



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-56-64>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.82

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ НА УРОВЕНЬ СОЗДАВАЕМОГО ИМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА

В. И. МОРДАЧЕВ, Д. А. ЦИОНЕНКО

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

Поступила в редакцию 24.03.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Радиочастотное электромагнитное излучение базовых станций является основным источником электромагнитного фона, создаваемого системами мобильной (сотовой) связи на селитебной территории; его интенсивность вносит существенный вклад в уровень электромагнитного загрязнения среды обитания и определяет степень электромагнитной безопасности населения. Предложенная ранее методика оценки средней интенсивности этого фона, основанная на анализе территориальной интенсивности мобильного трафика, учитывает пространственную избирательность излучений базовых станций в упрощенной форме путем введения параметра направленности излучения U , обратного числу секторов обслуживания базовой станции, в предположении равенства ширины главного лепестка диаграммы направленности излучения ширине этого сектора и без учета направленности излучения в вертикальной плоскости, что определяет пессимистический характер этих оценок. Выполнен уточненный анализ значений параметра U для двухуровневой модели диаграмм направленности антенн, отражающей реальные значения ширины их главного лепестка в горизонтальной и вертикальной плоскостях, относительные уровни боковых лепестков и соотношение мощностей излучений по главному и боковым лепесткам. Анализ проведен как для стационарных секторных антенн систем сотовой связи, так и для адаптивных активных фазированных антенных решеток 4G/5G, способных обеспечивать обслуживание с использованием узких лучей. Установлено, что значение параметра U секторных антенн на 5–15 дБ меньше величины, обратной числу секторов базовой станции, а для узких лучей адаптивных антенных решеток это различие достигает 20 дБ. При углах наклона главных лепестков по отношению к горизонту менее 30° при оценке средней интенсивности электромагнитного фона в качестве параметра U пространственной избирательности (направленности) излучений базовых станций может быть использовано значение, обратное коэффициенту усиления антенны в главном лепестке.

Ключевые слова: мобильная связь, базовая станция, электромагнитное излучение, пространственная избирательность, антенна, диаграмма направленности, главный лепесток, боковые лепестки, азимут, угол визирования, электромагнитный фон.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев В. И., Ционенко Д. А. Влияние пространственной избирательности излучения базовых станций мобильной связи на уровень создаваемого ими электромагнитного фона. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 56–64.

INFLUENCE OF SPATIAL SELECTIVITY OF RADIATION OF MOBILE COMMUNICATION BASE STATIONS ON THE LEVEL OF ELECTROMAGNETIC BACKGROUND INTRODUCED BY THEM

VLADIMIR I. MORDACHEV, DZMITRY A. TSYANENKA

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

Submitted 24.03.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Radio frequency electromagnetic radiation from base stations is the main source of electromagnetic background generated by mobile (cellular) communication systems in residential areas; its intensity makes a significant contribution to the level of electromagnetic pollution of the habitat and determines the level of electromagnetic safety of the population. The previously proposed technique for estimating the average intensity of this background, based on the analysis of the territorial intensity of mobile traffic, takes into account the spatial selectivity of base station radiation in a simplified form by introducing the radiation directivity parameter U , equal to the inverse of the number of base station service sectors, assuming that the width of the main lobe of the radiation pattern is equal to the width of this sector and without taking into account the radiation directivity in the vertical plane, which determines the pessimistic nature of these estimates. The paper presents a refined analysis of the values of the parameter U for a two-level models of antenna radiation patterns, which reflects the real values of the width of their main lobes in horizontal and vertical planes, the relative levels of side lobes and the ratio of radiation power of the main and side lobes. The analysis was performed both for stationary sector antennas of cellular communication systems and for adaptive phased antenna arrays of 4G/5G systems capable of providing service using narrow beams. The analysis showed that the value of the U parameter of sector antennas is 5–15 dB less than the inverse of the number of sectors of base stations, and for narrow beams of adaptive antenna arrays, this difference reaches 20 dB. If tilt angles of main lobes of antenna radiation patterns with respect to the horizon are less than 30° , then at estimation of the average electromagnetic background intensity the inverse of their antenna gain in the main lobe can be used as the U parameter value of the spatial selectivity (directivity) of base stations radiations.

Keywords: mobile communications, base station, electromagnetic radiation, spatial selectivity, antenna, pattern, main lobe, side lobes, azimuth, viewing angle, electromagnetic background.

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

For citation. Mordachev V. I., Tsyankenka D. A. Influence of Spatial Selectivity of Radiation of Mobile Communication Base Stations on the Level of Electromagnetic Background Introduced by them. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 56–64.

Введение

Электромагнитное загрязнение среды обитания, вызванное интенсивным применением систем беспроводного информационного обслуживания общества, их проникновением во все сферы человеческой деятельности, становится острой техногенной проблемой современности. Стремительная эволюция поколений мобильной (сотовой) связи (МС) 4G→5G→6G определяет одно из главных направлений прогресса человечества. МС 4G/5G/6G глубоко интегрируется со всеми сферами человеческого бытия, но при этом использует потенциально опасные для здоровья населения технологии. При определенных условиях это может стать причиной ухудшения электромагнитной экологии среды обитания и недопустимого роста вынужденных и добровольных рисков для здоровья населения.

В [1–3] предложена и верифицирована с использованием опубликованных результатов экспериментальных исследований электромагнитной обстановки (ЭМО) в десятках стран пяти континентов методика оценки средней суммарной интенсивности радиочастотного электромагнитного фона (ЭМФ РЧ), создаваемого электромагнитными излучениями (ЭМИ)

базовых станций (БС) МС на основе анализа системных характеристик радиосетей мобильной связи: средней территориальной плотности беспроводного трафика (Area Traffic Capacity, ATC); средней электромагнитной нагрузки на территорию (ЭМНТ) (Electromagnetic Loading on Area), создаваемой ЭМИ БС в различных полосах частот МС; спектральной эффективности передачи данных по прямым (нисходящим) радиоканалам и т. п. Данная методика позволяет учесть влияние пространственной избирательности ЭМИ БС на интенсивность создаваемого ЭМФ РЧ, однако результаты анализа этого влияния до настоящего времени отсутствуют. Такой анализ приобретает особую актуальность в связи с применением в БС МС 4G/5G активных фазированных антенных решеток (АФАР) – АФАР 2D ММО, обеспечивающих формирование в секторе обслуживания шириной 90° – 120° «веерной» многолучевой диаграммы направленности (ДН) с шириной каждого луча 12° – 36° , и АФАР Massive ММО, при использовании технологии Beamforming, обеспечивающей формирование индивидуальных относительно узких лучей для каждой из обслуживаемых абонентских станций (АС) [4].

Цель исследований авторов – уточнение влияния направленности ЭМИ БС в горизонтальной и вертикальной плоскостях на интенсивность ЭМФ РЧ, создаваемого радиосетями МС.

Методика анализа

Основные соотношения для оценки интенсивности ЭМФ РЧ, создаваемого БС

Пессимистическая оценка (оценка наихудшего случая) средней суммарной интенсивности ЭМФ $Z_{BS\Sigma}$ [Вт/м²], создаваемого в некоторой случайно выбранной точке наблюдения (ТН) у земной поверхности на высоте $H_{OP} \approx 1$ – 2 м (примерно соответствующей высоте человеческого роста) множеством БС МС, расположенных в области радиовидимости из ТН, с высотами подвеса антенн $H_{BS} \gg H_{OP}$, определяется следующим соотношением [1–3]:

$$Z_{BSk} \approx \frac{B}{2} \ln \left(\frac{4H_{OP}\sqrt{e}}{\lambda} \right), \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}; \quad Z_{BS\Sigma} = \sum_{k=1}^K |Z_{BSk}|, \quad (1)$$

где B – средняя ЭМНТ, создаваемая излучениями БС на рассматриваемой территории, Вт/м²; λ – длина волны используемой полосы частот; $Z_{BS\Sigma}$ – определяется как скалярная сумма значений Z_{BSk} , $k \in [1, K]$ плотности потока мощности ЭМИ K БС, наблюдаемых в ТН.

Средняя ЭМНТ, создаваемая множеством K источников ЭМИ, распределенных равномерно по территории площадью S , м², определяется как сумма значений охватывающей эту территорию полной излучаемой мощности (covering total radiated power, CTRP [3]) P_{ek} каждого источника, приходящаяся на единицу территории:

$$B = \frac{\sum_{k=1}^K P_{ek}}{S}; \quad P_{Sk} \approx \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\pi P_k(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi; \quad P_k(\theta, \varphi) = P_{Txk} g_k(\theta, \varphi), \quad (2)$$

где P_{Sk} – часть полной излучаемой мощности P_{Txk} (total radiated power, TRP [5]) k -го источника, излученной его антенной в телесном угле $\Omega \leq 2\pi$, охватывающем подстилающую поверхность S , за вычетом потерь в антенно-фидерном тракте; $P_k(\theta, \varphi)$ – мощность ЭМИ антенны k -го источника в направлении $\{\theta, \varphi\}$; $g_k(\theta, \varphi)$ – нормированная ДН антенны k -го источника, характеризующая пространственную избирательность его ЭМИ.

Приблизительное равенство в (2) отражает тот факт, что диапазон углов визирования сферической земной поверхности из расположенного над ней фазового центра антенны БС несколько меньше π . В (2) при вычислении P_{ek} интегрирование производится только по нижней полусфере (рис. 1) в телесном угле с вершиной O в фазовом центре антенны БС, стягиваемом земной поверхностью, так как ЭМИ верхней полусферы не участвуют в формировании ЭМО и в образовании ЭМФ РЧ у земной поверхности. В этом состоит отличие параметра P_{ek} CTRP от TRP в [5]. Поскольку мощности, излучаемые современными антеннами по главному лепестку ДН и вне его, имеют близкие значения [6], величины параметра CTRP оказываются на 1–3 дБ меньше значений TRP.

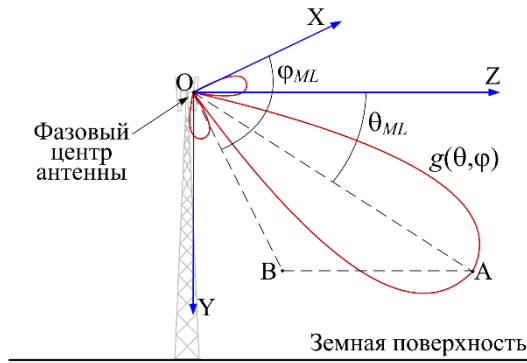


Рис. 1. Диаграмма направленности антенны источника электромагнитных излучений в сферических координатах $\{\theta, \varphi\}$: φ_{ML} , θ_{ML} – параметры направления оси главного лепестка (ГЛ); OB – проекция оси ГЛ на плоскость XY

Fig. 1. The antenna pattern of the electromagnetic radiation source in spherical coordinates $\{\theta, \varphi\}$: φ_{ML} , θ_{ML} – the direction parameters of the main lobe (ML) axis; OB – projection of the ML axis onto the XY plane

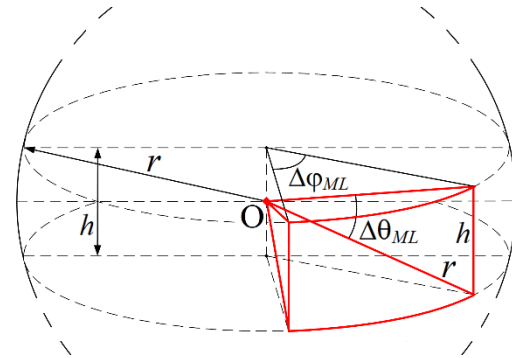


Рис. 2. Определение главного лепестка двухуровневой модели диаграммы направленности антенны как части сферы с вершиной в фазовом центре O , ограничиваемой углами $\Delta\varphi_{ML}$ и $\Delta\theta_{ML}$

Fig. 2. Determination of the main lobe of a two-level model of antenna pattern as a part of a sphere with apex at the phase center O , limited by angles $\Delta\varphi_{ML}$ and $\Delta\theta_{ML}$

При равномерном случайном распределении обслуживаемых АС по территории со средней плотностью ρ , АС/м², если каждая АС осуществляет радиоприем потока данных со скоростью v , бит/с, то средняя территориальная плотность трафика информационного обслуживания населения по прямым каналам БС будет определяться как $S_{tr} = \rho v$, бит/с/м², и создаваемая БС МС средняя ЭМНТ B , Вт/м², составит [2, 3]:

$$B(R_{\max}, S_{tr}, K_{CC}, W_{ER}, m, \lambda) = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N D_{\Sigma} (2^{m W_{ER}} - 1) R_{\max}^2 S_{tr} U}{\lambda^2 W_{ER}}; \quad D_{\Sigma} = (K_{CC} + 1) L_m L_c K_H, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; K_N – коэффициент шума радиоприемника, ед.; T_0 – температура окружающей среды, град. ($T_0 = 290$ К); W_{ER} – спектральная эффективность передачи информации в нисходящем радиоканале (РК) БС, в m раз отличающаяся от потенциальной, определяемой в соответствии с известной теоремой Шеннона-Хартли, бит/с/Гц; $K_{CC} = N_{INT} / N_0$ – коэффициент, характеризующий создаваемое в РК превышение уровнем внутрисетевой помехи N_{INT} уровня теплового шума N_0 ; S_{tr} – средняя АТС, создаваемая множеством БС на рассматриваемой территории, бит/с/м² (интегральная системная характеристика мобильной связи 4G/5G/6G [7, 8]); R_{\max} – радиус зоны обслуживания БС, на границе которой обслуживание АС с необходимым отношением «сигнал/(помеха+шум)» (SINR) требует максимальной эквивалентной изотропной излучаемой энергии БС на бит передаваемой информации; D_{Σ} – совокупный запас в мощности излучения БС, связанный с необходимостью преодоления внутрисистемных помех, компенсации потерь L_m на затухание радиоволн в зданиях, потерь на замирания L_c при распространении радиоволн в «каньонах» городской застройки вследствие многолучевости и дифракции, а также с необходимым запасом K_H в уровне принимаемого сигнала АС для реализации хендвера; $U = P_{AR} / P_{AI} < 1$ – системный параметр направленности ЭМИ БС, определяемый как отношение значений совокупной мощности P_{AR} ЭМИ БС, облучающей область S радиовидимости БС с земной поверхности, для случая реальной антенны БС с ДН $g(\theta, \varphi)$ и главным лепестком (ГЛ), направленным на обслуживаемую АС, и совокупной мощности P_{AI} идеальной всенаправленной (изотропной) антенны БС, облучающей эту область, при условии, что на входе радиоприемника АС, расположенной в точке, соответствующей направлению $\{\theta_{ML}, \varphi_{ML}\}$ оси ГЛ, в обоих случаях присутствует сигнал одинакового уровня, не ниже соответствующего необходимому значению SINR на границе зоны обслуживания БС: $P_{AR}(\theta_{ML}, \varphi_{ML}) = P_{AI}(\theta_{ML}, \varphi_{ML})$; U – параметр направленности, в интегральной форме характеризующий пространственную избирательность ЭМИ БС МС при передаче информации по прямым каналам.

Таким образом, если известна нормированная ДН $g(\theta, \varphi)$ антенны БС по азимуту φ и углу визирования θ по плотности потока мощности, то параметр ЭМИ БС определяется ее интегрированием по телесному углу, охватывающему поверхность S :

$$U = \frac{P_{AK}}{P_{AI}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\pi g_N(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi; \quad g_N(\theta, \varphi) = \frac{g(\theta, \varphi)}{g(\theta_{ML}, \varphi_{ML})} \leq 1. \quad (4)$$

Если структура радиосети МС регулярна с N_S секторами по азимуту на каждой БС, то грубая оценка наихудшего случая для средней интенсивности $Z_{BS\Sigma}$ ЭМФ, создаваемого множеством ЭМИ БС на рассматриваемой территории, может быть получена как $U_\varphi \approx 1/N_S$ [2, 3]. Однако эта оценка, не в полной мере учитывающая пространственную избирательность ЭМИ БС, в частности, в вертикальной плоскости, завышена и может быть уточнена путем определения параметра (4) для известных моделей ДН с достаточной степенью адекватности соответствующих реальным характеристикам направленности и ориентации антенн БС.

Модель направленности ЭМИ БС

Анализ влияния избирательности ЭМИ БС по азимуту φ и углу визирования θ на значение параметра U в (3) выполнен интегрированием (4) моделей ДН антенн БС по сферическим координатам (при горизонтальном расположении зенитной оси) в телесном угле $\Omega_S \approx 2\pi$, стягиваемом земной поверхностью, ограниченной линией горизонта. В этом телесном угле располагается ГЛ ДН антенны БС, всегда направленный к земной поверхности. ЭМИ БС в верхнюю полусферу не рассматривается, поскольку оно не участвует в создании ЭМНТ (3) на земную поверхность. Поэтому интегрирование в (4) должно осуществляться по интервалам $\{\varphi \in [-\pi/2, \pi/2], \theta \in [0, \pi]\}$ или $\{\varphi \in [-\pi, \pi], \theta \in [0, \pi/2]\}$.

Анализ выполнен для ДН антенны БС, представленной известной двухуровневой моделью, параметрами которой являются значения $\Delta\varphi_{ML}, \Delta\theta_{ML}$ ширины ГЛ ДН по азимуту и углу визирования, согласно рис. 2, для относительного уровня боковых лепестков G_{SL} , а также отношения $C_p = P_{ML} / P_{SL}$ мощностей ЭМИ БС по главному и боковым лепесткам ДН [6]. Эта модель включает следующие соотношения:

– для нормированной ДН антенны:

$$g_N(\varphi, \theta) = \begin{cases} 1, \varphi \in D\varphi_{ML} = \left[\varphi_{ML} - \frac{\Delta\varphi_{ML}}{2}, \varphi_{ML} + \frac{\Delta\varphi_{ML}}{2} \right], \theta \in D\theta_{ML} = \left[\theta_{ML} - \frac{\Delta\theta_{ML}}{2}, \theta_{ML} + \frac{\Delta\theta_{ML}}{2} \right]; \\ G_{SL} = \left[(\Delta\varphi_{ML}/2\pi C_p) \sin(\Delta\theta_{ML}/2) \right] / \left[1 - (\Delta\varphi_{ML}/2\pi) \sin(\Delta\theta_{ML}/2) \right], \varphi \notin D\varphi_{ML}, \theta \notin D\theta_{ML}; \end{cases} \quad (5)$$

– для коэффициента усиления G_{ML} в ГЛ ДН антенны:

$$G_{ML} = 2\pi C_p / \left[(C_p + 1) \Delta\varphi_{ML} \sin(\Delta\theta_{ML}/2) \right]; \quad (6)$$

– для отношения мощностей ЭМИ БС по главному и боковым лепесткам ДН:

$$C_p = \left[G_{ML} \Delta\varphi_{ML} \sin(\Delta\theta_{ML}/2) \right] / \left[2\pi - G_{ML} \Delta\varphi_{ML} \sin(\Delta\theta_{ML}/2) \right]. \quad (7)$$

Результаты анализа и их обсуждение

Анализ влияния пространственной избирательности ЭМИ антенн БС МС на уровень создаваемого ими ЭМФ РЧ у земной поверхности выполнен для типовой секторной топологии радиосети МС, для которой характерно следующее:

– при трехсекторной топологии сотовой радиосети 2G/3G/4G, как правило, используются антенны с шириной ГЛ ДН по половинной мощности по горизонтали $60^\circ-70^\circ$ и по вертикали $12^\circ-24^\circ$ в полосах частот нижней трети диапазона УВЧ (CDMA 450, GSM 800/900) и $5^\circ-12^\circ$ в его верхней половине (GSM 1800, UMTS, LTE) с углом наклона оси ГЛ $\theta_{ML} \geq 10^\circ$ в вертикальной плоскости $5^\circ-20^\circ$;

– при использовании АФАР в секторах радиосетей МС 4G/5G в наиболее освоенном диапазоне частот FR1 (0,410–7,125 ГГц) с многолучевой структурой ДН в секторе обслуживания (АФАР 2D MIMO) и с адаптивным динамическим формированием лучей для каждого пользователя (режим Beamforming АФАР Massive MIMO) ширина отдельных лучей составляет

12°–110° в горизонтальной и 6°–24° в вертикальной плоскостях с углом наклона оси ГЛ $\theta_{ML} \geq 10^\circ$ в вертикальной плоскости в зависимости от числа элементов АФАР, принимающих участие в их формировании (от 2–4 до 8–16 элементов по каждой из координат) [4, 9, 10].

По данным [6], для направленных антенн отношение C_P мощностей ЭМИ по главному и боковым лепесткам ДН может принимать значения в интервале (1, 10). Для антенн БС МС, имеющих ограниченную избирательность по азимуту, обеспечивающую обслуживание АС в азимутальном секторе в сочетании с возможностью электронного отклонения оси ГЛ ДН по обеим координатам, этот параметр, как правило, принимает значения в интервале (1, 3). Его оценки, полученные с использованием (5)–(7) для ряда известных антенн БС МС диапазона УВЧ, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Оценки отношения C_P мощностей электромагнитного излучения по главному и боковым лепесткам диаграммы направленности для ряда известных антенн базовых станций мобильной связи

Table 1. Estimates of the C_P ratio of power of electromagnetic radiation through the patterns main and side lobes for some well-known base stations antennas of cellular communications

| Тип антенны / Antenna type | G_{ML} , дБ/dB | $\Delta\varphi_{ML}$, град / deg | $\Delta\theta_{ML}$, град / deg | Полоса частот, МГц / Frequency band, MHz | C_P |
|----------------------------|------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|-------|
| Kathrein 742151 | 14,0 | 70° | 16,0° | 824–880 | 2,12 |
| | 14,5 | 65° | 15,0° | 880–960 | 1,98 |
| | 16,5 | 60° | 8,0° | 1710–1880 | 1,08 |
| Huawei A2645 1800v06 | 18,0 | 65° | 5,9° | 1710–2690 | 1,42 |
| Commscope NBX-6513DS-VTM | 14,7 | 68° | 15,0° | 1710–1880 | 2,67 |
| | 14,8 | 66° | 14,1° | 1850–1990 | 2,12 |
| | 15,2 | 64° | 13,5° | 1920–2180 | 2,25 |

Результаты количественного анализа влияния пространственной избирательности ЭМИ БС на величину параметра U , определяющего уровень средней ЭМНТ (3), создаваемого множеством ЭМИ БС у земной поверхности, представлены в графической форме на рис. 3–6.

На рис. 3 сплошные кривые соответствуют расчетным зависимостям $U(\theta_{ML})$, полученным с использованием (4) для $C_P = 1,5$ для ширины ГЛ ДН по азимуту $\Delta\varphi_{ML} = 60^\circ$ и различных значений его ширины $\Delta\theta_{ML}$ по углу визирования. Пунктирные горизонтальные линии соответствуют величинам, обратным значениям $1/G_{ML}$, полученным с использованием (6) для тех же $\Delta\varphi_{ML}$, $\Delta\theta_{ML}$. Парам зависимостей № 1, 2, 3 и 4 соответствуют значения ширины ГЛ ДН антенны в вертикальной плоскости 24°, 18°, 12° и 6°. Нижняя граница анализируемых углов визирования ограничена значением $\theta_{\min} = 10^\circ$, что связано с обеспечением снижения уровней внутрисистемных помех в радиосетях МС. Аналогичные зависимости, полученные для $C_P = 5$, приведены на рис. 4.

В связи с использованием в сетях МС 4G/5G АФАР, обеспечивающих в секторе обслуживания формирование множества лучей меньшей ширины и в горизонтальной, и в вертикальной плоскостях, интерес представляет оценка возможного снижения за счет этого средней ЭМНТ, создаваемой множеством БС на территории, обслуживаемой сетью МС. На рис. 5 приведены пары расчетных зависимостей, характеризующих пространственную избирательность ЭМИ АФАР. Они аналогичны кривым на рис. 3, 4 и соответствуют ширине ГЛ $\Delta\varphi_{ML} = 24^\circ$, $\Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ при $C_P = 1$ (зависимость № 1) и $C_P = 2$ (№ 2) и ширине ГЛ $\Delta\varphi_{ML} = \Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ при $C_P = 1$ (№ 3) и $C_P = 2$ (№ 4).

Несмотря на существенное различие в значениях $\Delta\varphi_{ML}$, $\Delta\theta_{ML}$ и C_P , соответствующих различным зависимостям на рис. 3–5, при наклоне ГЛ ДН антенны примерно на 30° вниз по отношению к горизонту значение параметра пространственной избирательности ЭМИ БС оказывается равным величине, обратной коэффициенту усиления в ГЛ ДН антенны: $U \approx 1/G_{ML}$. При меньших углах наклона оси ГЛ использование этого значения U в (3) обеспечивает некоторый пессимизм в оценке средней интенсивности ЭМФ РЧ, создаваемого множеством ЭМИ БС, в связи с чем при углах наклона ГЛ ДН антенны 10°–20° величина $1/G_{ML}$ превышает значение U , получаемое с использованием (4), на 1–3 дБ.

Обратная картина наблюдается при углах наклона оси ГЛ ДН антенны более 30°, однако такие углы наклона для секторных антенн используются редко, и их рассмотрение может представлять некоторый интерес только для АФАР Massive MIMO с адаптивным динамическим формированием лучей для каждого пользователя в режиме Beamforming.

При равномерном случайном распределении АС по земной поверхности плотность распределения вероятности угла визирования, определяющего положение АС, имеет существенно асимметричный вид [11], и относительная вероятность нахождения обслуживаемой АС в области углов визирования $\theta_{ML} > 30^\circ$ мала.

На рис. 6 для равномерного случайного распределения АС по земной поверхности приведены расчетные зависимости отношения вероятности V_{INT} попадания случайно выбранной АС во «внутренний» интервал углов визирования $(30^\circ + \Delta\theta_{ML})/2 \leq \theta_{ML} \leq 90^\circ$ и вероятности V_{OUT} ее попадания во «внешний» интервал углов визирования $\theta_{min} \leq \theta_{ML} \leq (30^\circ + \Delta\theta_{ML}/2)$ от ширины $\Delta\theta_{ML}$ ГЛ в вертикальной плоскости. Зависимости получены для различных значений нижней границы θ_{min} углов визирования границы зоны обслуживания БС: кривая 1 – для $\theta_{min} = 10^\circ$, 2 – для $\theta_{min} = 7,5^\circ$, 3 – для $\theta_{min} = 5^\circ$. Они позволяют заключить, что в связи с тем, что для антенн БС с реальными значениями $\Delta\theta_{ML}$ эти вероятности различаются на порядок и более, различиями в оценках значений параметров U и $1/G_{ML}$ можно пренебречь для всей области возможных углов визирования направлений на обслуживаемые АС.

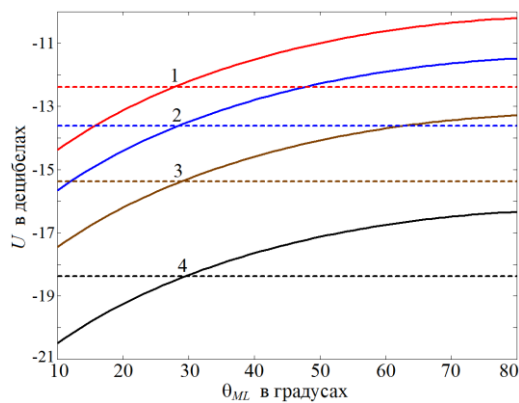


Рис. 3. Зависимость параметра избирательности электромагнитного излучения секторной антенной базовой станции ($\Delta\varphi_{ML} = 60^\circ$) для $C_P = 1,5$ от наклона θ_{ML} главного лепестка ДН для различных $\Delta\theta_{ML}$

Fig. 3. Dependences of EMR BS selectivity parameter for $C_P = 1.5$ on the tilt angle θ_{ML} of the ML of sector antenna pattern ($\Delta\varphi_{ML} = 60^\circ$) for different $\Delta\theta_{ML}$

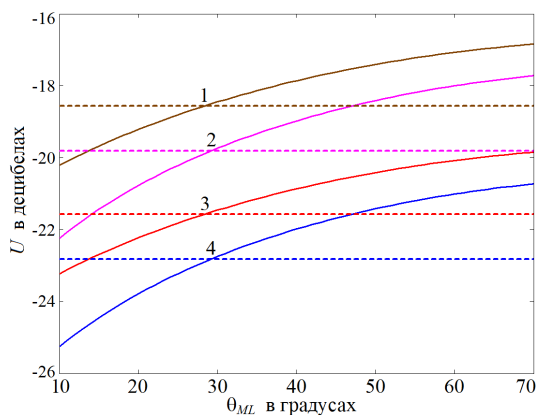


Рис. 5. Зависимость параметра избирательности электромагнитного излучения базовой станции с главным лепестком ДН активной фазированной антенной решетки $\Delta\varphi_{ML} = 24^\circ$, $\Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ (кривые 1, 2) и $\Delta\varphi_{ML} = \Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ (кривые 3, 4) от угла его наклона θ_{ML} для различных C_P

Fig. 5. Dependences of EMR selectivity parameter of BS active antenna array for ML width $\Delta\varphi_{ML} = 24^\circ$, $\Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ (curves 1, 2) and $\Delta\varphi_{ML} = \Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ (curves 3, 4) on the tilt angle θ_{ML} for different C_P

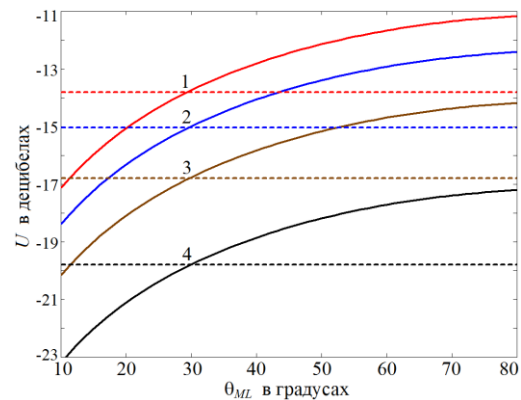


Рис. 4. Зависимость параметра избирательности электромагнитного излучения секторной антенной базовой станции ($\Delta\varphi_{ML} = 60^\circ$) для $C_P = 5$ от наклона θ_{ML} главного лепестка ДН для различных $\Delta\theta_{ML}$

Fig. 4. Dependences of EMR BS selectivity parameter for $C_P = 5$ on the tilt angle θ_{ML} of the ML of sector antenna pattern ($\Delta\varphi_{ML} = 60^\circ$) for different $\Delta\theta_{ML}$

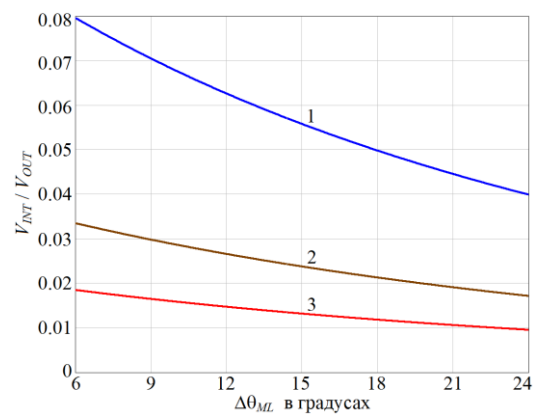


Рис. 6. Зависимость от $\Delta\theta_{ML}$ отношения вероятности попадания абонентской станции в интервал углов визирования $(30^\circ + \Delta\theta_{ML})/2 \leq \theta_{ML} \leq 90^\circ$ и вероятности ее попадания в интервал $\theta_{min} \leq \theta_{ML} \leq (30^\circ + \Delta\theta_{ML}/2)$

Fig. 6. Dependences on $\Delta\theta_{ML}$ of the ratio of probability of user's station hitting the range of viewing angles $(30^\circ + \Delta\theta_{ML})/2 \leq \theta_{ML} \leq 90^\circ$ and probability of it falling into the interval $\theta_{min} \leq \theta_{ML} \leq (30^\circ + \Delta\theta_{ML}/2)$

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Пространственная избирательность ЭМИ БС МС способна существенно влиять на интенсивность ЭМФ РЧ, создаваемого радиосетями МС на селитебной территории. Параметр U в интегральной форме отражает степень этого влияния. В зависимости от величин базовых параметров $\Delta\theta_{ML}$, $\Delta\theta_{ML}$, θ_{ML} и C_p антенн БС абсолютная величина $|U|$ может принимать значения в пределах 10–25 дБ, что на 5–20 дБ превышает параметр $1/N_s \approx 5$ дБ, который был использован в [2, 3] при пессимистических оценках интенсивности ЭМФ РЧ, создаваемого совокупностью ЭМИ БС.

2. Параметр U существенно зависит от угла наклона ГЛ ДН антенн БС. На практике углы наклона ГЛ ДН антенны БС выбираются в пределах $\theta_{\min} \leq \theta_{ML} \leq 30^\circ$, $\theta_{\min} \in [1^\circ, 5^\circ]$, что обеспечивает увеличение относительной площади сечения ГЛ земной поверхностью. Учет пространственной избирательности антенн БС в вертикальной плоскости обеспечивает более адекватную оценку средней ЭМНТ (3) и средней интенсивности ЭМФ РЧ, создаваемой совокупностью БС МС на обслуживаемой территории.

3. Большинство секторных антенн БС МС диапазона УВЧ имеют коэффициенты усиления от 10–15 дБ (при $\Delta\varphi = 60^\circ\text{--}90^\circ$ и $\Delta\theta_{ML} = 12^\circ\text{--}24^\circ$) до 16–20 дБ (при $\Delta\varphi = 60^\circ\text{--}70^\circ$ и $\Delta\theta_{ML} = 5^\circ\text{--}12^\circ$); коэффициенты усиления в сравнительно узких ГЛ ЭМИ АФАР БС систем 4G/5G достигают 24–25 дБ [4, 9, 10]. Таким образом, как следует из рис. 3–5, для используемых на практике углов наклона ГЛ ЭМИ БС значение системного параметра направленности в (3) может быть равно величине, обратной коэффициенту усиления антенны БС: $U \approx 1/G_{ML}$.

Заключение

1. Результаты анализа влияния пространственной избирательности электромагнитного излучения базовой станции мобильной связи на средний уровень создаваемого ими радиочастотного электромагнитного фона подтвердили гипотезу о том, что при углах наклона главного лепестка диаграммы направленности антенн базовой станции $\theta_{ML} \leq 30^\circ$ в качестве значения параметра пространственной избирательности электромагнитного излучения базовой станции может использоваться величина, обратная коэффициенту усиления в главном лепестке диаграммы направленности антенны базовой станции.

2. Уменьшение θ_{ML} приводит к уменьшению значений U в (3), способствуя снижению среднего уровня электромагнитной нагрузки на территорию, но одновременно вызывая увеличение соканальных помех в соседних сайтах, использующих те же рабочие частоты, что приводит к росту параметра K_{CC} в (3). Поэтому интерес представляет определение оптимальных значений θ_{ML} , при которых обеспечиваются наименьшие уровни радиочастотного электромагнитного фона.

3. Поскольку средняя электромагнитная нагрузка на территорию (3) фактически определяет гигиенические ограничения на развитие инфраструктуры мобильной связи 4G/5G, интерес представляют уточнение полученных результатов с использованием более детальных моделей диаграмм направленности антенн базовой станции (включая модели на основе измерений диаграмм направленности) и верификация методик (1), (3) прогноза средней интенсивности радиочастотного электромагнитного фона для $U \approx 1/G_{ML}$ на основе экспериментальных исследований уровней радиочастотного электромагнитного фона, создаваемых системами мобильной связи в различных условиях.

References

1. Mordachev V. I. (2019) Estimation of Intensity of Electromagnetic Background, Created by Wireless Systems of Public Information Services, on the Base of Forecast of Traffic Terrestrial Density. *Doklady BGUIR*. (2), 39–49 (in Russian).
2. Mordachev V. I. (2020) Verification of Worst-Case Analytical Model for Estimation of Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Proc. of the Int. Virtual Conf. "EMC Europe 2020"*, Rome, Italy, Sept. 23–25. 6.

3. Mordachev V. I. (2021) Electromagnetic Background Generated by Mobile (Cellular) Communications. *Proc. Of the Asia Pacific Int. Symp. on EMC (Hybrid Conf.) APEMC 2021, Bali-Indonesia, Sept. 27–30.* 37–40.
4. Aspund H. et al. (2020) Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments. Bridging the Gap between Theory and Practice. *Academic Press.* 713.
5. Review of the Harmonised Technical Conditions Applicable to the 3.4–3.8 GHz ('3.6 GHz') Frequency Band. *CEPT Report 67, July 6, 2018.* 17.
6. White D. R. J. (1977) A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility. *Shortcut Translation from English.* Moscow, Sov. Radio Publ. 1, 161 (in Russian).
7. Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-Advanced. *Report ITU-R M.2135-1 (12/2009).*
8. Zhang Z. et al. (2019) 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine.* 14 (3), 28–41.
9. *AAU5613 Product Description. Huawei Technologies Co., Ltd.* 2018.
10. Beam Management Feature Parameter Description. *Huawei Technologies Co., Ltd.* 2020, 41.
11. Mordachev V. I. (2009) System Ecology of Cellular Communications. *Belarus State University Publishers Publ.* (in Russian).

Вклад авторов

Мордачев В. И. осуществил постановку задачи, разработал методику анализа, выполнил расчеты, построение графиков и анализ полученных результатов, подготовил рукопись статьи.

Ционенко Д. А. выдвинул гипотезу о связи параметров U и G_{MS} , принял участие в проверке, анализе и обсуждении полученных результатов.

Authors' contribution

Mordachev V. I. stated the research problem, developed the analysis technique, performed calculations and of graphic materials and analysis of the results obtained, prepared the article.

Tsyankenka D. A. put forward a hypothesis about the relationship between the parameters U and G_{MS} , took part in the verification, analysis and discussion of the results obtained.

Сведения об авторах

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

Ционенко Д. А., к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

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

Tsyankenka D. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Chief Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

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

Address for correspondence

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