



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-42-50>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.82

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ, СОЗДАВАЕМОЙ ИЗЛУЧЕНИЯМИ АБОНЕНТСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СОТОВОЙ (МОБИЛЬНОЙ) СВЯЗИ ...4G/5G/6G В ЗДАНИЯХ

В.И. МОРДАЧЕВ

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

Поступила в редакцию 3 мая 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Цель работы – обоснование методики оценки интенсивности электромагнитного фона, создаваемого множеством излучающих абонентских устройств мобильной связи в многоэтажных зданиях. Для известных эмпирических моделей распространения радиоволн в зданиях получены выражения для плотности распределения вероятности и математического ожидания плотности потока мощности электромагнитных полей, создаваемых внутри здания этими устройствами из различных областей внутреннего пространства здания: из ближней зоны с распространением радиоволн, аналогичным условиям свободного пространства; и из дальней зоны, для которой наряду с интенсивным затуханием радиоволн вследствие внутренних препятствий (стен, перекрытий и др.) в отдельных направлениях возможно и «квазиволноводное» распространение радиоволн вдоль коридоров и производственных помещений. Получены соотношения для средних уровней отдельных слагаемых электромагнитного фона, определяемых в виде скалярных сумм значений плотности потока мощности полей, создаваемых излучениями множеств источников как ближней зоны, так и дальней зоны в целом либо ее отдельных частей, характеризующихся различными условиями распространения радиоволн. Предложена методика оценки электромагнитного фона внутри здания сложной формы с аппроксимацией участков внутренней поверхности помещения, в котором располагается точка наблюдения, и внешней поверхности здания, во внутреннем пространстве которого случайно распределены источники излучений, соответствующими участками внутренних и внешних сферических поверхностей, стягивающими соответствующие телесные углы, в элементах пространства которых возможны различные пространственные плотности и мощности излучения источников и различные условия распространения радиоволн. Результаты могут быть использованы для анализа электромагнитной экологии помещений и электромагнитной безопасности населения при полномасштабном внедрении мобильной связи 4G/5G/6G, а также для анализа электромагнитной совместимости систем, использующих полосы частот мобильной связи на первичной и вторичной основе.

Ключевые слова: мобильная связь, 4G, 5G, 6G, многоэтажное здание, абонентское устройство, электромагнитное излучение, электромагнитный фон, распространение радиоволн, электромагнитная безопасность.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев В.И. Характеристики электромагнитной обстановки, создаваемой излучениями абонентского оборудования сотовой (мобильной) связи ...4G/5G/6G в зданиях. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 42-50.

CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT CREATED BY RADIATIONS OF USER EQUIPMENT OF ...4G/5G/6G CELLULAR (MOBILE) COMMUNICATIONS IN BUILDINGS

VLADIMIR I. MORDACHEV

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

Submitted 3 May 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The goal of the work is to substantiate the technique for assessing the intensity of electromagnetic background generated by the set of radiating user devices of mobile communications in multi-storey buildings. For known empirical models of radio wave propagation in buildings, expressions are obtained for the probability distribution density and expectation of the power flux density of electromagnetic fields generated inside building by these sources from various parts of the building's interior space: from the near zone with radio wave propagation conditions similar to free space; and from the far zone, for which, along with intense attenuation of radio waves due to internal obstacles, a «quasi-waveguide» propagation of radio waves along corridors and industrial premises is also possible in certain directions. Relationships are obtained for the average levels of individual components of the electromagnetic background, determined as scalar sums of power flux density values of the fields generated by the sets of radiating devices of both the near zone and the far zone as a whole or its individual parts, characterized by different conditions of radio wave propagation. A method is proposed for assessing the electromagnetic background inside buildings based on approximation of sections of the inner surface of the premises in which the observation point is located, and the outer surface of the building, in the inner space of which radiation sources are randomly distributed, by the corresponding sections of the inner and outer spherical surfaces that are the subtend areas of the corresponding solid angles, in space elements of which a different spatial densities and radiation powers of sources and different conditions of radio wave propagation are possible. The results can be used to analyze the electromagnetic ecology of habitat and the electromagnetic safety of population at the full-scale implementation of 4G/5G/6G mobile communications, as well as to analyze the electromagnetic compatibility of systems using frequency bands for mobile communications on a primary and secondary basis.

Keywords: mobile communications, 4G, 5G, 6G, multi-storey building, user's equipment, electromagnetic radiation, electromagnetic background, radio waves propagation, electromagnetic safety.

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

For citation. Mordachev V.I. Characteristics of the electromagnetic environment created by radiations of user equipment of ...4G/5G/6G cellular (mobile) communications in buildings. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 42-50.

Введение

Эволюция систем и услуг сотовой (мобильной) связи (СС) к четвертому (4G) и пятому (5G), а в перспективе – к шестому (6G) поколению сопровождается интенсивным ростом пространственной плотности абонентских устройств (АУ), электромагнитное излучение (ЭМИ) которых обеспечивает все многообразие беспроводных услуг телефонии и передачи данных. Эта плотность может достигать 10^5 АУ/км² в сетях 4G (IMT-Advanced), 10^6 АУ/км² в сетях 5G (IMT-2020) и 10^7 АУ/км² в перспективных сетях 6G [1, 2]. В силу большого разнообразия функций и объемов трафика передачи данных различных АУ при примерно одинаковой мощности их ЭМИ (21–23 дБм [3]) в периоды наибольшей нагрузки сетей СС средняя мощность ЭМИ (как и относительная продолжительность нахождения АУ в активном состоянии, т. е. в режиме излучения) может отличаться на несколько порядков. Тем не менее в силу очень высокой декларируемой пространственной плотности АУ СС 4G/5G/6G суммарная интенсивность создаваемого ими электромагнитного фона (ЭМФ) может превышать принятые в [4, 5] предельно допустимые уровни (ПДУ) и представлять опасность для населения [6–9].

Очевидной принципиальной особенностью максимальной пространственной концентрации АУ для реализации сервисов СС 4G/5G/6G является их объемное (3D) размещение в многоэтажных жилых, офисных и производственных зданиях. В то же время как в основных рекомендациях [1, 3 и др.], так и в известных исследованиях процессов формирования радиочастотного ЭМФ совокупностью ЭМИ абонентского оборудования и базовых станций СС [6–9 и др.] рассматривается лишь территориальное (2D) размещение АУ. В какой-то мере это может быть объяснено как трудностями объективного анализа процессов распространения радиоволн (РРВ) внутри зданий [10], так и тем, что внедрение основных сценариев реализации систем и услуг 5G находится лишь в начальной стадии. Тем не менее задача анализа характеристик ЭМФ, создаваемого совокупностью излучений АУ 4G/5G/6G при их случайном распределении по внутреннему пространству зданий, представляет все возрастающий интерес с точки зрения электромагнитной безопасности населения и электромагнитной экологии среды его обитания и деятельности, а также электромагнитной совместимости систем, использующих полосы частот СС на первичной и вторичной основе.

Цель данной работы – системный анализ общих закономерностей формирования статистических характеристик электромагнитной обстановки (ЭМО) в помещениях, образуемой множеством ЭМИ пространственно рассредоточенных АУ СС при различной степени насыщения ими внутреннего пространства зданий, и обоснование методики оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого излучающими АУ в многоэтажных зданиях.

Методика анализа

Анализ статистических характеристик интенсивности ЭМФ в рассматриваемом случае выполнен по традиционной методике [6–9], основанной на использовании известных эмпирических моделей условий РРВ в зданиях и равномерного случайного распределения излучающих АУ в пространстве, а также на определении интенсивности ЭМФ в форме скалярной суммы значений плотности потока мощности (ППМ) электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых отдельными АУ в точке наблюдения (ТН).

Модель условий РРВ. Принимая во внимание чрезвычайно сложный характер РРВ в зданиях, при решении данной задачи использованы следующие известные эмпирические модели этих условий РРВ:

1. Обобщенная эмпирическая модель затухания радиоволн [10, 11]:

$$L_t(R) = L_C (R/R_0)^{\nu}, \quad L_C = \text{const}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент, определяющий степень увеличения затухания радиоволн с увеличением расстояния до ТН и в усредненной форме отражающий влияние внутренних препятствий (стен, перекрытий, оборудования и т.п.) на процесс РРВ; R_0 – «эталонное» расстояние, определяемое с учетом особенностей расположения ТН внутри либо вне здания. Без учета «квазиволноводного» характера РРВ вдоль коридоров и помещений различного назначения в пределах прямой видимости (для этих условий $\nu \approx 1,6...1,8$), для частот основной части диапазона УВЧ и нижней части диапазона СВЧ $\nu \approx 4...6$ для РРВ внутри офисных и жилых зданий, $\nu \approx 2...3$ для РРВ в производственных зданиях, $\nu \approx 3...5$ для сотовой связи в условиях затенения городской застройкой для ТН вне помещений вблизи земной поверхности [11]. Величина R_0 определяется эмпирически для каждого случая с учетом взаимного расположения ТН и внутренних поверхностей помещения либо затеняющих элементов застройки.

2. Эмпирическая модель [12] (Ericsson indoor path loss model), являющаяся развитием модели (1) для многоэтажных зданий и частот излучения, близких к 900 МГц (что примерно соответствует частотам ЭМИ АУ в сетях mMTC 5G [3] и в полосах частот № 5, 6, 8, 12–14, 17–20, 26–28, 44, 68 LTE [13]), и характеризуемая различными значениями ν при различных расстояниях между ТН и АУ:

на расстояниях от $R_0 = 1$ м до $R_1 = 10$ м – модель (1) для РРВ в свободном пространстве с показателем степени $\nu = 2$; на расстояниях от $R_1 = 10$ м до $R_2 = 2R_1 = 20$ м – модель (1) степени $\nu = 3$; на расстояниях от $R_2 = 20$ м до $R_3 = 4R_1 = 40$ м – модель (1) степени $\nu = 6$; на расстояниях $R \geq R_3 = 4R_1 = 40$ м – модель (1) степени $\nu = 12$:

$$\left. \begin{aligned} Z &= P_e / (4\pi R^2), & R_0 \leq R \leq R_1 \\ Z &= R_1 P_e / (4\pi R^3), & R_1 \leq R \leq R_2 = 2R_1, \quad v = 3 \\ Z &= 2R_1^4 P_e / (\pi R^6), & R_2 = 2R_1 \leq R \leq R_3 = 4R_1, \quad v = 6 \\ Z &= 8192R_1^{10} P_e / (\pi R^{12}), & R_3 = 4R_1 \leq R \leq R_m \gg R_3, \quad v = 12 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где Z , Вт/м², – ППМ ЭМП в ТН, создаваемая АУ с эквивалентной изотропной излучаемой мощностью (ЭИИМ) P_e , удаленным на расстояние R от ТН.

Модель пространственного размещения АУ и ТН. Будем рассматривать случайное размещение АУ со средней плотностью ρ_e , АУ/м³, во внутреннем пространстве многоэтажного здания. В помещении, в котором находится ТН, располагается также некоторое количество АУ; условия РРВ между ТН и этими АУ можно считать соответствующими (2). Для ЭМП АУ вне этого помещения, но располагаемых внутри здания, следует использовать модель (1) с параметром $v \neq 2$, либо модель (2). В качестве первичной модели пространственного размещения ТН и множества АУ рассматривается модель, изображенная на рис. 1.

В этой модели R_m – «эталонное» расстояние, ограничивающее область свободного РРВ между ТН и АУ, R_M – радиус области радиовидимости АУ из ТН; для АУ за ее пределами уровень сигналов этих АУ в ТН меньше порогового уровня (например, пороговой чувствительности их радиоприема). Для сигналов АУ из кольцевой области, ограниченной радиусами R_m и R_M , условия РРВ в ТН усложняются за счет присутствия многочисленных препятствий в виде стен, межэтажных перекрытий и т. п.; для этих условий $v > 2$.

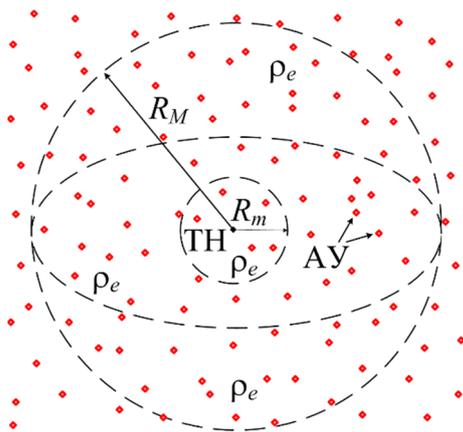


Рис. 1. 3D-модель пространственного размещения точки наблюдения (ТН) и множества АУ

Fig. 1. 3D-model of the spatial location of the observation point (OP) and the set of user equipment (UE)

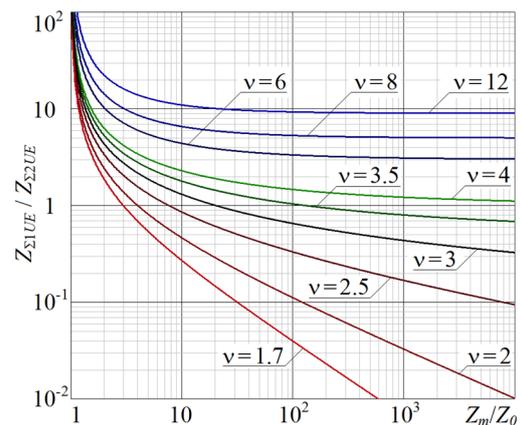


Рис. 2. Расчетные зависимости

$Z_{\Sigma UE} / Z_{\Sigma UE}$ от отношения Z_m / Z_0 для различных условий РРВ внутри здания (различных v)

Fig. 2. Dependences of $Z_{\Sigma UE} / Z_{\Sigma UE}$ on the ratio Z_m / Z_0 for different conditions of radiowave propagation inside building (different v)

Результаты анализа и их обсуждение

Для принятых моделей пространственного размещения АУ и условий РРВ между АУ и ТН, а также в предположении, что все АУ имеют ненаправленное излучение со средней ЭИИМ P_e , по известной методике [6, 7] могут быть определены следующие характеристики:

1. Плотность распределения вероятности (п.р.в.) удаленности от ТН точечных объектов «АУ», располагаемых равномерно случайно со средней плотностью ρ_e в «ближней зоне» – сферической области радиуса R_m :

$$w(R) = 3R^2 / (R_m^3), \quad 0 \leq R \leq R_m. \quad (3)$$

2. П.р.в. удаленности от ТН точечных объектов «АУ», располагаемых равномерно случайно в «дальней зоне» – сферическом кольце с параметрами R_m и R_M :

$$w(R) = 3R^2 / (R_M^3 - R_m^3), \quad R_m \leq R \leq R_M. \quad (4)$$

3. П.р.в. $w_a(Z)$ и математическое ожидание $m_{1a}(Z)$ значений ППМ Z ЭМП, создаваемых в ТН излучениями АУ ближней зоны:

$$w_a(Z) = 3Z_m^{3/2} / (2Z^{5/2}), \quad m_{1a}(Z) = 3Z_m; \quad Z \geq Z_m = P_e / (4\pi R_m^2). \quad (5)$$

Гиперболическое распределение (5) степени $-5/2$, полученное для 3D-модели случайного равномерного пространственного распределения точечных источников ЭМИ, обладает первым начальным моментом в отличие от аналогичного гиперболического распределения $w_a(Z)$ минус второй степени, характерного для 2D-модели их пространственного распределения [6, 7, 14]. Это позволяет избежать ряда ограничений и далее определять средний уровень ЭМФ как произведение среднего значения ППМ, создаваемого отдельным АУ в ТН, и среднего числа АУ в рассматриваемой области пространства.

4. Средний уровень $Z_{\Sigma 1UE}$, Вт/м², ЭМФ, образуемого в ТН излучениями АУ ближней зоны, определяется в виде скалярной суммы средних значений ППМ этих ЭМИ в ТН:

$$Z_{\Sigma 1UE} = m_{1a}(Z)N_{VS} = \rho_e P_e^{3/2} / (2\sqrt{\pi Z_m}), \quad N_{VS} = V_S \rho_e = \rho_e (P_e / Z_m)^{3/2} / (6\sqrt{\pi}), \quad (6)$$

где N_{VS} – среднее число излучающих АУ в сферической области радиуса R_m объемом V_S .

5. Для АУ, расположенных в дальней зоне, модель (1) РРВ в ТН приобретает следующий вид:

$$Z = R_m^{\nu-2} P_e / (4\pi R^\nu), \quad R_m \leq R \leq R_M. \quad (7)$$

6. П.р.в. $w_b(Z)$ ППМ ЭМП, создаваемых в ТН совокупностью АУ дальней зоны:

$$w_b(Z) = 3 / \left[\nu Z^{(3+\nu)/\nu} \left(Z_0^{-3/\nu} - Z_m^{-3/\nu} \right) \right], \quad Z_0 = R_m^{\nu-2} P_e / (4\pi R_M^\nu) \leq Z \leq Z_m. \quad (8)$$

7. Математическое ожидание $m_{1b}(Z)$ значений ППМ ЭМП, создаваемых в ТН излучениями АУ дальней зоны:

$$\left. \begin{aligned} m_{1b}(Z) &= 3Z_m^{3/\nu} Z_0^{3/\nu} \left(Z_m^{(v-3)/\nu} - Z_0^{(v-3)/\nu} \right) / \left[(v-3) \left(Z_m^{3/\nu} - Z_0^{3/\nu} \right) \right], \quad v \neq 3 \\ m_{1b}(Z) &\approx 3Z_0^{3/\nu} Z_m^{(v-3)/\nu} / (v-3), \quad v \neq 3, \quad Z_m^{3/\nu} \gg Z_0^{3/\nu}, \quad Z_m^{(v-3)/\nu} \gg Z_0^{(v-3)/\nu} \\ m_{1b}(Z) &= [Z_m Z_0 / (Z_m - Z_0)] \ln(Z_m / Z_0), \quad v = 3 \\ m_{1b}(Z) &\approx Z_0 \ln(Z_m / Z_0), \quad v = 3, \quad Z_m \gg Z_0 \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

8. Средний уровень $Z_{\Sigma 2UE}$, Вт/м², составляющей ЭМФ, образуемой в ТН излучениями АУ дальней зоны, также определяется скалярной суммой средних значений ППМ этих ЭМИ в ТН:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\Sigma 2UE} &= m_{1b}(Z)N_{VSR} = \rho_e P_e^{3/2} Z_m^{(6-3\nu)/(2\nu)} \left(Z_m^{(v-3)/\nu} - Z_0^{(v-3)/\nu} \right) / \left[2(v-3)\sqrt{\pi} \right], \quad v \neq 3 \\ Z_{\Sigma 2UE} &= m_{1b}(Z)N_{VSR} = \left[\rho_e P_e^{3/2} / (6\sqrt{\pi Z_m}) \right] \ln(Z_m / Z_0), \quad v = 3 \\ N_{VSR} &= V_{SR} \rho_e = \rho_e P_e^{3/2} Z_m^{-3/2} \left[(Z_m / Z_0)^{3/\nu} - 1 \right] / (6\sqrt{\pi}) \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где N_{VSR} – среднее число излучающих АУ в сферическом кольце дальней зоны объемом V_{SR} .

9. Суммарная средняя интенсивность $Z_{\Sigma UE}$, Вт/м², ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями множества АУ из всей сферической области их радиовидимости из ТН, определяется очевидным образом: $Z_{\Sigma UE} = Z_{\Sigma 1UE} + Z_{\Sigma 2UE}$. Интерес представляет отношение $Z_{\Sigma 1UE} / Z_{\Sigma 2UE}$, характеризующее относительный вклад излучений АУ дальней зоны в суммарный уровень ЭМФ в ТН:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\Sigma 1UE} / Z_{\Sigma 2UE} &= (v-3) / \left[(Z_m / Z_0)^{(3-v)/\nu} - 1 \right], \quad v \neq 3 \\ Z_{\Sigma 1UE} / Z_{\Sigma 2UE} &\approx v-3, \quad Z_m \gg Z_0, \quad v > 3 \\ Z_{\Sigma 1UE} / Z_{\Sigma 2UE} &\approx (3-v) (Z_0 / Z_m)^{(3-v)/\nu}, \quad Z_m \gg Z_0, \quad v < 3 \\ Z_{\Sigma 1UE} / Z_{\Sigma 2UE} &= 3 / \ln(Z_m / Z_0), \quad v = 3 \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Расчетные зависимости (11) от отношения Z_m / Z_0 для различных v приведены на рис. 2. Эти зависимости иллюстрируют наличие асимптот при $Z_m \gg Z_0$, а также позволяют примерно

оценить относительный вклад в интенсивность ЭМФ в ТН излучений АУ ближней зоны, который оказывается преобладающим только при $\nu > 4$, а при $\nu < 4$, как правило, существенно уступает вкладу излучений АУ дальней зоны.

10. На практике совокупность АУ в окрестности ТН располагается не по всему объему ближней зоны, а вблизи ее внутренней поверхности. Если все N_{VS} излучающих АУ этой области располагаются равномерно по ее внутренней поверхности на удаленности R_m от ТН, то средний уровень $Z_{\Sigma SUE}$, Вт/м², ЭМФ, создаваемого ими в ТН, определяется соотношением

$$Z_{\Sigma SUE} = N_{VS} Z_m = \rho_e P_e^{3/2} / (6\sqrt{\pi Z_m}) = Z_{\Sigma IUE} / 3 = EML_{SE} = N_{VS} P_e / (4\pi R_m^2), \quad (12)$$

где EML_{SE} – эквивалентная средняя электромагнитная нагрузка на внутреннюю сферическую границу ближней зоны, равная отношению суммарной средней мощности излучений АУ этой зоны, приходящейся на единицу площади этой границы.

11. Если излучающие АУ располагаются случайно равномерно со средней плотностью ρ_e не по всей сфере радиуса R_m и не по всему сферическому кольцу с параметрами R_m, R_M , а лишь в некотором телесном угле Ω (рис. 3), образуемом подобными стягивающими поверхностями $A_{\Omega 1}$ и $A_{\Omega 2}$ произвольной конфигурации, то соотношения (5), (6), (8), (9), (11) сохраняют силу, а средние интенсивности (6), (10) составляющих ЭМФ в ТН должны быть умножены на отношение $\Omega/4\pi$.

Это позволяет предложить общую методику определения интенсивности ЭМФ в ТН, располагаемой в помещении и в здании сложной формы, на основе аппроксимации отдельных участков внутренней поверхности S_{NZ} помещения, в котором располагается ТН (внутренней поверхности ближней зоны), и внешней поверхности здания S_{FZ} , в котором располагается это помещение (внешней поверхности дальней зоны). Эта аппроксимация осуществляется соответствующими участками внутренних и внешних сферических поверхностей, стягивающими соответствующие телесные углы $\Omega_j, j \in [1, J]$ (рис. 4).

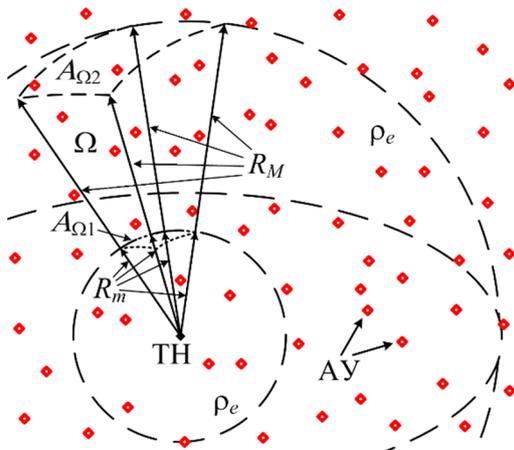


Рис. 3. Модель пространственного размещения ТН и множества АУ в телесном угле Ω , образуемом стягивающими поверхностями $A_{\Omega 1}$ на границе ближней зоны и $A_{\Omega 2}$ на границе дальней зоны

Fig. 3. Model of the spatial location of OP and the set of UE in the solid angle Ω , formed by the subtend areas $A_{\Omega 1}$ at the border of the near zone and $A_{\Omega 2}$ at the border of the far zone

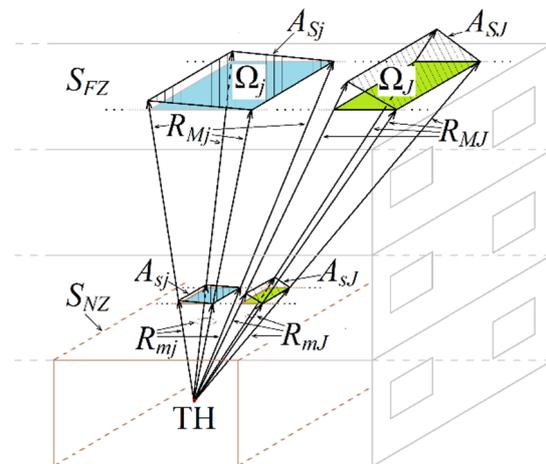


Рис. 4. Поэлементный анализ внутреннего пространства здания в отдельных телесных углах $\Omega_j, j \in [1, J]$, стягивающие поверхности которых A_{Sj}, A_{sj} аппроксимируют внешние поверхности здания и внутренние поверхности помещения соответственно

Fig. 4. Element-wise analysis of the building internal space in separate solid angles $\Omega_j, j \in [1, J]$, the subtend areas of which A_{Sj}, A_{sj} approximate the external surfaces of the building and the internal surfaces of the premises, respectively

В общем случае суммарная средняя интенсивность $Z_{\Sigma UE}$, Вт/м², ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями множества АУ, располагаемых в здании, может быть определена следующим образом:

$$Z_{\Sigma UE} = \sum_{j=1}^J Z_{\Sigma 1UEj} + \sum_{j=1}^J \Sigma_{2UEj}, \quad (13)$$

$$Z_{\Sigma 1UEj} = \rho_{e1j} P_{e1j} A_{sj} / (4\pi R_{mj});$$

$$Z_{\Sigma 2UEj} = \rho_{e2j} P_{e2j} (R_{mj} R_{mj}^{\nu_j-3} - R_{mj}^{\nu_j-2}) A_{sj} / [4\pi(\nu_j-3)R_{mj}^{\nu_j-1}], \quad \nu_j \neq 3;$$

$$Z_{\Sigma 2UEj} = A_{sj} \rho_{e2j} P_{e2j} R_{mj} \cdot \ln(R_{mj} / R_{mj}) / (4\pi R_{mj}^2) \quad \nu_j = 3,$$

где P_{e1j} , ρ_{e1j} и P_{e2j} , ρ_{e2j} – средняя ЭИИМ и средняя плотность размещения АУ в телесном угле Ω_j соответственно в пространстве ближней зоны, ограниченном стягивающей поверхностью A_{sj} , и в пространстве дальней зоны между стягивающими поверхностями A_{sj} и A_{sj} . Величины каждого из элементарных телесных углов Ω_j могут выбираться произвольно с учетом конфигурации ближней зоны и самого здания, степени равномерности пространственного распределения АУ и зависимости параметра ν условий РРВ от ориентации $\Omega_j, j \in [1, J]$.

Принимая во внимание, что модель (1) применяется для описания условий РРВ не только внутри зданий, но и вне зданий в условиях города [11], эта методика может быть использована и для оценок интенсивности ЭМФ в ТН, располагаемых вне помещений в условиях плотной многоэтажной городской застройки.

12. Для эмпирической модели (2) условий РРВ [12], уточняющей модель (1) для многоэтажных зданий и частот излучения, близких к 900 МГц, и 3D-модели пространственного размещения ТН и множества АУ внутри здания, аналогичной изображенной на рис. 1, получены следующие соотношения для суммарной средней интенсивности ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями множества АУ, распределенных случайно равномерно с плотностью ρ_e , АУ/м³, по внутреннему пространству здания:

– для области, ограниченной расстояниями от ТН до АУ от $R_0 = 1$ м до $R_1 = 10$ м, для которой характерны условия РРВ в свободном пространстве ($\nu = 2$) и адекватны статистические модели (3), (5) с параметром $R_m = R_1$, средний уровень $Z_{\Sigma 1}$ составляющей ЭМФ, образуемой в ТН излучениями АУ этой области, определяется соотношением, аналогичным (6):

$$Z_{\Sigma 1} = \rho_e P_e^{3/2} / (2\sqrt{\pi Z_{1m}}), \quad Z_{1m} = P_e / (4\pi R_1^2); \quad (14)$$

– для области, ограниченной расстояниями от ТН до АУ от $R_1 = 10$ м до $R_2 = 20$ м, для которой характерны условия РРВ с параметром $\nu = 3$ и адекватны статистические модели (4), (8) с параметрами $R_m = R_1$, $R_M = R_2$, средний уровень $Z_{\Sigma 2}$ составляющей ЭМФ, образуемой в ТН излучениями АУ этой области, определяется соотношением:

$$Z_{\Sigma 2} = (\rho_e P_e^{3/2} \ln 8) / (6\sqrt{\pi Z_{1m}}) \approx \rho_e P_e^{3/2} / (3\sqrt{\pi Z_{1m}}) \approx 0,69 Z_{\Sigma 1}; \quad (15)$$

– для области, ограниченной расстояниями от ТН до АУ от $R_2 = 20$ м до $R_3 = 40$ м, для которой характерны условия РРВ с параметром $\nu = 6$ и адекватны модель (4) с параметрами $R_m = R_2$, $R_M = R_3$ и модель (8), средний уровень $Z_{\Sigma 3}$ составляющей ЭМФ, образуемой в ТН излучениями АУ этой области, определяется соотношением:

$$Z_{\Sigma 3} = 7\rho_e P_e^{3/2} / (96\sqrt{\pi Z_{1m}}) \approx \rho_e P_e^{3/2} / (13,7\sqrt{\pi Z_{1m}}) \approx 0,22 Z_{\Sigma 2} \approx 0,15 Z_{\Sigma 1}; \quad (16)$$

– для области, ограниченной расстояниями от ТН до АУ $R \geq R_3 = 40$ м, для которой характерны условия РРВ с параметром $\nu = 12$ и адекватны модель (4) с параметром $R_m = R_3$ и параметром R_M , соответствующим удаленности от ТН границы радиовидимости АУ по уровню Z_0 , и модель (8), средний уровень $Z_{\Sigma 4}$ составляющей ЭМФ, образуемой в ТН излучениями АУ этой области, определяется соотношением

$$Z_{\Sigma 4} = \rho_e P_e^{3/2} / (192\sqrt{\pi Z_{1m}}) \approx Z_{\Sigma 3} / 14 \approx Z_{\Sigma 1} / 96, \quad R_M = 2(2R_1^{10} P_e / (\pi Z_0))^{1/12}. \quad (17)$$

Таким образом, если условия РРВ внутри здания соответствуют эмпирической модели (2) [12], то основной вклад в интенсивность ЭМФ, создаваемого излучениями всего множества АУ, распределенных случайно равномерно по внутреннему пространству многоэтажного здания, вносят излучения АУ ближней зоны, для которых условия РРВ в ТН

соответствуют условиям РРВ в свободном пространстве, а вклад ЭМИ АУ дальней зоны не превышает 3 дБ: $Z_{\Sigma UE} = Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 3} + Z_{\Sigma 4} \approx 1,85Z_{\Sigma 1}$.

Заключение

1. Для известных эмпирических моделей условий РРВ в зданиях и равномерного объемного случайного распределения излучающих АУ СС по внутреннему пространству многоэтажного здания получен ряд важных соотношений, характеризующих процессы формирования электромагнитной обстановки, создаваемой в здании этими источниками ЭМИ:

– соотношения (5), (8), (9) для статистических характеристик ансамбля значений ППМ ЭМП, создаваемых в ТН излучениями АУ из различных областей внутреннего пространства здания: из ближней зоны (помещения, в котором расположена ТН) с условиями РРВ между АУ и ТН, аналогичными условиям РРВ в свободном пространстве ($\nu = 2$); и из дальней зоны (пространства здания за пределами ближней зоны), для которой наряду с более значительным затуханием радиоволн ($\nu > 2$), обусловленным необходимостью преодоления ими элементов конструкции здания, в отдельных направлениях возможно и «квазиволноводное» РРВ ($\nu < 2$) от АУ к ТН вдоль коридоров и помещений различного назначения;

– соотношения (6), (10), (14)–(17), позволяющие оценить средние уровни отдельных слагаемых ЭМФ в ТН, определяемых в виде скалярных сумм средних значений соответствующих ансамблей ППМ ЭМП в ТН, создаваемых излучениями множеств АУ как ближней зоны, так и дальней зоны в целом либо ее отдельных частей, характеризующихся различными условиями РРВ (различными ν);

– соотношения (11) для отношения интенсивностей составляющих ЭМФ ближней и дальней зон. Полученные оценки свидетельствуют о том, что при $\nu > 3$ это отношение асимптотически приближается к значению $\nu - 3$. При $\nu > 4$ вклад ЭМП АУ ближней зоны в суммарную интенсивность ЭМФ в ТН оказывается преобладающим, но при $\nu < 4$ он существенно уступает вкладу излучений АУ дальней зоны, а при $\nu < 3$ интенсивность ЭМФ в ТН практически определяется совокупностью ЭМП АУ дальней зоны.

2. Предложена методика определения интенсивности ЭМФ в помещении здания сложной формы на основе аппроксимации участков внутренней поверхности помещения, в котором располагается ТН, и внешней поверхности здания, во внутреннем пространстве которого случайно распределены излучающие АУ. Эта аппроксимация осуществляется соответствующими подобными участками внутренних и внешних сферических поверхностей, стягивающими соответствующие телесные углы, в отдельных элементах пространства которых возможны различные пространственные плотности и ЭИИМ АУ, а также различные условия РРВ. В общем случае суммарная средняя интенсивность ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями множества АУ, располагаемых в здании, определяется соотношением (13). Эта методика может быть использована и для усредненных системных оценок интенсивности ЭМФ в ТН, располагаемых как внутри, так и вне помещений, при случайном 3D-размещении множества точечных источников ЭМИ в плотной многоэтажной городской застройке как внутри, так и вне зданий, с различной пространственной плотностью и различной ЭИИМ.

3. Соотношения (6), (10), (13), (14)–(17) могут быть использованы для анализа интенсивности ЭМФ, создаваемого в многоэтажных зданиях множеством источников ЭМИ – разнообразными мобильными АУ СС 4G/5G, функционирующими в «квазинепрерывном» режиме FDD, а также стационарными пико-базовыми станциями СС, что позволяет выполнить оценки электромагнитной безопасности населения в этих зданиях, а также ЭМС этих источников ЭМИ с системами, использующими полосы частот СС на вторичной основе.

4. Для ЭМФ, образуемого в сетях 5G множеством ЭМИ АУ массовой межмашинной связи (mMTC) и представляющего собой импульсный электромагнитный случайный процесс в виде пуассоновского потока случайных импульсов [3], соотношения (5), (8) позволяют определить п.р.в. ППМ отдельных импульсов, а соотношения (6), (10), (13), (14)–(17) позволяют оценить их суммарную среднюю мощность в различных условиях. При этом данные оценки не могут непосредственно использоваться для анализа электромагнитной безопасности населения сравнением их результатов с действующим ПДУ ЭМП 10 мкВт/см², поскольку опасные уровни средней мощности импульсного электромагнитного воздействия на один-два порядка меньше

данного ПДУ, установленного для непрерывного и квазинепрерывного электромагнитного воздействия, о чем свидетельствуют принятые гигиенические нормативы [4, 5] для этих видов электромагнитных воздействий на население и аргументация [15, 16]. Принимая во внимание сложный спектрально-временной характер этих сигналов и декларирование их использования системами СС в двух-, трехдекадном частотном диапазоне (УВЧ+СВЧ+КВЧ) [1, 3], актуальным является проведение глубоких, квалифицированных и независимых исследований степени их опасности для населения с целью научного обоснования соответствующих гигиенических нормативов, позволяющих проектировать и строить безопасные сети СС 4G/5G/6G.

Список литературы / References

1. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Rec. ITU-R M.2083;2015:19.
2. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., Karagiannidis G.K., Fan P. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*, 2019;14(3):28-41.
3. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT–2020. Report ITU-R M.2412;2017:143.
4. Requirements for radio frequency electromagnetic radiation when exposed to humans. Sanitary norms and rules registered by Belarus Ministry of Health 05.03.2015; 23. (in Russ.)
5. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. SanPiN 1.2.3685–21, reg. by Russian Ministry of Justice 29.01.202; 62296. (in Russ.)
6. Mordachev V. Worst–Case Estimation of Electromagnetic Background Created by Cellular Mobile Stations Near Ground Surface. *Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2014”*, Sweden, Sept. 1–4, 2014: 1275-1280.
7. Mordachev V. System-Level Estimation of Prevailing Levels of EM Fields of Mobile Phones Considering Near–Field Zone Limitations of Their Antennas. *Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2017”*, Angers, France, Sept. 4–8, 2017; 6: 64.
8. Mordachev V. Restrictions on Wideband Systems of Mobile Communications of New Generations at Declared Expansion of Data Transfer Rates. *Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2018”*, Amsterdam, The Netherlands, Aug. 27–30, 2018: 202–207.
9. Mordachev V. Estimation of Electromagnetic Background Intensity Created by Wireless Systems in Terms of the Prediction of Area Traffic Capacity. *Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2019”*, Barcelona, Spain, Sept. 2–6, 2019: 82-87.
10. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz. Rec. ITU-R P.1238–10; 2019: 26.
11. Rappaport T.S. [*Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd ed.*]. Prentice Hall, 2002: 710.
12. Akerberg D. Properties of a TDMA pico cellular office communication system. *IEEE Globecom*, Dec. 1988: 1343-1349.
13. ETSI TS 136 101 V14.3.0. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E–UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 14.3.0 Release 14).
14. Mordachev V. [*System ecology of cellular communications*]. Minsk: BSU Publishers; 2009: 319. (in Russ.)
15. Grigoriev O.A., Zubarev Y.B. [Electromagnetic Environment Management: Balance between Public Health and New Communication Technology]. *Vestnik Sviasy*. 2020;(12):20-27. (in Russ.)
16. Nikitina V. [Trends in the Development of Modern Radio Technologies. The Problem of Providing Electromagnetic Safety of The Population]. *Proc. of the Conf. “Actual Problems of Radiobiology and Hygiene of Non-Ionizing Radiation” (BioEMF-2019)*, Moscow, Russia, Nov. 12–13, 2019: 66-69. (in Russ.)

Сведения об авторе

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

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

Information about the author

Mordachev V.I., PhD, Associate Professor, Leading Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-84-38;
e-mail: mordachev@bsuir.by, www.emc.bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich