



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-36-45>

УДК 621.396.218:614.89.086.5

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, СОЗДАВАЕМОГО СОЗВЕЗДИЯМИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ СВЯЗИ, НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА ОБРАЗУЕМОЙ ИМИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ТРАФИКА

В. И. МОРДАЧЕВ, Д. А. ЦИОНЕНКО

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

Аннотация. Представлена методика, позволяющая анализировать характеристики электромагнитного фона у земной поверхности, создаваемого излучениями мегасозвездий низкоорбитальных спутников связи (НСС), на основе оценок средней территориальной плотности беспроводного трафика, создаваемого ими на земной поверхности, и доступных системных характеристик НСС и их группировок, таких как высота орбиты, характеристики диаграмм направленности антенн, ограничения на угол, под которым может быть направлен главный лепесток антенны НСС к поверхности Земли, и особенности сценариев обслуживания абонентских терминалов. Полученные оценки средних уровней электромагнитного фона, соответствующие диапазону реальных значений средней плотности беспроводного трафика, создаваемого созвездиями НСС на земной поверхности, существенно превышают уровни естественного электромагнитного фона. Это соответствует оценкам, полученным ранее с использованием данных о полной излучаемой мощности НСС и их количестве в мегасозвездии, и подтверждает адекватность представленной методики.

Ключевые слова: низкоорбитальный спутник, группировка, электромагнитное излучение, диаграмма направленности антенны, территориальная плотность трафика, электромагнитный фон.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Анализ электромагнитного фона, создаваемого созвездиями низкоорбитальных спутников связи, на основе прогноза образуемой ими территориальной плотности трафика / В. И. Мордачев, Д. А. Ционенко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 3. С. 36–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-36-45>.

ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC BACKGROUND CREATED BY CONSTELLATIONS OF LOW-EARTH ORBIT SATELLITES, BASED ON THE PREDICTION OF THE CREATED AREA TRAFFIC CAPACITY

VLADIMIR I. MORDACHEV, DZMITRY A. TSYANENKA

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

Abstract. The paper presents a technique for analyzing the characteristics of the electromagnetic background near the earth's surface generated by emissions from megaconstellations of low-orbit communication satellites (LOCSS) based on estimates of the average territorial density of wireless traffic generated by them on the earth's surface and available system characteristics of the LOCSS and their constellations, such as orbit altitude, characteristics of antenna patterns, limitations on the angle at which the main lobe of the LOCSS antenna can be directed to the earth's surface, and features of subscriber terminal servicing scenarios. The obtained estimates of the average levels of the electromagnetic background, corresponding to the range of real values of the average density of wireless traffic generated by LOCSS constellations on the earth's surface, significantly exceed the levels of the natural electromagnetic background. This is consistent with the estimates obtained earlier using data on the total radiated power of LOCSS and their number in the megaconstellation, and confirms the adequacy of the presented technique.

Keywords: low-earth orbit satellite, constellation, electromagnetic radiation, antenna pattern, area traffic capacity, electromagnetic background.

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

For citation. Mordachev V. I., Tsyantenka 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).

Введение

Создание в околоземном пространстве мегагруппировок низкоорбитальных спутников связи (НСС) (Starlink, OneWeb, Astra, Kuiper, GuoWang, «Сфера» и др.) увеличит на несколько порядков количество космических источников электромагнитного излучения (ЭМИ) диапазона СВЧ в направлении земной поверхности. Подобное «развитие событий» способно привести к недопустимому усложнению электромагнитной обстановки (ЭМО) для систем различных радиослужб, функционирующих в полосах частот этих группировок на земной поверхности и в воздушном пространстве на вторичной основе, а также к существенному росту интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), способному обострить проблемы электромагнитной безопасности населения и электромагнитной экологии среды обитания, особенно при интеграции этих систем спутниковой связи (ССС), обеспечивающих высокие скорости и относительно низкие задержки передачи информации наземным абонентским терминалам (АТ), с глобальными системами мобильной связи 5G/6G.

В [1, 2] разработана методика анализа интенсивности ЭМФ, создаваемого созвездиями НСС, на основе оценок количества космических аппаратов (КА) в группировке, полной излучаемой мощности КА, параметров ЭМИ в главном и боковых лепестках диаграммы направленности его антенны (ДНА), высоты орбиты КА и ограничений на угол, под которым могут быть направлены главные лепестки (ГЛ) излучения антенн КА к поверхности Земли при обслуживании АТ. Методика позволяет анализировать статистические и интегральные энергетические характеристики ЭМО, представляемой в виде ансамбля N радиочастотных электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых группировками НСС (НГСС) в точке наблюдения (ТН) у земной поверхности. Недостатком методики, предложенной в [1, 2], является определенная трудность в сборе необходимых исходных данных, иногда относящихся к разряду конфиденциальных.

Цель исследований – разработка методики, позволяющей анализировать характеристики ЭМФ у земной поверхности на основе оценок средней территориальной плотности нисходящего трафика АТС (бит/с/м²) (Area Traffic Capacity), создаваемого НГСС на земной поверхности, и доступных системных характеристик НГСС, таких как высота орбит КА, количество орбитальных оболочек, характеристики диаграммы направленности антенн КА и АТ и ограничения на угол места, при котором может быть реализован канал связи КА–АТ.

Методика анализа

При анализе характеристик ЭМФ у земной поверхности, создаваемых излучениями НГСС, воспользуемся моделями [1, 2] и подходом [3] к оценке уровня ЭМФ, создаваемого системами мобильной связи, на основе прогноза АТС.

Необходимая мощность полезного сигнала на входе радиоприемника абонентского терминала

1. В соответствии с теоремой Шеннона – Хартли потенциальная пропускная способность радиоканала V_P (бит/с) определяется следующими соотношениями:

$$V_P \approx \Delta F_R \log_2(1 + SNIR_P); \nu_P = \frac{V_P}{\Delta F_R} \approx \log_2(1 + SNIR_P); SNIR_P \approx \frac{P_0}{p_N + p_{INT}} = 2^{\nu_P} - 1, \quad (1)$$

где ν_P – потенциальная спектральная эффективность, бит/с/Гц, передачи информации в радиоканале с шириной полосы частот ΔF_R , Гц; $SNIR_P$ – отношение «сигнал/(шум+помеха)» (Signal-to-Noise-plus-Interference Ratio); $p_0 \approx \text{const}$, $p_N = kT_0K_N \approx \text{const}$ и $p_{INT} \approx \text{const}$, Вт/Гц – спектральные плотности мощности радиосигнала, собственного шума приемника и помех в полосе ΔF_R соответственно; k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; K_N – коэффициент шума радиоприемника, ед.; T_0 – температура окружающей среды, К ($T_0 = 290$ К).

2. Реальная скорость V_R передачи информации в канале связи в m раз меньше потенциальной пропускной способности радиоканала V_P ; во столько же раз реальная спектральная эффективность υ_P передачи информации в канале меньше потенциальной υ_P . Обеспечение скорости передачи данных, равной V_P при постоянном ΔF_R , требует значительного увеличения $SNIR_R$ в реальном канале по сравнению с потенциальным уровнем $SNIR_P$. В этом случае:

$$V_R = \frac{\upsilon_P}{m} = \frac{\log_2(1 + SNIR_P)}{m} = \frac{\log_2(1 + SNIR_R)^{1/m}}{m} \approx \frac{\log_2 SNIR_R}{m^2}; SNIR_R \approx SNIR_P^m. \quad (2)$$

Параметр m в (2), отражающий соотношение потенциальных и реальных характеристик радиоканала, позволяет учесть вклад технологии ММО [4] в повышение спектральной эффективности передачи информации по радиоканалу и в некоторых случаях может быть меньше единицы. Но в радиоканалах сотовой (мобильной) связи без использования технологии ММО $m \approx 2-10$ [5], и достигаемое увеличение спектральной эффективности в этих радиоканалах за счет технологии ММО в 2–8 раз фактически позволяет лишь скомпенсировать неидеальность процессов модуляции/демодуляции и кодирования-декодирования. Поэтому интерес представляет выполнение оценок для $m = 1$ в предположении, что скорость передачи данных V_R в радиоканалах ССС близка к потенциальной V_P в определении (1): $V_R \approx V_P$.

3. Минимально необходимая мощность полезного сигнала P_0 в радиоканале (реальная чувствительность радиоприема), при которой обеспечивается пропускная способность V_P радиоканала с тепловым шумом мощностью $P_N \approx p_N \Delta F_R$ и помехой мощностью $P_{INT} \approx p_{INT} \Delta F_R$, определяется следующим соотношением (пренебрегая различиями влияния внутрисетевой помехи и теплового шума на пропускную способность радиоканала):

$$P_0 = p_{N\Sigma} \Delta F_R (2^{\upsilon_P} - 1) = p_{N\Sigma} \Delta F_R SNIR_P, p_{N\Sigma} = (K_{CC} + 1) p_N, p_0 / p_{N\Sigma} = SNIR_P, \quad (3)$$

где $p_{N\Sigma}$ – суммарная спектральная плотность мощности собственного шума и помехи в радиоканале; K_{CC} – коэффициент, характеризующий превышение уровнем помехи уровня теплового шума, $K_{CC} \approx P_{INT}/P_N$.

Величина K_{CC} определяется качеством частотно-пространственного планирования ССС, функционированием в соседних радиоканалах других ССС, а также наличием функционирующих в тех же полосах частот систем других радиослужб на вторичной основе, и может принимать значения в широких пределах от 0 (внутрисетевая помеха отсутствует) до 10 и более при низком качестве обеспечения внутрисистемной и межсистемной электромагнитной совместимости (ЭМС).

Энергия на бит при приеме информации абонентским терминалом

При минимально необходимой мощности полезного сигнала P_0 на входе радиоприемника АТ минимально необходимая энергия сигнала для приема одного бита информации со скоростью V_P , бит/с, должна быть не менее следующего значения, Дж/бит:

$$E_{br} = \frac{P_0}{V_P} = \frac{(K_{CC} + 1) p_N (2^{\upsilon_P} - 1)}{\upsilon_P} = \frac{(K_{CC} + 1) p_N SNIR_P}{\log_2(1 + SNIR_P)}. \quad (4)$$

Поскольку энергия, необходимая для приема АТ одного бита информации, может быть рассчитана через плотность потока мощности (ППМ) излучения КА у земной поверхности и эквивалентную площадь приемной антенны АТ, можно определить значение ППМ и соответствующую мощность излучения в ГЛ антенны КА, которая необходима для передачи одного бита информации обслуживаемому АТ, находящемуся на поверхности Земли. Для этого используем следующую идеализированную двухуровневую модель ДНА АТ [1, 2], в которой ГЛ имеет коническую форму шириной $\Delta\varphi_{AT}$, а соотношение мощностей в режиме приема по главному (P_{MAT}) и боковым (P_{SAT}) лепесткам ДНА равно C_{PAT} :

$$G_{MAT} = \frac{C_{PAT}}{(1 + C_{PAT}) \sin^2(0,25\Delta\varphi_{AT})}; G_{SAT} = \frac{1}{(1 + C_{PAT}) \cos^2(0,25\Delta\varphi_{AT})}; C_{PAT} = P_{MAT} / P_{SAT}, \quad (5)$$

где G_{MAT} – коэффициент усиления (КУ) антенны АТ по ГЛ (КПД антенны $\eta = 1$ в рамках рассматриваемой модели); G_{SAT} – КУ антенны АТ по уровню боковых лепестков (БЛ), принимаемый

постоянным во всех направлениях вне ГЛ, в этой модели при относительно малой ширине ГЛ ($\Delta\varphi_{AT} \leq 20^\circ$) уровень БЛ мало зависит от $\Delta\varphi_{AT}$: $G_{SAT} \approx 1/(1+C_{PAT})$.

Эффективная площадь S_{eAT} антенны наземного АТ при приеме сигнала КА главным коническим лепестком шириной $\Delta\varphi_{AT}$ определяется по формуле

$$S_{eAT} = \frac{G_{MAT}\lambda^2}{4\pi} = \frac{C_{PAT}\lambda^2}{4\pi(1+C_{PAT})\sin^2(0,25\Delta\varphi_{AT})}. \quad (6)$$

Таким образом, ППМ Z_E , Вт/м², ЭМИ, создаваемая у земной поверхности в точке размещения обслуживаемого АТ, при $m = 1$ может быть определена следующим образом:

$$Z_E = \frac{P_0}{S_{eAT}} = \frac{4\pi P_0}{G_{MAT}\lambda^2} = \frac{4\pi\Delta F_R (K_{CC} + 1) p_N (2^{\nu_P} - 1)}{G_{MAT}\lambda^2} = \frac{4\pi\Delta F_R (K_{CC} + 1) p_N SNIR_p}{G_{MAT}\lambda^2}. \quad (7)$$

Оценки излучаемой энергии на бит информации на основе учета потерь при РРВ

Используя для представления характеристик излучения КА двухуровневую модель (5) с параметрами P_{MSC} , P_{SSC} , C_{PSC} (мощности излучения по Гл и БЛ, а также их отношение соответственно), G_{MSC} , G_{SSC} (уровни ГЛ и БЛ соответственно), определим требуемую излучаемую энергию на бит передаваемой информации с учетом затухания сигнала на радиолинии КА–АТ. Для того чтобы сигнал на входе приемника имел энергетику (4), необходимо выполнение следующих условий:

– радиосигналы должны излучаться передатчиками КА с мощностью, компенсирующей базовые потери при распространении радиоволн (РРВ) от антенны передатчика КА к антенне приемника АТ [6]; применительно к рассматриваемому случаю ограничимся учетом потерь L_{bf} при РРВ в свободном пространстве (поскольку радиолинии КА–АТ диапазона СВЧ и КВЧ являются радиолиниями прямой видимости, лишь в малой части захватывают плотные слои атмосферы и в большинстве случаев реализуются на частотах, на которых затуханием сигналов в атмосфере можно пренебречь, в том числе в окнах прозрачности нижней части миллиметрового диапазона);

– мощность излучения может быть уменьшена при использовании направленных антенн КА и АТ, поскольку потери L при передаче сигнала по радиолинии определяются известным соотношением [6]

$$L = L_{bf} / (G_T G_R), \quad (8)$$

где $G_T = G_{MSC}$, $G_R = G_{MAT}$ – коэффициенты усиления передающих антенн КА и приемных антенн АТ соответственно.

Затухание при РРВ с длиной волны λ в свободном пространстве на расстояние R и потери при передаче сигнала по радиолинии определяются по формулам [7]:

$$L_{bf} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2; \quad L = \frac{L_{bf}}{G_{MSC} G_{MAT}} = \frac{16\pi^2 R^2}{\lambda^2 G_{MSC} G_{MAT}}. \quad (9)$$

Излучаемая энергия на бит передаваемой информации должна быть обеспечена на уровне, не ниже $E_{bt} = E_{br}L$

$$E_{bt}(R) = \frac{E_{br}L_{bf}}{G_{MSC}G_{MAT}} = \frac{16\pi^2 (K_{CC} + 1) p_N (2^{\nu_P} - 1) R^2}{\lambda^2 G_{MSC} G_{MAT} \nu_P} = \frac{16\pi^2 (K_{CC} + 1) p_N SNIR_p R^2}{\lambda^2 G_{MSC} G_{MAT} \log_2(1 + SNIR_p)}. \quad (10)$$

Если скорость передачи информации по радиоканалу КА–АТ с полосой частот ΔF_R соответствует его потенциально пропускной способности (1), то мощность $P_{MSC}(R)$, излучаемая в ГЛ ДНА КА, и полная излучаемая мощность (total radiated power) КА $P_{TRSC}(R)$, ($P_{TRSC} = P_{MSC} + P_{SSC}$) могут быть определены следующим образом в зависимости от расстояния R между КА и АТ:

$$\left. \begin{aligned} P_{MSC}(R) &= E_{bt}(R) V_P = Y R^2, \quad P_{TRSC}(R) = P_{MSC}(R) \frac{1+C_{PSC}}{C_{PSC}}; \\ Y &= \frac{16\pi^2 (K_{CC} + 1) p_N (2^{\nu_P} - 1) \Delta F_R}{\lambda^2 G_{MSC} G_{MAT}} = \frac{16\pi^2 (K_{CC} + 1) p_N SNIR_p \Delta F_R}{\lambda^2 G_{MSC} G_{MAT}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Для получения зависимости полной излучаемой мощности $P_{TRSC}(V_R)$ в реальном радиоканале КА–АТ от его требуемой реальной пропускной способности V_R при заданных параметрах, входящих в (11), модифицируем соотношение (10) с использованием (1), (2) следующим образом:

$$E_{bt}(R) = \frac{16\pi^2 (K_{CC} + 1) p_N (2^{mV_R} - 1) R^2}{\lambda^2 G_{MSC} G_{MAT} m V_R} = \frac{16\pi^2 (K_{CC} + 1) p_N m [(1 + SNIR_R)^{1/m} - 1] R^2}{\lambda^2 G_{MSC} G_{MAT} \log_2(1 + SNIR_R)}. \quad (12)$$

В приведенных соотношениях также требуется учесть, что расстояние R между КА и АТ определяется не только высотой H_S орбиты КА и углом места θ , под которым его ГЛ направлен к земной поверхности, но и кривизной земной поверхности – ее сферичностью с радиусом R_E (рис. 1). Соотношение, связывающее величины K , R_E , H_S , записывается в виде:

$$R = \sqrt{R_E^2 \sin^2 \theta + H_S^2 + 2R_E H_S} - R_E \sin \theta. \quad (13)$$

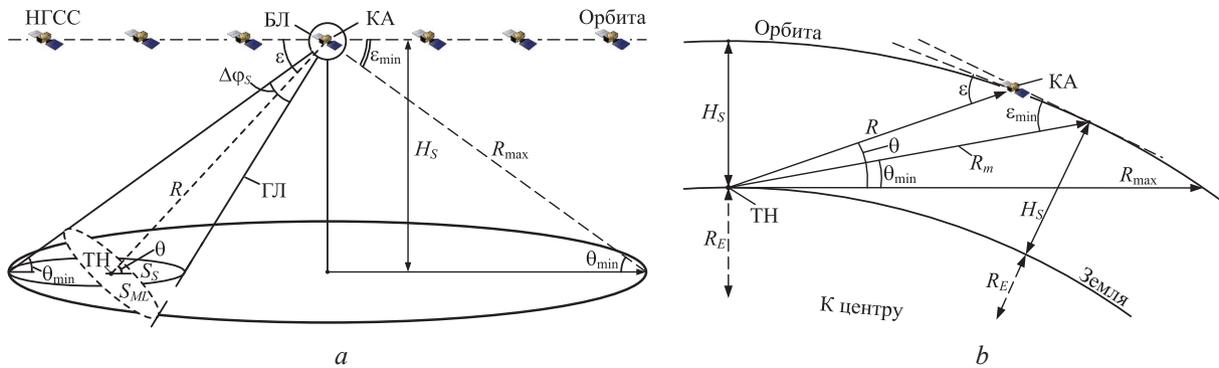


Рис. 1. Взаимное расположение КА-источника электромагнитного излучения и наземной точки наблюдения: *a* – формирование «пятна» главного лепестка на земной поверхности; *b* – учет сферичности земной поверхности

Fig. 1. Relative position of the low-orbit communication satellites of electromagnetic radiation and the ground observation point: *a* – formation of the “spot” of the main lobe on the earth’s surface; *b* – taking into account the sphericity of the earth’s surface

Средняя территориальная плотность мобильного трафика и уровень ЭМФ

В зависимости от сценария функционирования НГСС с круговой орбитой постоянной высоты H_S расстояние R между передающей антенной КА и ТН на земной поверхности, попадающей в «пятно облучения» ГЛ ДНА КА (рис. 1), может быть принято либо фиксированным, либо изменяющимся в определенных пределах.

Сценарий 1. Если КА использует узкий конический луч шириной $\Delta\varphi_{SC}$ с постоянным углом наклона ε по отношению к касательной к орбите или с фиксированным углом места θ направления прихода сигнала НГСС к наземным АТ (рис. 1), то расстояние от КА-источника ЭМИ до ТН в пятне облучения на земной поверхности практически постоянно: $R \approx \text{const}$. Таким образом, при этом сценарии необходимая полная излучаемая мощность КА $P_{TRCS}(R)$ может быть определена непосредственно с использованием (11).

Сценарий 2. Если КА и АТ используют узкие конические лучи шириной $\Delta\varphi_{SC}$ и $\Delta\varphi_{AT}$ с переменными углами наклона ε по отношению к касательной к орбите или с переменными углами места θ направления прихода сигнала НГСС к наземным АТ таким образом, чтобы в диапазоне углов места $\theta \in [\theta_{\min}, 90^\circ]$, $\theta_{\min} \geq 0^\circ$, ГЛ антенн КА и АТ были направлены друг на друга, то интервал значений расстояния между КА и АТ $R \in [H_S, R_m \leq R_{\max}]$ (рис. 1). При равновероятном расположении КА в различных точках орбиты расстояние (13) также случайно с плотностью распределения вероятности (п.р.в.) $w(R)$, имеющей следующий вид [1, 2]:

$$w(R) = 2R / (R_m^2 - H_S^2); \quad H_S \leq R \leq R_m \leq R_{\max}; \quad R_{\max} = \sqrt{2R_E H_S + H_S^2}. \quad (14)$$

При анализе данного сценария необходимо учитывать следующие варианты.

- В случае наличия в системе регулирования мощности P_{MLS} ($P_{MSC}(R) \approx P_{TRSC}(R)$) постоянной величиной является необходимая мощности P_0 полезного сигнала (3), определяющая заданную пропускную способность радиоканала КА–АТ. Случайные величины – необходимая полная излучаемая мощность КА $P_{TRSC}(R)$ и необходимый уровень излучаемой энергии на бит передаваемой информации $E_{bt}(R)$. П.р.в. $w(E_{bt})$ и матожидание $\langle E_{bt} \rangle$ могут быть определены по известным методикам [1, 2]:

$$w(E_{bt}) = \frac{1}{E_{bt\max} - E_{bt\min}} = \frac{1}{X(R_m^2 - H_S^2)}; \quad \langle E_{bt} \rangle = \frac{E_{bt\max} + E_{bt\min}}{2} = \frac{X(R_m^2 + H_S^2)}{2}; \quad (15)$$

$$X = \frac{16\pi^2 (K_{CC} + 1) p_N (2^{m_{VR}} - 1)}{\lambda^2 G_{MSC} G_{MAT} m \nu_R} = \frac{16\pi^2 (K_{CC} + 1) p_N m [(1 + SNIR_R)^{1/m} - 1]}{\lambda^2 G_{MSC} G_{MAT} \log_2(1 + SNIR_R)}. \quad (16)$$

- Средняя территориальная плотность мобильного трафика ATC_A , создаваемая на земной поверхности излучениями всех КА, принадлежащих ССС, которая состоит из N_{SC} КА, по нисходящим радиоканалам КА–АТ с емкостью каждого канала V_{CH} , бит/с, определяется по формуле:

$$ATC_A = V_{CH} N_{SC} / (4\pi R_E^2). \quad (17)$$

Результаты анализа

Расчетные зависимости $ATC_A(C_{CH})$ для различного числа КА N_S приведены на рис. 2, а.

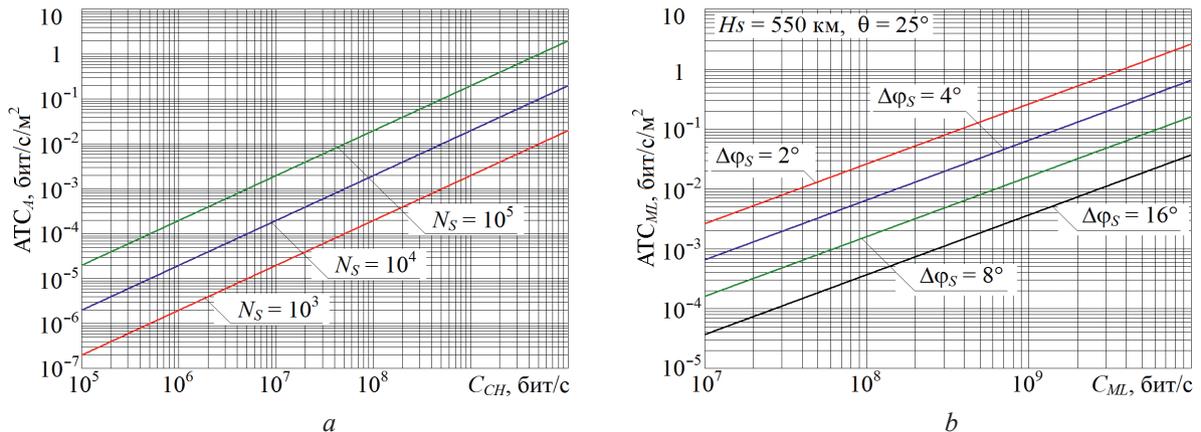


Рис. 2. Расчетные зависимости средней территориальной плотности беспроводного трафика от скорости передачи данных по радиоканалу НСС→АТ (C_{CH}) и в ГЛ НСС (C_{ML}):

a – зависимости $ATC_A(C_{CH})$ при различном числе НСС в их мегасозвездии; *b* – зависимости $ATC_A(C_{ML})$ в «пятне» ГЛ ЭМИ НСС на земной поверхности при $\theta = 25^\circ$, $H_S = 550$ км и различной ширине ГЛ $\Delta\varphi_S$

Fig. 2. Calculated dependencies of the average area traffic capacity on the data transfer rate in the downlink radio channel (C_{CH}) and in the LEOS main lobe (C_{ML}): *a* – $ATC_A(C_{CH})$ dependencies for different LEOS numbers in their megaconstellation; *b* – $ATC_A(C_{ML})$ dependencies in the LEOS main lobe “spot” on the earth’s surface for $\theta = 25^\circ$, $H_S = 550$ km and different main lobe width $\Delta\varphi_S$

Территориальная плотность мобильного трафика ATC_{ML} , создаваемая излучением единичного КА в пятне ГЛ на земной поверхности, равна отношению скорости передачи данных по нисходящему радиоканалу КА–АТ $V_{ML} = V_{CH}$ (бит/с) к площади пятна ГЛ на земной поверхности [1, 2]:

$$ATC_{ML} = \frac{V_{CH}}{S_S} \approx \frac{V_{CH} 2\text{tg}(\varepsilon + 0,5\Delta\varphi_S) \text{tg}(\varepsilon - 0,5\Delta\varphi_S) \sin(\varepsilon)}{\pi H_S^2 [\text{tg}(\varepsilon + 0,5\Delta\varphi_S) - \text{tg}(\varepsilon - 0,5\Delta\varphi_S)] \text{tg}(0,5\Delta\varphi_S)}. \quad (18)$$

Расчетные зависимости $ATC_{ML}(C_{ML})$ при различных значениях ширины $\Delta\varphi_S$ приведены на рис. 2, *b*. Эти зависимости свидетельствуют о том, что средняя территориальная плотность беспроводного трафика, которую может создавать НГСС у земной поверхности, на 6–8 порядков меньше уровня, декларируемого в [8] для систем мобильной связи 5G, и на 8–10 – деклари-

руемого в [9] для перспективных систем 6G. Если известна средняя территориальная плотность мобильного трафика ATC_A (бит/с/м²), то в данном сценарии, когда вся энергия, излучаемая КА в ГЛ, достигает земной поверхности, создаваемая этими излучениями ППМ, которая определяет ЭМФ от космического компонента НГСС у земной поверхности, вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} Z_{ATC} = \langle E_{bt} \rangle ATC_A &= \frac{8\pi^2 (K_{CC} + 1) p_N (2^{m\nu_R} - 1) (R_m^2 + H_S^2)}{\lambda^2 G_{MSC} G_{MKA} m\nu_R} ATC_A = \\ &= \frac{8\pi^2 (K_{CC} + 1) p_N m \left[(1 + SNIR_R)^{1/m} - 1 \right] (R_m^2 + H_S^2)}{\lambda^2 G_{MSC} G_{MKA} \log_2 (1 + SNIR_R)} ATC_A. \end{aligned} \quad (19)$$

На рис. 3 приведены расчетные зависимости ЭМФ $Z_{ATC}(ATC_A)$ (19) для $\lambda = 2$ см (15 ГГц), $K_{CC} = 2$, $m = 2$, $\theta_{\min} = 0^\circ$ и реальных диапазонов изменения G_{MSC} , G_{MAT} , ν_R , $SNIR_R$. Использована двойная оцифровка шкал: оцифровка черным шрифтом соответствует диапазону значений ATC_A , декларируемых в [8, 9] для систем 4G/5G/6G, а оцифровка цветным шрифтом – диапазону значений ATC_A , соответствующих данным рис. 2. Особенность этих зависимостей состоит в том, что средняя плотность мобильного трафика считается постоянной по всей земной поверхности вне зависимости от реального неравномерного «очагового» распределения потребителей информационных услуг по территории. Именно этим можно объяснить то, что при гипотетических значениях ATC , соответствующих декларациям 4G (10^5 бит/с/м²), средняя интенсивность создаваемого ЭМФ ненамного ниже предельно допустимого уровня (ПДУ) 10 мкВт/см²; при $ATC = 10^7$ бит/с/м², декларируемой для 5G, средняя интенсивность ЭМФ близка к ПДУ только при очень высокой направленности антенн КА и АТ ($G_T = G_R = 40$ дБ), а при $ATC = 10^9$ бит/с/м², декларируемой для 6G, расчетная средняя интенсивность создаваемого ЭМФ близка к уровням, соответствующим «тепловым» рекомендациям ICNIRP, и даже существенно превышающим данные уровни при $G_T = G_R < 40$ дБ. Это означает, что средние уровни ATC , декларируемые для систем 4G/5G/6G, как и расчетные средние уровни ЭМФ, иллюстрируемые графиками на рис. 3, являются пиковыми, характерными для наземных участков малой площади (хот-спотов), оборудованных терминалами ССС, на которые «фокусируются» потоки данных с КА, и где радиочастотный ЭМФ создается излучениями множества точек доступа (пико-БС) хот-спотов. Расчетные же уровни Z_{ATC} на рис. 3, соответствующие диапазону реальных значений средней ATC_A [10^{-4} – 10^2 бит/с/м²] (цветной оцифровке шкал по горизонтали и вертикали), на 2–3 порядка превышают уровни [10] естественного ЭМФ в диапазоне 10–20 ГГц и близки к ранее выполненным оценкам интенсивности создаваемого ЭМФ с использованием данных о полной излучаемой мощности P_{TRSC} КА и количестве КА в НГСС, что может служить подтверждением адекватности модели (19).

При отсутствии в системе регулировки P_{MSC} , P_{TRSC} фиксирована и обеспечивает постоянство излучаемой энергии на бит передаваемой информации в радиоканале КА–АТ: $E_{bt} = \text{const}$. Случайными величинами являются значения ППМ, создаваемой КА у земной поверхности в точке размещения обслуживаемого АТ, мощность полезного сигнала P_0 и $SNIR$ на входе приемника АТ и пропускная способность радиоканала V_p . При радиоприеме АТ энергия E_{br} одного бита информации зависит от случайной величины R с п.р.в. П.р.в. $w(E_{br})$ и матожидание $\langle E_{br} \rangle$ могут быть определены с использованием (10) по методикам [1, 2]:

$$\begin{aligned} w(E_{br}) &= \frac{E_{br \min} E_{br \max}}{(E_{br \max} - E_{br \min}) E_{br}^2}; \langle E_{br} \rangle = \frac{E_{br \min} E_{br \max}}{E_{br \max} - E_{br \min}} \ln \frac{E_{br \max}}{E_{br \min}}; E_{br \min} \leq E_{br} \leq E_{br \max}; \\ E_{br \min} &= \frac{E_{bt} G_T G_R \lambda^2}{16\pi^2 R_m^2}; E_{br \max} = \frac{E_{bt} G_T G_R \lambda^2}{16\pi^2 H_S^2}, \end{aligned} \quad (20)$$

где R_m – определяется по (13) при $\theta = \theta_{\min}$.

Используя (1), (2) и (4), значения $E_{br \min}$, $E_{br \max}$ можно связать с минимальными и максимальными значениями отношений $SNIR_{P \min}$, $SNIR_{R \min}$, $SNIR_{P \max}$, $SNIR_{R \max}$ и с соответствующими значениями спектральной эффективности $(\nu_P)_{\min}$, $(\nu_R)_{\min}$, $(\nu_P)_{\max}$, $(\nu_R)_{\max}$:

$$\left. \begin{aligned}
 E_{br \min} &= \frac{(K_{CC} + 1) p_N SNIR_{P \min}}{\log_2(1 + SNIR_{P \min})} = \frac{(K_{CC} + 1) p_N m \left((1 + SNIR_{R \min})^{1/m} - 1 \right)}{\log_2(1 + SNIR_{R \min})} = \\
 &= \frac{(K_{CC} + 1) p_N \left(2^{(\nu_P)_{\min}} - 1 \right)}{(\nu_P)_{\min}} = \frac{(K_{CC} + 1) p_N \left(2^{m(\nu_R)_{\min}} - 1 \right)}{m \cdot (\nu_R)_{\min}}, \quad (\nu_P)_{\min} = m \cdot (\nu_R)_{\min}; \\
 E_{br \max} &= \frac{(K_{CC} + 1) p_N SNIR_{P \max}}{\log_2(1 + SNIR_{P \max})} = \frac{(K_{CC} + 1) p_N m \left((1 + SNIR_{R \max})^{1/m} - 1 \right)}{\log_2(1 + SNIR_{R \max})} = \\
 &= \frac{(K_{CC} + 1) p_N \left(2^{(\nu_P)_{\max}} - 1 \right)}{(\nu_P)_{\max}} = \frac{(K_{CC} + 1) p_N \left(2^{m(\nu_R)_{\max}} - 1 \right)}{m \cdot (\nu_R)_{\max}}, \quad (\nu_P)_{\max} = m \cdot (\nu_R)_{\max},
 \end{aligned} \right\} (21)$$

где

$$(\nu_P)_{\min} \approx \log_2(1 + SNIR_{P \min}), \quad (\nu_P)_{\max} \approx \log_2(1 + SNIR_{P \max}), \quad SNIR_{P \max} / SNIR_{P \min} = R_m^2 / H_s^2. \quad (22)$$

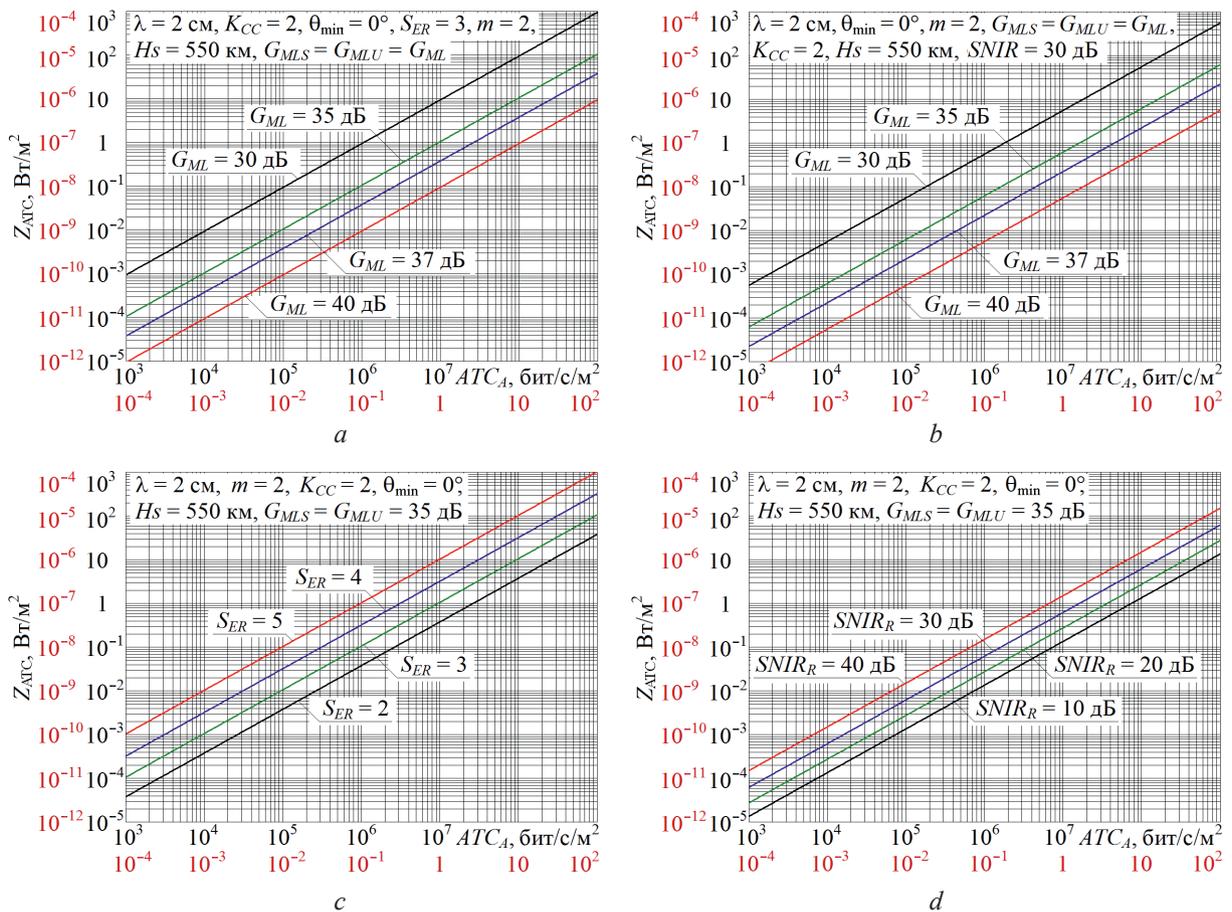


Рис. 3. Расчетные зависимости Z_{ATC} (АТЦ) для принятых ранее типовых характеристик радиоканала: a – при $S_{ER} = 3$; b – при $SNIR_R = 30$ дБ; c – при различной спектральной эффективности радиоканала; d – при различном отношении $SNIR_R$ в радиоканале

Fig. 3. Calculated Z_{ATC} (ATC) dependencies for the previously adopted radio channel typical characteristics: a – for $S_{ER} = 3$; b – for $SNIR_R = 30$ дБ; c – for different radio channel spectral efficiency; d – for different $SNIR_R$ ratios in radio channel

Используя (20) и (4), можно оценить значение ЭМФ у земной поверхности, создаваемого как в пятне ГЛ отдельного КА, так и всем НГСС, а также изменения в $SNIR_R$, ν_R и Z_{ATC} при изменении расстояния между АТ и КА из-за его перемещения по орбите. Однако очевидно, что в связи с относительно малым динамическим диапазоном изменений расстояния R между КА и ТН на земной поверхности эти оценки будут мало отличаться от оценок, приведенных на рис. 3.

Средняя мощность принимаемого сигнала $\langle P_0 \rangle$ равна произведению средней энергии (20) одного бита этого сигнала $\langle E_{br} \rangle$ на скорость V_P приема информации: $\langle P_0 \rangle = V_P \langle E_{br} \rangle$. Среднее значение ППМ $\langle Z_{UEA} \rangle$, создаваемое антеннами КА в пятне ГЛ, которое обеспечивает прием информации АТ с антенной эффективной площадью S_{eAT} , будет равно $\langle Z_{UEA} \rangle = \langle P_0 \rangle / S_{eAT}$. При этом мощность P_{rSC} , излучаемая антенной КА в ГЛ, может быть определена через площадь S_{ML} поверхности, стягивающей телесный угол ГЛ (рис. 1, а), как $P_{rSC} = \langle Z_{UEA} \rangle S_{ML}$.

Заключение

1. Представлены основные положения методики, позволяющей анализировать характеристики электромагнитной обстановки у земной поверхности на основе оценок средней территориальной плотности нисходящего трафика, создаваемого мегасозвездиями низкоорбитальных спутников связи (НСС), и их доступных системных характеристик. К исходным данным относятся высота орбит космических аппаратов, их количество в группировках НСС, диаграммы направленности антенн космических аппаратов и абонентских терминалов и ограничения на угол места, при котором допускается обслуживание абонентских терминалов, а также особенности сценариев их обслуживания.

2. Расчетные средние уровни электромагнитного фона, соответствующие диапазону реальных значений средней плотности беспроводного трафика, создаваемого созвездиями НСС на земной поверхности, на 2–3 порядка превышают уровни естественного электромагнитного фона [10] в полосе частот 10–20 ГГц. Это соответствует оценкам в [1, 2], которые получены с использованием данных о полной излучаемой мощности космических аппаратов и их количестве в группировках НСС, что может служить подтверждением адекватности разработанной методики оценки электромагнитного фона.

3. Прием/передача больших объемов данных по радиоканалам систем спутниковой связи для индивидуальных потребителей вместо использования ими наземной инфраструктуры сетей мобильной связи 4G/5G могут обеспечить значительное локальное снижение интенсивности радиочастотного электромагнитного фона у поверхности Земли до уровней, на несколько порядков ниже установленных ПДУ для населения. Поэтому интеграция спутниковых систем связи с использованием группировок НСС и наземных систем 4G/5G/6G может стать перспективным путем обеспечения электромагнитной экологичности и безопасности этих систем для населения. В частности, интеграция систем спутниковой связи с наземными системами может быть основана на создании хот-спотов и локальных кластеров, оборудованных одним абонентским терминалом систем спутниковой связи, в которых реализован «проводной», волоконно-оптический или низкоэнергетический беспроводной вариант организации доступа пользователей к каналам приема/передачи информации систем спутниковой связи и мобильной связи 4G/5G/6G.

4. Исследованные расчетные уровни электромагнитного фона, создаваемого у земной поверхности излучениями множества НСС, являются только одним из слагаемых интенсивности этого фона, создаваемых излучениями систем спутниковой связи, использующими НСС. Следует ожидать, что в местах с высокой плотностью населения вклад излучений множества абонентских терминалов этих систем и наземных шлюзовых станций в интенсивность наземного антропогенного электромагнитного фона в диапазоне СВЧ по меньшей мере сопоставим со вкладом излучений космического сегмента этих систем спутниковой связи. Данный вопрос требует отдельного изучения.

Список литературы / References

1. Mordachev V., Tsyantenka D., Svistunou A. (2024) Characteristics of Electromagnetic Environment Created by Communication Low Earth Orbit Satellite Systems Near the Earth's Surface. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2024"*, Bruges, Belgium, Sept. 2–5. 1178–1183.
2. 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).
3. 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. <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/1066> (in Russian).
4. Sibille A., Oestges C., Zanella A. (2011) MIMO from Theory to Implementation. *Academic Press*.

5. Tikhvinskiy V., Terentiev S., Visochin V. (2014) *LTE/LTE Advanced Mobile Networks: 4G Technologies, Applications Architecture*. Moscow, Media Publ. (in Russian).
6. The Concept of Transmission Loss for Radio Links. *Rec. ITU-R 341-7*. 2019.
7. Calculation of Free-Space Attenuation. *Rec. ITU-R 525-4*. 2019.
8. IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. *Rec. ITU-R. M.2083*. 2015.
9. Zhang Z., et al. (2019) 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*. 14 (3), 28–41.
10. Radio Noise. *Rec. ITU-R P.372–16*. 2022.

Поступила 10.11.2024

Received: 10 November 2024

Принята в печать 06.01.2025

Accepted: 15 January 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

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

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

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

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

Address for correspondence

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