



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-43-52>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, СОЗДАВАЕМОГО ГРУППИРОВКАМИ СПУТНИКОВ У ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГИСТРАЦИОННЫХ ДАННЫХ

В. И. МОРДАЧЕВ, А. С. СВИСТУНОВ, Д. А. ЦИОНЕНКО

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

Поступила в редакцию 21.05.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Разработана методика прогноза средней интенсивности электромагнитного фона, создаваемого вблизи поверхности Земли группировкой спутников связи, с учетом количества спутников в группировке, полной излучаемой мощности спутника, параметров его излучения по основным и боковым лепесткам, высоты орбиты и ограничений по углу места обслуживания наземного оборудования. Приведены результаты анализа зависимости средних уровней электромагнитного фона у земной поверхности от количества спутников в группировке при различных сценариях реализации информационного обслуживания наземных абонентских терминалов, подтверждающие адекватность разработанной методики. Сделан вывод, что ожидаемые уровни электромагнитного фона диапазона СВЧ, создаваемого мегасозвездиями низкоорбитальных спутников связи, на много порядков превышают уровни электромагнитного фона естественного происхождения, что существенно меняет физические характеристики среды обитания.

Ключевые слова: низкоорбитальный спутник связи, группировка, электромагнитное излучение, полная излучаемая мощность, главный лепесток, боковые лепестки, электромагнитный фон.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Для цитирования. Мордачев, В. И. Прогнозирование уровня электромагнитного фона, создаваемого группировками спутников у земной поверхности, с использованием регистрационных данных / В. И. Мордачев, А. С. Свистунов, Д. А. Ционенко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 43–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-43-52>.

PREDICTION THE LEVEL OF THE ELECTROMAGNETIC BACKGROUND CREATED BY CONSTELLATIONS OF SATELLITES NEAR THE EARTH'S SURFACE USING REGISTRATION DATA

VLADIMIR I. MORDACHEV, ALIAKSANDR S. SVISTUNOU, DZMITRY A. TSYANENKA

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

Submitted 21.05.2024

Abstract. A technique has been proposed for predicting the average intensity of electromagnetic background created near the Earth's surface by a constellation of communication satellites, taking into account the number of satellites in the constellation, the satellite total radiated power, parameters of its radiation in the main and side lobes,

the orbit altitude and restrictions on the tilt angle of service of ground-based equipment. The results of the analysis of the dependence of the average electromagnetic background levels at the Earth's surface on the number of satellites in the constellation under various scenarios for the implementation of information services for terrestrial subscriber terminals are presented, confirming the adequacy of the developed approach. It is concluded that the expected levels of electromagnetic background in the microwave range created by megaconstellations of low-orbit communication satellites are many orders of magnitude higher than the levels of electromagnetic background of natural origin, which significantly changes the physical characteristics of the habitat.

Keywords: low-earth orbit communication satellite, constellation, electromagnetic radiation, total radiated power, main lobe, side lobes, electromagnetic background.

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

Gratitude. The work was carried out within the framework of scientific project No 23-3172 with the financial support of the Ministry of Education of the Republic of Belarus.

For citation. Mordachev V. I., Svistunou A. S., Tsyantenka 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).

Введение

Наблюдаемое разветвление в околоземном космическом пространстве весьма многочисленных группировок (мегасозвездий) низкоорбитальных спутников связи (Starlink, OneWeb, Astra, Kuiper, GuoWang и др.) увеличивает на несколько порядков количество низкоорбитальных источников сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения (ЭМИ) в направлении земной поверхности и среднюю наземную территориальную плотность нисходящего трафика спутниковой связи, особенно при интеграции этих систем, обеспечивающих высокие скорости и относительно низкие задержки при передаче информации, с глобальными системами мобильной связи 5G/6G. Это неизбежно приведет к существенному усложнению электромагнитной обстановки (ЭМО) в СВЧ-диапазоне у поверхности Земли, что может вызвать помехи для наземных систем различных радиослужб, использующих полосы частот спутниковых систем связи на вторичной основе, а также возможное обострение проблем электромагнитной безопасности населения и электромагнитной экологии среды обитания [1, 2].

Цель исследований – разработка методики анализа статистических распределений энергетических характеристик ансамблей электромагнитных полей (ЭМП) низкоорбитальных спутников (НОИСЗ) у земной поверхности и прогнозирование соответствующих интегральных уровней наземного электромагнитного фона (ЭМФ) с использованием доступных регистрационных данных о полной излучаемой мощности НОИСЗ – параметре TRP (total radiated power [3]), параметрах диаграмм направленности их антенн (ДНА) – коэффициенте усиления в главном лепестке (ГЛ) и уровне боковых лепестков (БЛ), высоте орбиты и количестве НОИСЗ в группировке.

Исходные модели и ограничения

Модель электромагнитного излучения низкоорбитальных спутников

Мегасозвездия НОИСЗ характеризуются послойным размещением подмножеств (отдельных созвездий) спутников в разных орбитальных плоскостях и с различными наклонениями орбит, обеспечивающим их равномерное квазирегулярное расположение над поверхностью Земли [4]. Из наземной точки наблюдения (ТН) распределение N НОИСЗ по n сферическим орбитальным оболочкам радиусов $R_i = H_i + R_E$, $i \in [1, n]$, по N_i спутников в оболочке может считаться случайным равномерным по ее площади со средней плотностью ρ_i [НОИСЗ/м²]:

$$N = \sum_{i=1}^n N_i; \quad \rho_i = \frac{N_i}{4\pi(H_i + R_E)^2}, \quad (1)$$

где $300 \leq H_i \leq 2000$ – высота орбиты i -го созвездия НОИСЗ, км; R_E – радиус Земли.

В качестве модели ДНА НОИСЗ в направлении земной поверхности может быть использована следующая двухуровневая модель с коническим лучом ГЛ равной ширины $\Delta\varphi$ по азимуту α и зенитному углу β :

$$\left. \begin{aligned} G_{ML} &= \frac{C_P}{(1+C_P)\sin^2(\Delta\varphi/4)}; & G_{SL} &= \frac{1}{(1+C_P)\cos^2(\Delta\varphi/4)}; & G_{SLR} &= \frac{G_{SL}}{G_{ML}} = \frac{\operatorname{tg}^2(\Delta\varphi/4)}{C_P}; \\ C_P &= \frac{P_{ML}}{P_{SL}}, & P_{ML} + P_{SL} &= P_{TRP}; & g_N(\alpha, \beta) &= \begin{cases} 1, & \alpha, \beta \in \Delta\Omega_{ML}; \\ G_{SLR} = \frac{\operatorname{tg}^2(\Delta\varphi/4)}{C_P}, & \alpha, \beta \in \Delta\Omega_{SL} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где G_{ML} – коэффициент усиления в ГЛ; G_{SL}, G_{SLR} – абсолютный и относительный уровни БЛ; C_P – отношение мощностей, излучаемых по ГЛ (P_{ML}) и БЛ (P_{SL}) соответственно; $\Delta\Omega_{ML}, \Delta\Omega_{SL}$ – телесный угол, соответствующий ГЛ и БЛ; $g_N(\alpha, \beta)$ – нормированная ДНА; P_{TRP} – TRP.

Поскольку все спутники в созвездии НОИСЗ можно считать одинаковыми, можно считать одинаковыми и их эквивалентные изотропно излучаемые мощности (ЭИИМ) как по ГЛ ($P_{eML} = G_{ML}P_{TRP}$), так и по БЛ ($P_{eSL} = G_{SL}P_{TRP} = G_{SLR}P_{eML}$). На рис. 1 показано направление ГЛ ЭМИ НОИСЗ к земной поверхности при $\varepsilon = \varepsilon_{\min} + \Delta\varphi/2$ (O – точка пересечения оси ГЛ с земной поверхностью). Потенциальная зона обслуживания НОИСЗ ограничивается минимальными углами места θ_{\min} прихода сигналов на наземный абонентский терминал (АТ). При наклонном положении ГЛ она имеет вид пятна, по форме близкого к эллипсу с осями L_X, L_Y и площадью $S_S \approx \pi L_X L_Y$, наибольшая длина радиолинии НОИСЗ→АТ равна R_{\max} .

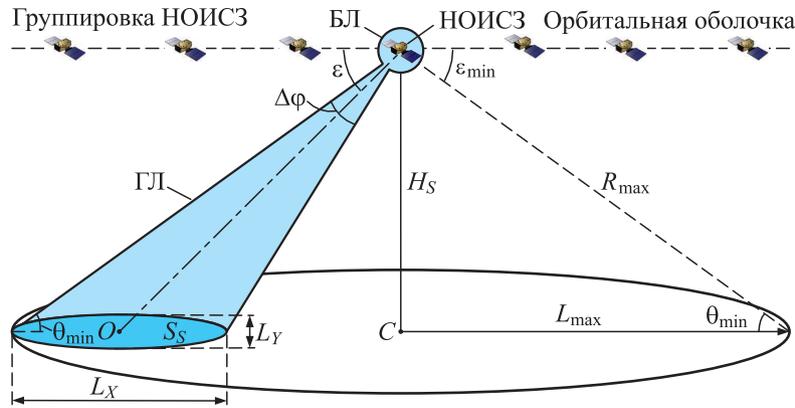


Рис. 1. Направление главного лепестка электромагнитного излучения низкоорбитальных спутников к земной поверхности

Fig. 1. Direction of the main lobe of electromagnetic radiation from low-orbit satellites to the Earth's surface

Модель размещения НОИСЗ на орбитальной оболочке с высотой орбиты H_S и ТН на земной поверхности с учетом ее сферичности приведена на рис. 2. Сферичность Земли и орбитальных оболочек НОИСЗ определяет различие между минимальным углом места наблюдения НОИСЗ из наземной ТН и минимальным углом визирования данной ТН с этого НОИСЗ: $\varepsilon_{\min} > \theta_{\min}$.

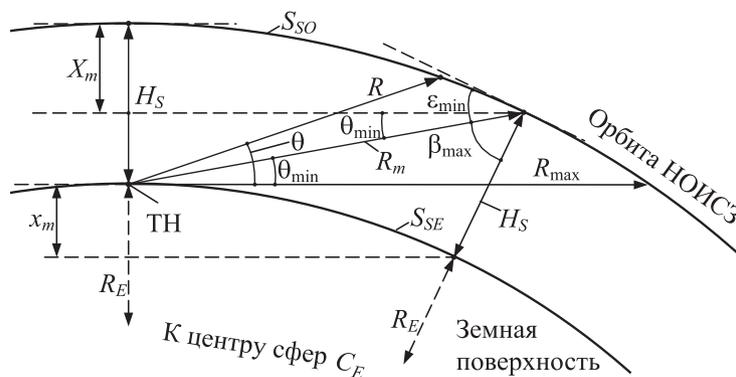


Рис. 2. Модель размещения низкоорбитальных спутников на орбитальной оболочке

Fig. 2. Model of placement of low-orbit satellites on the orbital shell

Связь между углами ε_{\min} и θ_{\min} определяется следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\min} = \frac{\pi}{2} - \beta_{\max}, \quad \beta_{\max} = \arccos \left(\frac{(H_S + R_E)^2 + R_m^2 - R_E^2}{2(H_S + R_E)R_m} \right); \\ R_m = \sqrt{R_E^2 \sin^2 \theta_{\min} + H_S^2 + 2R_E H_S - R_E \sin \theta_{\min}} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где R_m – максимальное расстояние между НОИСЗ и ТН при $90^\circ \geq \theta \geq \theta_{\min}$; β_{\max} – максимальный угол между вертикалью (надиром) в точке расположения НОИСЗ и направлением на границу его потенциальной зоны обслуживания, определяемый значением θ_{\min} .

НОИСЗ сферического сегмента высотой X_m и площадью S_{SO} орбитальной оболочки с высотой орбиты H_S облучают ТН в диапазоне углов визирования $\varepsilon \in [\varepsilon_{\min}, 90^\circ]$. Расстояние R_{\max} на рис. 2 соответствует горизонту (удаленности НОИСЗ от ТН при $\theta = 0^\circ$).

Модель условий распространения радиоволн

Будем полагать, что все анализируемые ТН земной поверхности находятся в прямой видимости от орбитальных позиций НОИСЗ – источников ЭМИ, что позволяет использовать модель условий распространения радиоволн (РРВ) в свободном пространстве

$$Z = \frac{P_e}{4\pi R^2}, \quad (4)$$

где Z – плотность потока мощности (ППМ) ЭМП, Вт/м², создаваемого в ТН; P_e – ЭИИМ НОИСЗ – точечного источника ЭМИ; R – расстояние между ТН и антенной НОИСЗ.

Интенсивность электромагнитного фона в точке наблюдения, создаваемого электромагнитными излучениями низкоорбитальных спутников

Интенсивность Z_Σ ЭМФ, создаваемого в ТН множеством M НОИСЗ, определяется в виде скалярной суммы M случайных значений ППМ ЭМП, создаваемых в ТН:

$$Z_\Sigma = \sum_{m=1}^M Z_m. \quad (5)$$

Алгоритм анализа характеристик электромагнитной обстановки

Технология системного анализа характеристик ЭМО у земной поверхности, создаваемых созвездиями НОИСЗ, основана на методологии [5] и предполагает последовательное выполнение следующих процедур:

а) определение анализируемого сценария ЭМИ созвездия НОИСЗ по отношению к земной поверхности, характеристик соответствующего данному сценарию взаимного пространственного расположения ТН, случайно выбираемой на земной поверхности, и подмножеств НОИСЗ с одинаковой ЭИИМ (P_{eML}, P_{eSL}) в направлении на ТН;

б) определение плотности распределения вероятностей (п.р.в.) $w(R)$ расстояний от НОИСЗ с ЭИИМ P_{eML} до ТН на земной поверхности;

с) определение п.р.в. $w(Z_{ML})$ ППМ ЭМП, создаваемых в ТН излучениями НОИСЗ по ГЛ, как п.р.в. случайной величины Z , функционально преобразованной с использованием зависимости, обратной (4), и $P_e = P_{eML}$, а также его матожидания $m_1(Z_{ML})$:

$$w(Z_{ML}) = w(R = \Phi^{-1}(Z)) \left| \frac{dR}{dZ} \right|, \quad R = \Phi^{-1}(Z_{ML}) = \left(\frac{P_{eML}}{4\pi Z_{ML}} \right)^{1/2}; \quad m_1(Z_{ML}) = \int_{Z_{ML \min}}^{Z_{ML \max}} Z_{ML} w(Z_{ML}) dZ_{ML}; \quad (6)$$

д) определение средней интенсивности $Z_{\Sigma ML}$ составляющей ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями НОИСЗ по ГЛ с ЭИИМ P_{eML} , как произведения среднего числа N_{ML} этих НОИСЗ, определенного на стадии «а», и среднего значения $m_1(Z_{ML})$ ППМ ЭМП НОИСЗ в ТН:

$$Z_{\Sigma ML} = N_{ML} m_1(Z_{ML}); \quad (7)$$

е) повторение стадий «б, с, д» для подмножества НОИСЗ, облучающих ТН по БЛ с ЭИИМ P_{eSL} , с определением средней интенсивности составляющей ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями подмножества НОИСЗ с ЭИИМ P_{eSL} , как произведения среднего числа этих НОИСЗ и матожидания создаваемой ими ППМ: $Z_{\Sigma SL} = N_{SL} m_1(Z_{SL})$;

г) определение среднего суммарного уровня Z_{Σ} ЭМФ в ТН как суммы компонент, образуемых излучениями данного множества НОИСЗ по ГЛ и БЛ:

$$Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma ML} + Z_{\Sigma SL}. \quad (8)$$

Анализ базовых сценариев облучения земной поверхности группировками низкоорбитальных спутников

Поскольку различные системы спутниковой связи отличаются характеристиками ЭМИ в направлении земной поверхности, вышеописанный алгоритм использован при анализе характеристик наземного ЭМФ для двух различных сценариев реализации ЭМИ НОИСЗ.

Сценарий 1. Низкоорбитальные спутники с квазиизотропным электромагнитным излучением в направлении земной поверхности

Под квазиизотропным ЭМИ НОИСЗ в направлении земной поверхности будем понимать излучение широким ГЛ ДНА, направленным вертикально вниз и охватывающим всю часть земной поверхности, визируемую из точки локализации НОИСЗ, либо значительную ее часть, соответствующую зоне обслуживания НОИСЗ в диапазоне углов места $[\theta_{\min}, \pi/2]$. Сценарий пространственного размещения наземной ТН и группировки подобных НОИСЗ, распределенных равномерно с плотностью $\rho_i = \text{const}$ по i -й орбитальной оболочке высотой H_S , приведен на рис. 3, 4. На рис. 3 облучающие ТН части ДНА НОИСЗ выделены цветом.

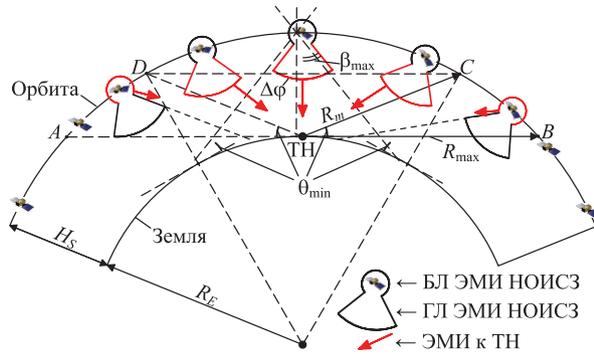


Рис. 3. Модель группировки низкоорбитальных спутников с широкими главными лепестками и ориентированными вертикально вниз электромагнитными излучениями

Fig. 3. Model of a constellation of low-orbit satellites with wide main lobes and vertically downward electromagnetic emissions

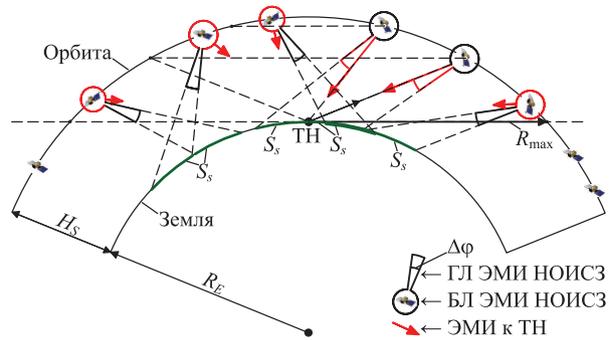


Рис. 4. Модель группировки низкоорбитальных спутников с узкими главными лепестками, разнонаправленными по отношению к точкам наблюдения

Fig. 4. Model of a constellation of low-orbit satellites with narrow main lobes, multidirectional with respect to observation points

Вариант 1. ГЛ ЭМИ НОИСЗ охватывает всю часть земной поверхности, ограниченной линией горизонта ($\theta_{\min} = 0^\circ$), БЛ ЭМИ НОИСЗ отсутствуют ($C_p \gg 1$), среднее число НОИСЗ в сегменте оболочки, ограниченном зоной радиовидимости радиусом R_{\max} из ТН, определяется по формуле

$$N_{\Sigma} = 2\pi\rho_i (R_E + H_S) H_S. \quad (9)$$

Используя вышеприведенный алгоритм, получим следующее:

1) п.р.в. $w(R)$ удаленности НОИСЗ – источника ЭМИ от ТН:

$$w(R) = \frac{R}{H_S R_E}, \quad H_S \leq R \leq \sqrt{2R_E H_S + H_S^2}; \quad (10)$$

2) в рассматриваемом случае ЭМИ НОИСЗ является изотропным лишь для множества ТН на земной поверхности, излучение происходит только в направлении Земли в телесном угле $\Omega_E = 2\pi(1 - \cos\beta_{\max})$, соответствующем $\theta_{\min} = 0^\circ$ и следующему значению β_{\max} :

$$\beta_{\max} = \arccos \frac{(H_S + R_E)^2 + R_{\max}^2 - R_E^2}{2(H_S + R_E)R_{\max}}, \quad R_{\max} = \sqrt{H_S^2 + 2R_E H_S}. \quad (11)$$

Поэтому при фиксированной TRP P_{TRP} ЭИИМ НОИСЗ в направлении земной поверхности увеличится на величину K_P , равную $4\pi/\Omega_E$: $P_e = 4\pi P_{TRP}/\Omega_E$:

$$P_e = \frac{4\pi P_{TRP}}{\Omega_E}; \quad K_P = \frac{2(H_S + R_E)}{H_S + R_E - \sqrt{H_S^2 + 2R_E H_S}}, \quad \Omega_E = 2\pi \left(1 - \frac{\sqrt{H_S^2 + 2R_E H_S}}{H_S + R_E} \right). \quad (12)$$

Случай $K_P = 1$ соответствует гипотетическому случаю с изотропными ЭМИ НОИСЗ;

3) п.р.в. $w(Z)$ ППМ, создаваемой НОИСЗ с ЭИИМ P_e в ТН:

$$w(Z) = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{(Z_{\max} - Z_{\min}) Z^2}, \quad Z_{\min} < Z < Z_{\max}, \quad Z_{\min} = \frac{P_e}{4\pi H_S (2R_E + H_S)}, \quad Z_{\max} = \frac{P_e}{4\pi H_S^2}; \quad (13)$$

4) матожидание $m_1(Z)$ определяется следующим соотношением:

$$m_1(Z) = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} Z w(Z) dZ = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} = \frac{P_e}{8\pi H_S R_E} \ln \frac{2R_E + H_S}{H_S}; \quad (14)$$

5) среднее значение Z_Σ интенсивности ЭМФ в ТН, определяемое по формуле:

$$Z_\Sigma = N_\Sigma m_1(Z) = \frac{\rho_i P_e (R_E + H_S)}{4R_E} \ln \frac{2R_E + H_S}{H_S}. \quad (15)$$

Вариант 2. Излучения НОИСЗ широкими ГЛ ДНА, направленными вертикально вниз, охватывают значительную часть земной поверхности, визируемой из точки локализации НОИСЗ, ограниченную диапазоном углов места $[\theta_{\min}, \pi/2]$. В данном случае имеет место следующее:

1) ЭМИ НОИСЗ не являются изотропными, их антенны с диаграммой направленности (2) ориентированы вертикально вниз и обеспечивают обслуживание в диапазоне $\theta \in [\theta_{\min}, 90^\circ]$ в силу конической формы ГЛ шириной $\Delta\varphi$, равной удвоенному значению максимального угла визирования ТН: $\Delta\varphi = 2\beta_{\max}$. Ширина $\Delta\varphi$ ГЛ ЭМИ НОИСЗ оказывается связанной с θ_{\min} и H_S НОИСЗ, определяющими значение β_{\max} визирования ТН в точке орбиты, наблюдаемой из ТН под углом θ_{\min} ;

2) ЭИИМ НОИСЗ в ГЛ ($P_{eML} = P_{TRP} G_{ML}$) и БЛ ($P_{eSL} = P_{TRP} G_{SL}$) будут определяться величиной P_{TRP} и коэффициентами усиления (2) антенны в ГЛ и БЛ;

3) область локализации НОИСЗ на орбитальной оболочке, облучающих ТН главными лепестками, представляет собой шаровой сегмент высотой X_m (рис. 2), определяемый величиной R_m (3) и диаметром основания DC на рис. 3; п.р.в. их удаленности от ТН имеет вид

$$w(R) = \frac{2R}{R_m^2 - H_S^2}, \quad H_S \leq R \leq R_m; \quad (16)$$

4) область локализации НОИСЗ на орбитальной оболочке, облучающих ТН боковыми лепестками, представляет собой шаровой пояс $ABCD$ на рис. 3; п.р.в. их удаленности от ТН сохраняет вид (16) при $R_m \leq R \leq R_{\max}$.

В варианте 2 средняя суммарная интенсивность ЭМФ Z_Σ равна сумме (8) значений средней интенсивности ЭМФ, создаваемых в ТН излучениями НОИСЗ по главным ($Z_{\Sigma ML}$) и боковым ($Z_{\Sigma SL}$) лепесткам, и определяемых соотношениями:

$$Z_{\Sigma ML} = \frac{\rho P_{TRP} G_{ML} (R_E + H_S) (H_S - R_m \sin \theta_{\min})}{R_m^2 - H_S^2} \ln \frac{R_m}{H_S}; \quad (17)$$

$$Z_{\Sigma SL} = \frac{P_{TRP} G_{ML} \rho (R_E + H_S) R_m \sin \theta_{\min} \operatorname{tg}^2(\Delta\varphi/4)}{C_P (R_{\max}^2 - R_m^2)} \ln \frac{R_{\max}}{R_m}. \quad (18)$$

Сценарий 2. Низкоорбитальные спутники с узконаправленным электромагнитным излучением в направлении земной поверхности

Этот сценарий (рис. 4) в наибольшей степени адекватен применительно к анализу созвездий НОИСЗ в системе Starlink, ширина лучей $\Delta\varphi$ в которой составляет $3,5^\circ - 5,5^\circ$ в зависимости от угла наклона, а множество значений наклона орбит для множества орбитальных плоскостей позволяет в первом приближении считать азимут ГЛ отдельного НОИСЗ в зоне радиовидимос-

ти из ТН равновероятным случайным при его относительно небольшом постоянном угле места θ_{\min} , обеспечивающем требуемую величину зоны обслуживания наземного АТ по направлению движения НОИСЗ. В силу указанных отличий данного сценария от рассмотренных ранее при его анализе использован иной подход, основанный на усреднении по земной поверхности суммы ППМ ЭМП, излучаемых по ГЛ, а также вероятностный подход, основанный на представлении облучения наземной ТН по ГЛ единичного НОИСЗ как редкого события и определения среднего уровня ЭМФ в ТН с использованием пуассоновской вероятностной модели.

Площадь S_S «пятна» на земной поверхности (рис. 1), облучаемого узким коническим лучом НОИСЗ шириной $\Delta\varphi$, определяется по формуле:

$$S_S \approx \frac{\pi L_X L_Y}{4}, \quad L_X = \frac{H_S [\operatorname{tg}(\varepsilon + \Delta\varphi/2) - \operatorname{tg}(\varepsilon - \Delta\varphi/2)]}{\operatorname{tg}(\varepsilon + \Delta\varphi/2) \operatorname{tg}(\varepsilon - \Delta\varphi/2)}, \quad L_Y \approx \frac{2H_S \operatorname{tg}(\Delta\varphi/2)}{\sin(\varepsilon)}. \quad (19)$$

Средняя относительная площадь S_{RA} облучения земной поверхности созвездием НОИСЗ, имеющей N_Σ спутников в орбитальной оболочке высотой H_S , запишется в виде:

$$S_{RA} = \frac{N_\Sigma S_S}{S_E} \approx \frac{\pi L_X L_Y N_\Sigma}{4S_E}, \quad S_E = 4\pi R_E^2. \quad (20)$$

Оценки с использованием (20), в частности, позволяют сделать вывод, что при завершении базовой стадии создания системы Starlink ($N_\Sigma \approx 30\,000$ на 10–15 орбитальных оболочках с высотами в пределах 340–640 км) сценарий, предполагающий наклонное положение ГЛ с $\theta_{\min} = 25^\circ$, обеспечивает практически полное «однослойное» покрытие всей земной поверхности, при котором любая точка на поверхности в каждый момент времени находится в зоне обслуживания хотя бы одного из НОИСЗ. Поскольку S_{RA} может интерпретироваться как среднее число ГЛ НОИСЗ, облучающих ТН в произвольный момент, можно полагать, что вероятность $p(k)$ ее облучения в этот момент конкретным числом k НОИСЗ определяется распределением Пуассона:

$$p(k) = \frac{S_{RA}^k}{k!} \exp(-S_{RA}). \quad (21)$$

Средняя ППМ Z_a , создаваемая в «пятне» ГЛ НОИСЗ на земной поверхности, запишется в виде:

$$Z_a \approx \frac{C_P P_{TRP} \sin^2 \varepsilon}{4\pi H_S^2 (1 + C_P) \sin^2(\Delta\varphi/4)}. \quad (22)$$

При дискретном распределении (21) вероятностей попадания ТН в зону обслуживания ровно k ГЛ НОИСЗ средняя интенсивность создаваемого ими ЭМФ в этой ТН определяется следующим образом:

$$Z_{\Sigma ML} = \sum_{k=1}^{K_m} k Z_a p(k), \quad K_m \rightarrow N_{\Sigma L}. \quad (23)$$

Очевидно, что адекватность пуассоновской модели применительно к рассматриваемому случаю ограничена, поскольку взаимное расположение ТН и НОИСЗ нельзя считать совершенно случайным, так как взаимное расположение НОИСЗ в орбитальной оболочке обладает регулярностью, необходимой для обеспечения адекватных времени ожидания и минимальной вероятности отказа обслуживания АТ. Принимая это во внимание, но учитывая наличие в мегасозвездии НОИСЗ многих орбитальных оболочек, взаимное расположение НОИСЗ которых можно считать случайным, а также независимость мегасозвездий НОИСЗ, достаточно, как правило, ограничиться рассмотрением модели (21) для $k \leq 10$.

Количество N_{SL} НОИСЗ, облучающих земную поверхность по БЛ, определяется числом НОИСЗ в зоне радиовидимости из ТН и соотношением Ω_{ML} соответствующего ГЛ, и Ω_H , стягиваемого земной поверхностью по линии горизонта и соответствующего углу β_{\max} (11) при $\theta_{\min} = 0^\circ$:

$$N_{\Sigma SL} = \frac{N_\Sigma (\Omega_H - \Omega_{ML})}{\Omega_H}, \quad \Omega_H = 2\pi \left(1 - \frac{\sqrt{H_S^2 + 2R_E H_S}}{H_S + R_E} \right), \quad \Omega_{ML} = 2\pi \left(1 - \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right). \quad (24)$$

Излучения НОИСЗ в направлении земной поверхности по БЛ можно считать изотропными в телесном угле величиной $\Omega_H - \Omega_{ML}$, поэтому для определения средней интенсивности $Z_{\Sigma SL}$ ЭМФ, создаваемого этими излучениями у земной поверхности, можно использовать соотношения (14), (15) для ЭМИ изотропных НОИСЗ (сценарий 1) подстановкой в них значений $P_e = P_{eSL}$ ЭИИМ по БЛ:

$$P_{eSL} = \frac{P_{TRP}}{(1 + C_P) \cos^2(\Delta\phi/4)}, \quad Z_{\Sigma SL} = \frac{N_{\Sigma SL} P_{eSL} \ln(R_{\max}/H_S)}{2\pi(R_{\max}^2 - H_S^2)}. \quad (25)$$

Средний суммарный уровень ЭМФ Z_{Σ} определяется аналогично (8) как сумма (23) и (25).

Количественный анализ средней интенсивности электромагнитного фона для сценариев 1, 2

На рис. 5 в качестве примера приведены следующие расчетные зависимости средней интенсивности ЭМФ, создаваемого ЭМИ по ГЛ созвездия НОИСЗ у земной поверхности, от количества НОИСЗ в системе при $P_{TRP} = 100$ Вт, $H_S = 550$ км:

- точечная коричневая линия 1 соответствует гипотетическому случаю с изотропными ЭМИ НОИСЗ при варианте 1 сценария 1 (рис. 3, соотношение (15) при $K_P = 1, P_e = P_{YRP}$);
- точечная черная линия 2 соответствует варианту 2 сценария 1 при $\theta_{\min} = 0^\circ, C_P \gg 1$ (рис. 3, соотношение (15));
- сплошная зеленая линия 3 соответствует $Z_{\Sigma ML}$ для варианта 2 сценария 1 (рис. 3, соотношение (17)) при $\theta_{\min} = 0^\circ, C_P = 1$; пунктирная зеленая линия 4 – $Z_{\Sigma ML}$ для этого варианта сценария 1 при $\theta_{\min} = 0^\circ, C_P = 5$;
- линии 5–10 соответствуют $Z_{\Sigma ML}$ при сценарии 2 (рис. 4, соотношение (23)): сплошная розовая линия 5, совпадающая с линией 1, соответствует $\theta_{\min} = 25^\circ, C_P = 1$; пунктирная розовая линия 6, совпадающая с линией 3, соответствует $\theta_{\min} = 25^\circ, C_P = 5$; сплошная красная линия 7 соответствует $\Delta\phi = 3,5^\circ, \theta_{\min} = 0^\circ, K_m = 50, C_P = 1$; пунктирная красная линия 8 соответствует $\Delta\phi = 3,5^\circ, \theta_{\min} = 0^\circ, K_m = 50, C_P = 5$; сплошная синяя линия 9 соответствует $\Delta\phi = 5,5^\circ, \theta_{\min} = 25^\circ, K_m = 50, C_P = 1$; пунктирная синяя линия 10 соответствует $\Delta\phi = 5,5^\circ, \theta_{\min} = 25^\circ, K_m = 50, C_P = 5$.

На рис. 6 в качестве примера для сценария 2 (рис. 4) приведены расчетные зависимости $Z_{\Sigma}(N_{\Sigma})$ средней интенсивности ЭМФ и его компонент $Z_{\Sigma ML}(N_{\Sigma})$ и $Z_{\Sigma SL}(N_{\Sigma})$ от количества НОИСЗ N_{Σ} в системе для $K_m = 50$ и типовых параметров НОИСЗ EMR при различных $\theta_{\min}, \Delta\phi$ и C_P ; здесь же приведена расчетная пессимистическая зависимость (15) для сценария 2:

- точечная красная линия 1 соответствует пессимистической оценке интенсивности ЭМФ (соотношение (15), вся энергия, излучаемая НОИСЗ, попадает на земную поверхность);

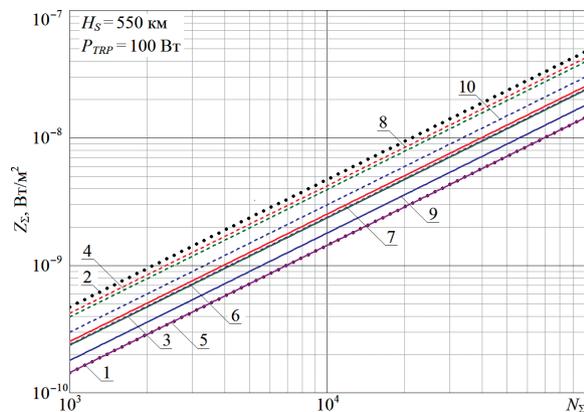


Рис. 5. Зависимость среднего уровня электромагнитного фона от количества низкоорбитальных спутников при различных сценариях функционирования спутниковой системы связи

Fig. 5. Dependence of the average level of electromagnetic background on the number of low-orbit satellites under various scenarios of operation of the satellite communication system

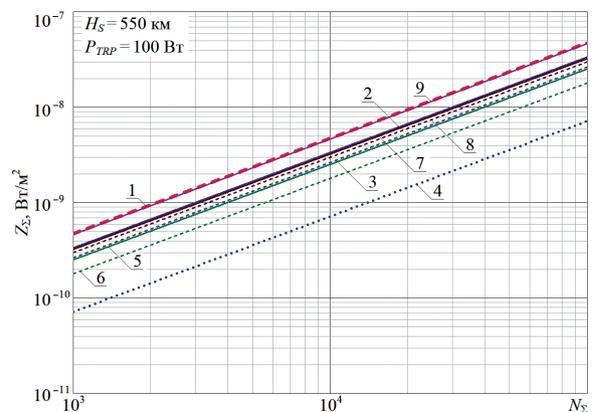


Рис. 6. Зависимость среднего уровня электромагнитного фона и его компонент от количества низкоорбитальных спутников при различных C_P, θ_{\min} и $\Delta\phi$ (сценарий 2)

Fig. 6. Dependence of the average electromagnetic background level and its components on the number of low-orbit satellites at different C_P, θ_{\min} and $\Delta\phi$ (scenario 2)

– линии 2, 3 и 4 соответствуют $\theta_{\min} = 0^\circ$, $\Delta\varphi = 10^\circ$, $C_p = 1$ – сплошная синяя линия 2 соответствует зависимости $Z_\Sigma(N_\Sigma)$, пунктирная синяя линия 3 – зависимости $Z_{\Sigma ML}(N_\Sigma)$ средней интенсивности (23) ЭМФ, создаваемой ЭМИ ГЛ; точечная синяя линия 4 – зависимости $Z_{\Sigma SL}(N_\Sigma)$ средней интенсивности (25) ЭМФ, создаваемой ЭМИ БЛ;

– линии 5 и 6 соответствуют $\theta_{\min} = 25^\circ$, $\Delta\varphi = 5,5^\circ$, $C_p = 1$ – сплошная зеленая линия 5 соответствует зависимости $Z_\Sigma(N_\Sigma)$ суммарной средней интенсивности ЭМФ, пунктирная зеленая линия 6 – зависимости $Z_{\Sigma ML}(N_\Sigma)$ средней интенсивности ЭМФ, создаваемой ЭМИ ГЛ; для этих параметров расчетная зависимость $Z_{\Sigma SL}(N_\Sigma)$ совпадает с линией 4;

– линии 7 и 8 соответствуют $\theta_{\min} = 25^\circ$, $\Delta\varphi = 5,5^\circ$, $C_p = 5$ – сплошная коричневая линия 7 соответствует зависимости $Z_\Sigma(N_\Sigma)$ суммарной средней интенсивности ЭМФ, пунктирная коричневая линия 8 – зависимости $Z_{\Sigma ML}(N_\Sigma)$ средней интенсивности ЭМФ, создаваемой ЭМИ ГЛ; составляющая $Z_{\Sigma SL}(N_\Sigma)$ практически отсутствует;

– сплошная розовая линия 9 соответствует зависимости $Z_\Sigma(N_\Sigma)$ суммарной средней интенсивности ЭМФ при $\theta_{\min} = 0^\circ$, $\Delta\varphi = 10^\circ$, $C_p = 5$.

Анализ графиков, а также детальный количественный анализ рассмотренных сценариев с использованием (9)–(25) свидетельствуют о следующем.

1. Уровень ЭМФ у земной поверхности существенно зависит от параметра C_p , характеризующего потери мощности ЭМИ на ЭМИ БЛ. С ростом C_p и уменьшением θ_{\min} зависимости $Z_\Sigma(N_\Sigma)$ приближаются к пессимистической, характерной для сценария 1 (соотношение (15)). В то же время для $C_p \leq 1$, соответствующих сканирующим антенным решеткам [6], БЛ ЭМИ НОИСЗ могут вносить заметный вклад в уровень ЭМФ.

2. В варианте 2 сценария 1 и в сценарии 2 при фиксированной P_{TRP} и исключении попадания ГЛ за пределы земной поверхности ($\theta_{\min} - \Delta\varphi/2 > 0$) изменение ширины ГЛ сопровождается соответствующим изменением усиления G_{ML} в ГЛ при практическом постоянстве доли P_{TRP} , излучаемой в телесном угле Ω_H (24). Поэтому при заданных N_Σ , θ_{\min} , P_{TRP} и C_p средняя интенсивность ЭМФ у земной поверхности практически не зависит от ширины $\Delta\varphi$ ГЛ и слабо зависит от высоты H_S орбиты НОИСЗ. При многолучевом ЭМИ НОИСЗ рост числа лучей сопровождается уменьшением мощности излучения по каждому лучу таким образом, что полная излучаемая мощность P_{TRP} остается постоянной, ограничиваемой энергетическими возможностями НОИСЗ, что можно интерпретировать как расширение эквивалентного единственного ГЛ, при принятых ограничениях не влияющее на среднюю интенсивность создаваемого ЭМФ.

3. Пессимистические оценки средних уровней ЭМФ, создаваемых созвездиями НОИСЗ (оценки наихудшего случая), могут выполняться с использованием (15), а более детальный анализ с применением (17), (18), (23), (25) позволяет оценить влияние на интенсивность ЭМФ энергетической эффективности и направленности ЭМИ НОИСЗ (параметров C_p , $\Delta\varphi$), ограничений на угол места θ_{\min} обслуживающего НОИСЗ, высот орбит H_S и др.

Заключение

1. Сопоставление среднего уровня естественного электромагнитного фона в полосах частот диапазона SHF, выделяемых мегасозвездиями низкоорбитальных спутников (Starlink, OneWeb и т. п.), по данным [7] равного примерно 10^{-20} – 10^{-19} Вт/м², со средним уровнем искусственного электромагнитного фона, создаваемого этими системами, свидетельствует о том, что последний может превышать уровень естественного электромагнитного фона на многие порядки. И хотя в целом уровни искусственного электромагнитного фона остаются достаточно низкими, столь значительное в количественном отношении изменение физических характеристик среды функционирования наземных технических систем и среды обитания населения требует весьма серьезного внимания и анализа.

2. Соотношения (9)–(18), (23), (25), полученные в результате анализа нескольких сценариев функционирования созвездий низкоорбитальных спутников, обеспечивают возможность предварительного многовариантного пессимистического количественного анализа средней интенсивности создаваемого ими электромагнитного фона у земной поверхности. Результаты, получаемые с использованием вероятностных схем (7), (21)–(23), дают практически совпадающие результаты, что может считаться свидетельством корректности этих различающихся подходов и методик анализа интенсивности электромагнитного фона.

Список литературы / References

1. Martel J. (2023) Did Low Earth Orbit Internet Satellites Trigger the COVID-19 Pandemic? *NEXUS*. 30 (3), 35–43, 82–83.
2. Furstenberg A. (2020) *The Invisible Rainbow*. Chelsea Green Publishing.
3. *CEPT Report 67*. July 6, 2018. P. 17.
4. Pehterev S., Makarenko S., Kovalsky A. (2022) Descriptive Model of Starlink Satellite Communication System. *Systems of Control, Communication and Security*. (4), 190–255. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255 (in Russian).
5. Mordachev V. (2009) *System Ecology of Cellular Communications*. Minsk, Belarusian State University Publ. (in Russian).
6. Mordachev V., Tsyantenka D. (2022) Influence of Spatial Selectivity of Radiation of Base Stations on the Level of Electromagnetic Background Created by Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 20 (7), 56–64 (in Russian).
7. Bandara P., Carpenter D. O. (2018) Planetary Electromagnetic Pollution: It is Time to Assess Its Impact. *The Lancet Planetary Health*. (2), e512–e514. DOI: 10.1016/s2542-5196(18)30221-3.

Вклад авторов

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

Свистунов А. С. принял участие в обсуждении исходных данных, методики анализа и полученных результатов.

Ционенко Д. А. принял участие в обосновании исходных данных и анализируемых сценариев формирования электромагнитной обстановки, а также в обсуждении методики анализа и полученных результатов.

Authors' contribution

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

Svistunou A. S. took part in the discussion of the initial data, analysis technique and the results obtained.

Tsyantenka D. A. took part in the substantiation of the initial data and analyzed scenarios for the formation of the electromagnetic environment, as well as in the discussion of the analysis methodology and 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 (БГУИР)

Свистунов А. С., науч. сотр. НИЛ 1.7, БГУИР

Ционенко Д. А., канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр. НИЛ 1.7, БГУИР

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 authors

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

Svistunou A. S., Researcher at the Lab. 1.7., BSUIR

Tsyantenka D. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Senior Researcher at the Lab. 1.7, BSUIR

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