

Методика оценивания электромагнитной совместимости земных станций геостационарных спутниковых систем с низкоорбитальными системами спутниковой СВЯЗИ

Д. И. Бучинский¹, С. А. Святкин², Д. А. Комлык³, Д. Ю. Щебет⁴

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
vka@mil.ru

Аннотация. Представлен подход к оценке электромагнитной совместимости низкоорбитальных систем спутниковой связи и земных станций геостационарных систем спутниковой связи при условии их работы в одном частотном диапазоне. В рамках описываемого подхода предлагается методика расчета плотности потока мощности, создаваемого космическими аппаратами низкоорбитальных космических систем спутниковой связи в точке расположения земной станции реципиента непреднамеренных помех и мощности помехового воздействия на входе её приемника. Предлагаемая методика основана на использовании статистических оценок, получаемых из массива данных о движении космических аппаратов орбитальной группировки.

Ключевые слова: низкоорбитальные системы спутниковой связи, электромагнитная совместимость, земная станция, геостационарные системы спутниковой связи

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время человечество испытывает потребность в передаче все больших объемов информации. При этом предъявляются требования не только к объему передаваемой информации, но и к качеству информационного сервиса. Поэтому в настоящее время широкое распространение получают низкоорбитальные системы спутниковой связи (НССС) такие как Starlink, OneWeb, Iridium NEXT. Такие системы спутниковой связи способны обеспечить глобальность, низкое время задержки передаваемой информации за счет небольшого расстояния до космических аппаратов ретрансляторов, большую суммарную пропускную способность за счет использования новых диапазонов электромагнитного спектра и многократного использования частотного ресурса. Следует отметить, что наибольшее широкое распространение и интенсивное развитие получает низкоорбитальная система спутниковой связи Starlink.

В тоже время растущая потребность человечества в телекоммуникации и ограниченный ресурс электромагнитного спектра приводит к обострению

проблемы электромагнитной совместимости [1–3]. Применение низкоорбитальных спутниковых систем связи лишь усугубляет эту проблему, поскольку традиционные методы обеспечения электромагнитной совместимости, основанные на пространственном разнесении, становятся малоэффективными [4–5]. Это обусловлено тем, что низкоорбитальные спутниковые системы связи требуют построения сложных и многочисленных орбитальных группировок, что приводит к сложности предсказания взаимного пространственного положения космических аппаратов ретрансляторов и радиоэлектронных систем, на которые они могут оказывать непреднамеренное помеховое воздействие. Количество, положение, ориентация диаграмм направленности передающих антенных систем космических аппаратов низкоорбитальных систем спутниковой связи, находящихся в зоне радиовидимости средства реципиента непреднамеренных помех в первом приближении, носит стохастический характер. Поэтому проблема обеспечения электромагнитной совместимости существующих систем спутниковой связи, использующих геостационарные космические аппараты с низкоорбитальными системами спутниковой связи, является актуальной.

II. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ С ГЕОСТАЦИОНАРНЫМИ СИСТЕМАМИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Использование низкоорбитальных космических аппаратов (КА) позволяют добиться существенного снижения времени задержки за счет сокращения трассы распространения сигнала. Кроме того, низкая орбита космического аппарата приводит к уменьшению геометрических размеров проекции главного луча диаграммы направленности передающей антенной системы КА на земную поверхность. Это позволяет добиться увеличения суммарной пропускной способности спутниковой системы связи за счет многократного использования частотного ресурса. В тоже время, такие спутниковые системы связи требуют использования очень большого количества КА и

сложной пространственной организации спутниковой системы связи.

Многokrатное использование выделенного частотного диапазона достигается путем статического разделения области покрытия на отдельные ячейки сравнительно небольшого размера. Каждый КА, пролетая над определенным участком местности, за счет электронного управления лучом активной фазированной антенной решетки (АФАР) сопровождает назначенную ячейку. Затем по мере выхода КА из зоны радиовидимости, обслуживание соты поручается следующему КА. При этом космический аппарат, принимающий на обслуживание ячейку, может быть из другой орбитальной плоскости.

III. РАСЧЕТ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ И ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ

Поскольку в первом приближении можно считать, что положение КА НССС Starlink и земной станции (ЗС) реципиента непреднамеренных помех является случайным, то для расчетов следует применять статистические оценки количества КА, находящихся в зоне радиовидимости и плотности распределения углов места и азимутов на КА Starlink из места расположения земной станции. Для расчетов траекторий движения КА использовалась известная «упрощенная модель возмущений» SGP4 (Simplified perturbations models) являющаяся, по сути, набором дифференциальных уравнений, численное интегрирование которых, позволяет получить массив координат подспутниковых точек и высот КА, в различные моменты времени, отличающиеся на шаг интегрирования Δt . Модель SGP4 учитывает возмущения обусловленные формой Земли; гравитацией Луны; гравитацией Солнца. В качестве реализации модели использовалась библиотека python pyorbital. Исходными данными послужили TLE (two-line element sets) параметры космических аппаратов орбитальной группировки Starlink полученные на портале space-track.org. Для каждого КА производился расчет траектории на сутки с шагом 30 секунд. Данные для всех КА собираются в единый массив данных, структура которого представлена в таблице и используются для дальнейшей обработки.

ТАБЛИЦА I. МАССИВ ДАННЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ КА

Номер КА	Время, с	λ Долгота подспутниковой точки, град	ϕ Широта подспутниковой точки, град	Высота КА, км
1	0	0.341	45.8	550.3
1	30	0.348	45.9	550.3
...
1	1440	271.2	37.2	551.1
...
1034	0	49.21	17.2	550.2
...
1034	1440	17.27	34.94	551.9
...
3127	1440	94.3	28.31	562.8

Полученные траектории движения в виде массивов точек вместе с координатами наземного пункта, для которого проводится оценка электромагнитной

совместимости, позволяют рассчитать в каждый момент времени количество КА в зоне радиовидимости, углы места, азимуты и некоторые другие пространственные данные.

IV. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

Поскольку относительное положение КА НССС и ЗС постоянно меняется, то для оценки электромагнитной совместимости следует произвести множество расчетов на протяжении определенного временного промежутка и оценить вероятность создания непреднамеренных помех, усредняя полученные результаты по времени. В качестве временного интервала моделирования был выбран интервал равный 24 часам. С одной стороны, за это время погрешности расчетов координат КА орбитальной группировки Starlink с помощью модели SGP4 остаются приемлемыми [7]. С другой стороны, каждый аппарат Starlink успевает совершить несколько обращений (период обращения КА Starlink составляет порядка 90 минут), а также в силу симметрии в структуре орбитального построения НССС Starlink такие оценки будут состоятельными.

Для оценки электромагнитной совместимости необходимо осуществить:

- Расчет траекторий движения КА всей орбитальной группировки НССС на протяжении всего временного интервала с некоторым шагом Δt .
- На каждом шаге расчетов движения космических аппаратов НССС определить взаимное положение всех КА НССС и ЗС реципиента непреднамеренных помех.
- Для каждого шага определить КА находящиеся в зоне радиовидимости, расстояния до этих КА от ЗС, угол между направлением от ЗС на геостационарный КА и направлением от ЗС на КА Starlink ψ .
- Произвести для каждого шага расчетов траекторий движения КА НССС, плотность потока мощности создаваемого КА Starlink, находящимися в зоне радиовидимости ЗС.
- Для каждого шага произвести расчет мощности помехового воздействия как суммы мощностей всех КА Starlink, находящихся в зоне радиовидимости ЗС с учетом ослабления избирательной антенной системой.
- Произвести усреднение по времени моделирования. Определить вероятность создания неприемлемого уровня непреднамеренных помех как отношение времени, когда мощность создаваемых непреднамеренных помех превышает мощность сигнала на входе приемного устройства ЗС геостационарной спутниковой системы.

Упорядочивая массив траекторных данных по времени можно рассчитать количество КА Starlink находящихся в зоне радиовидимости ЗС с заданными

координатами НКА для каждого момента времени прогнозирования движения КА t . Примеры такого расчета для земной станции с координатами 55 град. с.ш. и 37 град. в.д. приведены на рис. 1.

Пики на приведенном рисунке обусловлены появлением в зоне радиовидимости групп КА на промежуточных орбитах. Известно [8], что ввиду конструктивных особенностей, используемых на КА Starlink АФАР, обслуживание ячеек осуществляется только КА, угол места которых превышает 20 градусов. Поэтому, как следует из расчетов, результаты которых приведены на рис. 1б, для указанной ЗС в среднем в зоне радиовидимости находятся 14 КА, которые могут оказать непреднамеренное помеховое воздействие.

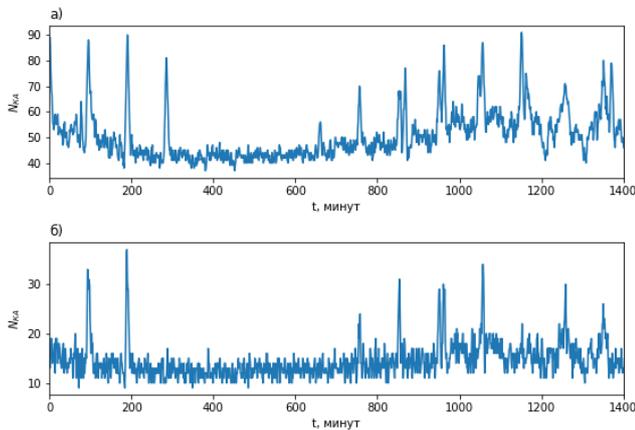


Рис. 1. Количество КА Starlink, находящихся в зоне радиовидимости земной станции с углом места а) 7 и б) 20 градусов

В качестве КА геостационарной системы спутниковой связи рассмотрим КА Ямал-601, расположенный на геостационарной орбите, в позиции 49 градусов восточной долготы. Координаты подспутниковой точки соответственно равны 0 градусов северной широты и 49 градусов восточной долготы, а высота КА соответствует 35786 километрам. В качестве характеристик антенны ЗС связи геостационарной системы спутниковой связи в расчетах использовались коэффициент усиления антенны в диапазоне 10,7 – 12,7 ГГц равный $G_{ЗС}$ 41,8 дБ, диаметр антенны 1,2 метра, с уровнем боковых лепестков -30 дБ.

Проведя расчеты, получим массив данных, содержащий для каждого момента времени на интервале расчета движения орбитальной группировки КА Starlink данные об углах между направлением на КА геостационарной системы спутниковой связи и направлениями на КА Starlink, находящимися в зоне радиовидимости ЗС.

Удаляя из массива все строчки, для которых угол между направлением на КА геостационарной системы спутниковой связи и направлениями на КА Starlink ψ превышает заданный, а затем, подсчитывая количество оставшихся строк для каждого момента времени, получим зависимость количества КА Starlink, находящихся в главном лепестке диаграммы направленности антенны ЗС. Полученные зависимости

для ширины диаграммы направленности антенны $\Theta_{ЗС}$ равной 1, 3 и 5 градусам представлены на рис. 2.

Вероятность попадания КА Starlink в главный лепесток ДН антенны ЗС можно принять равной отношению суммы интервалов времени, когда в главном лепестке ДН находится хотя бы один КА Starlink ко всему интервалу наблюдения:

$$P_{ГЛ} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ГЛ}} \tau_{ГЛi}}{T} \quad (1)$$

где $N_{ГЛ}$ – количество интервалов попадания КА НССС в главный лепесток диаграммы направленности во время наблюдения T , $\tau_{ГЛi}$ – i -й интервал нахождения КА НССС в главном лепестке диаграммы направленности.

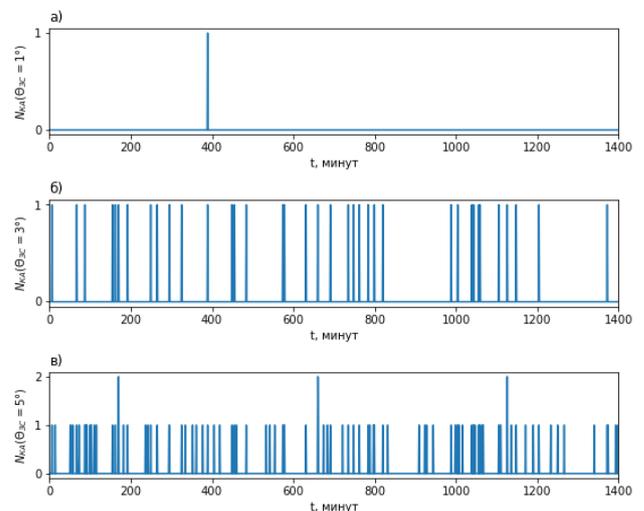


Рис. 2. Количество КА Starlink, находящихся в главном лепестке диаграммы направленности антенны земной станции с шириной главного лепестка а) 1, б) 3 и в) 5 градусов

Расчеты, произведенные по формуле (1) для случаев ширины диаграммы направленности антенны $\Theta_{ЗС}$ равной 1, 3 и 5 градусам, приводят вероятностям попадания КА в главный лепесток диаграммы направленности 0,0007, 0,0264 и 0,0667.

Для расчета энергетики непреднамеренных помех, необходимо определить какие КА Starlink, находящиеся в зоне радиовидимости, будут излучать в сторону расположения ЗС реципиента непреднамеренных помех. Однако алгоритм назначения КА Starlink не известен, поэтому следует произвести расчеты при условии, что все КА Starlink, находящиеся в зоне радиовидимости ЗС излучают в ее направлении для получения оценки сверху.

Расчет мощности непреднамеренных помех $P_{П}$ на входе приемника ЗС реципиента непреднамеренных помех представлен на рис.3. Мощность полезного сигнала на входе приемного устройства ЗС геостационарной системы спутниковой связи для мощности передатчика в 10 Вт и коэффициента усиления антенной системы в 42 дБ составляет -114 дБВт. Для

земных станций с узкой диаграммой направленности с $\Theta_{ЗС} = 1$ градус и работающих в помехоустойчивых режимах с $\gamma_3 > 10$ работоспособность будет обеспечена. Для ЗС с большей шириной главного лепестка ДН и подвижных станций, работающих в помехоустойчивых режимах с $\gamma_3 > 10$, работоспособность может кратковременно нарушаться. Это связано с появлением КА НССС в главном лепестке ДН антенны ЗС, либо большого количества КА НССС в близости от главного лепестка ДН антенны ЗС.

Следует отметить, что в большинстве современных систем спутниковой связи широко используются высокоскоростные режимы работы, характеризующиеся достаточно низким защитным отношением $\gamma_3 < 10$. Для ЗС, использующих такие режимы работы в указанных условиях КА НССС могут создавать непреднамеренные помехи, приводящие к потере работоспособности ЗС, даже при условии использования узконаправленных антенн с $\Theta_{ЗС} = 1^\circ$.

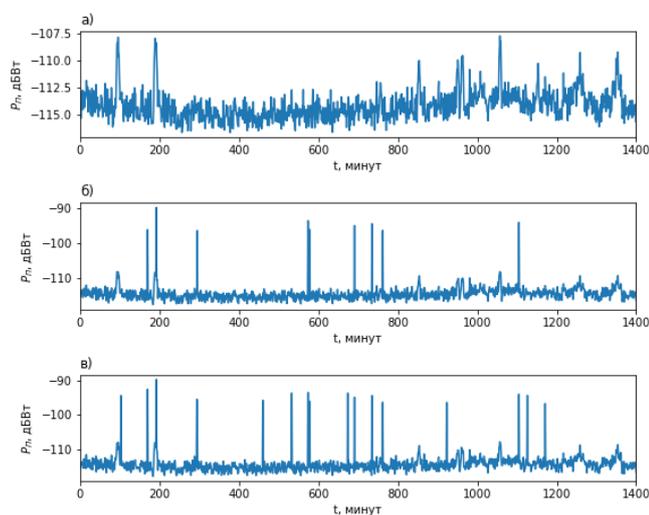


Рис. 3. Зависимость мощности непреднамеренной помехи от времени на входе приемного устройства ЗС с шириной ДН антенны а) $\Theta_{ЗС} = 1^\circ$ б) $\Theta_{ЗС} = 3^\circ$ в) $\Theta_{ЗС} = 5^\circ$

Как видно из приведенных зависимостей мощность непреднамеренной помехи на входе приемного устройства позволяет работать ЗС геостационарной системы спутниковой связи как в помехоустойчивых, так и в высокоскоростных режимах. Кроме того, мощность непреднамеренной помехи на входе приемного устройства ЗС, мало зависит от ширины главного лепестка ДН антенны ЗС. Следует отметить отсутствие скачков мощности непреднамеренной помехи при попадании КА НССС в главный лепесток ДН антенны ЗС. Это связано с тем, что диаграмма направленности ЗС ориентирована на юг с достаточно низким углом мета, а ближайшим к ЗС оказывается КА НССС расположенный ближе к зениту, т. е. ближайший КА НССС не попадает в главный лепесток ДН антенны ЗС. Для ЗС, расположенных ближе к экватору, ситуация может существенно отличаться.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ возможности создания непреднамеренных помех КА Starlink ЗС геостационарных спутниковых систем связи. Представлена методика расчета электромагнитной совместимости НССС и ЗС геостационарных систем спутниковой связи. С помощью методики произведены расчеты возможности создания непреднамеренных помех системой спутниковой связи Starlink ЗС геостационарной системы спутниковой связи, расположенной на широте Москвы.

Показано, что оценка «сверху» соответствующая случаю, когда в сторону ЗС производится излучение всеми КА НССС, находящимися в зоне радиовидимости, возможно создание непреднамеренных помех, способных нарушить нормальное функционирование приемной аппаратуры ЗС. Перманентно в случае использования высокоскоростных режимов работы, характеризующихся малым защитным отношением и кратковременно, при попадании КА НССС в главный лепесток ДН антенны ЗС, функционирующей в помехоустойчивом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Предложения по построению терминалов спутниковой связи, для абонентов высокоскоростной системы спутниковой связи / С.А. Якушенко, А.Н. Забело, В.В. Антонов [и др.] // Colloquium-Journal. 2020. № 6-1(58). С. 25-31. DOI 10.24411/2520-6990-2020-11443. EDN TTKTMB.
- [2] Курбанов К.А. Современные зарубежные системы спутниковой связи, обеспечивающие предоставление высокоскоростных услуг связи / К.А. Курбанов, С.И. Сахно // Инновационные механизмы решения проблем научного развития: сб. статей межд. научно-практ. Конф.: в 3 частях, Уфа, 18 марта 2017 года. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2017. С. 55-58. EDN VVLTQH.
- [3] Направления развития и проблемы внедрения новых сетевых технологий спутниковой связи в системы связи силовых структур / И.А. Липатов, В.М. Николаенко, С.Н. Тощий [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. № 12. С. 179-188. EDN YWYSEN.
- [4] Проекты низкоорбитальных систем широкополосного доступа – это наше всё или тупиковая ветвь развития спутниковой связи? // Технологии и средства связи. 2020. № S1. С. 15-24. EDN KUUMFY.
- [5] Денискина А.Р. Обзор современных и перспективных низкоорбитальных систем космических аппаратов связи / А.Р. Денискина, А.А. Прокофьева, И.О. Жуйков // Инновации и инвестиции. 2019. № 11. С. 187-190. EDN GHQKES.
- [6] Эталонная диаграмма направленности антенн земных станций фиксированной спутниковой службы для использования при координации и оценке помех в диапазоне частот от 2 до 31 ГГц. Серия S. Фиксированная спутниковая служба. Женева: ITU, 2010. 2 с.
- [7] Висюлькина Ю.С. Повышение точности данных о положении орбиты искусственного космического объекта с использованием модели SGP4 и данных GPS / Ю.С. Висюлькина // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований: сб. статей Международной научно-практической конференции, Саратов, 18 мая 2020 года. Саратов: НОО «Цифровая наука», 2020. С. 54-57. EDN MZYRPU.
- [8] Пехтерев С.В. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink / С.В. Пехтерев, С.И. Макаренко, А.А. Ковальский // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190-255. DOI 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255. EDN QMOLDV.