

УДК 621.396.946

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-84-103

Взаимовлияние параметров наземного терминала для радиолиний с низкоорбитальными спутниками связи

И. О. Малышонков, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

К. В. Шишаков, доктор технических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Рассмотрены свойства радиолиний для создания эффективных систем сопровождения низкоорбитальных спутников связи наземными следящими антеннами с точки зрения инженерной разработки наземного терминала. Для этого сначала в качестве исходных данных приводится общая характеристика современных низкоорбитальных спутников и их сигналов для приема наземными антеннами. Далее в качестве объектов исследования обсуждаются характеристики наземных направленных антенн, используемых для организации каналов радиосвязи связи с низкоорбитальными спутниками. Среди них – параболические антенны, антенные решетки и компактные проволочные направленные антенны для низкочастотного радиодиапазона. Чтобы удерживать низкоорбитальные спутники связи в поле антенны, обсуждаются варианты построения систем наведения наземных антенн. Среди них выделены: программное наведение, суммарно-разностный метод наведения для крупногабаритных антенн и метод конического сканирования для малогабаритных антенн. Показано, что большая изменчивость дальности радиолинии «наземная антенна – низкоорбитальный спутник связи» потребует добавления модуля управления мощностью передатчика во время проведения сеансов радиосвязи. Проанализирована связь диаметров созданных параболических антенн с радиодиапазонами их работы. Рассмотрен обоснованный выбор угловых скоростей наведения наземной антенны на низкоорбитальные спутники связи. Проанализирована задача согласования мощности радиопередатчика с сигнально-кодowymi конструкциями радиолиний. Обсуждается выбор параметров наземной следящей антенны для обеспечения эффективной радиосвязи с низкоорбитальными спутниками связи. В заключение приведены важные практически проверенные пропорции и значения параметров для современных наземных терминалов. По своему смыслу предлагаемая статья является подготовкой к построению детализированной имитационной модели следящей антенны, что позволило ограничиться понятными упрощенными теоретическими зависимостями, которые тем не менее наглядно показывают роли и взаимосвязи основных параметров таких систем радиосвязи с контурами активного наведения.

Ключевые слова: радиолиния, наведение луча антенны по углам азимута и высоты, низкоорбитальный спутник связи, следящие направленные антенны.

Введение

Обеспечение эффективной радиосвязи с низкоорбитальными спутниками (НОС) сохраняет свою актуальность в современных условиях [1–4]. Активное развитие различных группировок таких спутников, снижение их орбит, расширение областей использования, увеличение потребителей – всё это приводит к расширению многообразия вариантов конструкций наземных терминалов связи с различными направленными антеннами [5–8].

При разработке новой низкоорбитальной спутниковой системы связи или при выполнении модернизации существующей возникают вопросы правильного выбора наземной антенны

из предлагаемых на рынке или проектирование собственной следящей антенны с учетом специфических эксплуатационных условий и габаритно-массовых ограничений. Такая задача является многопараметрической и требует от инженеров понимания основных зависимостей в таких сложных радиотехнических системах.

Цель предлагаемой статьи – обсуждение влияния параметров радиолинии на создание систем сопровождения низкоорбитальных спутников связи наземными направленными антеннами с точки зрения инженерной разработки наземного абонентского терминала (АТ).

Для этого требуется сначала в качестве исходных данных дать краткую характеристику

низкоорбитальных спутников связи и их сигналов для приема наземными антеннами. Далее в качестве объектов исследования желательно рассмотреть характеристики применяемых наземных направленных антенн для организации каналов радиосвязи связи с НОС. Кроме того, важен краткий обзор вариантов построения систем наведения наземных антенн на достаточно быстро перемещаемые по небесной сфере низкоорбитальные космические аппараты (КА). Характерные для НОС значительные перепады дальности до КА во время сеанса радиосвязи могут потребовать отдельного внимания к конфигурации управления мощностью передатчика. В заключение все рассмотренные вопросы инженерного выбора параметров наземного АТ следует системно увязать с обеспечением эффективной радиосвязи с НОС. Этот этап необходим при задании корректных исходных системных данных для последующего за ним этапа построения имитационной модели процесса радиосвязи с низкоорбитальными КА (входящей составной частью в цифровой двойник спутниковой системы связи и необходимой для синтеза эффективных режимов управления следящими наземными антеннами в разных эксплуатационных условиях их применения).

По своему содержанию данная статья является продолжением темы исследования, начатой в предыдущей статье авторов [9]. Поэтому в ней будут широко использованы приведенные ранее математические зависимости. По своему смыслу предлагаемая статья является подготовкой к построению детализированной имитационной модели следящей антенны, что позволяет ограничиться понятными упрощенными теоретическими зависимостями, которые тем не менее наглядно показывают роли и взаимосвязи основных параметров таких систем радиосвязи.

Общая характеристика низкоорбитальных спутников связи и их сигналов для приема наземными антеннами

Низкоорбитальные спутники связи находятся на высотах от 300 до 2000 км над поверхностью Земли, что обеспечивает малое время задержки сигнала и повышенную плотность мощности на входе приемника по сравнению с геостационарными КА. Однако динамический характер движения НОС, ограниченное время видимости, а также влияние внешних факторов требуют тщательного анализа параметров радиолинии при организации устойчивой связи с использованием направленных наземных антенн [10–12].

На практике для организации связи с НОС используются разные частотные диапазоны – от УКВ (UHF) до Ка-диапазона [13, 14]. Выбор рабочего диапазона в первую очередь определяется требуемой пропускной способностью радиолинии, а также балансом между устойчивостью к внешним воздействиям, сложностью антенной системы и доступностью оборудования.

На нижних частотах, таких как УКВ = UHF (Ultra High Frequency: 300 МГц ... 1 ГГц), достигается минимальное затухание сигнала в атмосфере, что делает его устойчивым к погодным условиям. Этот диапазон используется в малых космических аппаратах и системах управления спутником, однако ограниченная ширина полосы ограничивает скорость передачи данных.

Переход к L-диапазону (Long: 1...2 ГГц) позволяет достичь лучшего баланса между помехоустойчивостью и пропускной способностью. Он применяется в мобильной спутниковой связи (Iridium) и глобальных навигационных системах (GNSS). При этом требуется более точное направление антенны по сравнению с работой в диапазоне UHF.

S-диапазон (Short: 2...4 ГГц) обеспечивает большую ширину полосы и часто используется в научных и военных спутниках. Более чувствителен к тропосферным эффектам.

В профессиональных и коммерческих системах связи распространено использование C-диапазона (Compromise: 4...8 ГГц), обеспечивающего хороший компромисс между помехоустойчивостью и скоростью передачи. Однако он сталкивается с проблемой насыщенности эфира.

Наиболее широкое применение в современных высокоскоростных спутниковых системах, таких как Starlink и OneWeb, получил Ku-диапазон (under K: 12...18 ГГц), позволяющий достичь высокой пропускной способности. Вместе с тем он подвержен значительному ослаблению сигнала при осадках и требует высокой точности наведения антенны.

В них также используется Ka-диапазон (above K: 27...40 ГГц), предоставляющий наибольшую ширину полосы, однако он наиболее уязвим к атмосферным явлениям. Для компенсации этих эффектов применяются адаптивные методы коррекции и высокоточные направленные антенны.

Оставшиеся диапазоны X (8...12 ГГц) и K (18...27 ГГц) также встречаются в спутниковой части, но часто они зарезервированы для систем радиолокации, дальней космической связи и др.

На практике выбор конкретного частотного диапазона зависит от множества факторов [15]: технических требований, климатических условий, регуляторных ограничений, стоимости реализации и др.

После его выбора обычно переходят к обеспечению энергетики радиолинии [16]. Здесь отношение сигнал/шум ($SNR = P_{\text{вх}}/P_{\text{ш}}$) является ключевым параметром, определяющим качество принимаемого сигнала и устойчивость радиолинии [17, 18]. Оно напрямую влияет на вероятность ошибок при демодуляции сигнала, допустимую скорость передачи данных, а также выбор типа модуляции и кодирования.

Для надежного радиоприема значение SNR должно превышать пороговое значение, зависящее от используемой схемы модуляции и корректирующего кодирования. Например, для простой цифровой модуляции требуется SNR порядка 4...6 дБ, тогда как для более высокочастотных схем, таких как 16-QAM или 64-QAM, этот порог возрастает до 10...15 дБ и выше.

SNR -уровень мощности сигнала на входе приемника обычно рассчитывается с помощью формулы бюджета линии связи [19, 20] как

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{вых}} + G_{\text{вых}} + Gr_{\text{вх}} - Lfs - L_{\text{атм}} - L_{\text{проч}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{вх}}$ – мощность сигнала на входе приемника, дБм; $P_{\text{вых}}$ – мощность передатчика на борту КА, дБм; $G_{\text{вых}}$, $Gr_{\text{вх}}$ – усиление передающей и приемной антенн, дБ; Lfs – потери (ослабление сигнала) в свободном пространстве, дБ; $L_{\text{атм}}$ – атмосферное затухание, дБ; $L_{\text{проч}}$ – прочие потери (поляризационные, фидерные и др.), дБ.

Особенностью работы с НОС является необходимость учета переменного расстояния до спутника (является функцией от угла высоты антенны), что вызывает значительные колебания уровня принимаемого сигнала в течение одного сеанса связи. Это требует применения специальных методов приема, включая автоматическую регулировку усиления, динамическое управление мощностью передачи и переключение скорости передачи в зависимости от текущих условий.

Мощность шума сигнала принято сводить к модели теплового шума:

$$P_{\text{ш}} = kT\Delta f, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$), Дж/К; T – системная температура (абсолютная), К; Δf – ширина полосы приема, Гц.

Он принимается равномерно распределенным по частотному диапазону и особенно значим при приеме слабых сигналов.

При этом источники шума разделяются на внутренние, связанные с электронными компонентами приемного тракта, и внешние, обусловленные как естественными физическими процессами, так и антропогенной активностью:

$$T = T_{\text{ант}} + TLNA + T_{\text{др}},$$

где $T_{\text{ант}}$ – шумовая температура антенны, зависящая от направления приема; $TLNA$ – эквивалентная шумовая температура малошумящего усилителя; $T_{\text{др}}$ – вклад других элементов приемного тракта.

Шумовая температура антенны зависит от излучения космического микроволнового фонового излучения, теплового излучения Земли и тропосферного излучения. При малых углах места наблюдается резкое увеличение уровня шума за счет излучения земной поверхности.

Атмосфера поглощает и рассеивает радиоизлучение, особенно заметно это в Ка- и Ку-диапазонах, где наблюдаются пики поглощения водяным паром (≈ 22 ГГц) и кислородом (≈ 60 ГГц), что приводит к увеличению $T_{\text{ант}}$ и снижению SNR .

На нижних частотах, в УКВ L-диапазонах, прохождение сигнала через ионосферу может вызывать дополнительные флуктуации амплитуды и фазы, а также усиление шума из-за взаимодействия с неоднородностями плазмы.

Искусственные источники шума, такие как линии электропередачи, бытовые устройства и промышленное оборудование, создают фоновый шум, выраженный в городских условиях, особенно в диапазонах до 2...3 ГГц.

Помимо рассмотренных источников шума современные системы спутниковой связи могут быть подвержены воздействию преднамеренных и непреднамеренных помех, что делает обеспечение электромагнитной совместимости важным аспектом при проектировании наземных станций [21, 22].

Радиоэлектронная борьба (РЭБ) представляет собой комплекс мероприятий, направленных на подавление, искажение или перехват сигналов связи, и может существенно снижать качество канала или даже полностью блокировать передачу данных. Помехи от РЭБ делятся на активные и пассивные. Активные помехи создаются специально разработанными средствами подавления и могут быть широкополосными, узкополосными, импульсными или маскирующими.

Особую угрозу представляют целевые помехи, адаптирующиеся к текущему состоянию канала и изменяющие свои параметры в реальном времени. Пассивные средства РЭБ включают, например, создание искусственных отражающих объектов и использование радиопоглощающих материалов.

Для повышения устойчивости радиолинии к такого рода угрозам применяются следующие меры: использование частотного разнесения, внедрение широкополосных сигналов с расширением спектра, применение пространственного разнесения с использованием адаптивных антенных решеток, шифрование и кодирование сигнала, автоматическое обнаружение и подавление помех, а также резервирование каналов и маршрутов передачи данных.

Работа с НОС имеет ряд специфических особенностей, связанных с движением КА относительно наземной станции. Наиболее значимыми из них являются: доплеровский сдвиг частоты, ограниченная продолжительность сеанса связи и нестабильность уровня сигнала.

Доплеровский сдвиг частоты вызван относительным движением спутника и наземной антенны и может достигать нескольких кГц в L-диапазоне и до десятков кГц в Ka-диапазоне. Это может вызвать срыв захвата фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и ухудшить качество демодуляции сигнала.

Продолжительность сеанса связи с одним НОС обычно составляет от 5 до 15 минут, что обуславливает необходимость автоматизации процессов захвата, слежения и передачи данных. Также важно организовать надежный переход между сеансами связи с разными спутниками группировки.

Уровень сигнала в радиолинии с НОС не остается постоянным в течение всего сеанса. Он зависит от расстояния до спутника, ориентации его бортовой антенны, изменения угла места и возможных замираний сигнала в тропосфере. Особенно заметными эти колебания становятся при использовании высоконаправленных антенн.

Учет указанных факторов играет ключевую роль при проектировании наземных станций, особенно при организации устойчивой связи с быстро перемещающимися объектами. Для их компенсации применяются алгоритмы прогнозирования траектории спутника, системы динамической коррекции частоты и управляемые антенные решетки с возможностью быстрого перенацеливания луча.

Конструкции наземных направленных антенн для связи с НОС

Каналы спутниковой связи обычно имеют круговую поляризацию. Эффективная организация радиолинии малой энергозатратности при сопровождении НОС требует использования наземных антенн с высокой направленностью, способных повысить относительно слабый уровень приходящего сигнала и обеспечить устойчивое соединение в условиях динамического изменения параметров трассы [23]. При этом выбор типа антенной системы зависит от множества факторов: рабочий частотный диапазон, коэффициент усиления, точность слежения за подвижным объектом и допустимые массогабаритные характеристики [24].

Распространенными типами направленных антенн, применяемых в наземных АТ, являются параболические антенны и антенные решетки, а также направленные антенны из проводников для низкочастотных каналов радиосвязи [25–27].

Параболическая антенна (рис. 1, а) состоит из параболического рефлектора и облучателя, установленного в фокусе. Такая конструкция при большом диаметре D , м, раскрыва антенны позволяет формировать узкий луч с высоким коэффициентом усиления G :

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2, \quad (3)$$

где η – КПД антенны (обычно не превышает 0,5...0,7); λ – длина волны, м.

Создаваемая диаграмма направленности применяемых параболических антенн характеризуется достаточно узким главным лепестком и низким уровнем боковых лепестков, что обеспечивает высокую помехоустойчивость и точность направления луча. Одновременно это обычно требует и применения высокоточных систем слежения за НОС.

Антенные решетки (рис. 1, б, в), состоящие из совокупности антенных элементов, дополнительно к формированию узкого луча часто позволяют перенастраивать диаграмму направленности в реальном времени без изменения их пространственного положения, что делает их особенно эффективными при работе с быстро перемещающимися НОС. Их коэффициент усиления G , дБ,

$$G = G_{el} + 10 \log_{10} (N),$$

где G_{el} – усиление одного элемента; N – количество элементов в решетке.

Диаграмма направленности антенной решетки может быть адаптирована под текущие условия: можно формировать несколько лучей, управлять их направлением и глубиной нулей для подавления помех. Благодаря этим возможностям антенные решетки находят всё большее применение в современных спутниковых АТ, особенно в Ku- и Ka-диапазонах.

С различными вариантами отечественных конструкций параболических антенн и антенных решеток для спутниковой радиосвязи можно познакомиться на сайте компании ООО «Технологии радиосвязи» (www.rc-tech.ru).

Заметим, что в низкочастотном диапазоне UHF антенные решетки с круговой поляриза-

цией получаются достаточно громоздкими (рис. 1, *b*). Поэтому их в компактных АТ в ряде случаев заменяют на направленные антенны типа елочка (рис. 1, *c*). В логопериодическом варианте, когда каждый вибратор подключается к фидеру, можно достичь широкополосного режима работы. Такая конфигурация делает антенну эффективной в диапазоне УКВ, где важна устойчивость к изменениям условий распространения. Однако они имеют обычно значительно более широкий главный луч (до ± 60 угл. град) и поэтому характеризуются относительно невысоким усилением (2...6 дБ). Требования к системе слежения за КА для них минимальны.

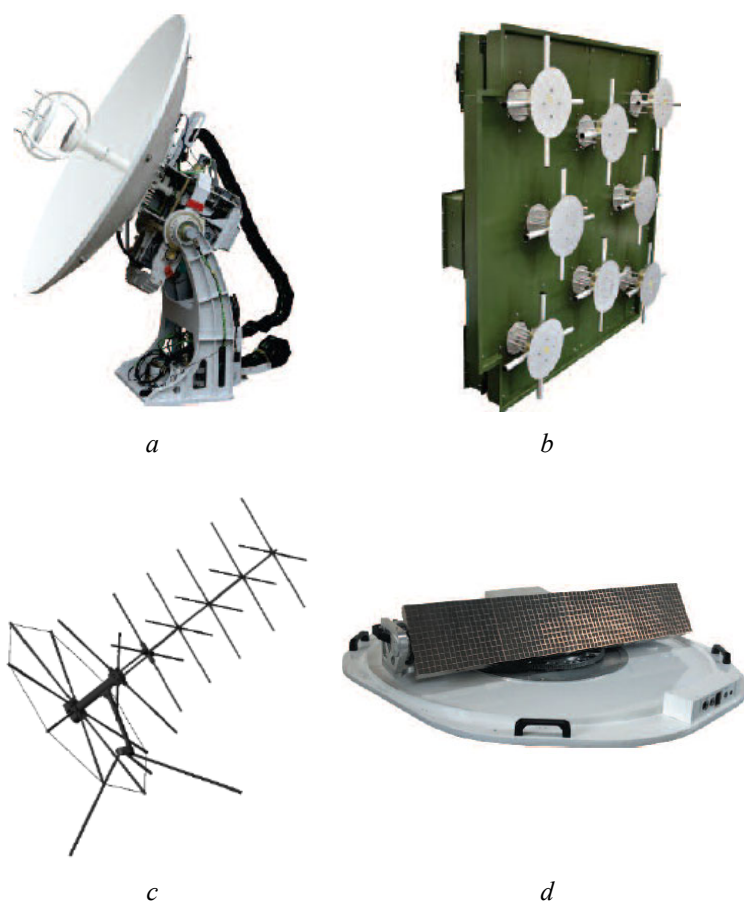


Рис. 1. Антенны для спутниковой связи: *a* – антенна 1,7 м С-диапазона; *b* – ФАР UHF-диапазона 2×2 м; *c* – UHF-антенна типа елочка; *d* – ФАР Ku-диапазона 0,6 м [28, 29]

Fig. 1. Antennas for satellite communications: *a* - antenna 1,7 m C-band; *b* - UHF phased array 2×2 m; *c* - UHF herringbone antenna; *d* - 0,6 m Ku-band phased array [28, 29]

Варианты систем наведения наземных антенн на НОС

При проектировании радиолинии между наземной станцией и низкоорбитальным спутником важным параметром является запас по энергетике линии связи, который учитывает возможные отклонения реальных условий ра-

боты системы от идеализированных расчётных данных. Особенно актуален этот параметр при использовании высоконаправленных антенн, где даже небольшие отклонения луча от направления на спутник могут привести к значительному снижению уровня принимаемого сигнала.

Запас по энергетике линии связи представляется собой разницу между рассчитанным уровнем отношения сигнал/шум (рассчитываются по формулам (1), (2)) в идеальных условиях ($SNR_{идеал}$) и минимально допустимым ($SNR_{порог}$), необходимым для обеспечения заданного качества приема:

$$L_{en} = SNR_{идеал} - SNR_{порог}.$$

Он служит компенсацией за неопределенность и нестабильность параметров радиолинии, возникающих вследствие различных факторов.

Ошибки наведения антенны связаны с неточностью системы слежения, дрейфом траектории КА, инерционностью приводов и другими эффектами, которые становятся особенно заметными при использовании узконаправленных антенн. Изменения условий распространения сигнала, такие как влияние атмосферных осадков, облачности и ионосферных возмущений, также оказывают влияние на уровень принимаемого сигнала. Кроме того, необходимо учитывать техническую нестабильность оборудования, вызванную изменением усиления передатчика и приемника, температурными эффектами и старением компонентов. Неопределенность модели трассы, обусловленная погрешностями в предсказании траектории НОС, особенно при отсутствии высокоточных эфемерид, также вносит свой вклад в общую неопределенность. На фоне этих факторов особое внимание уделяется ошибкам наведения, поскольку они напрямую зависят от направленности антенны и ее пространственной ориентации [30, 31].

Направленная антенна имеет диаграмму направленности, характеризующую зависимость усиления от направления прихода сигнала. При отклонении направления на угол θ от максимума ДН происходит снижение усиления $G(\theta)$, что можно выразить следующим образом:

$$G(\theta) = G_0 - \Delta G(\theta),$$

где G_0 – максимальное усиление антенны; $-\Delta G(\theta)$ – уменьшение усиления вследствие отклонения луча.

Запас по энергетике напрямую зависит от характеристик используемой антенны. Чем уже диаграмма направленности (меньше уровень половинной мощности), тем выше чувствительность к ошибкам наведения и, соответственно, требуется больший запас. Увеличение диаметра антенны повышает коэффициент усиления, но одновременно уменьшает ширину луча, увели-

чивая требования к точности наведения. Использование антенных решеток с цифровым управлением лучом позволяет адаптивно компенсировать ошибки наведения, что может позволить снизить требуемый запас.

Поэтому выбор антенны всегда должен сопровождаться анализом не только усиления, но и допустимой погрешности наведения, которая должна быть учтена в бюджете линии связи через введение L_{en} .

В стационарных системах спутниковой связи точное направление главного луча наземной антенны на КА часто обеспечивается с помощью программного управления. Такой подход позволяет автоматически рассчитывать и обновлять углы азимута и угла места в реальном времени, исходя из текущего положения спутника относительно точки установки антенны. В случае работы с низкоорбитальными спутниками, характеризующимися достаточно высокой скоростью перемещения по небесной сфере, программное наведение луча антенны становится не просто удобным, но и востребованным элементом системы слежения.

При этом основой для расчета углов выставки антенны обычно служат геометрические соотношения, основанные на модели сферической Земли и известных параметрах орбиты спутника. Для определения азимута A и угла места H используются зависимости, аналогичные приведенным в предыдущей статье авторов. Здесь реализация программного модуля управления углами наведения базируется на последовательном выполнении нескольких ключевых этапов. На первом этапе производится получение данных о положении спутника, которые могут быть представлены в формате TLE (Two Line Element), либо поступать в виде GPS-телеметрии от самого аппарата. Далее выполняется преобразование этих данных в географические координаты точки субспутника, что позволяет определить текущее относительное положение спутника относительно антенны. С использованием соответствующих тригонометрических выражений рассчитываются целевые значения азимута и угла места.

При установке антенны на подвижном объекте или в условиях сложного рельефа местности особое внимание уделяется интеграции программного модуля с датчиками ориентации, такими как акселерометры, гироскопы и магнитометры [32]. Эти устройства позволяют уточнять фактическое положение антенной системы в пространстве и компенсировать возможные отклонения от расчетной ориентации.

Введение режима программного управления антенной системой облегчает организацию процессов слежения за быстро движущимися спутниками, обеспечивает гибкость при переходе на другой спутник или изменение рабочей конфигурации, а также способствует предиктивному управлению, позволяющему заранее готовить антенну к следующему сеансу связи. Кроме того, использование такого подхода обеспечивает высокую воспроизводимость результатов и позволяет эффективно интегрировать антенную систему в состав более сложных комплексов спутниковой связи.

Для активного наведения узконаправленной антенны на спутники связи применяются разные режимы управления [33]. Среди них для повышения точности слежения за КА большими параболическими антеннами обычно используется суммарно-разностный метод, также известный в РЛС как амплитудный моноимпульсный метод [34]. На практике данный подход используется повсеместно в крупногабаритных антенных системах с узкой диаграммой направленности, где даже небольшие отклонения луча от цели приводят к заметному снижению уровня принимаемого сигнала.

Суть суммарно-разностного метода заключается в пространственном разделении входного поля на несколько частей и последующем сравнении уровней принятых сигналов. В традиционной четырехканальной реализации диаграмма направленности делится на четыре сектора: верхний левый (UL), верхний правый (UR), нижний левый (LL) и нижний правый (LR). Сигналы с этих секторов поступают на соответствующие маломощные приемники, после чего вычисляются разностные значения, характеризующие отклонение направления на источник от оси антенны. Нормализация разностных величин относительно суммарного сигнала $F = UL + UR + LL + LR$ обеспечивает независимость управляющих параметров от вариаций общей интенсивности сигнала:

$$\begin{aligned} S_A &= \frac{\Delta A}{F}, \quad \Delta A = (UR + LR) - (UL + LL); \\ S_H &= \frac{\Delta H}{F}, \quad \Delta H = (UL + UR) - (LL + LR). \end{aligned} \quad (4)$$

Полученные значения служат основой для коррекции положения антенны по двум осям – азимуту A и углу высоты H . Знак и модуль каждого из сигналов определяют направление и степень необходимой корректировки, обеспечивая автоматическое удержание главного лепестка

диаграммы направленности в направлении на источник излучения.

Преимуществом данного метода является возможность получения информации о направлении на максимум сигнала для неподвижной антенны (без необходимости сканирования ее лучом через колебания большой инерционной антенны). Это позволяет значительно повысить скорость реакции системы на изменения положения спутника и снизить уровень переходных процессов, возникающих при динамическом слежении. Особенно это актуально при работе с низкоорбитальными спутниками, движущимися с достаточно высокими угловыми скоростями.

Эффективность применения суммарно-разностного метода зависит от ряда факторов, включая ширину главного лепестка диаграммы направленности, стабильность параметров приемных каналов, отношение сигнал/шум и точность юстировки разностных секторов. Для повышения помехоустойчивости и улучшения качества управления могут использоваться: цифровая обработка сигналов, адаптивная фильтрация, компенсация температурного дрейфа и использование пилот-сигналов для нормировки амплитуд.

Наведение по разностному сигналу обеспечивает высокую динамическую точность, не требует механического перемещения луча и сохраняет работоспособность при переменном уровне полезного сигнала, что делает его перспективным решением для больших наземных станций, осуществляющих связь с быстро перемещающимися спутниками.

В тех случаях, когда необходимо реализовать автоматическое слежение малогабаритными антеннами с минимальными аппаратными затратами, применяются альтернативные методы, позволяющие обойтись единственным приемным каналом. Одним из таких подходов является метод конического сканирования [35], известный также как метод улитки (широко применяется в системах радиолокации). Он используется в компактных и малогабаритных антенных системах, где важны простота конструкции, энергоэффективность и экономическая целесообразность.

В этом режиме главный лепесток диаграммы направленности приводится во вращательное движение вместе с антенной вокруг некоторого центрального направления, образуя коническую поверхность. Этого можно достичь за счет одновременного гармонического колебания антенны по азимуту и углу высоты с одинаковой частотой f_s , но со сдвигом фаз на 90 градусов:

$$A(t) = A_0 \sin(2\pi f_s t), \quad H(t) = H_0 \cos(2\pi f_s t),$$

где A_0 и H_0 – максимальные отклонения луча по соответствующим осям, определяющие радиус окружности, которую описывает вершина луча на небесной сфере.

В результате точка максимума диаграммы направленности движется по круговой траектории, центр которой задает текущее направление системы наведения. Если центр окружности совпадает с направлением на источник сигнала, то уровень принимаемого сигнала остается постоянным в течение одного полного оборота луча. Однако если между центром сканирования и положением источника существует угловое рассогласование θ , то мощность сигнала начинает модулироваться с частотой f_s . Причем амплитуда этой модуляции прямо пропорциональна величине ошибки, а ее фаза указывает на направление корректировки.

Центральную область главного луча для простоты можно аппроксимировать, например, гауссовой функцией. Тогда изменение уровня сигнала

$$P_{rx}(t) = P_0 G(\theta(t)) = P_0 G_0 e^{-k\theta^2(t)},$$

где P_0 – уровень сигнала на оси диаграммы; G_0 – максимальное усиление антенны; k – коэффициент, зависящий от ширины главного лепестка диаграммы направленности; $\theta(t)$ – текущее угловое расстояние между направлением на спутник и положением луча на траектории сканирования.

Результирующий сигнал детектируется и разделяется на две составляющие – синфазную и квадратурную – относительно частоты сканирования f_s . Эти составляющие позволяют определить сигналы для коррекции:

$$\begin{aligned} \Delta A &= k_A V_1, V_1 = \frac{1}{T} \int_0^T P_{rx}(t) \cos(2\pi f_s t) dt; \\ \Delta H &= k_H V_Q, V_Q = \frac{1}{T} \int_0^T P_{rx}(t) \sin(2\pi f_s t) dt, \end{aligned} \quad (5)$$

где k_A и k_H – коэффициенты усиления по соответствующим осям азимута и высоты, определяемые параметрами системы наведения (чувствительностью приводов и шириной диаграммы направленности).

Эти сигналы подаются на приводы, которые производят коррекцию положения антенны таким образом, чтобы минимизировать отклонение луча от источника. Процесс продолжается

до тех пор, пока амплитуда модуляции не станет ниже заданного порогового значения, свидетельствующего о достаточной точности наведения.

Преимущество метода заключается в его простоте реализации, поскольку он не требует наличия нескольких приемных каналов или сложных алгоритмов обработки сигнала. Однако эффективность метода снижается при наличии внешних помех, флуктуаций сигнала или резких изменений его уровня, вызванных, например, атмосферными эффектами или динамикой спутника. Для повышения устойчивости системы применяются дополнительные алгоритмы цифровой обработки сигнала, включая адаптивную фильтрацию и запоминание траектории движения спутника.

Метод улитки находит широкое применение в мобильных и портативных станциях спутниковой связи, где важны компактность, энергоэффективность и простота конструкции. Он обеспечивает достаточную точность слежения для антенн с умеренной направленностью и может быть использован как автономный режим наведения или как часть более сложной гибридной системы слежения.

Заметим, что с точки зрения механики такой метод оказывается проще реализовать через вращение с постоянной скоростью относительно визирного направления на НОС параболического зеркала с малым угловым отклонением своей оси. Однако на практике это потребует применения специально разработанных вращающихся волноводных и коаксиальных соединений в местах контакта линии передачи с вращающимся зеркалом.

Учет изменения уровня сигнала в процессе сеанса связи с НОС

Как уже отмечалось, динамический характер движения КА относительно наземной станции может приводить к значительному изменению длины радиолинии в течение сеанса связи – дальности $R(t)$, которая определяет уровень потерь в свободном пространстве (обратно пропорционально R^2).

Очевидно, что наименьшее расстояние между КА и АТ будет наблюдаться при прохождении спутника над зенитом, т.е. соответствовать высоте орбиты: $R_{\min} = h_{ka}$, а наибольшее расстояние – моменту его появления или исчезновения за горизонтом (когда угол высоты антенны становится отрицательным). Для рассматриваемого случая, когда плоскость орбиты проходит через точку местоположения антенны,

R_{\max} понятно вычисляется из геометрии (см. рис. 2, а):

$$R_{\max} = \sqrt{(R_{KA})^2 - (R_3)^2} = h_{ka} \sqrt{1 + 2 \frac{R_3}{h_{ka}}}, \quad (6)$$

где $R_{ka} = R_3 + h_{ka}$ – радиус орбиты КА; $R_3 = 6378$ км – средний радиус Земли.

При этом перепад мощности сигнала на интервале сеанса радиовидимости составит

$$\left(\frac{R_{\max}}{R_{\min}} \right)^2 = 1 + 2 \frac{R_3}{h_{ka}}.$$

Например, для спутников Starlink $h_{ka} = 550$ км с плоскостью орбиты, проходящей через местоположение наземной антенны минимальное и максимальное расстояния (6), составят: $R_{\min} = 550$ км, $R_{\max} = 2740$ км, что соответствует $(R_{\max}/R_{\min})^2 \approx 25$ раз.

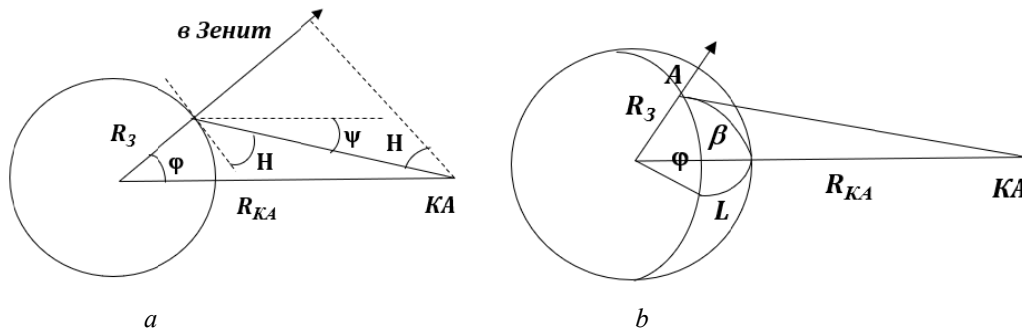


Рис. 2. Вспомогательные схемы для случаев нахождения антенны в плоскости (а) и вне плоскости (b) орбиты КА

Fig. 2. Auxiliary circuits for antenna cases in the plane (a) and outside the plane (b) of the spacecraft orbit

При этом для оценки длины сеанса наблюдения НОС удобно пренебречь собственным вращением Земли, так как угловая скорость таких КА на порядок превышает скорость Земли. Тогда для рассматриваемого случая (рис. 2, а) время наблюдения составит

$$T_n = (\gamma_n / 2\pi) T_{об}, \quad \gamma_n = 2 \arccos \left[R_3 / (R_3 + h_{KA}) \right]; \quad (7)$$

$$T_{об} = 2\pi / \omega_{KA}, \quad \omega_{KA} = \left[\mu / (R_3 + h_{KA})^3 \right]^{1/2},$$

где $\mu = 398600 \text{ км}^3 / \text{с}^2$ – гравитационная постоянная; γ_n – угловой сегмент видимости спутника, отсчитываемый относительно центра Земли.

В более общем случае, когда наземный терминал не находится в плоскости орбиты, для оценки минимального R_{\min} и максимального R_{\max} расстояний между антенной и КА плоскость орбиты удобно условно назвать «новым» экватором. При этом тоже можно будет воспользоваться схемой на рисунке 2, b, в которой угол ϕ будет характеризовать уже не широту, а угловую отстройку точки антенны от плоскости орбиты относительно центра Земли. Получаются следующие понятные из рисунка 2 зависимости.

Так, R_{\max} будет по-прежнему определяться точкой горизонта (6), а R_{\min} – по теореме косинусов:

$$R_{\max} = \sqrt{(R_{KA})^2 + (R_3)^2 - 2R_{KA}R_3 \cos \tilde{\phi}}. \quad (8)$$

Из соотношений (5) и (8) легко определяется перепад расстояний в течение сеанса радиосвязи.

При этом для расчета времени нахождения КА над горизонтом (времени наблюдения) можно использовать прежние зависимости (7), в которых угловой сегмент видимости КА следует пересчитать с уменьшением:

$$\gamma_n = 2 \arccos \left[(R_3 + \Delta R) / R_{KA} \right], \quad (9)$$

$$\Delta R = R_{KA} - R_3 / \cos \tilde{\phi}.$$

Если требуется получить функцию изменения расстояния до НОС в течение сеанса связи, для оценки текущего расстояния между антенной и спутником следует использовать зависимость (получается из геометрической модели положения КА относительно Земли – см. предыдущую статью авторов):

$$R = R_{KA} \sqrt{1 + \left(\frac{R_3}{R_{KA}} \right)^2 - 2 \frac{R_3}{R_{KA}} \cos \beta}, \quad (10)$$

где β , рад, – угловое расстояние между точкой подспутника и местоположением антенны (А), связанное с разницей долготы $L = \lambda_{КА} - \lambda_A$ и широты $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{КА}$ отношением $\cos\beta = \cos L \cos \Delta\varphi$.

Заметим, что ранее приведенное $R_{\min} = h_{КА}$ получается при $\cos\beta = 1$, а R_{\max} (6) – отвечает условию $\cos\beta = R_3/R_{КА}$.

Характер изменения длины (10) радиолинии в случаях нахождения антенны в плоскости орбиты для спутников Starlink, OneWeb, «Гонец МКА», «Марафон IoT» показан на рисунке 3. При этом для спутника Starlink время видимости составляет ≈ 12 мин, для спутника OneWeb ($h_{КА} = 1200$ км) оно увеличивается до ≈ 15 мин, а для спутников «Гонец МКА» ($h_{КА} = 585$ км) и «Марафон IoT» ($h_{КА} = 750$ км) занимает промежуточные значения.

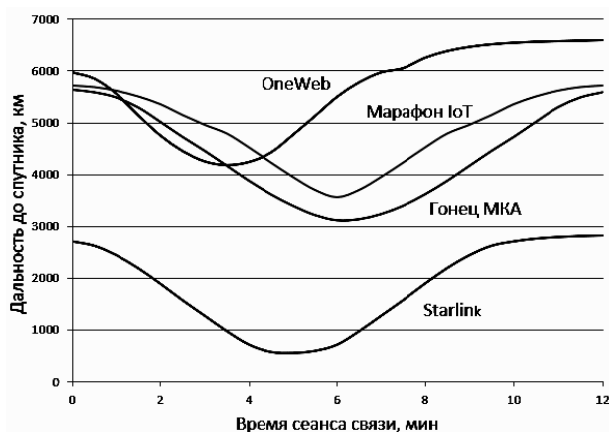


Рис. 3. Изменение длины радиолинии в течение сеанса связи (для случая прохождения плоскости орбиты через местоположение антенны)

Fig. 3. Changing the length of the radio link during a communication session (for the case when the orbital plane passes through the antenna location)

Поскольку мощность сигнала обратно пропорциональна квадрату расстояния R^2 , показанные значительные перепады расстояния до НОС во время сеанса связи на практике обычно требуют введения дополнительных алгоритмов стабилизации усиления и компенсации затухания. С другой стороны, сильное увеличение радиосигнала на центральных участках зоны радиовидимости по сравнению с ее краями повышает потенциал работы системы связи в условиях повышенных шумов за счет уменьшения длительности сеанса, ограничиваясь только участком центральной зоны.

Связь диаметра наземной антенны с радиочастотой

Важными исходными данными при расчете радиолинии между наземной направленной антенной и низкоорбитальными спутниками связи являются соотношение диаметра d апертуры антенны и длины волны λ радиоизлучения.

На рисунке 4 показаны типовые размеры параболических спутниковых антенн, изготовленные и применяемые для соответствующих диапазонов рабочих радиочастот.

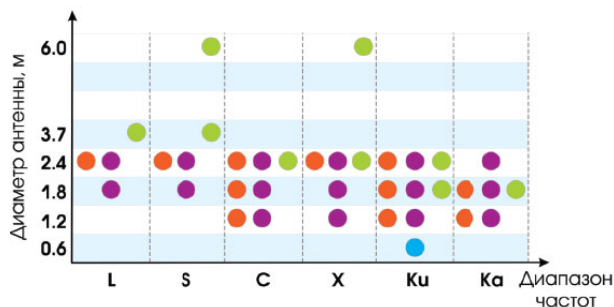


Рис. 4. Варианты выбора диаметра конструкций параболических спутниковых антенн в зависимости от диапазона рабочих частот [36]

Fig. 4. Options for choosing the diameter of parabolic structures satellite dishes depending on the operating frequency range [36]

Для таких антенн через диаметр d с учетом (3) определяется коэффициент направленного действия (КНД) D и коэффициент усиления G :

$$G = D\eta, \quad D = \left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)^2 = 4\pi S/\lambda^2, \quad S = \pi d^2/4, \quad (11)$$

где η – коэффициент полезного действия (КПД), учитывающий дополнительные потери, включая влияние рассогласования антенны с антенно-фидерным трактом, поляризационного рассогласования и др. (в хороших условиях он обычно не превышает 0,7).

Заметим, что на практике эффективная площадь $S_{\text{эф}}$ приемной параболической антенны связана с площадью S через коэффициент использования поверхности $k_{\text{и.п}} = (0,55...0,7)/S_{\text{эф}} = k_{\text{и.п}}S$. Для упрощения записи в (11) он тоже включен в КПД.

При этом ширина луча по уровню половины мощности оценивается как

$$\Delta\theta_{0,5} = k(\lambda/d), \quad k \approx 57 \text{ угл. град.} \quad (12)$$

Заметим, что из (11), (12) имеем понятную обратноквадратичную связь коэффициента усиления с шириной главного луча антенны:

$$G = (\pi k / \Delta\theta_{0,5})^2 \eta. \quad (13)$$

При этом на практике точность слежения лучом антенны за КА часто устанавливают не хуже $0,1 \dots 0,2 \Delta\theta_{0,5}$.

В случае применения антенной решетки с квадратным раскрытием $(a \times a)$ в идеальном случае вместо (12) также можно использовать похожие соотношения:

$$\Delta\theta_{0,5} = k(\lambda/a), \quad k \approx 51 \text{ угл. град};$$

$$D = 4\pi S / \lambda^2, \quad S = a \times a.$$

Однако для небольшого числа излучателей решетки, а также с учетом увеличения расстояния между ними (чтобы уменьшить их электромагнитную связь) коэффициент k будет несколько увеличен.

В случае применения направленных проволочных антенн (типа волнового канала, логопериодических или типа изображенной на рис. 1, с) расчет эффективной площади антенны определяют опосредованно – через измеренный или отдельно рассчитанный в специальной программе коэффициент усиления антенны G (или КНД):

$$S = G\lambda^2 / 4\pi. \quad (14)$$

Так как длина волны λ , м, связана с частотой излучения f , ГГц, через скорость света c

$$\lambda = c / f = 0,3 / f,$$

из выражений (11)–(13) получаем

$$G = \eta(\pi/c)^2 (fd)^2, \quad \Delta\theta_{0,5} = kc / (fd). \quad (15)$$

Входящая в (15) величина (fd) показывает возможности пропорционального изменения диаметра эффективной площади антенны при изменении радиочастоты. На практике в соответствии с рисунком 4 она по конструктивным габаритно-массовым соображениям уменьшается с уменьшением частоты, что предполагает повышение мощности передатчика.

Для оценки мощности сигнала, принимаемого приемником (будем обозначать индексом «пр») с учетом только ослабления сигнала вдоль трассы распространения (без учета дополнительных потерь поглощения сигнала на трассе), используется зависимость

$$P_{\text{пр}} = \text{ЭИИМ} S_{\text{пр}} f_{\text{пр}}(\theta_A, \theta_H) / (4\pi R^2), \quad (16)$$

$$S_{\text{пр}} = G_{\text{пр}} \lambda^2 / 4\pi,$$

где ЭИИМ = $P_{\text{пер}} G_{\text{пер}}$ – эквивалентная изотропная излучаемая мощность передатчика (будем обозначать индексом «пер»), имеющего мощность $P_{\text{пер}}$ и коэффициент усиления $G_{\text{пер}}$ (с учетом своего КПД); $f_{\text{пр}}(\theta_A, \theta_H)$ – диаграмма направленности приемной антенны по мощности; (θ_A, θ_H) – угловые координаты в направлении углов азимута и высоты; $S_{\text{пр}}$ – эффективная площадь приемной апертуры.

В простом представлении центральную область диаграммы направленности (внутри области половинного уменьшения мощности) в (16) можно с учетом (12) приближенно аппроксимировать квадратичной функцией:

$$f_{\text{пр}}(\theta_A, \theta_H) \approx 1 - 0,5 \left[\left(\frac{\theta_A}{\Delta\theta_{0,5}} \right)^2 + \left(\frac{\theta_H}{\Delta\theta_{0,5}} \right)^2 \right]. \quad (17)$$

Выписанные параметрические зависимости позволяют правильно согласовать требования к ошибке слежения, ширине диаграммы направленности и коэффициенту усиления принятого сигнала в приемнике. Так, сужение луча антенны через увеличение ее диаметра позволяет уменьшить передаваемую мощность, лучше выделять сигнал из шума, но одновременно повышает требования к системе слежения за спутником связи. В свою очередь, ослабление требований к системе слежения потребует расширения диаграммы направленности (например, через уменьшение диаметра апертуры антенны) с одновременным повышением мощности передатчика.

Заметим, что требования к уровню принимаемого сигнала зависят также от выбора системы наведения наземной антенны на низкоорбитальный спутник. Так, в случае заданного программного сопровождения НОС опорно-поворотным устройством антенны (без активного наведения) можно рассматривать достижение необходимого защитного отношения, которое представляет собой разность между принимаемым сигналом (1) и уровнем помех (2) в дБ. Если же выполняется активное наведение луча антенны по алгоритмам (4) или (5) в процессе слежения за НОС, тогда в качестве сигнала (1) потребуется принять его изменение на угловом размахе диаграммы направленности (17) антенны, чтобы система наведения смогла выделить его из уровня помех и понять направление угловой подстройки луча антенны. С учетом (16), (17) в этом случае оценочно можно принять $\Delta P_{\text{пр}} \approx 0,25 P_{\text{пр}}$.

Так как чувствительность приемника зависит от энергии радиоизлучения (произведения мощности на длительность), увеличением такта накопления измерительного сигнала следящего контура можно добиться необходимой эффективности его выделения из равномерно распределенного белого шума.

Выбор угловых скоростей наведения наземной антенны на НОС

При выборе или создании опорно-поворотного устройства (ОПУ) антенны важным этапом является правильный выбор угловых скоростей наведения антенны по углам азимута A и высоты H . Для такой задачи в предыдущей статье авторов были выписаны следующие функции изменения этих углов сопровождения во времени:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} A(t) &= \operatorname{tg} L(t) / \sin \Delta \varphi(t); \\ \operatorname{tg} H(t) &= \left[\cos L(t) \cdot \cos \Delta \varphi(t) - \right. \\ &\quad \left. - (R_3 / R_{KA}) \right] / \sqrt{1 - \cos^2 L \cdot \cos^2 \Delta \varphi(t)}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $L(t) = \lambda_{KA}(t) - \lambda_A$; $\Delta \varphi(t) = \varphi - \varphi_{KA}(t)$; λ_A, φ_A – углы долготы и широты точки места наземной антенны; $\lambda_{KA}(t), \varphi_{KA}(t)$ – соответствующие функции перемещения подспутниковой точки выбранного КА.

Так как аналитическое дифференцирование выражений (18) получается громоздким, на практике удобнее ограничиться их численным дифференцированием с учетом масштаба времени (7), (9). В результате для большинства случаев обычно получаются скорости, не превышающие 1 угл. град/сек. Данных скоростей будет достаточно для режима программного сопровождения спутника ОПУ стационарной антенны (без активного наведения) или же в режиме наведения (4) по разностному сигналу.

В то же время при использовании в системе активного наведения алгоритма конического сканирования (5) на приведенные функции потребуется наложить на порядок более высокие колебания по осям азимута и высоты с угловым размахом до третьей (или четвертой) части ширины главного луча (17) антенны. Отсюда выбирается эффективная частота сканирования f_s .

В практических конструкциях ОПУ с учетом переходных процессов захвата и наведения часто закладывается скорость до 6 угл. град./сек.

Если же рассматривается расположение наземной антенны на движущейся платформе, тогда дополнительно к этим скоростям потребуется добавить угловые скорости компенсации сложной траектории движения подвижного средства.

Например, в продукции компании ООО «Технологии радиосвязи» (www.rc-tech.ru) для ОПУ обычно заложены угловые скорости до 16 или до 18 угл. град/сек., причем для диапазона UHF и антенн с широкой диаграммой направленности (типа показанной на рис. 1, б) такие скорости понижены до 10 угл. град/сек.

Заметим, что с учетом современной тенденции к повышению интеллектуальности систем управления на практике могут представлять интерес комплексные режимы наведения, объединяющие программное и активное наведение стационарной антенны на НОС. В этом случае на участках активного наведения выполняется идентификация траектории движения КА относительно антенны, которая потом отслеживается антенной в режиме программного сопровождения с необходимой тонкой коррекцией в режиме активного наведения. Это может несколько понизить требования к скоростям ОПУ.

В таких задачах для идентификации траектории относительного движения НОС удобно использовать прежние зависимости (18). Однако математическую модель задачи идентификации удастся существенно упростить, если, как и ранее, плоскость орбиты КА условно назвать «новым» экватором. Тогда в соответствии со схемой на рисунке 2, б угол $\tilde{\varphi}$ будет идентифицироваться как постоянная величина (характеризует угловую отстройку точки антенны от плоскости орбиты относительно центра Земли), а «новый» угол \tilde{L} будет изменяться с угловой скоростью КА.

После рассмотренного выбора параметров наземного терминала, обеспечивающих надежное удержание канала радиосвязи с низкоорбитальным спутником, следует дополнить его учетом скоростей радиопередачи.

Согласование мощности радиопередатчика с сигнально-кодовой конструкцией (СКК) радиолинии

СКК канала радиосвязи представляют собой объединение в рамках модемного оборудования цифровых модемов и внешних помехоустойчивых кодеров. При этом модемы повышают скорость передачи информации, но и существенно повышают требования к мощности радиосигнала. В свою очередь, помехоустойчивые кодеры несколько удлиняют временной сеанс передачи информации (обычно менее чем в 1,5...2 раза), но позволяют и несколько уменьшить требования к мощности сигнала (обычно до 2...3 раз).

При рассмотрении радиолиний с СКК выделяются следующие системные характеристики

во внутренней структуре отношения сигнал/шум (см. (1), (2)) на входе приемника:

$$P_{\text{вх}} = E_b R_b P_{\text{ш}} = N_0 \Delta f \Rightarrow P_{\text{вх}} / P_{\text{ш}} = (E_b / N_0) (R_b / \Delta f), \quad (19)$$

где E_b – энергия на бит информации (произведение мощности на длительность бита); N_0 – спектральная плотность шума (тепловой шум приемника + шум от параллельно работающих радиостанций); $R_b = 1/T_b$ – битовая скорость передачи информации; T_b – длительность бита; Δf – полоса частот пропускания приемника.

Так как в (19) входная мощность $P_{\text{вх}}$ описывается зависимостью (16), а спектральная плотность шума с учетом (2) представляется через

шумовую температуру $N_0 = kT$, иногда выделяют $G_{\text{пр}}/T$:

$$P_{\text{вх}} / P_{\text{ш}} = \text{ЭИИМ} \left[\lambda / (\pi 4 \pi R) \right]^2 \times (G_{\text{пр}} / T) / (k \Delta f). \quad (20)$$

Выделенное в (19) отношение (E_b / N_0) определяет вероятности ошибок на бит (BER) как для цифровых модуляторов (рис. 5), так и для помехоустойчивых кодеров. В обратной форме записи получаем его связь с отношением сигнал/шум (20) через коэффициент усиления G приемника:

$$E_b / N_0 = (P_{\text{вх}} / P_{\text{ш}}) G, \quad G = \Delta f / R_b = \Delta f T_b. \quad (21)$$

| Вид модуляции | Вероятность ошибки на бит (BER) |
|---|---|
| ОК | $Q(\sqrt{E_b / N_0})$ |
| М-ASK код Грея | $\frac{2(M-1)}{M \log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{\log_2 M}{(M-1)^2} \frac{E_b}{N_0}}\right)$ |
| BPSK | $Q(\sqrt{2E_b / N_0})$ |
| Некогерентная DBPSK | $\frac{1}{2} \exp(-E_b / N_0)$ |
| Когерентная DBPSK | $2Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \left(1 - Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)\right)$ |
| QPSK код Грея | $Q(\sqrt{2E_b / N_0})$ |
| Когерентная DQPSK при $E_b / N_0 \gg 1$ | $2Q(\sqrt{2E_b / N_0})$ |
| М-PSK код Грея | $\frac{2}{\log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{2E_b \log_2 M}{N_0} \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right)}\right)$ |
| FSK | $Q\left(\sqrt{\left[1 - \frac{\sin(2\pi \cdot m)}{2\pi \cdot m}\right] \frac{E_b}{N_0}}\right)$ |
| MSK | $Q(\sqrt{E_b / N_0})$ |
| М-MSK | $\frac{2(M-1)}{M \log_2 M} Q\left(\sqrt{\log_2 M \frac{E_b}{N_0}}\right)$ |
| QAM код Грея | <p>для $k = \log_2 M$, k – четное:</p> $BER = \frac{2P_0 - P_0^2}{\log_2 M}, \text{ где}$ $P_0 = \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1} \frac{E_b}{N_0}}\right)$ <p>для нечетных k:</p> $BER \leq \frac{1}{\log_2 M} \left[1 - \left(1 - 2Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1} \frac{E_b}{N_0}}\right) \right)^2 \right]$ |

Рис. 5. Вероятность ошибки на бит для разных видов модуляции [37]

Fig. 5. Error probability per bit for different types of modulation [37]

Видно, что для сохранения значения (21) при уменьшении показателя сигнал/шум требуется увеличивать время корреляционной обработки сигнала (T_b) или расширять полосы приема (Δf).

Это позволяет ослабить требования к отношениям (разность мощности сигнала/шум) при реализации алгоритмов управления (4) или (5).

В теории цифровой связи зависимости BER от (E_b / N_0) для типовых вариантов цифровых модуляторов известны в аналитическом виде (см. рис. 5). Например, в старых системах связи для информационного сигнала встречаются требования к $(E_b / N_0) = 12 \dots 15$ дБ, а в новых системах связи это отношение стремятся умень-

шить до $6 \dots 7$ дБ. Так, например, для эффективных детекторов фазомодулированных сигналов часто рекомендуется принимать отношение $(E_b / N_0) = 6 \dots 8$ дБ. Примерно такие же рекомендации приводятся и для помехоустойчивых кодеров [38, 39].

Использование практически проверенных пропорций при выборе параметров наземного терминала для радиолиний с НОС

В качестве начального ориентира при выборе пропорций важных рассмотренных характеристик наземных АТ необходимо привести известные данные для двух наиболее современных систем связи с НОС.

Так, для КА системы связи One Web в пределах границ абонентского луча ЭИИМ составляет 34,6 дБВт. При этом поляризация луча круговая правая. Диапазон частот абонентских кана-

лов на линии «вниз» (КА – АТ) 10,7...12,7 ГГц, а на линии «вверх» (АТ – КА) 14,0...14,5 ГГц. Другие важные характеристика наземных АТ CCC OneWeb приведены в таблице 1 [40].

Таблица 1. Характеристика наземных АТ CCC OneWeb

Table 1. Characteristics of OneWeb ground-based AT

| № п/п | Наименование характеристики | Значение | |
|----------|--|--|----------------|
| | | АТ от Intellian | АТ Kymeta u8 |
| 1 | Тип антенн | параболическая | АФАР |
| 2 | Размер антенн, см | 73 | 89,5x89,5x12,3 |
| 3 | Коэффициент усиления антенн, дБ: - на прием; - на передачу | 37,0 | 33,0 |
| | | 38,5 | 34,5 |
| 4 | Мощность передатчика, Вт | 8 | 20 |
| 5 | Максимальная ЭИИМ, дБВт | до 47,5 | до 46,5 |
| 6 | Минимальный рабочий угол места, град. | 53 | 15 |
| 7 | Добротность, дБ/К | 12,2 | от 9,5 до 12 |
| 8 | Поляризация сигнала: - на прием; - на передачу | круговая (правая); круговая (левая) | |

Первым вариантом для услуг связи в CCC Starlink был ATUT-1 с единой 1675-элементной ФАР, работающей поочередно на прием и на передачу в режиме разделения времени. При этом мощность передатчика ATUT-1 менялась в зависимости от наклона луча. При направлении луча в зенит выдаваемая на антенну мощность составляла 0,76 Вт, а при предельном отклонении от вертикали – 4,06 Вт (эти ограничения обусловлены, в том числе, санитарными нормами США на плотность потока радиоизлучения).

С середины 2021 г. ATUT-1 стал повсеместно заменяться на свою вторую версию – UT-2. В ней приемная и передающая ФАР представляют уже отдельные антенные решетки. В АТ UT-2 обеспечивается угол сканирования (наведения) луча ФАР в пределах почти $\pm 60^\circ$ при 4 дБ.

Однако на практике стационарные ATUT-1 и UT-2 часто теряют связь при их установке на подвижной платформе. Это привело к необходимости разработки мобильной АТ – ESIM (Earth Station In Motion).

В итоге общие эксплуатационные характеристики абонентских терминалов CCC Starlink выбраны следующими (см. табл. 2) [41].

Выводы

В ходе исследования установлено, что динамика радиолинии «наземная антенна – низкоорбитальный спутник» существенно влияет на проектирование наземных терминалов. Для спутников Starlink с орбитальной высотой 550 км наблюдается перепад мощности сигнала в 25 раз, что требует применения модуля динамического управления мощностью передатчика с регули-

рованием от 0,76 Вт (в зените) до 4,06 Вт (при максимальном отклонении луча). Для систем OneWeb на высоте 1200 км перепад мощности составляет 21 раз, что также требует соответствующей компенсации. Эти данные подтверждают необходимость разработки систем управления мощностью, способных адаптироваться к быстро меняющимся условиям связи, что является критически важным для обеспечения стабильного качества связи в условиях динамических орбитальных параметров.

Угловые скорости наведения антенных систем демонстрируют четкую зависимость от типа наведения и частотного диапазона. Программное сопровождение требует скоростей до 1 угл. град/сек., активное наведение методом конечного сканирования – до 6 угл. град/сек., коммерческие опорно-поворотные устройства – до 16...18 угл. град/сек. Эти характеристики напрямую определяют выбор аппаратуры для конкретных применений: для стационарных систем можно использовать более медленные, но высокоточные системы, тогда как для мобильных платформ требуется высокая скорость реакции. Особенно важно, что для UHF-диапазона и антенн с широкой диаграммой направленности эти скорости снижаются до 10 угл. град/сек., что позволяет использовать более простые и экономичные системы наведения для низкочастотных приложений.

Точность слежения лучом антенны должна обеспечиваться не хуже 0,1...0,2 ширины главного луча, что для Ku-диапазона (12...18 ГГц) при диаметре антенны 0,6 м соответствует по-

грешности не более $0,1...0,2^\circ$. Эта характеристика критически важна для обеспечения устойчивости связи в условиях высокочастотных диапазонов, где даже небольшие отклонения приводят к значительным потерям мощности. Анализ показывает, что метод суммарно-разностного наведения обеспечивает погрешность определения угла азимута не более $0,05...0,1^\circ$ и угла мес-

та – $0,03...0,08^\circ$, что делает его предпочтительным для высокоточных систем связи. В методе конического сканирования амплитуда модуляции сигнала прямо пропорциональна угловой ошибке. Это позволяет достичь точности наведения до $0,1^\circ$ при частоте сканирования $1...5$ Гц, что является оптимальным компромиссом для компактных мобильных систем.

Таблица 2. Общие эксплуатационные характеристики абонентских терминалов CCC Starlink

Table 2. General performance characteristics of Starlink satellite communication system subscriber terminals



| Параметр | UT-1 | | UT-2 | | ESIM | |
|--|---|-----------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| | Луч в зенит | Отклоненный луч | Луч в зенит | Отклоненный луч на $\pm 60^\circ$ | Луч в зенит | Отклоненный луч на $\pm 60^\circ$ |
| Диапазон частот, ГГц: | | | | | | |
| - прием | 10,7-12,7 | | 10,7-12,7 | | 10,7-12,7 | |
| - передача | 14-14,5 | | 14-14,5 | | 14-14,5 | |
| Длина волны, м | 0,02 | | 0,02 | | 0,02 | |
| Ширина полосы частот, МГц | | | | | | |
| - прием | 2000 | | 2000 | | 2000 | |
| - передача | 500 | | 500 | | 500 | |
| Эквивалентный диаметр антенны, м: | | | | | | |
| - приемной антенны | 0,48 (одна ФАР на прием и передачу) КИП=0,57 | | 0,31×0,31 м | | 0,37×0,37 м | |
| - передающей антенны | | | 0,31×0,31 м | | 0,31×0,31 м | |
| Площадь рефлектора, м ² | 0,18 | | 0,14 | | 0,18 | |
| Апертурная эффективность, % | 54 | | 73 | | 56 | |
| Время работы на передачу | 11% | | 14% | | 11-33% | |
| Усиление антенны, дБи: | | | | | | |
| - приемной антенны | 33,2 | 30,6 | 34,2 | 30 | 36,1 | 32 |
| - передающей антенны | 34,6 | 32 | 34,2 | 30 | 34,2 | 30 |
| Ширина ДНА, | | | | | | |
| - прием | 3,5° | 5,5° | 3,4° | 5,5° | 3,5° | 5,5° |
| - передача | 2,8° | 4,5° | 3,5° | 5,5° | 3,5° | 5,5° |
| Кросс-поляризационная развязка в пределах сканирования, дБ | н/д | 11 | | | | |
| Мощность излучения, Вт | 0,76 | 4,06 | 1,2 | 3,2 | 1,2 | 3,2 |
| ЭИИМ, дБВт | 33,4 | 38,2 | 35 | 39,1 | 35 | 39,1 |
| Коэффициент G/T, дБ/К | 7,8 | 3,8 | 9,2 | 5 | 11,1 | 7 |
| Классы излучений | 240M8D7W; 120M8D7W; 62M5D7W; 31M3D7W; 15M6D7W | | | | | |
| Тип используемых сигналов | BPSK ... 64QAM | | | | | |
| Используемые полосы частот, МГц | | | | | | |
| - прием | 240; 120; 60; 30; 15 | | | | | |
| - передача | 60; 30; 15 | | | | | |
| Скорости передачи данных, Мсимв/с | | | | | | |
| - прием | 240; 120; 60; 30; 15 | | | | | |
| - передача | 60; 30; 15 | | | | | |

Для диапазона Ku типичные диаметры параболических антенн составляют 0,3...0,6 м, обеспечивая ширину главного луча 3...5° при коэффициенте полезного действия до 0,7. При внешних воздействиях, таких как атмосферные осадки и ионосферные возмущения, требуется дополнительный запас по энергетике не менее 3...5 дБ, а для систем с активным наведением – не менее 6...8 дБ. Эти данные подтверждают необходимость проектирования систем с запасом прочности, учитывающим реальные условия эксплуатации. Например, для систем связи с (E_b/N_0) 6...8 дБ, характерных для современных высокоскоростных спутниковых систем, требуется особое внимание к точности наведения и стабильности антенных систем, что напрямую влияет на качество обслуживания конечных пользователей.

При работе на подвижных платформах угловые скорости компенсации достигают 10...15 угл. град/сек., обеспечивая стабильность связи при углах наклона до $\pm 30^\circ$. Системы с цифровым управлением лучом (фазированные антенные решетки) демонстрируют погрешность наведения не более 0,05° при скорости сканирования до 100 град/сек., что позволяет поддерживать связь даже при резких маневрах. Эти характеристики особенно важны для мобильных приложений, где требования к точности и скорости наведения значительно выше, чем для стационарных систем. Анализ эксплуатационных характеристик терминалов Starlink показывает, что UT-2 обеспечивает угол сканирования луча ФАР в пределах почти $\pm 60^\circ$ при 4 дБ, а ESIM (Earth Station in Motion) обеспечивает стабильную работу при скоростях движения до 150 км/ч с погрешностью наведения не более 0,15°. Для систем OneWeb эквивалентная изотропная излучаемая мощность составляет 34,6 дБВт, а погрешность наведения в условиях шторма не превышает 0,2° при использовании адаптивных методов коррекции.

Полученные количественные зависимости между параметрами радиолинии и характеристиками наземных терминалов позволяют создавать точные имитационные модели следящих систем радиосвязи. Эти модели становятся неотъемлемой частью цифровых двойников сложных радиокомплексов при проектировании дорогостоящих космических систем связи, обеспечивая учет множества тонких факторов, эксплуатационных шумов и переходных процессов в различных режимах работы следящих антенн. Разработанные методики и полученные результаты могут быть использованы для опти-

мизации параметров наземных терминалов при проектировании новых систем связи с низкоорбитальными спутниками, что особенно актуально в условиях стремительного развития глобальных спутниковых систем связи. Эти результаты подтверждают, что современные системы связи с низкоорбитальными спутниками требуют комплексного подхода к проектированию наземных терминалов, учитывающего как технические параметры, так и условия эксплуатации, что позволяет обеспечить надежную и высококачественную связь даже в сложных условиях.

Библиографические ссылки

1. Урличич Ю. М. Анализ низкоорбитальных спутниковых систем широкополосного доступа на примере развития Starlink // *Электросвязь*. 2024. № 7. С. 14–19.
2. Щеглов Г. А., Таратонкина В. С. Оценка проектных параметров группировки спутников интернета вещей на предельно низких орбитах // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2024. Вып. 8. С. 1–15.
3. Спутниковые системы связи и вещания. 2021. № 2 (дополнение к выпуску). Перспективные проекты систем связи и вещания. Спутниковые платформы. 116 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://radiotec.ru/uploads/articles/Дополнение%20CCCB%202021-2.pdf> (дата обращения: 15.06.2025).
4. Yung K.L., Ip A.W.H., Fatos Xhafa, Tseng K.K. (2022) *IoT and Spacecraft Informatics* (Aerospace Engineering). Elsevier, 2022, 376 p.
5. Проблемы создания антенн с электрическим сканированием луча для абонентских терминалов спутниковых систем связи в Ku- и Ka-диапазонах В. Р. Анпилогов [и др.] // *Первая миля*. 2019. № 3. С. 16–27.
6. Анпилогов В. Р. О серийности и себестоимости абонентских терминалов спутниковой системы широкополосного доступа // *Технологии и средства связи*. 2023. № S1. С. 36–41.
7. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи. Журнал радиоэлектроники / А. В. Шишлов, Б. А. Левитан, С. А. Топчиев, В. Р. Анпилогов, В. В. Денисенко. 2018. № 7 [Электронный ресурс]. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/6/text.pdf> (дата обращения: 15.06.2025).
8. Зинкин С. В. Теоретические обоснования методов снижения ближнего бокового излучения антенн для земной станции спутниковой связи // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2024. Т. 27, № 2. С. 70–75. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-70-75
9. Малышонков И. О., Шишаков К. В., Савельев А. В. Наведение наземной антенны на спутник связи с круговой орбитой // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2025. Т. 28, № 2. С. 76–87.
10. Нгуен Дык Ань. Оценка энергетики абонентских радиолиний и информационной емкости спутниковой низкоорбитальной системы интернета ве-

щей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 11. С. 32–39.

11. Оценка энергетических характеристик радиолиний перспективных систем спутникового широкополосного доступа для аэромобильных абонентов / А. В. Нестеров, А. А. Лелюх, Г. В. Куликов, Н. С. Гавриков // Журнал радиоэлектроники [Электронный ресурс]. 2019. № 1. С. 1–12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/11/text.pdf> (дата обращения: 15.06.2025).

12. Пащинцев В. П., Чипига А. Ф., Анзин И. В. Энергетическая скрытность низкоорбитальной системы спутниковой связи при произвольном удалении приемника радиоперехвата // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 122–135.

13. Меньшикова Л. В., Найденова Д. М. Мониторинг радиочастотного спектра сети спутниковой связи, охватывающей всю территорию Российской Федерации: особенности практики территориально распределенного решения // Информационно-технологический вестник. 2022. № 4. С. 119–135.

14. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем / под ред. М. А. Быховского. М.: Эко-Трендз, 2006. 376 с.

15. George Sebestyen, Steve Fujikawa, Nicholas Galassi, Alex Chuchra (2018) Low Earth Orbit Satellite Design. Springer, 313 p.

16. Абламейко С. В., Саечников В. А., Спиридонов А. А. Спутниковые системы связи. Минск: БГУ, 2012. 147 с.

17. Оценка отношения сигнал/шум в спутниковых системах связи / А. А. Силантьев, В. Г. Патюков, Е. В. Патюков, В. А. Шатров // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 3. С. 1–12.

18. Антилогов В. Р. Уровни сигналов и помех при совместной работе сетей LPWAN и низкоорбитальной спутниковой системы M2M/IoT // Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание – 2018». С. 72–78.

19. Методика расчета энергетического запаса радиолинии «космический аппарат – станция» / Г. А. Ерохин, В. И. Мандель, Ю. А. Нестеркин, А. П. Струков // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. № 1. С. 6574.

20. Самойлов А. Г., Самойлов В. С., Насир С. А. Х. Особенности распространения радиоволн на радиолиниях «космический аппарат – земная станция» // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 4. С. 21–27.

21. Мордачев В. И., Ционенко В. И. Оценка электромагнитной совместимости низкоорбитальных группировок спутниковой связи с наземными радиосистемами // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 52–61.

22. Макаренко С. И. Помехозащищенность наземных абонентских терминалов системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 81–101.

23. Романов П. В., Чони Ю. И., Романов А. Г. Электронная стабилизация лучей спутниковой системы связи при использовании разреженной сетки наземных маяков. Обзор // Журнал радиоэлектрони-

ки. 2020. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/4/text.pdf> (дата обращения: 15.06.2025).

24. Милыев П. В., Калинин Ю. Н., Савченко Д. И. Современные методы и средства измерения радиотехнических характеристик антенн // Альманах современной метрологии. 2019. № 2 (18). С. 133–157.

25. Бобков В., Званцугуев Н., Бобков А. Комплексы на базе малогабаритных опорно-поворотные устройств ООО «Технологии радиосвязи» // Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание – 2025». С. 54–56.

26. Поворотные антенны и АФАР – взаимовлияние, конкуренция и место на рынке / В. Бобков, Н. Званцугуев, А. Бобков, М. Голубцов // Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание – 2024». С. 57–61.

27. Верба Б. П., Мосунов Д. Г., Шишаков К. В. Проектирование антенны диапазона 230–280 МГц: моделирование основных параметров, исследование ШСУ различных типов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. № 3. С. 149–154.

28. Бобков В., Званцугуев Н. Антенные системы SONV (Satcom-On-The-Move) ООО «Технологии Радиосвязи» // Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание – 2019». С. 42–44.

29. Бобков В., Званцугуев Н. «Технологии Радиосвязи – 2020». Работа на перспективные проекты // Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание – 2020». С. 42–44.

30. Пыхов Ю. А. Исследование комбинированных схем коррекции в системе автосопровождения коммуникационного спутника с борта поезда // Электронный журнал «Труды МАИ». 2011. № 45 [Электронный ресурс]. URL: <https://mai.ru/science/publications/publish/#> (дата обращения: 15.06.2025).

31. Пыхов Ю. А., Яковлева С. Ю. Построение схем коррекции с использованием траекторных фильтров в системе управления электронным и электронно-механическим позиционированием антенного луча при автосопровождении спутника-ретранслятора с борта поезда // Радиотехника (Журнал в журнале). 2012. № 11 (Радиолокация и связь. № 14). С. 16–26.

32. Design, modeling and control of a satcom antenna terminal, 2019, 126 p. [Электронный ресурс]. URL: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12624775/index.pdf> (дата обращения: 15.06.2025).

33. Мнушка О. В. Системы управления позиционированием и слежением мобильных спутниковых антенных установок // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 5/9 (65). С. 39–45.

34. Многолучевые облучатели моноимпульсного типа для следающих антенн спутниковой связи / В. Бобков, Н. Званцугуев, А. Бобков, М. Голубцов, А. Будкин // Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание – 2023». С. 44–47.

35. Балашов Е. Г., Сенцов А. А. Моделирование движения диаграммы направленности антенны при коническом сканировании в условиях угловых эво-

люций носителя // Электронный журнал «Труды МАИ». 2024. № 135 [Электронный журнал]. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179697> (дата обращения: 15.06.2025).

36. Бобков В., Званцугуев Н. Готовые решения для наземного сегмента ССС «Экспресс-РВ» // Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание – 2020». С 34–35.

37. Скляр Б. Цифровая связь, теоретические основы и практическое применение / пер. с англ. Е. Г. Грозы. М.: Вильямс, 2004. 1104 с.

38. Бондарь А. А., Авдеев К. В. Особенности помехоустойчивого декодирования в системах мобильной связи // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2022. Т. 191, № 6. С. 40–45.

39. Киченко А. Н., Савельев А. В., Шишаков К. В. Анализ сигнально-кодовых конструкций в задачах повышения энергетической скрытности радиолиний // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 4. С. 11–20.

40. Чепурнов П. А., Мишуков А. Н., Яковлев Р. С. Общая описательная модель низкоорбитальной многоспутниковой системы широкополосной связи ONEWEB // Информация и космос. 2022. № 3. С. 46–56.

41. Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковалевский А. А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190–255.

References

1. Urlichich Yu.M. (2024) [Analysis of low-orbit satellite broadband access systems on the example of Starlink development]. *Electrosvyaz*, no. 7, pp. 14-19 (in Russ.).

2. Shcheglov G.A., Taratonkina V.S. (2024) [Assessment of design parameters of the Internet of Things satellite constellation in extremely low orbits]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii*, no. 8, pp. 1-15 (in Russ.).

3. Supplement to Issue 2 “Satellite Communication and Broadcasting Systems 2021”. *Perspektivnye proekty sistem svyazi i veshhaniya. Sputnikovye platform*, 116 p. (in Russ.).

4. Yung K.L., Ip A.W.H., Fatos Xhafa, Tseng K.K. (2022) *IoT and Spacecraft Informatics (Aerospace Engineering)*. Elsevier, 2022, 376 p.

5. Anpilogov V.R. [et al.] (2019). [Problems of Creating Antennas with Electric Beam Scanning for Subscriber Terminals of Satellite Communication Systems in the Ku- and Ka-Bands]. *Pervaya milya*, no. 3, pp. 16-27 (in Russ.).

6. Anpilogov V.R. (2023) [On the Seriality and Cost of Subscriber Terminals of the Satellite Broadband Access System]. *Tehnologii i sredstva svyazi*, no. S1, pp. 36-41 (in Russ.).

7. Shishlov A.V., Levitan B.A., Topchiev S.A., Anpilogov V.R., Denisenko V.V. (2018) [Multibeam antennas for radar and communication systems]. *Zhurnal radioelektroniki*, no. 7 [Electronic resource]. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/6/text.pdf> (accessed: 15.06.2025) (in Russ.).

8. Zinkin S.V. (2024) [Theoretical substantiation of methods for reducing the near side radiation of antennas for a satellite earth station]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 2. pp. 70-75. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-70-75 (in Russ.).

9. Malyshonkov I.O., Shishakov K.V., Savelyev A.V. (2025) [Pointing a ground antenna at a communication satellite with a circular orbit]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 2. pp. 76-87 (in Russ.).

10. Nguyen Duc Anh (2021) [Estimation of the energy of subscriber radio lines and information capacity of the satellite low-orbit system of the Internet of Things]. *T-Comm: Telekomunikacii i transport*, vol. 15, no. 11, pp. 32-39 (in Russ.).

11. Nesterov A.V., Lelyukh A.A., Kulikov G.V., Gavrikov N.S. (2019) [Assessment of Energy Characteristics of Radio Links of Advanced Satellite Broadband Access Systems for Airmobile Subscribers]. *Journal of Radio Electronics*, no. 1, pp. 1-12 [Electronic resource]. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/11/text.pdf> (accessed: 15.06.2025) (in Russ.).

12. Pashintsev V.P., Chipiga A.F., Anzin I.V. (2018) [Energy Secrecy of Low-Orbit Satellite Communication System at Arbitrary Removal of a Radio Intercept Receiver]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, no. 4, pp. 122-135 (in Russ.).

13. Menshikova L.V., Naydenova D.M. (2022) [Monitoring of the Radio Frequency Spectrum of a Satellite Communication Network Covering the Entire Territory of the Russian Federation: Features of the Practice of a Territorially Distributed Solution]. *Informacionno-tehnologicheskij vestnik*, no. 4, pp. 119-135 (in Russ.).

14. Bykhovsky M.A. (ed.) (2006) *Upravlenie radiochastotnym spektrom i jelektromagnitnaja sovmestimost' radiosistem* [Radio Frequency Spectrum Management and Electromagnetic Compatibility of Radio Systems]. Moscow: Eco-Trends Publ., 376 p. (in Russ.).

15. George Sebestyen, Steve Fujikawa, Nicholas Gallassi, Alex Chuchra (2018) *Low Earth Orbit Satellite Design*. Springer, 313 p.

16. Ablameyko S.V., Saechnikov V.A., Spiridonov A.A. (2012) *Sputnikovye sistemy svyazi* [Satellite communication systems]. Minsk: BSU, 147 p. (in Russ.).

17. Silantev A.A., Patyukov V.G., Patyukov E.V., Shatrov V.A. (2015) [Evaluation of the Signal-to-Noise Ratio in Satellite Communication Systems]. *Zhurnal radioelektroniki*, no. 3, pp. 1-12 (in Russ.).

18. Anpilogov V.R. (2018) [Signal and Interference Levels in the Joint Operation of LPWAN Networks and Low-Orbit Satellite System M2M/IoT]. *Special'nyy vypusk "Sputnikovaya svyaz' i veshchanie - 2018"*, pp. 72-78 (in Russ.).

19. Erokhin G.A., Mandel V.I., Nesterkin Yu., Strukov A.P. (2018) [Methodology for calculating the energy reserve of the spacecraft-station radio link]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*, no. 1, pp. 65-74 (in Russ.).

20. Samoylov A.G., Samoylov V.S., Nasir S.A.KH. (2021) [Features of radio wave propagation on radio lines "spacecraft - earth station"]. *Proektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv*, no. 4, pp. 21-27 (in Russ.).
21. Mordachev V.I., Tsionenko V.I. (2024) [Assessment of electromagnetic compatibility of low-orbit satellite communication groups with ground radio systems]. *Doklady BGUIR*, vol. 22, no. 6, pp. 52-61 (in Russ.).
22. Makarenko S.I. (2023) [Interference immunity of ground subscriber terminals of the Starlink satellite communication system]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, no. 2, pp. 81-101 (in Russ.).
23. Romanov P.V., Choni Yu.I., Romanov A.G. (2020) [Electronic Stabilization of Satellite Communication System Beams When Using a Rarefied Grid of Ground Beacons. Overview]. *Zhurnal radioelektroniki*, no. 2 [Electronic resource]. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/4/text.pdf> (accessed: 15.06.2025) (in Russ.).
24. Milyaev P.V., Kalinin Yu.N., Savchenko D.I. (2019) [Modern Methods and Means of Measuring Radio Engineering Characteristics of Antennas]. *Al'manah sovremennoy metrologii*, no. 2 (18), pp. 133-157 (in Russ.).
25. Bobkov V., Zvantsugov N., Bobkov A. (2025) [Complexes based on small-sized slewing devices of Radio Communication Technologies LLC]. *Special'nyy vypusk "Sputnikovaya svyaz' i veshchanie - 2025"*, pp. 54-56 (in Russ.).
26. Bobkov V., Zvantsugov N., Bobkov A., Golubtsov M. (2024) [Rotary antennas and AESA - mutual influence, competition and place in the market]. *Special'nyy vypusk "Sputnikovaya svyaz' i veshchanie - 2024"*, pp. 57-61 (in Russ.).
27. Verba B.P., Mosunov D.G., Shishakov K.V. (2018) [Design of an antenna in the 230-280 MHz range: modeling of the main parameters, study of mine control systems of various types]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, no. 3, pp. 149-154 (in Russ.).
28. Bobkov V., Zvantsugov N. (2019) [SONV (Satcom-On-The-Move) Antenna Systems of Radio Communication Technologies LLC]. *Special'nyy vypusk "Sputnikovaya svyaz' i veshchanie - 2019"*, pp. 42-44 (in Russ.).
29. Bobkov V., Zvantsugov N. (2020) [LLC "Radio Communication Technologies" 2020 – work on promising projects]. *Special'nyy vypusk "Sputnikovaya svyaz' i veshchanie - 2020"*, pp. 42-44 (in Russ.).
30. Pykhov Yu.A. (2011) [Study of combined correction schemes in the automatic tracking system of a communications satellite from on board a train]. *Elektronnyy zhurnal "Trudy MAI"*, no. 45 [Electronic resource]. Available at: <https://mai.ru/science/publications/publish/#> (accessed: 15.06.2025) (in Russ.).
31. Pykhov Yu.A., Yakovleva S.Yu. (2012) [Construction of correction schemes with the use of trajectory filters in the control system of electronic and electromechanical positioning of the antenna beam with automatic tracking of the relay satellite from the train]. *Radiotekhnika (Zhurnal v zhurnale)*, no. 11, pp. 16-26 (in Russ.).
32. Design, modeling and control of a satcom antenna terminal, 2019, 126 p. [Electronic resource]. Available at: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12624775/index.pdf> (accessed: 15.06.2025).
33. Mnushka O.V. (2013) [Control Systems for Positioning and Tracking of Mobile Satellite Antenna Installations]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tekhnologij*, no. 5/9 (65), pp. 39-45 (in Russ.).
34. Bobkov V., Zvantsugov N., Bobkov A., Golubtsov M., Budkin A. (2023) [Multibeam monopulse irradiators for tracking antennas of satellite communication]. *Special'nyy vypusk "Sputnikovaya svyaz' i veshchanie - 2023"*, pp. 44-47 (in Russ.).
35. Balashov E.G., Sentsov A.A. (2024) [Simulation of antenna radiation pattern motion during conical scanning in the conditions of angular evolutions of the carrier]. *Elektronnyy zhurnal "Trudy MAI"*, no. 135 [Electronic resource]. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179697> (accessed: 15.06.2025) (in Russ.).
36. Bobkov V., Zvantsugov N. (2020) [Ready-made solutions for the ground segment of the Express-RV SSS]. *Special'nyy vypusk "Sputnikovaya svyaz' i veshchanie 2020"*, pp. 34-35 (in Russ.).
37. Sklyar B. (2004) Digital communications: theoretical foundations and practical applications [Digital Communication, Theoretical Foundations and Practical Application]. Moscow: Williams Publ., 1104 p. (in Russ.).
38. Bondar A.A., Avdeev K.V. (2022) [Features of noise-resistant decoding in mobile communication systems]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM*, vol. 191, no. 6, pp. 40-45 (in Russ.).
39. Kichenko A.N., Savelyev A.V., Shishakov K.V. (2020) [Analysis of signal-code constructions in the problems of increasing the energy secrecy of radio lines]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 18, no. 4, pp. 11-20 (in Russ.).
40. Chepurnov P.A., Mishukov A.N., Yakovlev R.S. (2022) [General descriptive model of the low-orbit multisatellite broadband system ONEWEB]. *Informatsiya i kosmos*, no. 3, pp. 46-56 (in Russ.).
41. Pekhterev S.V., Makarenko S.I., Kovalovsky A.A. (2022) [Descriptive model of the Starlink satellite communication system]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, no. 4, pp. 190-255 (in Russ.).

Mutual Influence of the Parameters of the Ground Terminal for Radio Links with Low-Orbit Communication Satellites

I.O. Malyshonkov, Post-graduate, Izhevsk, Russia

K.V. Shishakov, DSc in Engineering, Associate Professor, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

The properties of radio links for the creation of effective systems for tracking low-orbit communication satellites by ground-based tracking antennas are considered from the point of view of engineering development of the ground terminal. For this purpose, first, the general characteristics of modern low-orbit satellites and their signals for reception by ground-based antennas are given as initial data communication with low-orbit satellites. Among them are parabolic antennas, antenna arrays and compact wire directional antennas for the low-frequency radio range. In order to keep low-orbit communication satellites in the antenna field, options for building ground-based antenna guidance systems are being discussed. Among them are: software guidance, total-difference guidance method for large-sized antennas and conical scanning method for small-sized antennas. It is shown that the greater variability of the range of the radio link "ground antenna - low-orbit communication satellite" will require the addition of a transmitter power control module during radio communication sessions. The relationship of the diameters of the created parabolic antennas with the radio ranges of their operation is analyzed. A reasonable choice of angular velocities of the ground antenna pointing to low-orbit communication satellites is considered radio transmitter with signal-code structures of radio links. The choice of parameters of a ground-based tracking antenna to ensure effective radio communication with low-orbit communication satellites is discussed. In conclusion, important practically proven proportions and parameter values for modern land terminals are given. In its essence, the proposed article is a preparation for the construction of a detailed simulation model of a tracking antenna, which made it possible to limit ourselves to understandable simplified theoretical dependencies, which, nevertheless, clearly show the roles and relationships of the main parameters of such radio communication systems with active guidance circuits.

Keywords: radio link, antenna beam pointing at azimuth and altitude angles, low-orbit communication satellite, tracking directional antennas.

Получено 02.07.2025

Образец цитирования

Мальшонков И. О., Шишаков К. В. Взаимовлияние параметров наземного терминала для радиолиний с низкоорбитальными спутниками связи // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 3. С. 84–103. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-84-103

For Citation

Malyshonkov I.O., Shishakov K.V. (2025) [Mutual Influence of the Parameters of the Ground Terminal for Radio Links with Low-Orbit Communication Satellites]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 3, pp. 84-103. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-84-103 (in Russ.).