



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-35-44>

УДК 621.396.218:614.89.086.5

СУММАРНЫЕ УРОВНИ АНТРОПОГЕННОГО И ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА СВЧ НА ТЕРРИТОРИЯХ С ИНТЕНСИВНЫМ ИНФОРМАЦИОННЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ СОЗВЕЗДИЯМИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ СВЯЗИ

В. И. МОРДАЧЕВ, Д. А. ЦИОНЕНКО

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

Аннотация. Разработана методика анализа средней интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого у земной поверхности абонентскими терминалами систем спутниковой связи, использующих созвездия низкоорбитальных спутников. С использованием ранее полученных результатов анализа ЭМФ, создаваемого у земной поверхности излучениями космического сегмента этих систем, выполнены оценки суммарных уровней антропогенного и естественного ЭМФ диапазона СВЧ на территориях с интенсивным информационным обслуживанием населения этими системами. Полученные результаты свидетельствуют о том, что излучения абонентских терминалов таких систем вносят основной вклад в интенсивность ЭМФ у земной поверхности, на несколько порядков превышая другие слагаемые ЭМФ, образуемые как естественными источниками микроволнового излучения, так и излучениями множества низкоорбитальных спутников, в целом существенно изменяя физические характеристики среды обитания.

Ключевые слова: низкоорбитальный спутник связи, группировка, электромагнитное излучение, электромагнитный фон, естественный радишум, абонентский терминал.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Суммарные уровни антропогенного и естественного электромагнитного фона СВЧ на территориях с интенсивным информационным обслуживанием созвездиями низкоорбитальных спутников связи / В. И. Мордачев, Д. А. Ционенко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 35–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-35-44>.

TOTAL LEVELS OF ANTHROPOGENIC AND NATURAL MICROWAVE ELECTROMAGNETIC BACKGROUND IN AREAS WITH INTENSIVE INFORMATION SERVICING BY CONSTELLATIONS OF LOW-ORBIT COMMUNICATION SATELLITES

VLADIMIR I. MORDACHEV, DZMITRY A. TSYANENKA

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

Abstract. A technique for analyzing the average intensity of electromagnetic background (EMB) created near the earth's surface by subscriber terminals of satellite communication systems which are based on constellations of low-orbit satellites has been developed. Using previously obtained results of analyzing the EMB created near the earth's surface by radiations from the space segment of these systems, estimates have been made of the total levels of anthropogenic and natural EMB in the microwave range in areas with intensive information servicing of the population by these systems. The results obtained indicate that radiation from subscriber terminals of these systems makes the main contribution to the microwave EMB intensity near the earth's surface, exceeding by several orders of magnitude other EMB components created by both natural sources of microwave radiation and radiation from many low-orbit satellites, generally significantly changing the physical characteristics of the habitat.

Keywords: low-orbit communication satellite, constellation, electromagnetic radiation, electromagnetic background, natural radio noise, subscriber terminal.

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

For citation. Mordachev V. I., Tsyanenka D. A. (2025) Total Levels of Anthropogenic and Natural Microwave Electromagnetic Background in Areas with Intensive Information Servicing by Constellations of Low-Orbit Communication Satellites. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 35–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-35-44> (in Russian).

Введение

Развертывание в околоземном космическом пространстве мегасозвездий низкоорбитальных спутников связи (НСС) (Starlink, OneWeb, Astra, Kuiper, GuoWang и др.) на два-три порядка увеличивает количество низкоорбитальных источников электромагнитного излучения (ЭМИ) диапазона СВЧ в направлении земной поверхности, одновременно на порядки увеличивая территориальную плотность наземных источников ЭМИ СВЧ, каковыми являются абонентские терминалы (АТ) этих систем спутниковой связи. Ранее авторами была разработана методика анализа и выполнены оценки интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого космическим сегментом подобных систем спутниковой связи (ССС) у земной поверхности, с использованием регистрационных данных ЭМИ НСС (полная излучаемая мощность, характеристики направленности ЭМИ) и их количества в мегасозвездии НСС [1, 2]. Полученные расчетные средние уровни ЭМФ, создаваемого этим сегментом СССР в полосе частот 10–20 ГГц, на два-три порядка превышают уровни естественного ЭМФ [3].

Следует ожидать, что в местах с высокой плотностью населения вклад излучений множества АТ этих систем и наземных шлюзовых станций в интенсивность наземного антропогенного ЭМФ в диапазоне СВЧ по меньшей мере сопоставим с вкладом излучений космического сегмента этих СССР. Поэтому интерес представляет оценивание суммарных уровней ЭМФ в частотном диапазоне функционирования СССР, учитывающих как антропогенные составляющие, обусловленные ЭМИ НСС и АС рассматриваемых систем, так и естественный радишум [3].

Цель исследований – с использованием подходов [4] разработка методики анализа средних уровней ЭМФ, создаваемых у земной поверхности излучениями АТ СССР рассматриваемого вида, и оценка суммарных уровней ЭМФ на основе [1–3], учитывающих все его составляющие (как антропогенные, так и природные), в полосе частот 10–30 ГГц радиоканалов этих систем и во всем диапазоне СВЧ.

Составляющие электромагнитного фона в полосах частот низкоорбитальных спутников связи систем спутниковой связи у земной поверхности

А. Уровни ЭМФ, создаваемого излучениями АТ СССР

Типовые сценарии организации связи в СССР с использованием мегасозвездий НСС, как правило, ориентированы на малоэтажную пригородную застройку, сельскую местность и малонаселенные территории, где высокоскоростная передача данных не может быть обеспечена по волоконно-оптическим линиям связи, и предполагают размещение АТ на относительно небольшой высоте (1–5 м) над земной поверхностью. Анализ характеристик электромагнитной обстановки (ЭМО), создаваемой излучениями АТ в точке наблюдения (ТН), располагаемой на высоте H_{OP} [м] над земной поверхностью (рис. 1), выполнялся при следующих условиях, обеспечивающих пессимистический характер оценок интенсивности ЭМФ в ТН:

- земная поверхность считается плоской, ее сферичность и морфология (неоднородность рельефа, наличие растительности, зданий и сооружений) не учитываются;
- условная плоскость пространственного размещения АТ со средней плотностью ρ_{UE} [АТ/м²] находится над земной поверхностью на высоте H_{UE} [м] подвеса АТ, так что расстояние H между этой плоскостью и плоскостью случайного размещения ТН равно $H_{UE} - H_{OP}$;
- область пространства вокруг ТН, расположенные в которой АТ принимаются во внимание при формировании ЭМО в ТН, ограничивается размерами области радиовидимости АТ из ТН. В качестве критерия радиовидимости АТ (источника электромагнитного поля (ЭМП) с эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ) P_e в направлении на ТН) принимается некоторое пороговое значение плотности потока мощности (ППМ) ЭМП Z_0 , соответствующее,

например, чувствительности «по полю» радиоприемных устройств – возможных рецепторов помех, и связанное с радиусом $R_{\max}$ области радиовидимости этого источника из ТН при распространении радиоволн (РРВ) в свободном пространстве:

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

– АТ имеют узконаправленные антенны с шириной главных лепестков (ГЛ) в несколько градусов, направленных вверх под углом не менее 25° , поэтому ЭИИМ АТ в направлении на ТН определяется уровнями боковых лепестков (БЛ) излучений АТ.

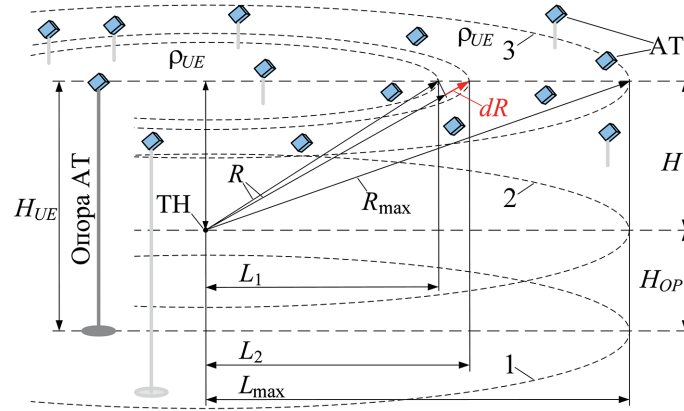


Рис. 1. Пространственное размещение абонентских терминалов и точек наблюдения в системах спутниковой связи с использованием низкоорбитальных спутников связи:
1 – земная поверхность; 2, 3 – условная плоскость размещения точек наблюдения и абонентских терминалов соответственно

Fig. 1. Spatial placement of subscriber terminals and observation points in satellite communication systems using low-orbit communication satellites: 1 – earth's surface; 2, 3 – conventional plane of placement of observation points and subscriber terminals, respectively

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

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

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

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

где $L_{\max}$ – радиус, соответствующий области расположения АТ, вклад ЭМП которых учитывается в оценках (2) уровня ЭМФ в ТН.

АТ – точечные источники ЭМП, удаленность которых от ТН не превышает R , распределены равномерно по круговой области плоскости радиусом L_1 на высоте H ; их среднее число:

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

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

$$\begin{aligned} N_{2UE} &= \rho_{UE} \pi L_2^2 = \rho_{UE} \pi ((R + dR)^2 - H^2) = \rho_{UE} \pi (R^2 + 2RdR + (dR)^2 - H^2) = \\ &= N_{1UE} + \rho_{UE} \pi (2RdR + (dR)^2). \end{aligned}$$

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

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

Вероятность $p(R, dR)$ попадания значения удаленности некоторого АТ (точечного источника ЭМП, произвольно выбранного из $N_{\Sigma UE}$) в интервал $\{R, R+dR\}$ вычисляется по формуле

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

Плотность распределения вероятности (п.р.в.) $w(R)$ удаленности R произвольно выбранного АТ (точечного источника ЭМИ от ТН) определится соотношением

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

Иногда удобнее это распределение использовать в следующем виде:

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

Таким образом, для модели случайного равномерного распределения АТ – источников ЭМП на плоскости, располагаемой на некоторой высоте над плоскостью расположения ТН, п.р.в. удаленности источников от ТН при $R_{\max} \gg H$ практически не зависит от этой высоты, от нее зависит лишь область ее определения.

Для последующего определения п.р.в. ППМ ЭМП, создаваемых излучениями АТ в ТН, необходимо оценить возможность использования в рассматриваемой пространственной модели на рис. 1 зависимости (1), характерной для условий РРВ в свободном пространстве. Эта зависимость теряет адекватность при многолучевом РРВ, характерном при расположении АТ за пределами breakpoint-окрестности ТН радиусом $R_{BP} \geq 4H_{Op}H_{UE}/\lambda$ [5], где λ – длина волны ЭМП. Для ССС с использованием мегасозвездий НСС выделены полосы частот сантиметрового диапазона с $\lambda = 2-3$ см, для которых $R_{BP} \geq 200$ м. В малоэтажной городской застройке в breakpoint-окрестность ТН попадают десятки индивидуальных АТ. При территориально распределенных источниках ЭМП интенсивность ЭМФ в ТН определяется излучениями ближайших источников [6], для которых удаленность от ТН существенно меньше R_{BP} , и условия РРВ в анализируемой модели можно считать соответствующими условиям РРВ в свободном пространстве с зависимостью (1) между ППМ ЭМП Z в ТН и ее удаленностью R от АТ – источника ЭМП с ЭИИМ P_e . Дополнительным аргументом в пользу использования модели (1) для всех источников из области радиовидимости из ТН является существенное рассеяние ЭМП сантиметрового диапазона при их отражении от земной поверхности, в среднем заметно снижающее влияние отраженных от нее лучей на уровни ЭМП.

При монотонной функциональной зависимости (1) $Z = \Phi(R)$ и одинаковой ЭИИМ АТ (квазиизотропные источники ЭМП, $P_e = \text{const}$) п.р.в. $w(Z)$ в ансамбле ЭМП АТ в ТН определяется из (1) и (3) следующим образом [4, 7]:

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

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

$$Z_{\min} = \frac{P_e}{4\pi R_{\max}^2}; \quad Z_{\max} = \frac{P_e}{4\pi H^2} \rightarrow R_{\max} = \left(\frac{P_e}{4\pi Z_{\min}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad H = \left(\frac{P_e}{4\pi Z_{\max}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

В рассматриваемом случае антенны АТ представляют собой достаточно сложные системы – активные фазированные антенные решетки (АФАР) с числом элементов до 2^8 – 2^{10} . Поэтому можно предположить их реализацию с ослаблением задних и боковых лепестков и принять значение P_e ЭИИМ АТ в нижней полусфере с использованием следующей двухуровневой модели диаграммы направленности антенны (ДНА) АТ с коническим лучом ГЛ равной ширины $\Delta\varphi_M$ по азимуту α и зенитному углу β , использованной в [1, 2]:

$$G_{MLM} = \frac{C_{PM}}{(1 + C_{PM}) \sin^2(\Delta\varphi_M/4)}; G_{SLM} = \frac{1}{(1 + C_{PM}) \cos^2(\Delta\varphi_M/4)}; G_{SLRM} = \frac{G_{SLM}}{G_{MLM}} = \frac{\text{tg}^2(\Delta\varphi_M/4)}{C_{PM}};$$

$$C_{PM} = \frac{P_{MLM}}{P_{SLM}}; P_{MLM} + P_{SLM} = P_{TRP}; g_{NM}(\alpha, \beta) = \begin{cases} 1, & \alpha, \beta \in \Delta\Omega_{MLM} = 4\pi - \Delta\Omega_{SLM}; \\ G_{SLRM} = \frac{\text{tg}^2(\Delta\varphi_M/4)}{C_{PM}}, & \alpha, \beta \in \Delta\Omega_{SLM}, \end{cases} \quad (6)$$

где G_{MLM} – коэффициент усиления по ГЛ в его «прямоугольной» модели; G_{SLM} , G_{SLRM} – абсолютный и относительный уровни БЛ; C_{PM} – отношение мощностей, излучаемых по ГЛ (P_{MLM}) и БЛ (P_{SLM}) соответственно; $\Delta\Omega_{MLM}$, $\Delta\Omega_{SLM}$ – телесные углы, соответствующие ГЛ и БЛ; $g_{NM}(\alpha, \beta)$ – нормированная ДНА; P_{TRP} – полная излучаемая мощность (total radiated power, TRP) АТ в определении [8].

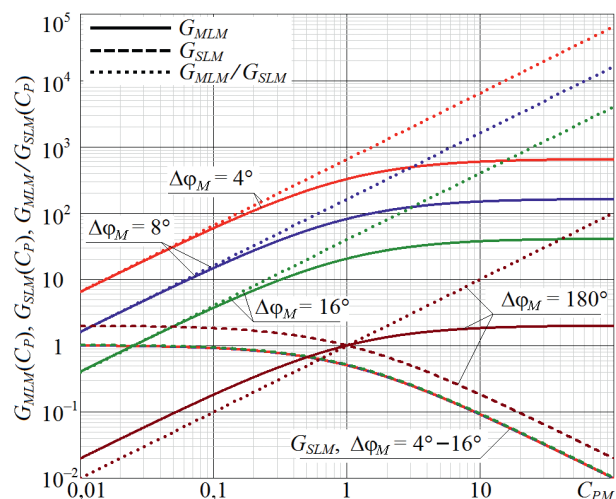
В этой модели по сравнению с ее традиционным представлением в [1, 2] в индексах параметров и характеристик g_{NM} , G_{MLM} , G_{SLM} , G_{SLRM} , C_{PM} , P_{MLM} , P_{SLM} , $\Delta\varphi_M$, $\Delta\Omega_{MLM}$ и $\Delta\Omega_{SLM}$ присутствует символ «М», указывающий на их принадлежность двухуровневой модели ДНА, в которой ширина ГЛ определяется не по половинной мощности (half power beamwidth, HPBW), а соответствует первым нулям ДНА (first null beamwidth, FNBW).

По данным [9, 10], в антеннах с узкими ГЛ их ширина, соответствующая FNBW, в 2,1–2,26 раза превышает его HPBW ($\Delta\varphi_M \approx (2,1\text{--}2,26)\Delta\varphi$), что практически совпадает с соответствующим отношением для ГЛ ДНА вида $(\sin x)/x$. В результате коэффициент усиления модели (6), в которой ширина $\Delta\varphi_M$ ГЛ соответствует FNBW, оказывается примерно в 2,2 раза (3,3–3,5 дБ) меньше по сравнению с коэффициентами усиления по ГЛ по HPBW реальных антенн, что должно быть учтено при выполнении расчетов с использованием (6).

На рис. 2 приведены расчетные зависимости G_{MLM} (сплошные линии), G_{SLM} (пунктирные линии) и отношения G_{MLM}/G_{SLM} (точечные линии) в модели (6) от отношения C_{PM} мощности излучения АТ по ГЛ и БЛ для $\Delta\varphi_M = 4^\circ$ (красные линии), $\Delta\varphi_M = 8^\circ$ (синие линии) и $\Delta\varphi_M = 16^\circ$ (зеленые линии). Для проверки корректности модели указанные расчетные зависимости приведены также для $\Delta\varphi_M = 180^\circ$, которые, как и положено, пересекаются в точке $C_{PM} = 1$; при $C_{PM} \gg 1$ наблюдается $G_{MLM} \rightarrow 2$, $G_{SLM} \rightarrow 0$, и симметрично при $C_{PM} \ll 1$ наблюдается $G_{SLM} \rightarrow 2$, $G_{MLM} \rightarrow 0$. В области реальных значений ширины ГЛ ДНА АТ $\Delta\varphi_M \leq 10^\circ$ уровни боковых лепестков от величины $\Delta\varphi_M$ практически не зависят (пунктирные линии для $\Delta\varphi_M = 4^\circ$ – 16° совпадают), что объясняется незначительностью влияния изменений малого телесного угла $\Delta\Omega_{MLM} = 4\pi - \Delta\Omega_{SLM}$ узкого ГЛ на величину большого телесного угла $\Delta\Omega_{SLM}$.

Рис. 2. Зависимость коэффициентов усиления в модели диаграммы направленности антенны абонентского терминала по главному (G_{MLM}) и боковому (G_{SLM}) лепесткам, их отношений (G_{MLM}/G_{SLM}) от C_{PM}

Fig. 2. Dependence of gain factors in the model of the antenna radiation pattern of the subscriber terminal on the main (G_{MLM}) and side (G_{SLM}) lobes, their (G_{MLM}/G_{SLM}) ratios on C_{PM}



Из приведенных на рис. 2 графиков видно, что, принимая во внимание различие в усилении по ГЛ реальных антенн и двухуровневой модели (6) примерно в 2,2 раза, отношению коэффициентов усиления по ГЛ и БЛ 35–50 дБ, характерному для наиболее совершенных АФАР с оптимизированным распределением токов по апертуре [10], соответствует уровень БЛ (–10)–(–20) дБ по сравнению с изотропным излучением и ЭИИМ примерно $(0,01–0,10)P_{TRP}$ при C_{PM} 10–100 (10–20 дБ).

Если все АТ одинаковы, и их ЭИИМ по БЛ равны ($P_{eSL} = G_{SL}P_{TRP} = P_e$), то, используя (4) и (5), получим выражения для п.р.в. и матожидания ППМ ЭМП АТ в ТН:

$$w(Z) = \frac{Z_{\min}Z_{\max}}{(Z_{\max} - Z_{\min})Z^2}; m_1(Z) = \frac{Z_{\min}Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}}, Z_{\min} < Z < Z_{\max}; \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{\min}Z_{\max} &= \frac{P_e^2}{16\pi^2 R_{\max}^2 H^2}; \quad Z_{\max} - Z_{\min} = \frac{P_e(R_{\max}^2 - H^2)}{4\pi R_{\max}^2 H^2}; \quad \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} = 2 \ln \frac{R_{\max}}{H}; \\ m_1(Z) &= \frac{Z_{\min}Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} = \frac{P_e}{2\pi(R_{\max}^2 - H^2)} \ln \frac{R_{\max}}{H}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

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

$$Z_{\Sigma UE} = N_{\Sigma UE} m_1(Z) = \frac{\rho_{UE} P_e}{2} \ln \frac{R_{\max}}{H} \approx \frac{B_{UESL}}{2} \ln \frac{R_{\max}}{H}; \quad (9)$$

$$B_{UESL} = \rho_{UE} P_e \approx \rho_{UE} P_{TRP} G_{SL} = \frac{\rho_{UE} P_{TRP}}{(1 + C_P) \cos^2(\Delta\phi/4)}, \quad (10)$$

где B_{UESL} – средняя электромагнитная нагрузка на территорию, создаваемая ЭМИ АТ по БЛ.

Соотношения (9), (10) позволяют оценить среднюю интенсивность ЭМФ $Z_{\Sigma UE}$, создаваемого излучениями АТ на условной плоскости размещения ТН при известных ρ_{UE} и P_{TRP} . В качестве иллюстрации на рис. 3 приведены расчетные зависимости средних уровней ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями АТ, от соотношения C_{PM} мощности излучения АТ по ГЛ и БЛ при различной территориальной плотности ρ_{UE} излучающих АТ и при типовых параметрах ЭМИ АТ, близких к используемым в сети Starlink: ширине ГЛ АТ по НРВW $\Delta\phi = 4^\circ$ ($\Delta\phi_M = 9^\circ$) и $P_{TRP} = 4$ Вт. Анализ зависимостей на рис. 3 позволяет сделать вывод, что средняя интенсивность этой компоненты ЭМФ определяется ближайшими к ТН излучающими АТ (что сосогласуется с результатами [6]), а потому слабо зависит от высоты $H_{UE} > H_{OP}$, определяющей радиус breakpoint-окрестности R_{BP} вокруг ТН, а также от радиуса зоны радиовидимости $R_{\max}$: его увеличение в 10 раз с 1 до 10 км (что соответствует увеличению на два порядка числа учитываемых в (2) слагаемых при определении суммарного среднего уровня ЭМФ) привело к увеличению расчетного значения интенсивности ЭМФ $Z_{\Sigma BS}$ всего на 1,6 дБ; кривизна земной поверхности, сводящая гипотетическую зону радиовидимости к зоне реальной прямой видимости, сделает эту разницу незначительной.

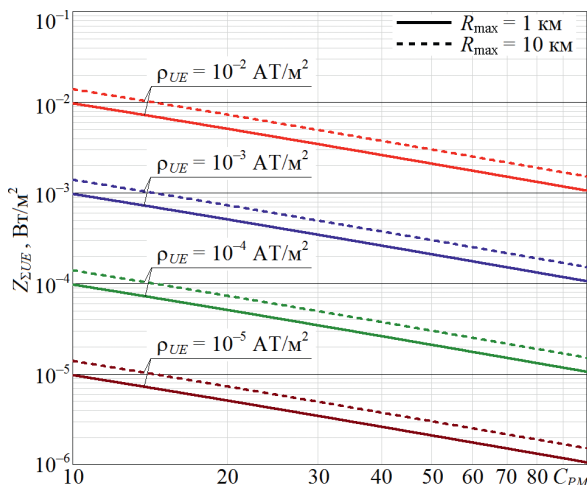


Рис. 3. Зависимость средних уровней электромагнитного фона, создаваемого излучениями абонентских филиалов, от C_{PM} при различной территориальной плотности абонентских филиалов

Fig. 3. Dependence of average levels of electromagnetic background created by radiation from subscriber branches on C_{PM} at different territorial densities of subscriber branches

В. Уровни ЭМФ, создаваемого излучениями НСС CCC

Методика оценки уровней ЭМФ, создаваемого излучениями мегасозвездий НСС у земной поверхности, с использованием регистрационных данных о характеристиках НСС и их группировках, а также на основе прогноза образуемой ими территориальной плотности трафика приведена в [1, 2]. Сравнение расчетных уровней, составляющих ЭМФ, представленных в графической форме на рис. 3, с результатами [1, 2] позволяет сделать вывод, что в местах с интенсивным информационным обслуживанием населения системами рассматриваемого вида вклад ЭМИ АТ в формирование ЭМФ диапазона СВЧ является абсолютно преобладающим.

С. Уровни естественного радишума в полосах частот НСС CCC

При анализе среднего уровня естественного радиочастотного ЭМФ у земной поверхности будем учитывать только следующие его компоненты, определяемые источниками ЭМИ внеземного происхождения [3] (атмосферные эффекты не рассматриваются).

1. Излучение Солнца. Вклад этого компонента в совокупную интенсивность ЭМФ учитывается только в дневные часы. При определении средних уровней естественного ЭМФ рассматривается только «спокойное Солнце»; сильные всплески интенсивности радиочастотного шума, возникающие в периоды солнечной активности, не рассматриваются.

2. Излучение Луны. Вклад этого компонента в совокупную интенсивность ЭМФ учитывается только при наличии Луны над горизонтом и зависит от ее фазы.

3. Галактический шум. Среднее значение его интенсивности определено как усредненное по всему небосводу. Локальные максимумы этого излучения не рассматриваются.

4. Реликтовое излучение (космический фон). Рассматривается как изотропное излучение абсолютно черного тела с температурой 2,7 К.

Совокупность двух последних компонентов образует радишум дальнего космоса (РДК). С использованием [3] получена частотная зависимость спектральной плотности ЭМФ у земной поверхности (рис. 4), создаваемого основными источниками внеземного радишума (суммирование для различных случаев – «день + полнолуние», «ночь + новолуние», космический ЭМФ). ЭМИ Солнца в дневные часы вносит преобладающий вклад в естественный ЭМФ. Интегрирование этих зависимостей по заданной полосе частот позволяет определить усредненное значение интенсивности естественного радиочастотного ЭМФ в данной полосе.

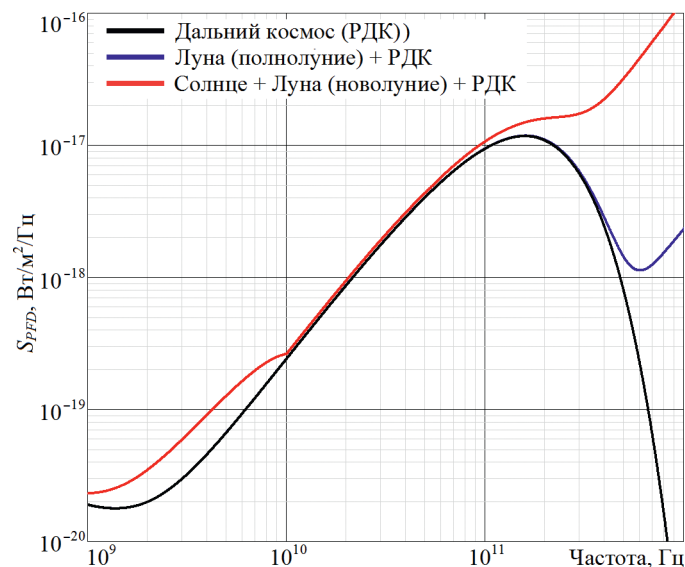


Рис. 4. Спектральная плотность электромагнитного фона у земной поверхности, создаваемого основными источниками внеземного радишума

Рис. 4. Spectral density of the electromagnetic background at the Earth's surface created by the main sources of extraterrestrial radio noise

Сравнительный анализ составляющих совокупного наземного электромагнитного фона, образуемого антропогенными и естественными компонентами

На начальном этапе реализации ССС с использованием мегасозвездий НСС, когда имеет место «пятнистое» покрытие территории лучами ГЛ ЭМИ НСС, сопоставление всех компонентов совокупного ЭМФ у земной поверхности имеет смысл в местах, где они присутствуют одновременно, т. е. в пятне ГЛ ЭМИ НСС. На последующих стадиях реализации ССС, когда созвездие НСС сформировано, и системой обеспечивается полное покрытие территории, первостепенный интерес представляет сопоставление усредненных уровней антропогенных и естественных компонентов ЭМФ и их суммы. В табл. 1 приведены результаты сравнения расчетных значений ППМ в ТН на земной поверхности, расположенной в луче НСС космического сегмента НСС Starlink Gen1, в выделенных этому сегменту ССС полосах частот D_{F1} , D_{F2} , D_{F3} , D_{F4} , с интенсивностью естественного ЭМФ в каждой из этих полос, а также с интегральными уровнями естественного шума в полосе частот 10–30 ГГц, используемой различными ССС, и во всем диапазоне СВЧ. Результаты сравнения расчетных значений усредненной интенсивности составляющих антропогенного ЭМФ, создаваемого излучениями множества НСС и АТ ССС Starlink Gen1 при разном количестве НСС и различной территориальной плотности АТ в ССС, с интенсивностью естественного ЭМФ приведены в табл. 2.

Таблица 1. Результаты сравнения расчетных значений плотности потока мощности на земной поверхности с интенсивностью составляющих естественного электромагнитного фона в различных полосах частот

Table 1. Results of comparison of calculated values of power flux density on the earth's surface with the intensity of components of the natural electromagnetic background in different frequency bands

Полоса частоты излучения, ГГц	Плотность потока мощности, Вт/м²				$Z_{\Sigma NDF} = Z_{NS} + Z_{NM} + Z_{DS}, \times 10^{-11}$	$Z_{ML}/Z_{\Sigma NDF},$ дБ	$Z_{ML}/Z_{\Sigma N1},$ дБ	$Z_{ML}/Z_{\Sigma N2},$ дБ
	в центре пятна луча $Z_{ML}, \times 10^{-10}$	источников естественного фона, $\times 10^{-11}$						
		Солнце Z_{NS}	Полнолуние Z_{NM}	РДК Z_{DS}				
$D_{F1}: 10,7\text{--}10,94$	1,6–20	0,58	0,02	6,7	$Z_{\Sigma NDF} = 7,3$	3,3–14,4	(–11,2)–(–0,1)	(–11,4)–(–0,3)
$D_{F2}: 12,46\text{--}12,7$	1,6–20	0,77	0,02	8,9	$Z_{\Sigma NDF} = 9,7$	2,0–13,1	(–11,2)–(–0,1)	(–11,4)–(–0,3)
$D_{F3}: 17,8\text{--}18,6$	18–63	5,04	0,15	58,5	$Z_{\Sigma NDF} = 63,7$	4,5–10,0	(–0,5)–4,9	(–0,8)–4,7
$D_{F4}: 18,7\text{--}19,3$	12–39	4,09	0,12	47,5	$Z_{\Sigma NDF} = 51,7$	3,7–8,8	(–2,3)–2,8	(–2,5)–2,6
10,0–30,0 (полосы НСС ССС)		15,6	4,77	182,7	$Z_{\Sigma N1} = 203,1$			
3,0–30,0 (диапазон СВЧ)		19,6	4,95	190,8	$Z_{\Sigma N2} = 215,4$			

Таблица 2. Результаты сравнения усредненной интенсивности составляющих антропогенного электромагнитного фона с интенсивностью естественного электромагнитного фона

Table 2. Results of comparison of the average intensity of the components of the anthropogenic electromagnetic background with the intensity of the natural electromagnetic background

Стадия реализации ССС	Усредненный уровень ЭМФ, создаваемого космическим и наземным сегментами ССС, Вт/м ²				$Z_{\Sigma A} = Z_{\Sigma S} + Z_{\Sigma ST}$, Вт/м ²	$Z_{\Sigma S}/Z_{\Sigma N1}$, дБ $Z_{\Sigma S}/Z_{\Sigma N2}$, дБ	$Z_{\Sigma A}/Z_{\Sigma N1}$, дБ $Z_{\Sigma A}/Z_{\Sigma N2}$, дБ
	ЭМИ НСС $Z_{\Sigma S}$		ЭМИ АТ (14,0–14,5 ГГц, $R_{\max} = 1$ км) $Z_{\Sigma ST}$				
	$P_{TRP} = 20$ дБВт	$P_{TRP} = 25$ дБВт	$C_P = 20$	$C_P = 50$			
$N_{\Sigma} = 10^3$, $\rho_{ST} = 10^{-6}$ АТ/м ²	$4,7 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$(2,1-5,1) \cdot 10^{-7}$	(–6,4)–(–1,3) (–6,6)–(–1,5)	20,1–24,0 19,9–23,7
$N_{\Sigma} = 10^4$, $\rho_{ST} = 10^{-5}$ АТ/м ²	$4,7 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$(2,1-5,1) \cdot 10^{-6}$	3,6–8,7 3,4–8,5	30,1–34,0 29,9–33,7
$N_{\Sigma} = 10^5$, $\rho_{ST} = 10^{-4}$ АТ/м ²	$4,7 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$(2,1-5,1) \cdot 10^{-5}$	13,6–18,7 13,4–18,5	40,1–44,0 39,9–43,7

Анализ оценок, приведенных в табл. 1, 2, позволяет сделать следующие выводы.

1. В пятне луча НСС на земной поверхности ППМ ЭМИ НСС лишь на 3–14 дБ превышает уровень естественного ЭМФ, при коэффициенте усиления антенны АТ ССС по ГЛ 35–45 дБ этого

достаточно для обеспечения необходимого соотношения сигнал/шум в нисходящем радиоканале. ЭМИ отдельного НСС не оказывает существенного влияния на электромагнитное загрязнение среды обитания, поскольку его ППМ всего на 3–5 дБ превышает уровень естественного ЭМФ в диапазоне СВЧ и, в частности, соответствует категории «Отсутствие опасений» западных стандартов строительной биологии [11, 12].

2. В полосе частот 10–30 ГГц, в которой планируется функционирование ССС с использованием созвездий НСС, уровень естественного ЭМФ определяется РДК, который при $N_{\Sigma} = 10^3$ сопоставим с усредненным уровнем ЭМФ, создаваемого излучениями НСС, но при увеличении N_{Σ} до 10^4 – 10^5 относительный вклад космической антропогенной составляющей ЭМФ по сравнению с РДК увеличивается в 10–100 раз (на 10–20 дБ).

3. ЭМФ, создаваемый излучениями АТ ССС, вносит определяющий вклад в интенсивность совокупного ЭМФ, на несколько порядков превышая уровни составляющих ЭМФ, создаваемого естественным радиошумом и излучениями множества НСС.

Заключение

1. Интенсивность у земной поверхности электромагнитного фона диапазона СВЧ, создаваемого излучениями систем спутниковой связи на основе мегасозвездий низкоорбитальных спутников связи, определяется излучениями абонентских филиалов, вносящими определяющий вклад в интенсивность совокупного электромагнитного фона, на несколько порядков превышая уровни составляющих электромагнитного фона, создаваемого естественным радиошумом и излучениями множества низкоорбитальных спутников связи. При высокой интенсивности использования абонентских терминалов, когда реальная средняя территориальная плотность излучающих абонентских терминалов может достигать 10^2 – 10^3 АТ/км², средний уровень электромагнитного фона, создаваемого излучениями рассматриваемых систем спутниковой связи, по меньшей мере на два порядка меньше уровня 0,1 Вт/м², принятого в качестве предельно допустимого уровня радиочастотных электромагнитных полей для населения, но на 30–45 дБ превышает уровень естественного электромагнитного фона диапазона СВЧ.

2. Планируемое интенсивное информационное обслуживание общества значительным количеством систем спутниковой связи различной принадлежности, при котором общее число функционирующих низкоорбитальных спутников связи может достигать 10^5 , способно быть причиной существенного микроволнового электромагнитного загрязнения среды обитания, уровни которого соответствуют категории «Серьезные опасения при постоянном облучении более 4 часов в сутки в помещении» западных стандартов строительной биологии [11, 12], где уровни радиочастотных электромагнитных полей этой категории определены как «Неприемлемые с точки зрения строительной биологии. Они неестественны для человека. Хроническое воздействие этих уровней может быть причиной будущих нарушений здоровья».

3. Работа выполнена в рамках научного проекта № 23-3172 при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь.

Список литературы / References

1. Mordachev V. I., Svistunou A. S., Tsyankenka D. A. (2024) Prediction the Level of the Electromagnetic Background Created by Constellations of Satellites Near the Earth's Surface Using Registration Data. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 43–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-43-52> (in Russian).
2. Mordachev V. I., Tsyankenka D. A. (2025) Analysis of the Electromagnetic Background Created by Constellations of Low-Earth Orbit Satellites, Based on the Prediction Forecast of the Created Area Traffic Capacity. *Doklady BGUIR*. 23 (3), 36–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-36-45> (in Russian).
3. Radio Noise. *Rec. ITU-R P.372-16*. 2022.
4. Mordachev V. I. (2024) Radio-Frequency Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Radiation Biology. Radioecology*. 64 (3), 305–322.
5. Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz. *Rec. ITU-R P.1411-11*.
6. Mordachev V., Loyka S. (2009) On Node Density – Outage Probability Tradeoff in Wireless Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 27 (7), 1120–1131.
7. Mordachev V. (2009) *System Ecology of Cellular Communications*. Belarus State University Publishers. https://emc.bsuir.by/m/12_116413_0_176480.pdf (in Russian).
8. CEPT Report 67, July 6, 2018. <https://docdb.cept.org/>.

9. Balanis C. A. (2016) *Antenna Theory Analysis and Design*. Wiley.
10. Mailloux R. J. (2005) *Phased Array Antenna Handbook*. Artech House.
11. *Baubiologie MAES. Standard of Building Biology Testing Methods*. Inst. Building Biol. + Sustainability IBN. Rosenheim, Germany, Tech. Rep. SBM-2008.
12. *Guideline of the Austrian Medical Association for the Diagnosis and Treatment of EMF-Related Health Problems and Illnesses (EMF Syndrome), Standard*. 2012. 1–17. Available: <https://www.magdahavas.com/wp-content/uploads/2012/06/Austrian-EMF-Guidelines-2012.pdf>.

Поступила 12.02.2025

Принята в печать 28.05.2025

Received: 12 February 2025

Accepted: 28 May 2025

Вклад авторов

Мордачев В. И. осуществил постановку задачи, разработал методику анализа электромагнитного фона, создаваемого низкоорбитальными спутниками связи и абонентскими терминалами, выполнил расчеты рис. 2, 3 и табл. 2, анализ результатов, подготовил рукопись статьи.

Ционенко Д. А. разработал методику анализа электромагнитного фона, создаваемого внеземными источниками электромагнитного излучения, выполнил расчеты рис. 4 и табл. 1, принял участие в обсуждении полученных результатов.

Authors' contribution

Mordachev V. I. formulated the problem, developed a methodology for analyzing the electromagnetic background created by low-orbit communication satellites and subscriber terminals, performed the calculations in Fig. 2, 3 and Tab. 2, analyzed the results, and prepared the manuscript.

Tsyankenka D. A. developed a method for analyzing the electromagnetic background created by extraterrestrial sources of electromagnetic radiation, performed the calculations in Fig. 4 and Tab. 1, and took part in the discussion of the results obtained.

Сведения об авторах

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

Ционенко Д. А., канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр. НИЛ 1.7, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Information about the authors

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

Tsyankenka D. A., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Senior Researcher at the Lab 1.7, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Адрес для корреспонденции

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

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