



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-49-57>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.82

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИФЕРИЙНОГО РАДИООБОРУДОВАНИЯ СЕТЕЙ 4G/5G НА УРОВЕНЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, СОЗДАВАЕМОГО В ЗДАНИЯХ

В. И. МОРДАЧЕВ

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

Поступила в редакцию 22.09.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Известные результаты исследований радиочастотного электромагнитного фона, создаваемого в зданиях радиочастотным электромагнитным излучением периферийного оборудования систем мобильной связи 4G/5G, включая оборудование массовой межмашинной связи/интернета вещей (mMTC/IoT) и абонентских устройств беспроводной телефонии и передачи данных, основаны на использовании модели равномерного случайного распределения этого оборудования по внутреннему объему здания. Ее адекватность при анализе ряда сценариев 4G/5G подвергается сомнению в связи с тем, что за исключением абонентских устройств, основная часть располагаемого в зданиях периферийного радиооборудования mMTC/IoT размещается на стенах помещений с тенденцией их группирования вблизи мест пересечения плоских поверхностей стен, пола и потолка. В статье приведены результаты сравнительных оценок средней интенсивности электромагнитного фона внутри здания при различном характере распределения множества точечных источников радиочастотных электромагнитных полей по внутреннему пространству здания: при их однородном равномерном распределении по его объему и при двух типах неоднородности этого распределения – при равномерном распределении источников по его внутренним поверхностям и равномерном их распределении по линиям пересечения этих поверхностей. Эти результаты свидетельствуют об относительно малом влиянии рассмотренных видов неоднородности пространственного размещения источников излучений на оценки средней интенсивности создаваемого ими электромагнитного фона внутри здания при использовании методики, основанной на представлении внутреннего пространства здания в виде совокупности телесных углов, отдельные элементы внутреннего пространства которых характеризуются постоянством средней объемной плотности источников и усредненных условий распространения радиоволн в направлении точки наблюдения.

Ключевые слова: мобильная связь, 4G, 5G, периферийное устройство, электромагнитное излучение, электромагнитный фон, распространение радиоволн, электромагнитная безопасность.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Влияние неоднородности пространственного распределения периферийного радиооборудования сетей 4G/5G на уровень электромагнитного фона, создаваемого в зданиях / В. И. Мордачев // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 49–57. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-49-57>.

INFLUENCE OF THE HETEROGENEITY OF SPATIAL DISTRIBUTION OF PERIPHERAL RADIO EQUIPMENT OF 4G/5G NETWORKS ON THE LEVEL OF ELECTROMAGNETIC BACKGROUND CREATED IN BUILDINGS

VLADIMIR I. MORDACHEV

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

Submitted 22.09.2022

Abstract. Known results of studies of the radio frequency electromagnetic background generated in buildings by electromagnetic radiation from the peripheral equipment of 4G/5G mobile communications, including equipment for massive machine-type communication/Internet of things (mMTC/IoT) and user's devices for wireless telephony and data transmission, are based on the use of a model of uniform random distribution of this equipment over the building internal space. The adequacy of this model for the analysis of a number of 4G/5G scenarios is questioned due to the fact that, excluding user's devices, the main part of the mMTC/IoT peripheral radio equipment located in buildings is distributed along the walls of the premises with a tendency to concentrate them near the intersections of flat surfaces of walls, floors and ceilings. Paper presents the results of comparative estimates of the average intensity of electromagnetic background inside building for different types of distribution of the set of point sources of RF electromagnetic fields over the building interior space: for their uniform distribution over internal space and for two types of heterogeneity of this distribution: for uniform distribution of sources over building internal surfaces and with their uniform distribution along the lines of intersection of these surfaces. Results of this analysis indicate a relatively small effect of the considered types of heterogeneity in the spatial distribution of radiation sources on the estimates of the electromagnetic background average intensity created by these sources inside the building, when using a technique based on the representation of the internal space of a building as a set of solid angles, which internal space separate sections are characterized by the constancy of the sources average space density and by the average conditions for radio waves propagation in the direction of the observation point.

Keywords: mobile communications, 4G, 5G, peripheral equipment, electromagnetic radiation, electromagnetic background, radio waves propagation, electromagnetic safety.

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

For citation. Mordachev V. I. (2023) Influence of the Heterogeneity of Spatial Distribution of Peripheral Radio Equipment of 4G/5G Networks on the Level of Electromagnetic Background Created in Buildings. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 49–57. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-49-57> (in Russian).

Введение

В [1, 2] предложена методика интегральной оценки интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого множеством излучающих периферийных устройств (ПУ) радиосвязи и беспроводной передачи данных в многоэтажных зданиях, основанная на:

– использовании модели случайного равномерного распределения ПУ равной эквивалентной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ), представляемых в виде точечных источников радиочастотных электромагнитных полей (ЭМП РЧ), по внутреннему объему здания со средней плотностью ρ [ПУ/м³], либо по внутренним объемам его I отдельных частей, либо отдельных элементов городской застройки с известными плотностями $\rho_i, i \in [1, J]$;

– использовании известной интегральной эмпирической модели [3–5] распространения радиоволн (РРВ) в зданиях;

– определении интенсивности ЭМФ в форме скалярной суммы значений плотности потока мощности (ППМ) ЭМП РЧ, создаваемых в точке наблюдения (ТН) множеством излучающих ПУ, распределенных в окружающем пространстве;

– представлении всего окружающего пространства вокруг ТН внутри здания и, при необходимости, вне его в виде совокупности относительно узких телесных углов $\Omega_j, j \in [1, J]$, стягиваемых элементами внешних поверхностей здания либо поверхностями элементов городской застройки и в сумме составляющих полный телесный угол $\Omega_\Sigma = 4\pi$.

Последнее является принципиальным преимуществом методики, обеспечивающим существование первых начальных моментов распределений вероятности значений ППМ ЭМП РЧ,

создаваемых ближайшими точечными источниками ЭМП РЧ, располагаемыми внутри каждого из телесных углов Ω_j , $j \in [1, J]$, и оказывающими наибольшее влияние на интенсивность ЭМФ в ТН. Это впервые обеспечило возможность разработки практического алгоритма интегральной оценки средней интенсивности ЭМФ в ТН, создаваемого источниками ЭМП РЧ как из окружающего пространства внутри здания, так и за его пределами, в виде скалярной суммы средних значений ППМ ЭМП РЧ в ТН. Результаты обсуждения в [2] этой методики подтвердили ее актуальность и практическую значимость, но выявили необходимость анализа ее погрешности, связанной с использованием равномерного объемного распределения источников, поскольку основная часть располагаемого в зданиях периферийного радиооборудования mMTC/LoT сетей 4G/5G размещается на стенах помещений с тенденцией их группирования вблизи мест пересечения плоских поверхностей стен, пола и потолка.

Цель исследований – сравнительный анализ оценок средней интенсивности ЭМФ в ТН внутри здания по принципам [1, 2] при различном характере распределения множества точечных источников ЭМП РЧ равной ЭИИМ по внутреннему пространству помещения: при их однородном равномерном 3D-распределении по его объему и при двух типах неоднородности этого распределения – при равномерном 2D-распределении того же количества источников по его внутренним поверхностям и при равномерном 1D-распределении данных источников по линиям пересечения этих поверхностей.

Методика анализа

Оценки относительной интенсивности ЭМФ при различном характере распределения источников внутри зданий выполнены по традиционной методике [1, 2, 6], основанной на использовании известных эмпирических моделей условий РРВ в зданиях и различных вариантов распределения излучающих ПУ в пространстве (однородного и неоднородных).

Модель условий распространения радиоволн в зданиях. Принимая во внимание интегральный характер оценок средней интенсивности ЭМФ в ТН в рассматриваемых случаях, использована следующая известная обобщенная эмпирическая модель условий РРВ в зданиях [3–5], определяющая зависимость их затухания L_t от расстояния R до их источника:

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

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 источников дальней зоны (вне помещения, в котором находится ТН), а также для частот диапазона FR1 5G (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. Величина R_0 определяется эмпирически для каждого случая с учетом взаимного расположения ТН и внутренних поверхностей помещения либо затеняющих элементов застройки. Для источников ближней зоны (в помещении, где находится ТН) для $R_0 = 1$ м и $R_0 \leq R \leq 10$ м использована модель РРВ в свободном пространстве ($\nu = 2$) [5].

В представленном на рис. 1 примере пространство внутри телесного угла Ω_j с вершиной в ТН, располагаемой в секции 1 здания 1, разделено на ближнюю зону объема V_1 , охватывающую часть внутреннего пространства секции 1, на элементы V_2, V_3 секций 2, 3 здания 1, на часть V_4 внешнего пространства и часть V_5 внутреннего пространства соседнего здания 2. Отдельные части внутреннего пространства угла Ω_j , отличающиеся средней пространственной плотностью ПУ ρ_i и условиями РРВ ν_i , $i \in [1, 5]$, в направлении на ТН, разделяются стягивающими сферическими поверхностями B_1 – B_4 , аппроксимирующими реальные поверхности раздела (стены, перекрытия и т. п.).

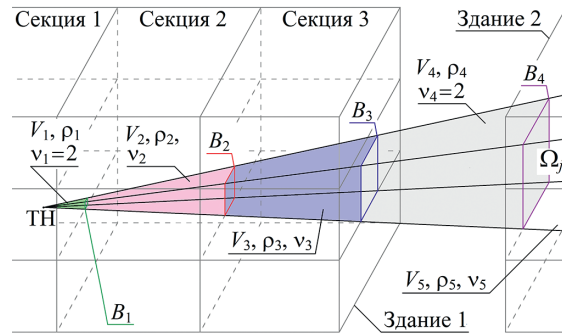


Рис. 1. Пример разделения внутреннего пространства здания в телесном угле Ω_j на области V_1-V_5
Fig. 1. An example of the division of the building inner space covered by the solid angle Ω_j into parts V_1-V_5

Модели пространственного размещения периферийных устройств – источников радиочастотных электромагнитных полей. Рассмотрим относительно небольшой телесный угол $\Omega_0 < \pi$ с вершиной в ТН, совпадающей с центром O сфер с радиусами R и $r = kR, k < 1$, стягиваемый внешней и внутренней поверхностями $G_1G_2G_3G_4$ и $g_1g_2g_3g_4$ усеченной сферической пирамиды (УСП) $G_1G_2G_3G_4g_1g_2g_3g_4$, образованной радиальными ребрами g_1G_1, g_2G_2, g_3G_3 и g_4G_4 , а также азимутальным α и зенитным β углами (рис. 2). Данная УСП использована для аппроксимации геометрии анализируемого внутреннего пространства здания, располагаемого в дальней зоне по отношению к ТН.

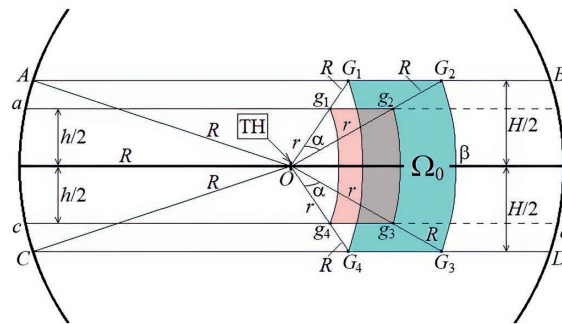


Рис. 2. Представление анализируемой области внутреннего пространства здания в виде усеченной сферической пирамиды $G_1G_2G_3G_4g_1g_2g_3g_4$
Fig. 2. Representation of the analyzed part of the building internal space in the form of truncated spherical pyramid $G_1G_2G_3G_4g_1g_2g_3g_4$

Принимая во внимание сложность как внутренней структуры зданий, так и конфигурации внешнего пространства городской застройки вокруг них, при реализации методики [1, 2], предполагающей представление пространства вокруг ТН в виде достаточно большого числа узких углов $\Omega_j, j \in [1, J]$, интерес представляет случай, когда анализируемая УСП ограничена сравнительно малыми азимутальным α и зенитным β углами. Модель (1) условий РРВ удобно представить в следующем виде:

$$Z = \frac{\text{const}}{x^v}, \quad r \leq x \leq R; \tag{2}$$

$$Z_{\min} = \frac{\text{const}}{R^v}; \quad Z_{\max} = \frac{\text{const}}{r^v} = \frac{\text{const}}{k^v R^v}; \quad Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max},$$

где Z – плотность потока мощности, Вт/м², ЭМП РЧ в ТН от источника, удаленного на расстояние x ; Z_{\min}, Z_{\max} – минимальное и максимальное значения ППМ ЭМП РЧ от источников, располагаемых в пределах рассматриваемой УСП.

Определим средние уровни ЭМФ в точке наблюдения O при следующих вариантах пространственного распределения одинакового количества излучающих ПУ в рассматриваемой УСП.

1. Источники располагаются в объеме V_{TSP} УСП (TSP – truncated spherical pyramid – усеченная сферическая пирамида) равномерно случайно со средней плотностью ρ_V [ПУ/м³] так, что их чис-

ло в ее объеме $N_{V\Sigma} = V_{TSP}\rho_V$. Объем V_{TSP} рассматриваемой УСП $G_1G_2G_3G_4g_1g_2g_3$ равен $\alpha/2\pi$ -й части разности двух величин, из них:

– первая – объем V_{ABDC} шарового слоя $ABDC$ высотой H за вычетом объемов $V_{OAB} = V_{OCD} = V_{cout}$ двух внешних конусов OAB и OCD с образующей R и радиусом основания $R\cos(\beta/2)$;

– вторая – объем V_{abdc} шарового слоя $abdc$ высотой h за вычетом объемов $V_{aOb} = V_{cOd} = V_{cin}$ внутренних конусов aOb и cOd с образующей r и радиусом основания $r\cos(\beta/2)$.

Таким образом:

$$V_{TSP} = \frac{\alpha}{2\pi}(V_{ABDC} - 2V_{cout} - V_{abdc} + 2V_{cin}); \quad N_{V\Sigma} = \rho_V V_{TSP}. \quad (3)$$

Суммарная интенсивность $Z_{\Sigma V}$ ЭМФ в ТН от излучающих ПУ, расположенных равномерно случайно в объеме УСП, запишется в виде [1, 2]:

$$Z_{\Sigma V} = N_{V\Sigma} m_{1V}(Z) \approx \frac{3Z_{\min}^{\frac{3}{v}} Z_{\max}^{\frac{3}{v}}}{(v-3) \left(Z_{\max}^{\frac{3}{v}} - Z_{\min}^{\frac{3}{v}} \right)} \left(Z_{\max}^{1-\frac{3}{v}} - Z_{\min}^{1-\frac{3}{v}} \right) \frac{\alpha R^3 \rho}{3} (1-k^3) \sin \beta, \quad v \neq 3; \quad (4)$$

$$Z_{\Sigma V} = N_{V\Sigma} m_{1V}(Z) \approx \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} \cdot \frac{\alpha R^3 \rho}{3} (1-k^3) \sin \beta, \quad v = 3, \quad (5)$$

где $m_{1V}(Z)$ – матожидание значений ППМ этих ПУ в ТН.

2. $N_{V\Sigma}$ источников располагаются случайно равномерно с плотностью ρ_S на внутренней, внешней и боковых поверхностях (гранях) анализируемой УСП. Площади $S_{R\alpha\beta}$ и $S_{r\alpha\beta}$ внешней $G_1G_2G_3G_4$ и внутренней $g_1g_2g_3g_4$ граней рассматриваемой УСП определяются значениями радиусов R и r внешнего и внутреннего шаровых слоев и углов α , β :

$$S_{R\alpha\beta} = 2\alpha R^2 \sin \frac{\beta}{2}; \quad S_{r\alpha\beta} = k^2 S_{R\alpha\beta}.$$

Площадь S_{spl} боковой поверхности рассматриваемой УСП является суммой площадей одинаковых круговых трапеций $G_1g_1g_4G_4$ и $G_2g_2g_3G_3$ и площадей двух одинаковых круговых трапеций $G_1g_1g_2G_2$ и $G_3g_3g_4G_4$:

$$S_{spl} \approx 2S_{Rr\beta} + 2S_{Rr\alpha\beta} = \beta R^2 (1-k^2) + \alpha (1-k^2) R^2 \cos \frac{\beta}{2} = R^2 (1-k^2) \left(\beta + \alpha \cos \frac{\beta}{2} \right).$$

Суммарная площадь поверхности анализируемой УСП будет равна

$$S_{TSP} = S_{RH\alpha\beta} + S_{rh\alpha\beta} + S_{spl}. \quad (6)$$

Если все $N_{V\Sigma}$ источников располагаются равномерно на внутренней, внешней и боковых поверхностях УСП, то поверхностная плотность такого размещения $\rho_S = N_{V\Sigma}/S_{TSP}$ [ПУ/м²].

Плотности потока мощности ЭМП РЧ в точке наблюдения O от источников, распределенных по внешней $G_1G_2G_3G_4$ и внутренней $g_1g_2g_3g_4$ граням, будут соответственно равны Z_{\min} и Z_{\max} . Развертка боковой поверхности рассматриваемой УСП представляет собой $(\alpha + \beta)/\pi$ -ю часть кольца с внешним R и внутренним r радиусами, что обеспечивает гиперболическое распределение вероятности степени « $-(1 + 2/v)$ » значений ППМ ЭМП РЧ от ПУ, распределенных по площади S_{spl} этой поверхности [6]. Таким образом, суммарная интенсивность $Z_{\Sigma S}$ ЭМФ в ТН от излучающих ПУ, расположенных равномерно случайно по внутренней поверхности анализируемой УСП, запишется в виде:

$$Z_{\Sigma S} = S_{R\alpha\beta} \rho_S Z_{\min} + S_{r\alpha\beta} \rho_S Z_{\max} + S_{spl} \rho_S m_{1S}(Z); \quad (7)$$

$$m_{1S}(Z) = \frac{2Z_{\min}^{\frac{2}{v}} Z_{\max}^{\frac{2}{v}} \left(Z_{\max}^{1-\frac{2}{v}} - Z_{\min}^{1-\frac{2}{v}} \right)}{(v-2) \left(Z_{\max}^{\frac{2}{v}} - Z_{\min}^{\frac{2}{v}} \right)}, \quad v \neq 2; \quad m_{1S}(Z) = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}}, \quad v = 2, \quad (8)$$

где $m_{1S}(Z)$ – матожидание значений ППМ в ТН от ПУ, располагаемых случайно равномерно со средней плотностью ρ_S на боковых поверхностях анализируемой УСП.

3. $N_{V\Sigma}$ источников располагаются случайно равномерно с плотностью ρ_L на внутренних, внешних и боковых ребрах анализируемой УСП. Плотности потока мощности ЭМП РЧ в точке наблюдения O от источников, распределенных по ребрам внешней $G_1G_2G_3G_4$ и внутренней $g_1g_2g_3g_4$ граней УСП, будут, как в пункте 2, равны Z_{\min} и Z_{\max} , а периметры этих граней $L_{R\alpha\beta}$ и $L_{r\alpha\beta}$ запишутся в виде:

$$L_{R\alpha\beta} = 2R \left(\beta + \alpha \cos \frac{\beta}{2} \right); \quad L_{r\alpha\beta} = kL_{R\alpha\beta}.$$

Суммарная длина боковых и всех ребер усеченной сферической пирамиды $G_1G_2G_3G_4g_1g_2g_3g_4$ соответственно:

$$L_{Rrsp} = 4(R - r) = 4R(1 - k);$$

$$L_{\Sigma Rr\alpha\beta} = L_{R\alpha\beta} + L_{r\alpha\beta} + L_{Rrsp} = 2R(1 + k) \left(\beta + \alpha \cos \frac{\beta}{2} \right) + 4R(1 - k). \quad (9)$$

Если все $N_{V\Sigma}$ источников располагаются равномерно на ребрах усеченной сферической пирамиды, то линейная плотность такого размещения $\rho_L = N_{V\Sigma}/L_{\Sigma Rr\alpha\beta}$ [ПУ/м]. В силу идентичности и характера расположения боковых ребер УСП по отношению к ТН распределение вероятности значений ППМ ЭМП РЧ от ПУ, распределенных по этим ребрам, будет гиперболическим степени « $-(1 + 1/\nu)$ » [6]. Таким образом, для представляющей практический интерес области значений $\nu > 1,5$ суммарная интенсивность $Z_{\Sigma L}$ ЭМФ в ТН от излучающих ПУ, расположенных равномерно случайно по ребрам УСП, запишется в виде:

$$Z_{\Sigma L} = L_{R\alpha\beta}\rho_L Z_{\min} + L_{r\alpha\beta}\rho_L Z_{\max} + L_{Rrsp}\rho_L m_{1L}(Z); \quad (10)$$

$$m_{1L}(Z) = \frac{Z_{\min}^{\frac{1}{\nu}} Z_{\max}^{\frac{1}{\nu}}}{(\nu - 1) \left(Z_{\max}^{\frac{1}{\nu}} - Z_{\min}^{\frac{1}{\nu}} \right)} \left(Z_{\max}^{1 - \frac{1}{\nu}} - Z_{\min}^{1 - \frac{1}{\nu}} \right), \quad \nu > 1, \quad (11)$$

где $m_{1L}(Z)$ – матожидание значений ППМ в ТН от ПУ, располагаемых случайно равномерно со средней плотностью ρ_L на ребрах УСП.

4. Внутренний объем УСП разделен на n^3 секций равной длины $\Delta R = (R - r)/n$ и равных угловых размеров α/n и β/n . Выполняется сравнение средней интенсивности ЭМФ в ТН от $N_{V\Sigma}$ излучающих ПУ, расположенных равномерно случайно по всему объему УСП, со средней интенсивностью ЭМФ в ТН в ситуациях, когда эти источники ЭМП РЧ располагаются случайно равномерно на всех гранях секций анализируемой УСП и когда они распределены случайно равномерно по ребрам всех секций анализируемой УСП.

Результаты анализа и их обсуждение

На рис. 3, *a, b* приведены расчетные зависимости отношения $Z_{\Sigma S} / Z_{\Sigma V}$ средней интенсивности ЭМФ в ТН для случаев, когда источники распределены равномерно по стенкам и объему усеченной сферической пирамиды, от параметра $k = r/R$, характеризующего относительную длину анализируемого пространства в направлении на ТН. Расчеты выполнены с использованием соотношений (4), (5), (7) и (8) для различных условий РРВ для относительно узкого (рис. 3, *a*: $\alpha = \beta = \pi/18$) и достаточно широкого телесного угла Ω_0 (рис. 3, *b*: $\alpha = \beta = \pi/3$). На рис. 4, *a, b* представлены аналогичные расчетные зависимости отношения $Z_{\Sigma S} / Z_{\Sigma V}$ от $k = r/R$ для случая, когда внутреннее пространство УСП разделено на 64 секции ($n = 4$).

Расчетные зависимости отношения $Z_{\Sigma L} / Z_{\Sigma V}$ средней интенсивности ЭМФ в ТН для случаев, когда источники распределены равномерно по ребрам и объему усеченной сферической пирамиды, от параметра $k = r/R$ приведены на рис. 5, *a, b*. Для сопоставления со случаем их распределения по граням УСП расчеты с использованием (4), (5), (10), (11) также выполнены для различных ν , для $\alpha = \beta = \pi/18$ (рис. 5, *a*) и $\alpha = \beta = \pi/3$ (рис. 5, *b*). На рис. 6, *a, b* представлены аналогичные расчетные зависимости отношения $Z_{\Sigma L} / Z_{\Sigma V}$ от $k = r/R$ для случая, когда внутреннее пространство УСП разделено на 64 секции ($n = 4$).

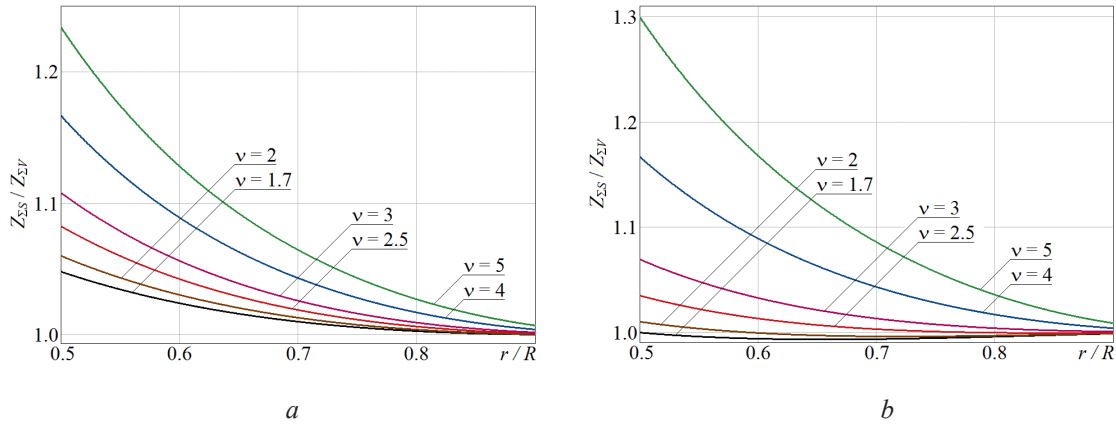


Рис. 3. Зависимости отношения суммарной интенсивности электромагнитного фона в точке наблюдения для случаев, когда источники распределены по поверхностям граней и по объему усеченной сферической пирамиды, от $k = r/R$ при $n = 1$: a – при $\alpha = \beta = 10^\circ$; b – при $\alpha = \beta = 60^\circ$
Fig. 3. Dependences of the ratio of the total electromagnetic background intensity in the observation point for the cases when sources are distributed over the surfaces of the faces and the volume of the truncated spherical pyramid, on $k = r/R$ at $n = 1$: a – at $\alpha = \beta = 10^\circ$; b – at $\alpha = \beta = 60^\circ$

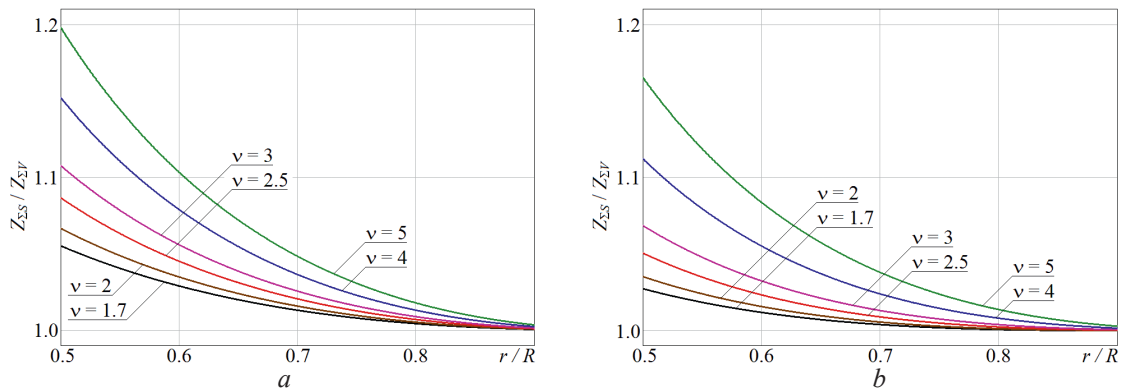


Рис. 4. Зависимости отношения суммарной интенсивности электромагнитного фона в точке наблюдения для случаев, когда источники распределены по поверхностям граней 64 секций ($n = 4$) усеченной сферической пирамиды и по ее объему, от $k = r/R$: a – при $\alpha = \beta = 10^\circ$; b – при $\alpha = \beta = 60^\circ$
Fig. 4. Dependences of the ratio of the total intensity electromagnetic background in the observation point for the cases when sources are distributed over the surfaces of the faces of 64 sections ($n = 4$) of a truncated spherical pyramid and over its volume, on $k = r/R$: a – at $\alpha = \beta = 10^\circ$; b – at $\alpha = \beta = 60^\circ$

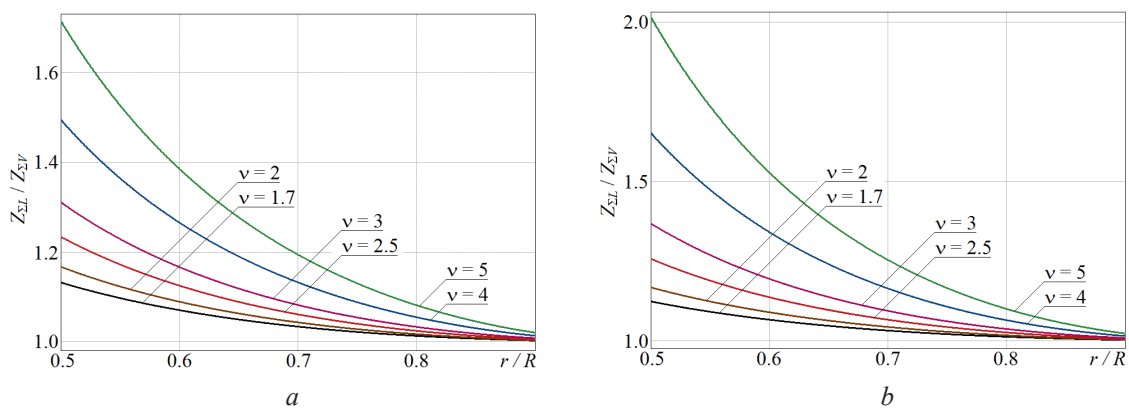


Рис. 5. Зависимости отношения суммарной интенсивности электромагнитного фона в точке наблюдения для случаев, когда источники распределены по ребрам и по объему усеченной сферической пирамиды, от $k = r/R$ при $n = 1$: a – при $\alpha = \beta = 10^\circ$; b – при $\alpha = \beta = 60^\circ$
Fig. 5. Dependences of the ratio of the total intensity electromagnetic background in the observation point for the cases when the sources are distributed along the edges and volume of a truncated spherical pyramid, on $k = r/R$ at $n = 1$: a – at $\alpha = \beta = 10^\circ$; b – at $\alpha = \beta = 60^\circ$

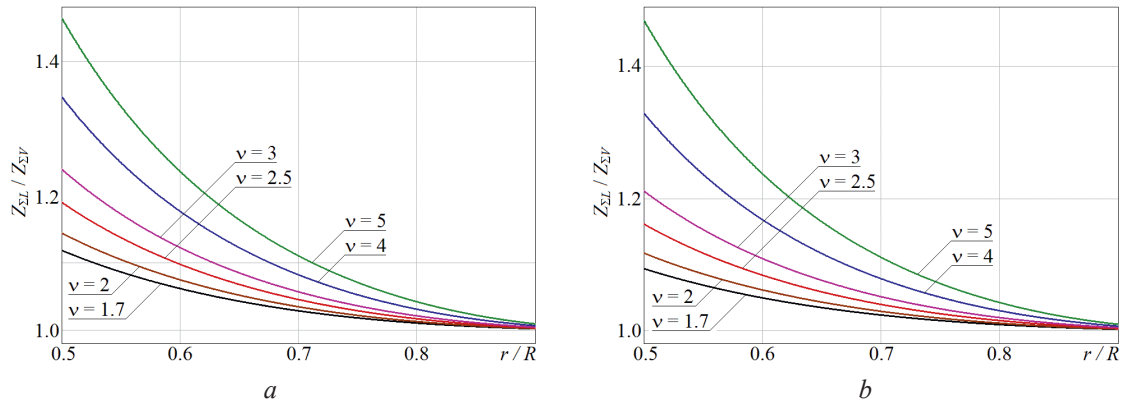


Рис. 6. Зависимости отношения суммарной интенсивности электромагнитного фона в точке наблюдения для случаев, когда источники распределены по ребрам 64 секций усеченной сферической пирамиды ($n = 4$) и по ее объему, от $k = r/R$: a – при $\alpha = \beta = 10^\circ$; b – при $\alpha = \beta = 60^\circ$

Fig. 6. Dependences of the ratio of the total intensity electromagnetic background in the observation point for the cases when sources are distributed over the surfaces of 64 sections ($n = 4$) of a truncated spherical pyramid and over its volume, on $k = r/R$: a – at $\alpha = \beta = 10^\circ$; b – at $\alpha = \beta = 60^\circ$

Анализируя приведенные расчетные зависимости, можно отметить, на что необходимо обратить внимание.

1. Следует ожидать, что по сравнению с однородным распределением ПУ-источников ЭМП РЧ по внутреннему пространству зданий их неоднородное по объему равномерное размещение на внутренних поверхностях зданий либо на стыках этих поверхностей, как правило, обеспечивает увеличение средней интенсивности электромагнитного фона в точках наблюдения внутри здания:

- до 0,8–1,2 дБ ($v = 4$ –5) при поверхностном распределении и до 2–3 дБ при линейном размещении периферийных устройств на стыках внутренних поверхностей;
- до 0,2–0,3 дБ ($v = 1,7$ –2,5) при поверхностном распределении и до 0,8–1,0 дБ при линейном размещении периферийных устройств на стыках внутренних поверхностей.

2. Описанное в п. 1 ожидаемое увеличение средней интенсивности ЭМФ сравнительно слабо зависит от ширины телесного угла Ω_0 , но существенно зависит от относительной длины анализируемой части пространства (параметра k), в котором размещаются ПУ, и от условий РРВ. При росте k до 0,7–0,8 (сокращении относительной длины УСП в направлении на ТН до 20–30 %) влияние рассмотренных видов неоднородности распределения ПУ по внутреннему пространству здания на среднюю интенсивность электромагнитного фона, создаваемого ими в ТН, резко ослабевает и становится пренебрежимо малым: ожидаемый рост средней интенсивности ЭМФ не превышает 0,25–0,35 дБ при распределении ПУ по внутренним поверхностям зданий и 0,80–1,20 дБ для линейного размещения ПУ на стыках внутренних поверхностей даже при $v = 4$ –5.

3. Увеличение средней интенсивности ЭМФ в ТН внутри здания, как при размещении ПУ на внутренних поверхностях зданий, так и при их размещении на стыках этих поверхностей, по сравнению с их объемным распределением по внутреннему пространству УСП существенно зависит от условий РРВ, и тем значительнее, чем больше значение параметра v в модели РРВ (1), (2). Однако влияние данного обстоятельства на суммарный уровень ЭМФ в здании существенно ослаблено в силу того, что, как правило, чем выше значение v для источников ЭМП РЧ некоторой области внутреннего пространства здания, тем больше удаленность этой области от ТН и меньше вклад источников этой области в уровень ЭМФ в ТН. Это подтверждается результатами [1, 2] для модели РРВ [5] и равномерного объемного распределения источников, свидетельствующими о том, что если вклад в суммарную интенсивность ЭМФ области внутреннего пространства с параметрами $k = 0,5$, $v = 3$ составляет $\approx 37\%$, то вклад области с $k = 2/3$ и $v = 6$ – всего $\approx 8\%$, а вклад области с $k \ll 1$ и $v = 12$ – менее 1 %.

4. Следует принимать во внимание, что переход от модели равномерного распределения ПУ по внутреннему пространству здания к моделям их неоднородного распределения по внутренним поверхностям помещений либо по линиям их стыков должен сопровождаться соответствующим учетом изменения вклада в уровень ЭМФ источников «ближней зоны» радиуса r (части пространства помещения, в котором располагается точка наблюдения). Результаты, приведенные в [1, 2], позволяют сделать вывод, что если совокупность ПУ-источников ЭМП РЧ в окрестности ТН располагается не по всему объему ближней зоны, а вблизи ее границы, то их вклад в уровень

ЭМФ уменьшается до трех раз, что практически полностью компенсирует полученное выше увеличение вклада излучений ПУ за пределами «ближней зоны» при их неоднородном по отношению к внутреннему объему здания распределении по внутренним поверхностям либо по линиям их стыков (пересечений).

Заключение

1. По сравнению с равномерным распределением периферийных устройств – источников радиочастотных электромагнитных полей по внутреннему пространству зданий их равномерное размещение на внутренних поверхностях зданий либо равномерное линейное распределение вдоль стыков этих поверхностей, как правило, вызывает некоторое увеличение средней интенсивности электромагнитного фона, создаваемого источниками «дальней зоны» в точке наблюдения внутри здания, причем при линейном распределении источников увеличение интенсивности электромагнитного фона примерно в 1,5 раза (на $\approx 1,8$ дБ) больше, чем при их распределении по поверхностям. Данное увеличение относительно мало зависит от ширины анализируемого телесного угла, но существенно – от относительной длины $k = r/R$ анализируемой части пространства в направлении на точку наблюдения и от условий распространения радиоволн (параметра v).

2. При относительно малых k и больших v увеличение интенсивности электромагнитного фона может достигать 3–5 дБ, однако для представляющих наибольший практический интерес значений $k \geq 0,5$ и $v \leq 5$ переход от однородного объемного распределения источников к их поверхностному либо линейному распределению обеспечивает рост вклада радиочастотных электромагнитных полей источников «дальней зоны» в суммарную интенсивность электромагнитного фона в точке наблюдения не более 2–3 дБ. Поскольку изменение характера распределения источников «ближней зоны» (помещения, в котором расположена точка наблюдения) вызывает уменьшение вклада их радиочастотных электромагнитных полей в суммарную интенсивность электромагнитного фона до 4–5 дБ [1, 2], указанные изменения вкладов источников «дальней» и «ближней» зон практически взаимно компенсируются, и переход от однородного равномерного к рассмотренным типам неоднородного распределения источников по внутреннему пространству здания практически не влияет на интегральные оценки создаваемого ими электромагнитного фона внутри здания.

References

1. 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. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-42-50> (in Russian).
2. Mordachev V. (2022) System Analysis of Electromagnetic Environment Created by Radiating 4G/5G User Equipment Inside Buildings. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2022"*, Sweden, Sept. 5–8. 525–530. DOI: 10.1109/EMCEurope51680.2022.9900959.
3. Recommendation ITU-R P.1238-10. *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*. 2019. 28.
4. Rappaport T. S. (2002) *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Prentice Hall. 710.
5. Akerberg D. (1988) Properties of a TDMA Pico Cellular Office Communication System. *IEEE Globecom*. 1343–1349.
6. Mordachev V. I. (2009) *System Ecology of Cellular Communications*. Minsk, BSU Publ. 319 (in Russian).

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
Мордачев Владимир Иванович

Information about the author

Mordachev V. I., Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher of the 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