



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-52-61>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.82

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С НАЗЕМНЫМИ РАДИОСИСТЕМАМИ

В. И. МОРДАЧЕВ, Д. А. ЦИОНЕНКО

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

Поступила в редакцию 22.05.2024

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

Аннотация. Для анализа электромагнитной совместимости низкоорбитальных группировок спутниковой связи (НГСС) с наземными радиосистемами проведена оценка плотности потока мощности радиочастотного электромагнитного излучения, создаваемого НГСС у поверхности Земли. Оценка основана на анализе системных характеристик НГСС, параметров космических аппаратов и земного сегмента (абонентских терминалов, шлюзовых станций). Проанализированы условия, при которых излучение космических аппаратов может приводить к помехам функционирования наземных фиксированных служб связи, в том числе радиорелейных линий связи, использующих те же частоты на вторичной основе. Установлено, что при увеличении количества космических аппаратов и шлюзовых станций в одной НГСС вероятность создания помех функционированию радиорелейной линии со стороны этой НГСС уменьшается из-за увеличения минимального угла места обслуживания абонентских терминалов. Однако увеличение количества развернутых НГСС требует ужесточения требований к функционированию каждой из них для предотвращения помех.

Ключевые слова: негеостационарные системы спутниковой связи, радиоэлектронные средства, радиорелейная связь, электромагнитная совместимость, электромагнитное излучение, диаграмма направленности, модели наихудшего случая.

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. Оценка электромагнитной совместимости низкоорбитальных группировок спутниковой связи с наземными радиосистемами / В. И. Мордачев, Д. А. Ционенко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 52–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-52-61>.

EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF LOW-ORBIT SATELLITE COMMUNICATION CONSTELLATIONS WITH TERRESTRIAL RADIO SYSTEMS

VLADIMIR I. MORDACHEV, DZMITRY A. TSYANENKA

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

Submitted 22.05.2024

Abstract. To analyze the electromagnetic compatibility of low-orbit satellite constellations of communication (LOSCC) with ground-based radio systems, the power flux density of radio-frequency electromagnetic radiation generated by LOSCC near the Earth's surface was estimated. The estimate is based on the analysis

of LOSCC system characteristics, spacecraft and ground segment (subscriber terminals, gateway stations) parameters. The conditions under which spacecraft radiation can cause interference with the functioning of terrestrial fixed communication services, including radio relay communication lines, using the same frequencies on a secondary basis were analyzed. It was found that with an increase in the number of spacecraft and gateway stations in the LOSCC, the probability of interference with the functioning of the radio relay line from this LOSCC decreases due to an increase in the minimum elevation angle of subscriber terminals. However, an increase in the number of deployed LOSCCs requires stricter requirements for the functioning of each of them to prevent interference.

Keywords: non-geostationary systems of satellite communication, radioelectronic equipment, radio relay communications, electromagnetic compatibility, electromagnetic radiation, radiation pattern, worst-case models.

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., Tsyantenka D. A. (2024) Evaluation of Electromagnetic Compatibility of Low-Orbit Satellite Communication Constellations with Terrestrial Radio Systems. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 52–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-52-61> (in Russian).

Введение

Развитие технологий широкополосного доступа в интернет, интернета вещей, связи машина-машина, автоматической идентификации, навигации и позиционирования повышает спрос на услуги высокоскоростной передачи данных. Это определяет темпы наращивания многочисленных низкоорбитальных группировок спутниковой связи (НГСС). Развиваются действующие группировки спутниковой связи (Globalstar second-generation, Orbcomm OG2, Iridium NEXT) [1], введены в эксплуатацию группировки Starlink SpaceX (4408 космических аппаратов (КА) в соответствии с заявкой [2]) и OneWeb (планируемое количество КА – 716 [3]). По состоянию на начало 2024 г., на орбитах находилось 12 597 КА, из них 4714 составляют группировку Starlink Gen1, выведены на орбиту 936 КА Starlink V2 Mini и 620 КА OneWeb. В стадии проектирования находится ряд НГСС, наиболее крупные из которых – Astra (13 620 КА), Project Kuiper (7784 КА), Guo Wang (12 992), Stellar, Hughes, Orbit20, Hanwa Systems, Genesat, Efir/Sfera [1]. Поданы заявки на расширение и обновление группировок Starlink V2 (29 988 КА [4]) и OneWeb (47 844 КА и не менее 200 шлюзовых станций (ШС) [5]). Таким образом, общее число КА НГСС в ближайшее время может превысить 100 000.

Такой бурный рост количества КА, излучение которых направлено к земной поверхности, может привести к увеличению суммарной территориальной плотности нисходящего трафика спутниковой связи в 10^2 – 10^3 раз. Увеличение плотности потока мощности (ППМ) электромагнитного (ЭМ) излучения, которое создается НГСС на поверхности Земли, может привести к помехам функционированию наземных радиослужб различного статуса, использующих полосы частот НГСС на вторичной основе [6], в частности, радиорелейных линий (РРЛ) связи. Анализ электромагнитной совместимости (ЭМС) НГСС и РРЛ предлагается осуществлять следующим образом.

1. Определить ППМ на земной поверхности в пределах области облучения (пятна), создаваемого одним лучом антенны КА, на основе требований к качеству услуг связи НГСС.

2. Осуществить проверку соответствия ППМ каждого луча КА требованиям Статьи 21 Регламента радиосвязи [6] для полос частот, используемых для связи КА по нисходящим каналам с абонентскими терминалами (АТ) (10,7–12,7 ГГц) и ШС (17,8–19,3 ГГц).

3. Оценить мощность, принимаемую антенной РРЛ от совокупности лучей одной НГСС, создающей электромагнитный фон (ЭМФ), на основе рассчитанной ППМ одного луча и огибающих (справочных) диаграмм направленности (ДН) антенн РРЛ [7] с учетом многолучевого характера обслуживания абонентов НГСС, количества спутников в НГСС и распределения спутников по орбитам.

4. Обобщить полученные результаты на несколько НГСС, создающих ЭМФ в рассматриваемой области на поверхности Земли. Сравнить эти результаты с пределами, указанными в [6], и сделать вывод о возможности возникновения помех, создаваемых излучением НГСС, функционированию наземных фиксированных служб (ФС).

5. Сформулировать рекомендации для обеспечения ЭМС НГСС и наземных ФС.

Методика анализа электромагнитной совместимости низкоорбитальных группировок спутниковой связи с наземными радиосистемами

Расчет ППМ, создаваемой одним лучом КА, на поверхности Земли. В НГСС, которые осуществляют широкополосный доступ в интернет, обслуживание абонентов на поверхности Земли осуществляется в пределах лучей, сформированных антеннами КА. Каждый луч, которому соответствует частотный канал заданной ширины, имеет узкий главный лепесток (ГЛ) и облучает определенный участок земной поверхности (пятно луча). Для уменьшения уровня внутрисистемных помех соседние лучи соответствуют различным частотным каналам и поляризациям. Как правило, в нисходящих каналах НГСС используется излучение с правой и левой круговой поляризацией [2, 3].

ППМ на земной поверхности в пределах пятна, создаваемого одним лучом КА, может быть определена на основе требований к качеству предоставляемых услуг связи и системных параметров НГСС. Исходными данными для оценки ППМ являются: скорость передачи информации, ширина полосы частот радиоканала, который соответствует одному лучу, характеристики элементов системы (рабочая температура, коэффициент усиления (КУ) антенн КА, АТ и ШС, коэффициент шума радиоприемников наземного сегмента).

Скорость передачи информации C_R по каналу с шириной полосы Δf_1 определяется отношением мощности полезного сигнала P_s , принимаемого АТ, к суммарной мощности шума и помех P_n , которая зависит от характеристик приемника и условий приема:

$$P_n = P_0 K_N (1 + K_C), P_0 = k T_0 \Delta f_1, K_C = P_{in} / P_0, \quad (1)$$

где P_0 – уровень теплового шума, Вт; K_N – коэффициент шума радиоприемника, ед.; K_C – коэффициент превышения мощностью помех уровня теплового шума приемника; k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T_0 – температура приемника (выбрана равной стандартной температуре $T_0 = 290$ К); P_{in} – мощность помех, Вт.

Минимальная мощность полезного сигнала P_s на входе приемника, необходимая для обеспечения скорости передачи информации C_R по одному каналу шириной Δf_1 , определяется по формуле

$$P_s = P_n (2^{C_R / \Delta f_1} - 1). \quad (2)$$

Эта же мощность может быть выражена через ППМ излучения, которое падает на облучаемую антенну приемника, находящегося в пятне луча [8]:

$$P_s = Z_T A_{effR} F_R(\delta, \varphi) |\xi|^2 (1 - |\Gamma_R|^2), \quad (3)$$

где Z_T – ППМ, Вт/м², которую должна обеспечить излучающая антенна КА для создания заданной скорости передачи информации C_R ; $F_R(\delta, \varphi)$ – нормированная ДН приемной антенны по мощности, ед., в направлении спутника с углом места δ и азимутом φ ; ξ – поляризационный фактор, ед.; Γ_R – коэффициент отражения токовых волн от нагрузки приемной антенны, ед.; A_{effR} – эффективная площадь приемной антенны, м²:

$$A_{effR} = \lambda_i^2 D_{nR} / 4\pi; G_{Rmax} = D_{nR} \eta_R, \quad (4)$$

λ_i – длина волны, соответствующая i -му лучу, $\lambda_i = c/f_i$; c – скорость ЭМ-волн в вакууме; G_{Rmax} – КУ приемной антенны в максимуме ДН; D_{nR} – коэффициент направленного действия приемной антенны, ед.; $\eta_R = 1 - \text{КПД}$ приемной антенны, ед.

Полагается, что передающая антенна КА и приемные антенны АТ и ШС имеют одинаковую рабочую поляризацию, т. е. $|\xi|^2 = 1$, они согласованы с нагрузкой в рабочей полосе частот $\Gamma_R = 0$, и ГЛ ДН приемной антенны ориентирован вдоль луча КА, обслуживающего данную область, $F_R(\delta, \varphi) = 1$. Тогда, подставляя (1) в (2) и приравнивая полученное выражение к (3) при учете (4), для ППМ Z_T , которая создается лучом КА, передающим информацию со скоростью C_R в полосе Δf_i , на несущей $f_i = c/\lambda_i$ получаем:

$$Z_{Ti} = 4\pi k T_0 (2^{C_R / \Delta f_i} - 1) \Delta f_i f_i^2 K_N K_\Sigma / (c^2 G_{Rmax}). \quad (5)$$

Анализ соответствия характеристик излучения НГСС требованиям [6]. Статья 21 [6] содержит ограничения, выполнение которых обеспечивает защиту наземной ФС от помех, связанных с передачей информации по нисходящим каналам «КА–АТ» в полосе частот 10,7–12,7 ГГц

и «КА–ШС» в полосе 17,7–19,3 ГГц ([2, 3, 6]). Ограничения наложены на предельные значения ППМ, которые создаются излучениями антенн КА НГСС на поверхности Земли в зависимости от угла места δ спутника.

Сравним результаты, полученные с применением (5) при подстановке данных, характерных для системы Starlink Gen1 [2, 9, 10], с ограничениями Статьи 21 [6]. Полоса частот 10,7–12,7 ГГц, используемых в системе Starlink Gen1 для связи по нисходящему каналу, разбита на восемь частотных полос по 240 МГц [9]. Таким образом, при применении двух поляризаций каждый КА Starlink Gen1 может одновременно передавать информацию по 16 лучам нисходящих каналов «КА–АТ». Согласно [2, 9], максимальная скорость передачи информации спутника этой группировки по одному лучу составляет $C_{R\text{ AT max}} = 850$ Мбит/с. Тогда для указанной ширины канала при максимальной C_R , температуре приемника $T_0 = 290$ К и при $K_N = 1,5$ и $K_C = 0,5$ отношение сигнал-шум равно 10,6, и мощность на выходе приемной антенны АТ составит $P_{\text{sAT}} = 2,3 \cdot 10^{-11}$ Вт (2).

В качестве антенн АТ в НГСС Starlink Gen1 используются активные фазированные антенные решетки [2, 9, 10], которые имеют размеры порядка 0,4×0,4 м [9, 10] и $A_{\text{eff AT}} = 0,148$ м² при частоте 12,7 ГГц. Рассчитанная по (5) ППМ, которую создает излучающая антенна КА в пятне вертикального луча при $C_{R\text{ AT max}} = 850$ Мбит/с, равна $Z_{\text{AT/4k}} = -146$ дБ (Вт/м²/4кГц) (для опорной полосы 4 кГц). Для того чтобы максимальная скорость передачи информации в луче была постоянна при изменении его положения в зоне обслуживания КА, эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) его антенны должна изменяться в соответствии с формулой

$$E_{Ti} = G_{Ti}(f_i, \chi_{T0i}, \psi_{T0i})P_{Ti} = 4\pi R_i^2(\beta)Z_{Ti}, \quad (6)$$

где β – угол между направлением от КА к центру Земли и от КА в точку расположения АТ, $\beta = \arcsin(R_E \cos \delta / (H_S + R_E))$; R_E – радиус Земли; H_S – высота орбиты спутника; R_i – расстояние от КА до АТ вдоль i -го луча, м; χ_{T0i} , ψ_{T0i} – углы отклонения ГЛ i -го луча антенны КА в системе отсчета, связанной с КА.

Обслуживание АТ в НГСС Starlink Gen1 реализовано в диапазоне углов места спутника δ от 25° (минимальный угол места КА) до надира ($\delta = 90^\circ$). На рис. 1 показано сравнение ППМ на поверхности Земли (для опорной полосы 1 МГц), создаваемой одним лучом КА НГСС OneWeb (линия 1) и Starlink Gen1 – с учетом автоматической регулировки ЭИИМ (6) (линия 2), а также с ограничениями на ППМ Статьи 21 [6] (линия 3), для разных полос частот при значениях параметров моделирования: $C_R = 850$ Мбит/с; $H_S = 550$ км для Starlink Gen1; $H_S = 1200$ км для OneWeb.

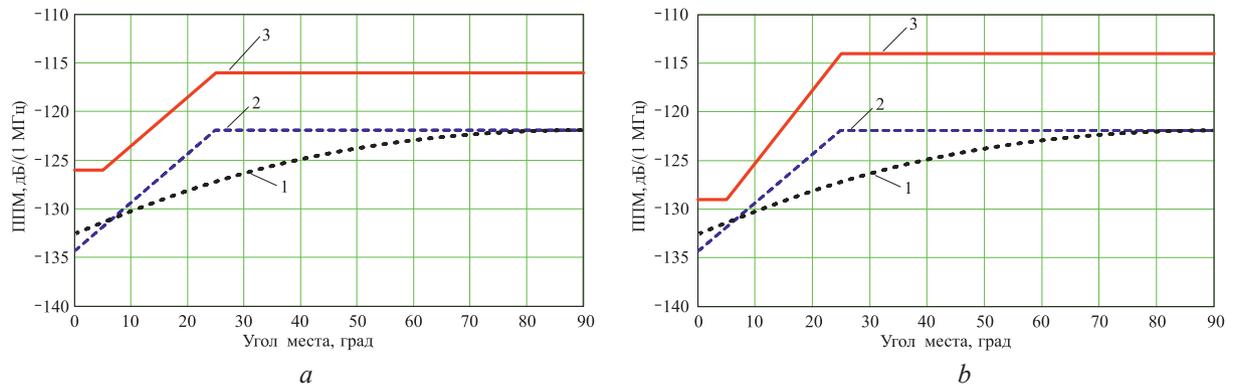


Рис. 1. Сравнение плотности потока мощности, создаваемой одним лучом космического аппарата в полосах частот 10,7–11,7 ГГц (а) и 11,7–12,7 ГГц (б): 1 – OneWeb; 2 – Starlink Gen1; 3 – с ограничениями Статьи 21 [6]

Fig. 1. Comparison of the power flux density generated by a single spacecraft beam in the frequency bands of 10.7–11.7 GHz (a) and 11.7–12.7 GHz (b): 1 – OneWeb; 2 – Starlink Gen1; 3 – with limitations of Article 21 [6]

Оценка ППМ на поверхности Земли при отсутствии регулировки мощности луча в зависимости от угла наклона, как это реализовано, например, в НГСС OneWeb первого поколения, осуществляется на основе подхода наихудшего случая, который соответствует наименьшим потерям при распространении ЭМ-волн в свободном пространстве: $L_{fs} = 10 \cdot \log(4\pi R^2) = 133$ дБ, где кратчайшее расстояние от спутника OneWeb, находящегося в точке надира, до поверхности Земли $R(0) = H_S = 1200$ км. Полагая, что ППМ на поверхности Земли при передаче данных на АТ

при $\delta = 90^\circ$ с максимальной скоростью 850 Мбит/с равна $Z_{AT/4k} = -146$ дБ (Вт/м²/4кГц), получаем, что максимальная ЭИИМ нисходящего канала $E_{4k} = -13,4$ дБ (Вт/4кГц) [3]. Считая, что ЭИИМ поддерживается на этом уровне для всех направлений, и учитывая потери, связанные только с увеличением расстояния до точки наблюдения (ТН) при отклонении луча от надира, получаем, что требования Статьи 21 [6] удовлетворяются с запасом не менее 5 дБ даже для наихудшего случая, соответствующего максимальной ЭИИМ (рис. 1, линия 2).

Рассмотрим соответствие излучения действующих НГСС требованиям Статьи 21 [6] для полосы частот 17,7–19,3 ГГц. В НГСС Starlink Gen1 для связи КА с ШС в этой полосе используются два частотных канала общей шириной 1,3 ГГц [2]. В рамках модели наихудшего случая примем, что скорость передачи информации в канале «КА–ШС» равна максимальной скорости передачи информации по одному лучу «КА–АТ», умноженной на количество лучей каждого КА (для каждой из поляризаций): $C_{RG\max} = N_{R\text{AT}}C_{R\text{AT}\max}$. При одинаковых условиях приема на антенны ШС и АТ ($T_0 = 290$ К; $K_N = 1,5$; $K_C = 0,5$) и количестве лучей $N_{R\text{AT}} = 8$ в НГСС Starlink Gen1 для максимальной скорости передачи информации по каналу «КА–ШС» получаем $C_{RG\max} = 5,1$ Гбит/с, и для соответствующей мощности сигнала на выходе антенны ШС $P_{SG} = 4,3 \cdot 10^{-10}$ Вт. Учитывая, что эффективная площадь антенны ШС Starlink $A_{effR} = 1,4$ м² [10], максимальное значение ППМ на поверхности Земли, создаваемой КА, расположенным на высоте 550 км над ШС, рассчитанное по (5), $-Z_G = 3 \cdot 10^{-10}$ Вт/м² или $Z_{G/1M} = -126,3$ дБ (Вт/м²/1МГц). Это значение совпадает со значением, приведенным в [2], что подтверждает адекватность разработанной модели и правильность оценок параметров системы Starlink Gen1. На рис. 2 показано сравнение ППМ, создаваемой одним КА Starlink Gen1 в диапазоне 17,7–19,7 ГГц с ограничениями [6] для группировки из 4408 КА (линия 1), при регулировке ЭИИМ (линия 2), без регулировки ЭИИМ (линия 3) при значениях параметров моделирования: $H_S = 550$ км; $Z_G = 3,03 \cdot 10^{-10}$ Вт/м².

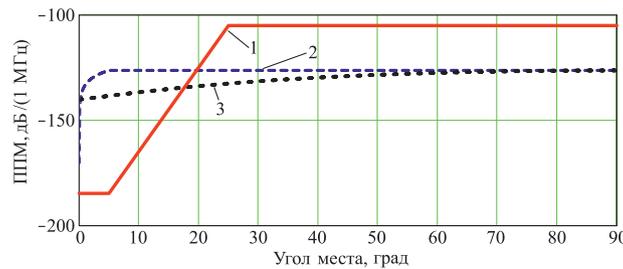


Рис. 2. Сравнение плотности потока мощности, создаваемой одним космическим аппаратом Starlink Gen1 в полосе 17,7–19,7 ГГц: 1 – с ограничениями [6]; 2, 3 – при регулировке и без регулировки эквивалентной изотропно излучаемой мощности соответственно

Fig. 2. Comparison of the power flux density generated by one Starlink Gen1 spacecraft in the 17.7–19.7 GHz band: 1 – with limitations [6]; 2, 3 – with and without adjustment of the equivalent isotropically radiated power, respectively

Модель наихудшего случая для расчета мощности излучения, принятой антенной РРЛ. Значение ППМ, созданное в пятне ГЛ луча КА, рассчитывается по (5) для лучей нисходящих каналов связи «КА–АТ» и «КА–ШС». ППМ вне пятна ГЛ луча получается умножением формулы (5) на значение нормированной ДН антенны КА при заданных углах χ_T, ψ_T отклонения от направления ГЛ. Мощность излучения, принятая антенной РРЛ по одному лучу (i – номер луча), определяется по (3) при подстановке в нее ППМ с учетом направления прихода луча от КА, задаваемой ДН $F_T(\chi_T, \psi_T)$ антенны КА, КУ $G_{RC\max}$ антенны РРЛ и ее нормированной ДН $F_{RC}(\delta, \varphi)$. Полагается, что $\Gamma_R = 0$, так как рабочие частоты НГСС и РРЛ совпадают, тогда:

$$P_{in\ i} = \frac{G_{RC\max}}{G_{R\max\ i}} B(C_R, \Delta f_i, K_{N1}, K_{C1}) F_{RC}(\delta_{RCi}, \varphi_{RCi}) F_{Ti}(\chi_{Ti}, \psi_{Ti}) \cdot |\xi_{i2}|^2 k T_{0R} \Delta f_i, \quad (7)$$

где $B(C_R, \Delta f_i, K_{N1}, K_{C1})$ – коэффициент, зависящий только от системных параметров НГСС:

$$B(C_R, \Delta f_i, K_{N1}, K_{C1}) = (2^{C_R/\Delta f_i} - 1) K_{N1} (1 + K_{C1}). \quad (8)$$

Для анализа воздействия излучения космического сегмента НГСС на объекты, расположенные на поверхности Земли, в Статье 22 [6] и в [11] вводится понятие суммарной эквивалентной ППМ (ЭППМ). В общем случае суммарная ЭППМ, создаваемая всеми лучами НГСС в (испыта-

тельной) ТН на поверхности Земли, изменяется с течением времени, и для ее вычисления операторами НГСС [2, 3] используется программное обеспечение, представленное в [11, 12]. Для оценки наихудшего возможного сценария, при котором ЭППМ в ТН имела бы максимальный уровень, необходимо выполнять статистическое моделирование [13]. Полученный результат сравнивается с пределами, установленными для процента времени, в течение которого ЭППМ, создаваемая излучениями всех КА в ТН, может превышать значение, заданное в Статье 22 [6]. В частности, анализ критерия помех для защиты ФС от изменяющихся во времени совокупных помех со стороны других служб радиосвязи, совместно использующих полосу частот 17,7–19,3 ГГц, основан на методике [14]. В основе методики лежит определение отношения помеха/шум I/N ($I/N = K_{CRC} = P_{in}/P_{0RC}$ (1)) для приемников указанной службы и его анализ для случаев длительного и кратковременного превышения предельных значений. Здесь в качестве мощности шума P_{in} выступает мощность, излученная совокупностью лучей всех КА всех НГСС и принятая антенной ФС, например, антенной РРЛ.

Полагая, что все антенны рассматриваемой НГСС, выполняющие одинаковые функции, идентичны ($G_{Rmax\ i} = G_{Rmax}$) и рабочая температура приемников НГСС и РРЛ на земной поверхности одинакова ($T_{0R} = T_{0RC}$), для коэффициента помеха/шум запишем:

$$K_{CRC} = \frac{G_{RCmax} \Delta f_i}{G_{Rmax} \Delta f_{RC}} B(C_R, \Delta f, K_{N1}, K_{\Sigma 1}) |\xi_{12}|^2 \sum_{i=1}^{N_V} F_{RC}(\delta_{RCi}, \Phi_{RCi}) F_{Ti}(\chi_{Ti}, \Psi_{Ti}), \quad (9)$$

где N_V – количество спутников НГСС, облучающих главными и боковыми лепестками (БЛ) область, в которой расположена антенна РРЛ; Δf_{RC} – ширина рабочей полосы частот РРЛ связи; ξ_{12} – поляризационный фактор, учитывающий влияние излучения антенн КА НГСС на антенны РРЛ, выбирается одинаковым для всех антенн КА и РРЛ.

Результаты анализа и их обсуждение

Анализ влияния связи «КА–ШС» на антенны РРЛ в рамках модели наихудшего случая. В рамках такой модели для связи «КА–ШС» полагается, что при штатном режиме работы ШС устанавливает связь со всеми КА, которые имеют угол места больший, чем минимальный угол, заданный для рассматриваемой НГСС (например, не менее 5° для Starlink Gen1 [2]). Для связи КА с ШС нет пространственного разделения по лучам, так как ШС представляет собой локализованный на малой площади комплекс антенн [10], $\Delta f_{RG} = 1,3$ ГГц. ГЛ параболических антенн КА, предназначенных для связи с ШС, постоянно направлены в область расположения ШС: $F_{Ti}(\chi_{Ti}, \Psi_{Ti}) = 1$. Скорость передачи информации по каналу «КА–ШС» максимальна. Движение спутников по орбитам является упорядоченным: расстояние между КА одинаковы на каждой орбите, сдвиги между КА на соседних орбитах одной оболочки постоянны. Для обеспечения максимального значения принятой мощности положим также, что направление ГЛ антенны РРЛ, расположенной вблизи ШС, лежит в плоскости, касательной к земной поверхности, и в плоскости одной из орбит НГСС. В этой плоскости $\varphi = 0^\circ$, а угол прихода излучения от КА к ШС равен углу прихода излучения на антенну РРЛ и углу места δ КА (рис. 3, а). На рис. 3 показано мгновенное положение КА, ближайших к ШС, обеспечивающее максимальную мощность помех со стороны НГСС станции РРЛ для параметров $H_S = 550$ км и $N_V = 1584$.

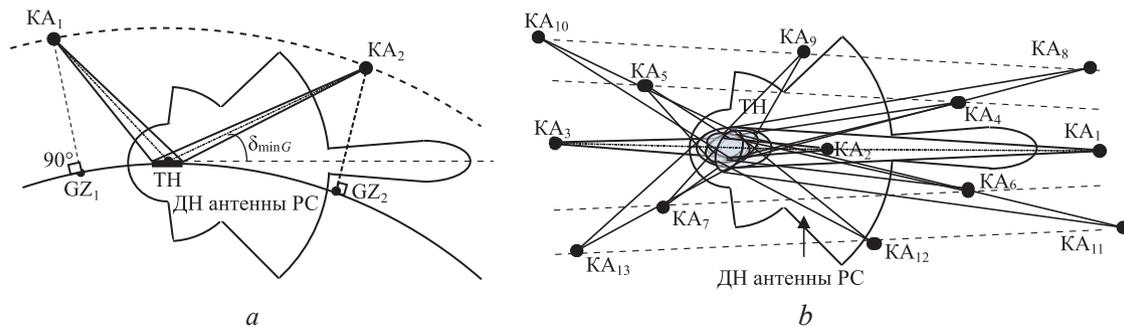


Рис. 3. Мгновенное положение космических аппаратов:

а – в вертикальной плоскости; б – в проекции на поверхность Земли

Fig. 3. Instantaneous position of spacecraft: a – in the vertical plane; b – in projection onto the Earth's surface

Для НГСС Starlink Gen1 при высоте орбиты $H_S = 550$ км и $\delta_{\min AT} = 25^\circ$ радиус зоны обслуживания АТ одним КА будет равен 941 км. Тогда для непрерывного обслуживания АТ минимальное количество КА на одной орбите N_{01} должно быть не менее 22, и угол, определенный из центра Земли, между спутниками на одной орбите составляет $16,3^\circ$. Для полного покрытия земной поверхности в одной оболочке Starlink Gen1 используется $N_{orb} = 72$ орбиты, и угол между узлами орбит составляет $2,5^\circ$. При $\delta_{\min G} = 5^\circ$ для связи КА с ШС получаем, что в НГСС Starlink Gen1 каждая ШС может установить связь с КА не более чем на 15 орбитах. Мгновенные положения КА на соседних орбитах отличаются на угол сдвига $\Delta\alpha = 8,8^\circ$, поэтому в наихудшем случае (рис. 3, б) одновременно на двух из ближайших к ШС орбит будет обслуживаться по три КА, на пяти орбитах – по два КА и на остальных – по одному КА.

Проведем анализ ЭМС для антенн РРЛ средней и низкой эффективности [7]. Антенна средней эффективности (типа 1) характеризуется шириной ГЛ по уровню -3 дБ $\theta_{3dB1} = 1^\circ$ (ДН считается аксиально симметричной). Антенна низкой эффективности (типа 2) имеет $\theta_{3dB2} = 3^\circ$. Тогда отношения диаметров антенн к длине волны соответственно $D_1/\lambda = 70$, $D_2/\lambda = 23$ и максимальные значения КУ: $G_{RC\max1} = 44,5$ дБи, $G_{RC\max2} = 35$ дБи [7, с. 4]. Нормированные ДН антенн РРЛ типов 1 и 2 средней эффективности с шириной ГЛ $\theta_{3dB1} = 1^\circ$ [7] и низкой эффективности с шириной ГЛ $\theta_{3dB2} = 3^\circ$ представлены на рис. 4.

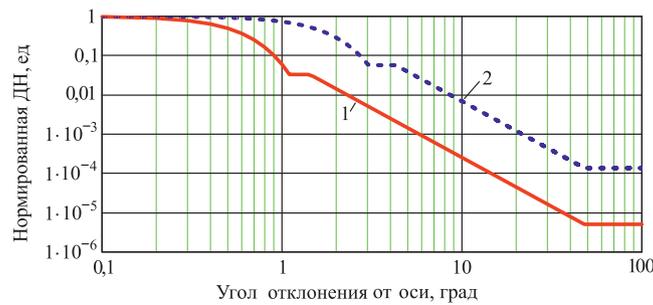


Рис. 4. Нормированная диаграмма направленности антенны:

1, 2 – средней и низкой эффективности соответственно

Fig. 4. Normalized radiation pattern of the radio relay line antenna:

1, 2 – medium and low efficiency, respectively

Согласно (9) учтем, что все лучи КА, направленные к ШС, имеют один и тот же тип рабочей поляризации – круговую [2, 3], а антенны РРЛ – линейную рабочую поляризацию [7]. Тогда на основании оценки наихудшего случая [15] поляризационная развязка $|\xi_{12}|^2 = 0,5$. Коэффициент, зависящий от системных параметров НГСС, $-B(C_R, \Delta f_{RG}, K_{N1}, K_{\Sigma 1}) = 82,24$ для $C_{RG\max} = 5,1$ Гбит/с и $\Delta f_{RG} = 1,3$ ГГц (на каждую поляризацию). Ширину рабочей полосы частот РРЛ Δf_{RC} выберем 500 МГц, тогда $\Delta f_{RG}/\Delta f_{RC} = 2,6$. Для антенн ШС $G_{R\max} = 47,7$ дБи [10]. Для определения суммы в (9) необходимы значения ДН антенны РРЛ для углов, под которыми видны КА из точки расположения ШС. Углы могут быть оценены на основании параметров НГСС Starlink Gen1: $\delta_{КА1} = 5,0^\circ$, $\delta_{КА4} = 20,3^\circ$, $\delta_{КА6} = 17,2^\circ$, $\delta_{КА8} = 5,7^\circ$, $\delta_{КА9} = 40,2^\circ$, $\delta_{КА12} = 35,1^\circ$. Углы отклонения от оси ГЛ антенны РРЛ для остальных КА больше 48° , и для них значение F_{RC} постоянно (рис. 4). Используя нормированную ДН для антенн РРЛ, представленную на рис. 4, для антенн РРЛ типа 1 в наихудшем случае получаем $K_{CRC1} = 0,305$ (или $-5,5$ дБ), а для типа 2 – $K_{CRC2} = 0,916$ (или $-0,38$ дБ).

Полученные значения для наихудшего случая являются мгновенными, которые соответствуют заданному положению антенн КА и ШС (рис. 3). Для сравнения с пределами, заданными в [14], следует оценить время, в течение которого превышаются значения I/N при движении спутников по орбитам. Зависимость от времени угла $\delta(t)$, характеризующего отклонение луча КА от оси ГЛ антенны РРЛ, определяется формулой

$$\delta_i(t) = \left| \arccos \left(\frac{(R_E + H_S) \sin(\omega t + \Delta\alpha_i)}{\sqrt{(2R_E H_S (1 - \cos(\omega t + \Delta\alpha_i))) + H_S^2}} \right) \right|, \quad (10)$$

где ω – угловая скорость КА на орбите (рад/с), зависящая от высоты орбиты, $\omega \sim (R_E + H_S)^{3/2}$; t – начальное время ($t = 0$), соответствует прохождению КА № 1 надиром: $\delta_1(0) = 90^\circ$.

Поскольку КА НГСС в каждой орбитальной плоскости распределены равномерно, одно и то же пространственное расположение КА и максимальный K_{CRC} в ТН будут повторяться с пе-

риодом $T_{\text{НКА}} = 2\pi/(N_{01}\omega)$ (для Starlink Gen1 – $T_{\text{НКА}} = 270$ с). Используя формулу (9) и нормированную ДН антенны РРЛ (рис. 4), получаем, что I/N не превысит -10 дБ до тех пор, пока $\delta_{i1}(t) \geq 6,4^\circ$ для РРЛ с антеннами типа 1, и $\delta_{i2}(t) \geq 13,1^\circ$ – для типа 2. Используя (10), получаем, что время, за которое угол δ изменится от $6,4^\circ$ до $5,0^\circ$, составит 3,1 с. Изменению δ от $13,1^\circ$ до $5,0^\circ$ соответствует промежуток времени 18 с. Конфигурация, соответствующая наихудшему случаю (рис. 3), обусловлена излучением КА с номерами 1, 8 и 6. Возможные конфигурации, при которых будет наблюдаться превышение I/N значения -10 дБ, обусловлены излучениями спутников с номерами 4, 6, 11. Остальные конфигурации КА на орбитах не дают превышения I/N над уровнем -10 дБ.

Время превышения I/N над значением -10 дБ составляет 9,3 с, что соответствует 3,6 % от общего времени для антенн РРЛ типа 1. Для антенн РРЛ типа 2 время превышения I/N над значением -10 дБ равно 50 с, т. е. 18,8 % всего времени. Таким образом, параметры излучения НГСС Starlink Gen1 удовлетворяют требованиям [14] для долговременных оценок времени превышения (превышение значения I/N уровня -10 дБ может быть реализовано не более чем в 20 % времени). Результаты также коррелируют с данными, приведенными в [2], которые получены численным моделированием с применением ПО [12] и с учетом неравномерности трафика по времени [13].

При анализе краткосрочных превышений следует рассмотреть следующую ситуацию: ГЛ луча КА, реализующего связь по каналу «КА–ШС», направлен на ШС (под углом не менее 5°), при этом БЛ этого луча облучают антенну РРЛ таким образом, что это излучение принимается ГЛ антенны РРЛ (рис. 5). Для реализации данного процесса рассматриваемая антенна РРЛ должна находиться позади антенны ШС на линии, соединяющей ШС и точку GZ , соответствующую КА, который облучает рассматриваемую область. При высоте орбиты $H_S = 550$ км расстояние между антенной РРЛ типа 1 и ШС должно быть в интервале 391–500 км, а между антенной РРЛ типа 2 и ШС – 187–500 км (антенна РРЛ находится позади ШС).

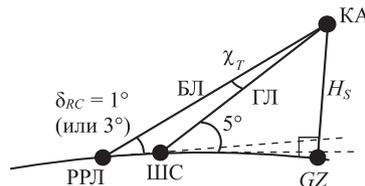


Рис. 5. Геометрическая модель задачи о кратковременных превышениях значений I/N , заданных в [14]
Fig. 5. Geometric model of the problem of short-term excesses of I/N values specified in [14]

Учитывая, что максимальная ППМ на внутренней границе пятна, создаваемого БЛ антенны КА, $0,5Z_G = 1,5 \cdot 10^{-10}$ Вт/м², то $I/N_{\text{max1}} = 12$ дБ – для антенн РРЛ типа 1 и $I/N_{\text{max2}} = 2$ дБ – для типа 2. Полученные результаты соответствуют значениям, приведенным в [2]. ППМ, которая создается БЛ антенны КА, изменяется со скоростью, определяемой изменением $F_T(\chi_T, \psi_T)$. Изменение этой функции при движении спутника по орбите связано с изменением направления ГЛ, поскольку луч от КА постоянно направлен на ШС:

$$\left| \frac{dF_T(\chi_T, \psi_T)}{dt} \right| = \left| \frac{dF_T(\chi_T, \psi_T)}{d\chi_T} \cdot \frac{d\chi_T}{dt} \right|, \quad (11)$$

и $d\psi/dt = 0$ в рассматриваемой плоскости, где I/N достигает максимальных значений.

Используя рис. 5, получаем, что при $H_S = 550$ км $\chi_{T1} = 0,515^\circ$ – для антенн типа 1 и $\chi_{T2} = 0,327^\circ$ – для типа 2. Применяя модель антенн типа 2 к антеннам КА и зная, что диаметр $D_{\text{КА}} \approx 20\lambda$ при КУ порядка 31–35 дБи [10], определим скорость убывания $F_T(\chi_T, 0)$ с увеличением угла χ_T по рис. 4 для антенн типа 2 (линия 2): $dF(\chi)/d\chi = 7,33$ град⁻¹. Средняя величина $\langle d\chi/dt \rangle$ определяется из (10), и для малых углов χ равна 0,45 град/с. Тогда процент времени краткосрочного превышения I/N_{max} для антенн РРЛ типа 1 равен 0,06 и для типа 2 – 0,037. Следовательно, излучение КА Starlink Gen1 удовлетворяет требованиям [14] для краткосрочного времени превышения заданных уровней.

Анализ влияния связи «КА–АТ» на антенны РРЛ в рамках модели наихудшего случая. Для каналов связи «КА–АТ» в полосе частот 10,7–12,7 ГГц анализ осуществляется на основе вероятности превышения ЭППМ, созданного излучениями антенн КА НГСС, значений ЭППМ, заданных в [6]. Для этих каналов связи расчет ЭММП в модели наихудшего случая следует осуществлять с учетом следующих технологических особенностей НГСС:

– обслуживание всех АТ на поверхности Земли в пределах пятна, которое создает ГЛ луча (определенный по уровню 3 дБ), осуществляется одновременно только одним лучом одного КА рассматриваемой НГСС. Остальные лучи КА, которые обслуживают АТ, принадлежащие соседним пятнам, могут облучать рассматриваемую область только БЛ;

– обслуживание АТ осуществляется с максимально возможной скоростью передачи информации в луче. Например, для НГСС Starlink Gen1 постоянство скорости обслуживания АТ обусловлено регулированием мощности в луче, который постоянно направлен на АТ при перемещении КА. При достижении минимального угла места КА ($\delta_{\min} = 25^\circ$) АТ переключается на луч следующего КА и т. д. [10]. Для НГСС OneWeb пятна лучей перемещаются вместе с КА, и происходит последовательное переключение АТ с одного луча КА на следующий луч этого же КА, а затем на лучи следующего КА и $\delta_{\min} = 40^\circ$ [3].

В силу этих особенностей и того, что δ_{\min} для лучей КА, которые обслуживают АТ, существенно превосходит ширину ГЛ $\theta_{3\text{дБ}}$ антенн РЛЛ, и ГЛ этих антенн направлены параллельно поверхности Земли, влияние каналов связи «КА–АТ» на РЛЛ минимально. Это связано с тем, что активные фазированные антенные решетки, используемые на КА для связи с АТ, обладают низким уровнем БЛ, и прием излучения этих БЛ антеннами РЛЛ минимизирован при штатном режиме работы НГСС.

Заключение

1. Разработанная модель наихудшего случая для оценки плотности потока мощности, создаваемой излучениями космических аппаратов низкоорбитальных группировок спутниковой связи (НГСС) на поверхности Земли, позволяет оценить электромагнитную совместимость НГСС и наземных систем фиксированных служб. Адекватность модели подтверждена совпадением результатов расчетов, проведенных с ее использованием, с результатами компьютерного моделирования по методикам [11, 12]. Преимущество модели – ее вычислительная эффективность, позволяющая рассчитать характеристики излучения каждой НГСС на основе ее системных параметров и обобщить полученные результаты на совокупность НГСС.

2. Режимы работы различных НГСС не согласованы друг с другом, и итоговые значения плотности потока мощности на земной поверхности, значения процентов времени превышения заданных уровней эквивалентной плотности потока мощности (и I/N) могут быть определены суммированием результатов, полученных для каждой из НГСС. Например, если на одном и том же участке земной поверхности осуществляется обслуживание абонентских терминалов несколькими НГСС с максимальной скоростью передачи данных, то пределы, приведенные в Статье 21 [6], могут оказаться превышенными, хотя излучение каждой НГСС соответствует ее требованиям. Такая ситуация может наблюдаться при высокой пространственной плотности абонентских терминалов.

3. На основании анализа можно сформулировать следующие рекомендации для обеспечения электромагнитной совместимости совокупности НГСС и наземных фиксированных служб:

– необходимо обеспечить работу всех НГСС исключительно в штатном режиме, когда при углах места космических аппаратов меньших, чем регламентированные, излучение этих аппаратов в направлении земной поверхности отсутствует;

– при развитии и модернизации НГСС целесообразно увеличивать значение минимальных углов места космических аппаратов, при которых осуществляются обслуживание абонентских терминалов и связь со шлюзовыми станциями, обеспечивать пространственную избирательность лучей космических аппаратов. Это может быть достигнуто при уменьшении, по возможности, высоты орбит космических аппаратов, увеличении их количества на орбите (и числа орбит) и увеличении количества шлюзовых станций;

– целесообразно, по возможности, ограничить количество НГСС, одновременно обслуживающих одну и ту же территорию. Допустима одновременная работа не более трех НГСС при условии предоставления услуг качеством, не ниже чем Starlink Gen1, каждой из них;

– при использовании в наземных радиорелейных линиях на вторичной основе полос частот НГСС следует избегать установки антенн радиорелейных линий вблизи шлюзовых станций и ориентации их главного лепестка вдоль плоскости орбиты НГСС;

4. Перспективным направлением развития НГСС является обеспечение связи между спутниками на орбите, как это предусмотрено в проекте Starlink V2 [4]. Это позволит существенно уменьшить плотность потока мощности на земной поверхности за счет резкого уменьшения облучений космических аппаратов к шлюзовым станциям.

Список литературы / References

1. *NewSpace Index*. Available: <https://www.newspace.im> (Accessed 31 October 2024).
2. LLC SAT-MOD-20200417-00037. *Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings*. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20200417-00037> (Accessed 23 November 2023).
3. SAT-LOI-20160428-00041. *Application for Fixed Satellite Service by WorldVu Satellites Limited. Attachment*. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOI-20160428-00041/1134939> (Accessed 14 December 2023).
4. LLC FCC SAT-LOA-20200526-00055. *Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings*. Available: <https://fcc.report/IBFS/FCC SAT-LOA-20200526-00055> (Accessed 23 November 2023).
5. *OneWeb Non-Geostationary Satellite System (LEO). Phase 2: Modification to Authorized System. Attachment B. Technical Information to Supplement Schedule S*. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MPL-20200526-00062/2379706> (Accessed 10 November 2023).
6. Radio Regulations (2020) ITU. 1. Geneva, Switzerland.
7. F.699-8. *Reference Radiation Patterns for Fixed Wireless System Antennas for Use in Coordination Studies and Interference Assessment in the Frequency Range from 100 MHz to 86 GHz*. Rec. ITU-R. 2018.
8. Mordachev V. I., Tsyankenka D. A. (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. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-56-64> (in Russian).
9. Pekhterev S. (2020) *Global Broadband Satellite Internet Network Starlink*. Available: <https://www.comnews.ru/content/209438/2020-10-07/2020-w41/enciklopediya-starlink> (Accessed 10 November 2023) (in Russian).
10. Pekhterev S. (2023) *Mini-Encyclopedia Starlink. Part 3. NCC, Gateways, Subscriber Terminal*. Available: <https://novosti-kosmonavtiki.ru/articles/76678/> (Accessed 14.12.2023) (in Russian).
11. S.1592. Methodology to Assess Compliance of Non-Geostationary Fixed-Satellite Service Satellite Systems in Circular Orbits with the Additional Operational Limits on Downlink Equivalent Power Flux-Density in Article 22 of the Radio Regulations. *Rec. ITU-R*.
12. S.1503-2. Functional Description to be Used in Developing Software Tools for Determining Conformity of Non-Geostationary-Satellite Orbit Fixed-Satellite System Networks with Limits Contained in Article 22 of the Radio Regulations. *Rec. ITU-R*.
13. S.1588. Methodologies for Calculating Aggregate Downlink Equivalent Power Flux-Density Produced By Multiple Non-Geostationary Fixed-Satellite Service Systems into a Geostationary Fixed-Satellite Service Network. *Rec. ITU-R*.
14. F.1495-2. Interference Criteria to Protect the Fixed Service from Time Varying Aggregate Interference from Other Radiocommunication Services Sharing the 17.7–19.3 GHz Band on a Co-Primary Basis. *Rec. ITU-R*.
15. Bogdanor J. L., Pearlman R. A., Siegel M. D. (1974) *Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program. Volume I. User's Manual Engineering Section*. Rome Air Development Center, Griffiss AFB NY.

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,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-38
E-mail: emc@bsuir.by
Ционенко Дмитрий Александрович

Information about the authors

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

Tsyankenka D. A., Cand. of Sci., 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: emc@bsuir.by
Tsyankenka Dzmitry Alexandrovich