношением $Z_{\Sigma BS} / Z_{\Sigma UE}$ составляющих суммарного среднего уровня Z_{Σ} ЭМФ в данном сценарии (вариант 1);
- оценки с использованием (8), (10), (11) значений системных параметров 4G/5G/6G, декларируемых в [1–3], в идеализированном случае в предположении, что $W_{ER} = W_{EP}$ (несовершенство процессов передачи данных по радиоканалу БС→АТ полностью компенсируется применением технологии ММО, $m = 1$) и $D_{\Sigma} = 1$, что возможно в силу отсутствия повторения несущих частот излучений БС, значительно уменьшающего уровни внутрисетевых помех (вариант 2);
- оценки с использованием (8), (10), (11) для потенциальных характеристик радиоканала ($m = 1$) и запаса в мощности излучения БС 10 дБ ($D_{\Sigma} = 10$) (вариант 3);
- оценки с использованием (8), (10), (11) для реального радиоканала, в котором несовершенство процессов передачи данных не полностью компенсируется применением технологии ММО ($m = 1,5$), и запаса мощности излучения БС 7 дБ ($D_{\Sigma} = 5$) (вариант 4).

Результаты этих оценок приведены в табл. 2.

Таблица 1. Типовые параметры пространственного размещения и излучения базовых станций и абонентских терминалов при различных конфигурациях сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G
Table 1. Typical parameters of spatial placement and radiation of base stations and subscriber terminals for various configurations of the Indoor Hotspot-eMBB 5G scenario

Параметр	Сценарий Indoor Hotspot-eMBB для конфигурации		
	A	B	C
Частота F , ГГц (λ , м)	4 (0,075)	30 (0,01)	70 (0,0043)
Параметры БС			
R_{\max} , м	15–60	15–60	15–60
H , м	1,5	1,5	1,5
ρ_{BS} , БС/м ²	0,002–0,0025	0,002–0,0025	0,002–0,0025
P_{TRP} , дБм/Вт	24/0,25	23/0,2 ($P_e \leq 58$ дБм)	21/0,125 ($P_e \leq 58$ дБм)
ΔF , МГц	20	80	80
W_{ER} , бит/с/Гц	9	9	9
$S_{tr \max}$, бит/с/м ²	$3,6 \cdot 10^5$ – $4,5 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$ – $1,8 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$ – $1,8 \cdot 10^6$
G_{OBS} , ед./дБи	3,16/5	3,16/5 ($G_{OBS} \leq 25$ дБи)	3,16/5 ($G_{OBS} \leq 27$ дБи)
K_N , ед./дБ	5/7	10/10	10/10
K_F	1	1	1
Параметры АТ			
H_{UE} , м	1,5	1,5	1,5
Количество АТ	10 АТ/БС	10 АТ/БС	10 АТ/БС
Использование АТ, %	95 (≈ 100)	95 (≈ 100)	95 (≈ 100)
$\rho_{UE} \approx \rho_{BS}$, АТ/м ²	0,0020–0,0025	0,0020–0,0025	0,0020–0,0025
$P_{TRP} \approx P_{eUE}$, дБм/Вт	23/0,2	23/0,2	21/0,125
G_{OUE} , ед./дБи	1/0	3,16/5	3,16/5
<i>Примечания</i>			
1. Анализ ограничен рассмотрением режима FDD, при котором при использовании всех АТ в каждый момент времени дуплексная радиосвязь БС осуществляется только с одним АТ, и территориальная плотность ρ_{UE} излучающих АТ равна территориальной плотности БС.			
2. $S_{tr \max}$ – создаваемая максимальная средняя территориальная плотность трафика; K_F – коэффициент повторения несущих частот.			

Таблица 2. Результаты оценок средней электромагнитной нагрузки на территорию и средней интенсивности электромагнитного фона, создаваемого излучениями базовых станций и абонентских терминалов при различных конфигурациях сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G
Table 2. Results of assessments of the average electromagnetic load on the territory and the average intensity of the electromagnetic background created by the radiation of base stations and subscriber terminals under various configurations of the Indoor Hotspot-eMBB 5G scenario

Параметр	Сценарий Indoor Hotspot-eMBB для конфигурации		
	A	B	C
Оценка средней ЭМНТ и средней интенсивности ЭМФ в ТН, создаваемых излучениями БС			
С использованием (8), (9), (12) – вариант 1			
B_{BS} (9), Вт/м ²	$1,58 \cdot 10^{-3} - 1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-3} - 1,58 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-4} - 9,88 \cdot 10^{-4}$
$Z_{\Sigma BS}$ (8), (9), Вт/м ²	$1,82 \cdot 10^{-3} - 3,64 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3} - 2,91 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-4} - 1,82 \cdot 10^{-3}$
B_{TUE} (12), Вт/м ²	$4 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4} - 3,13 \cdot 10^{-4}$
$Z_{\Sigma UE}$ (12) Вт/м ²	$1,94 \cdot 10^{-3} - 2,43 \cdot 10^{-3}$	$2,75 \cdot 10^{-3} - 3,44 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3} - 2,4 \cdot 10^{-3}$
$Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma BS} + Z_{\Sigma UE}$, Вт/м ²	$3,76 \cdot 10^{-3} - 6,07 \cdot 10^{-3}$	$4,21 \cdot 10^{-3} - 6,35 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3} - 4,2 \cdot 10^{-3}$
$Z_{\Sigma BS} / Z_{\Sigma UE}$	0,9–1,5	0,53–0,85	0,48–0,76
С использованием (8), (10), (11) при $D_{\Sigma} = 1, m = 1$ – вариант 2			
B_{BS} (10)	$4,09 \cdot 10^{-7} - 8,18 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-4} - 3,7 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3} - 0,020$
$Z_{\Sigma BS}$ (8) при ЭМНТ (10)	$4,71 \cdot 10^{-7} - 1,51 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-4} - 6,8 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3} - 0,037$
С использованием (8), (10), (11) при $D_{\Sigma} = 10, m = 1$ – вариант 3			
B_{BS} (10)	$4,09 \cdot 10^{-6} - 8,18 \cdot 10^{-5}$	$1,84 \cdot 10^{-3} - 0,037$	0,010–0,200
$Z_{\Sigma BS}$ (8) при ЭМНТ (10)	$4,71 \cdot 10^{-6} - 1,51 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^{-3} - 0,068$	0,011–0,370
С использованием (8), (10), (11) при $D_{\Sigma} = 5, m = 1,5$ – вариант 4			
B_{BS} (10)	$4,63 \cdot 10^{-5} - 9,27 \cdot 10^{-4}$	0,021–0,420	0,11–2,26
$Z_{\Sigma BS}$ (8) при ЭМНТ (10)	$5,33 \cdot 10^{-5} - 1,71 \cdot 10^{-3}$	0,024–0,770	0,13–4,16

Приведенные в табл. 2 результаты свидетельствуют о следующем.

1. Для варианта 1 оценки средней интенсивности ЭМФ на всех частотах оказываются существенно ниже предельно допустимых уровней (ПДУ) 0,025–0,400 Вт/м, установленных для многих видов оборудования объектов критической инфраструктуры и населения [8], что свидетельствует об электромагнитной безопасности всех конфигураций сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G с параметрами пространственного размещения и электромагнитного излучения БС и АТ, принятыми в [1, 2]. Для конфигураций B, C этого варианта характерно преобладание среднего уровня ЭМФ, создаваемого излучениями АТ, над средними уровнями ЭМФ, создаваемыми излучениями БС. В действительности следует ожидать сопоставимых значений $Z_{\Sigma BS}$ и $Z_{\Sigma UE}$ при $Z_{\Sigma BS} / Z_{\Sigma UE} \geq 1$ в силу того, что (12) получено в предположении, что АТ имеют антенны с размерами, близкими к $\lambda/2$. Это справедливо для АТ 2G/3G, но не в полной мере адекватно для АТ с многоэлементными антеннами (до 32–64 элементов в конфигурациях B, C [1]), поскольку увеличение размеров антенны по отношению к длине волны сопровождается расширением ее ближней зоны и уменьшением значения Z_{max} в модели (6) для ансамбля ЭМП АТ в ТН, что вызывает уменьшение средних уровней $Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемых излучениями АТ, за счет снижения динамического диапазона значений интенсивности ЭМФ на условной плоскости размещения АТ и ТН. Этот вопрос требует дальнейшего количественного анализа. Тем не менее приведенные результаты свидетельствуют о недостаточности оценок лишь уровней ЭМФ, создаваемого излучениями БС, при оформлении санитарных паспортов подобных объектов и о необходимости обязательного учета в какой-либо форме вклада излучений АТ в ожидаемые уровни совокупного среднего ЭМФ, создаваемого в хот-спотах 5G.

2. Для варианта 2 оценки средней интенсивности ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями БС, для всех конфигураций данного сценария, а также оценки для конфигурации A вариантов 3, 4 тоже оказываются существенно ниже ПДУ на всех частотах. Это свидетельствует о том, что безопасность всех конфигураций данного сценария может быть обеспечена близкой к потенциальной пропускной способностью радиоканалов БС→АТ ($m = 1$) за счет эффективного применения технологии ММО и обеспечения условий РРВ в свободном пространстве (что в условиях возможного затенения АТ телами их владельцев и местными предметами возможно за счет перекрытия зон обслуживания соседних БС).

3. Для конфигураций B, C вариантов 3 и 4 оценки средней интенсивности ЭМФ оказываются сопоставимыми со значениями ПДУ либо даже существенно их превосходящими. Это свидетельствует о том, что на частотах диапазона FR2 даже относительно небольшое ухудшение пропускной способности радиоканала по сравнению с потенциальной ($m \geq 1$), как и необходимость обеспечения даже относительно небольшого запаса по уровню сигнала ($D_{\Sigma} \geq 7-10$ дБ), делают невозможной безопасную реализацию деклараций 5G в рамках данного сценария.

В табл. 1 оценки максимальной средней территориальной плотности беспроводного трафика $S_{tr \max}$, полученные с использованием (11), для конфигурации A оказались выше предела 10^5 бит/с/м², декларируемого в [1–3] для систем 4G, но более чем на порядок меньше заявленного там же предела 10^7 бит/с/м² для систем 5G. Оценки значений $S_{tr \max}$ для конфигураций B, C , приведенные в табл. 1, также оказались в 5,5–7 раз меньше указанного предела для систем 5G. Таким образом, реализация рассматриваемого сценария 5G с типовыми параметрами [1, 2] не обеспечивает предельных значений интенсивности S_{tr} беспроводного информационного обслуживания и максимально возможных уровней ЭМФ в хот-спотах 5G; во всех конфигурациях имеются резервы роста ρ_{BS} , позволяющие приблизить уровни S_{tr} к декларируемому пределу для 5G при сохранении безопасных средних уровней ЭМФ.

При фиксированных W_{ER}, ρ_{BS} увеличение средней территориальной плотности беспроводного трафика S_{tr} возможно только за счет расширения полос частот радиоканалов. В миллиметровом диапазоне FR2 5G такое расширение допускается до 1 ГГц ([2], п. 5.2.4.3.15), однако без соответствующего улучшения спектральной эффективности оно должно сопровождаться увеличением излучаемой мощности БС по отношению к заявленной в [1, 2].

Как следует из соотношений (8)–(10), средние уровни ЭМНТ и ЭМФ, создаваемые БС, существенно зависят от направленности излучений БС. КНД антенн БС $G_{OBS} = 5$ дБи, предложенный для базовой реализации типового сценария Indoor Hotspot-eMBB, характерен для слабонаправленных антенн, обеспечивающих постоянство ЭИИМ ($P_e = G_{OBS} P_{TRP} \approx \text{const}$) в телесном угле, стягиваемом зоной обслуживания БС. В то же время для конфигураций B, C данного сценария в перспективе предусмотрено использование АФАР с КНД лучей $G_{OBS} = 25-27$ дБи, обеспечивающих адаптивное формирование узких лучей в направлении на обслуживаемые АТ (АФАР Massive MIMO). Их использование обеспечит возможность снижения средней интенсивности ЭМФ на два порядка по сравнению со слабонаправленными антеннами БС.

На рис. 2 приведены семейства кривых $Z_{\Sigma BS}(m)$ для параметров конфигурации B при умеренном запасе мощности излучения БС $D_{\Sigma} = 10$ и различных значениях S_{tr} , декларируемых для систем 4G/5G/6G. Семейство кривых на рис. 2, a соответствует использованию слабонаправленных антенн, а на рис. 2, b – направленных антенн с КНД 25 дБи.

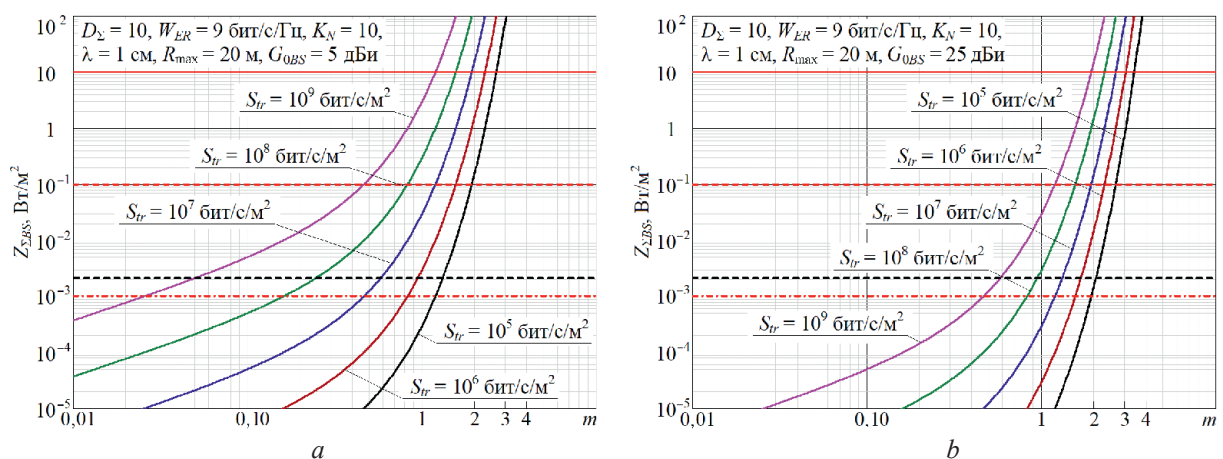


Рис. 2. Зависимость $Z_{\Sigma BS}(m)$ для конфигурации B сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G при различной средней территориальной плотности беспроводного трафика:

a – при слабонаправленных антеннах базовых станций; b – при использовании в базовых станциях многоэлементных активных фазированных антенных решеток Massive MIMO с направленным излучением

Fig. 2. Dependency $Z_{\Sigma BS}(m)$ for configuration B of the Indoor Hotspot-eMBB 5G scenario with different average territorial density of wireless traffic: a – with weakly directional base station antennas; b – when using multi-element active phased array antennas Massive MIMO with directional radiation in base stations

На рис. 2, *a*, *b* горизонтальная сплошная красная линия $Z_{\Sigma BS1} = 10 \text{ Вт/м}^2$ соответствует «тепловым» ограничениям ICNIRP [9] на интенсивность радиочастотного ЭМФ для населения, горизонтальная красная пунктирная линия $Z_{\Sigma BS2} = 0,1 \text{ Вт/м}^2$ соответствует ПДУ ЭМП, принятому в ряде стран с учетом опасности «нетепловых» эффектов воздействия ЭМП на человеческий организм, а также области ПДУ диапазона FR1 для оборудования критической инфраструктуры [8]; горизонтальная красная штрих-пунктирная линия $Z_{\Sigma BS3} = 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ соответствует границе области «уровней особых опасений», установленной стандартами строительной биологии многих развитых стран [10]; горизонтальная черная пунктирная линия $Z_{\Sigma BS} = 2,05 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ – среднему уровню ЭМФ, полученному для конфигурации *B* с использованием (8), (9) при $R_{\max} = 20 \text{ м}$, $\rho_{BS} = 0,0025 \text{ БС/м}^2$.

Выбор диапазона изменения значений параметра *m* при расчетах графиков на рис. 2 обусловлен следующим. В системах 5G технология MIMO обеспечивает выигрыш в спектральной эффективности 2–8 раз [11], для систем 6G рост спектральной эффективности радиоканалов декларируется в 5–10 раз по сравнению с системами 5G [3]. Поэтому можно предположить, что в системах 6G этот выигрыш ожидается на уровне 10–80 раз. В современных радиоканалах без использования технологии MIMO значение параметра *m* составляет не менее 1,5–2,0 вследствие неидеальности процессов модуляции/демодуляции и кодирования/декодирования, что позволяет ожидать в радиоканалах с MIMO значений $m \leq 1$ в системах 5G и $m \leq 0,1$ – в 6G.

Анализ кривых на рис. 2 позволяет сделать следующие выводы.

1. При слабонаправленном излучении БС максимальный уровень $S_{lr} = 10^5 \text{ бит/с/м}^2$, объявленный для систем 4G, может быть условно безопасным ($Z_{\Sigma BS} \leq 0,1 \text{ Вт/м}^2$) при $m \leq 2$, при использовании в БС АФАР с КНД 25 дБи максимум S_{lr} для 4G может быть достигнут при $m \leq 2,6$, что обеспечивается минимальным повышением спектральной эффективности за счет MIMO.

2. Максимальный уровень $S_{lr} = 10^7 \text{ бит/с/м}^2$, объявленный для систем 5G, при слабонаправленном излучении БС может быть безопасным при $m \leq 1,1$, что требует минимум дву-, трехкратного повышения спектральной эффективности за счет MIMO. При использовании в БС АФАР с КНД 25 дБи максимум S_{lr} для 5G может быть достигнут при $m \leq 2$, т. е. при умеренном повышении спектральной эффективности за счет MIMO.

3. Предел $S_{lr} = 10^9 \text{ бит/с/м}^2$, декларируемый для систем 6G, при слабонаправленном излучении БС может быть безопасным лишь при $m \leq 0,5$, что требует как минимум шести-, восьмикратного повышения спектральной эффективности за счет MIMO. При использовании в БС АФАР с КНД 25 дБи максимум S_{lr} для 6G может быть достигнут при $m \leq 1,1$, что требует как минимум дву-, трехкратного повышения спектральной эффективности за счет MIMO.

4. Эти выводы не учитывают вклада излучений АТ в средний уровень создаваемого ЭМФ. Однако в силу растущей асимметрии удельного трафика АТ (отношения объемов принимаемой и передаваемой информации), достигающей 100 [12], т. е. на порядок превышающей асимметрию трафика при рассмотренном типовом сценарии Indoor Hotspot-eMBB 5G, относительный вклад ЭМП АТ в суммарный уровень ЭМФ также будет меньше полученного для варианта 1 в табл. 2. Тем не менее вклад излучений АТ в среднюю интенсивность ЭМФ в хот-спотах 4G/5G/6G требует дальнейшего изучения.

5. В анализируемом случае без применения технологии MIMO и других способов значительного увеличения спектральной эффективности радиоканалов достижение предельных уровней S_{lr} для 5G/6G чревато крайне опасным превышением уровнями ЭМФ даже «теплого» ПДУ $Z_{\Sigma BS1}$ [9] как при слабонаправленном, так и при направленном излучении БС. Возможность же уменьшения среднего уровня ЭМФ до величин, не вызывающих опасений, при достижении этих предельных значений S_{lr} , маловероятна.

Заключение

1. Представленные результаты анализа позволяют сделать вывод, что реализация типового сценария Indoor Hotspot-eMBB 5G с параметрами базовых станций и абонентских терминалов, заявленными в [1, 2], безопасна и для населения, и для оборудования критической инфраструктуры. При этом значительный вклад в интенсивность электромагнитного фона (в конфигурациях *B*, *C* – преобладающий) могут вносить излучения абонентских терминалов, что требует учета при оценках электромагнитной безопасности подобных объектов, в частности, при их санитарно-гигиенической паспортизации.

2. Параметры данного сценария 5G позволяют без ущерба для безопасности приблизиться к максимальной территориальной плотности беспроводного трафика 5G путем увеличения территориальной плотности базовых станций. Дальнейшее же безопасное увеличение в хот-спотах максимальной средней территориальной плотности беспроводного трафика до уровня 10^9 бит/с/м², декларируемого для систем 6G, требует как обеспечения максимально возможной эффективности применяемой технологии МИМО в повышении спектральной эффективности радиоканалов, так и использования более сложных базовых станций и абонентских терминалов с многоэлементными активными фазированными антенными решетками Massive МИМО, обеспечивающими адаптивное формирование узких лучей с КНД 20–30 дБи, существенно снижающими создаваемую электромагнитную нагрузку на территорию (10) и увеличивающими спектральную эффективность радиоканалов W_{ER} за счет соответствующего увеличения $CNIR_R$ в (11).

3. При анализе безопасности рассмотренного сценария 5G необходимо учитывать, что создаваемый при его реализации уровень электромагнитного фона не в полной мере характеризует безопасность систем 4G/5G, имеющих многоуровневую иерархическую структуру, содержащую множество базовых станций и абонентских терминалов как вне, так и внутри зданий. Поэтому оценки электромагнитного фона, создаваемого системами 4G/5G как в помещениях, так и вне их, должны учитывать присутствие электромагнитных полей и внутренних, и внешних источников, что может быть выполнено с использованием (8)–(12) и результатов [5, 8, 13, 14]. Кроме того, сделанные выше выводы о безопасности рассмотренного сценария 5G справедливы только применительно к технологии FDD, так как для импульсных сигналов TDD 4G/5G, согласно [15], в силу их биологической «агрессивности» необходимо установить существенно более жесткие гигиенические нормативы. Очевидно, что такое же заключение напрашивается и по отношению к предельно допустимым уровням радиочастотных электромагнитных полей для оборудования критической инфраструктуры, которое может располагаться в хот-спотах 5G/6G с технологией TDD.

Список литературы / References

1. *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020*. Report ITU-R M.2412.
2. *The Outcome of the Evaluation, Consensus Building and Decision of the IMT-2020 Process (Steps 4 to 7), Including Characteristics of IMT-2020 Radio Interfaces*. Report ITU-R M.2483.
3. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., et al. (2019) 6G. *Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies*. *IEEE VT Magazine*. 14 (3), 28–41.
4. Mordachev V. (2009) *System Ecology of Cellular Communications*. Minsk, Belarus State University Publ. https://emc.bsuir.by/m/12_116413_0_176480.pdf (in Russian).
5. Mordachev V. I. (2024) Radio-Frequency Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Radiation Biology. Radioecology*. 64 (3), 305–322.
6. *Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz*. Rec. ITU-R. 1411–11.
7. CEPT Report 67. 2018, p. 17. Available: <https://docdb.cept.org/download/118>.
8. Mordachev V. I., Svistunou A. S., Sinkevich E. V. (2024) Electromagnetic Safety of 4G/5G Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 80–91. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91> (in Russian).
9. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2020) Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys*. 118 (5), 483–524.
10. Maes B. (2008) Standard of Building Biology Testing Methods. *Inst. Building Biol. + Sustainability IBN, Rosenheim, Germany, Tech. Rep. SBM-2008*.
11. *LTE-Advanced (3GPP Rel.12). Technology Introduction. White Paper, 2015, 1ma252_wp_lte_rel12_2e.pdf*. https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/lte-advanced-3gpp-rel-12-technology-introduction-white-paper-white-paper_230854-108294.html.
12. *Ericsson Mobility Reports. 2011–2022*. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports> (Accessed 25 August 2024).
13. Mordachev V. I. (2021) Characteristics of the Electromagnetic Environment Created by Radiations of User Equipment of ...4G/5G/6G Cellular (Mobile) Communications in Buildings. *Doklady BGUIR*. 19 (6), 42–50. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-42-50> (in Russian).
14. Mordachev V. (2023) Influence of the Radiating UE Distribution Irregularity in Building Internal Space on the Level of Indoor Electromagnetic Background. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2023", Krakow, Poland, Sept. 4–8*.

15. Grigoriev O. A., Zubarev Y. B. (2022) The Effects of Wireless Communication Electromagnetic Energy Influence on Persons: Predictions of the Growth for Conditioned Morbidity, Their Implementation and Problems of Evaluation. *CONCEPCII*. 1 (41), 3–17 (in Russian).

Поступила 19.11.2024

Принята в печать 18.03.2025

Received: 19 November 2024

Accepted: 18 March 2025

Сведения об авторе

Мордачев В. И., канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (НИЛ 1.7), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Information about the author

Mordachev V. I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory “Electromagnetic Compatibility of Radio-Electronic Equipment” (Lab 1.7), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich