

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и Информационных технологий

Кафедра Электроники, телекоммуникации и космических технологий

Телеупова Дильназ Шавхатовна

«Проектирование спутниковой системы Starlink»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

По образовательной программе 6В06201 – Телекоммуникация

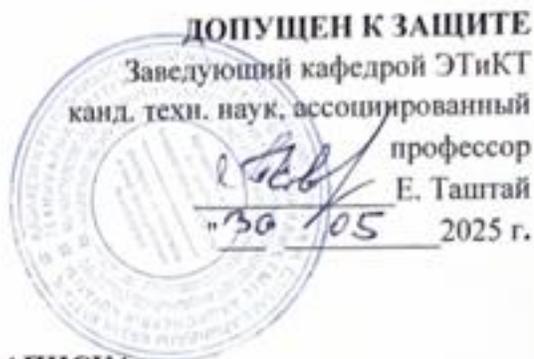
Алматы 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломной работе

На тему: «Проектирование спутниковой системы Starlink»

Образовательная программа: 6В06201 – Телекоммуникация

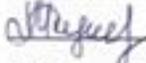
Выполнил, студент

Рецензент:

К.ф.м.н., профессор

НАО АУЭС имени Г.Даукеева

Академик МАИН

 Хизирова М.А.

"29" 05 2025 г.

 Телеупова Д.Ш.

Научный руководитель:

Старший преподаватель

 Джунусов Н.А.

"29" 05 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева
Институт автоматики и информационных технологий
Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»
ОП «6В06201 Телекоммуникация»



ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломной работы

Обучающейся *Телеупова Дильназ Шавхатовна*
Тема: *Проектирование спутниковой системы Starlink*
Утверждена приказом Ректора Университета № 26 п/в от «19.01.25»
Срок сдачи законченной работы «30» апреля 2025г.
Исходные данные к дипломной работе: *Скорость - 100/20 Мбит/сек к абоненту/от абонента; ракета-носитель Falcon 9 для вывода на орбиту спутников Starlink; 72 орбитальные плоскости на высоте 550 км и в каждой плоскости должно быть по 22 спутника; 4 антенны с фазированной решеткой Ku-диапазона; 2 параболические антенны Ka-диапазона; КА версий 1.0, 1.5 и 2.0, работающих в Ku (10,7-12,7 и 14-14,5 ГГц) в Ka (17,8-19,3 и 27,5-30 ГГц) в E (71-79 ГГц и 81-86 ГГц) диапазонах; StarLink использует на Гейтвях параболические антенны диаметром 1,5 м в радах (радиопрозрачные купола) собственного производства и с передатчиком мощностью 50 Вт; Площадь зоны обслуживания составляет 379,6 км²; для организации связи с АТ каждый КА использует 500 МГц в линии «вверх» и 2000 МГц в линии «вниз».*

Краткое содержание дипломной работы:

- а) Анализ спутниковой системы Starlink*
- б) Реализация процессов проектирования и развертывания CCC Starlink*
- в) Космические и наземные средства CCC Starlink*
- г) Расчет основных параметров CCC Starlink*

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- 1. Архитектура сети StarLink*
- 2. Схема спутниковой сети Starlink*
- 3. Рисунок – Компоновка КА Starlink версии 1.5*
- 4. Рисунок – Ячейки обслуживания («cells») CCC Starlink*
- 5. Рисунок – Сопровождение АТ со стороны КА*

6. Рисунок - Изменение по углу места антенны АТ при наведении на КА

Рекомендуемая основная литература:

- 1) Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. No .4 С.255.
- 2) Буйдинов Е. В., Кузовкова Т. А., Шаравова О. А. Методика и результаты оценки внешней эффективности развития инфраструктуры спутниковой связи на основе метода экстерналий / Электросвязь. 2018. No 4. .С 29-33.
- 3) Кузовкова Т. А., Кузовков Д. В., Шаравова О. И. Методические особенности комплексной оценки эффективности инфраструктурных проектов развития спутниковой связи // Век качества. 2017. No 1. С. 97-109.
- 4) Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 1// Хабр [Электронный ресурс], 02.11.2020. - URL: <https://habr.com/ru/post/526154/> (дата доступа 14.09.2022).
- 5) Pekhterev S. Entsiklopediya Starlink. God spustya [The Starlink Encyclopedia. A year later]. CommNews, 12.10.2021. Available at: <https://www.comnews.ru/content/216301/2021-10-12/2021-w41/enciklopediya-starlink-god-spustya>

ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Анализ спутниковой системы Starlink	1.02.2025 - 1.03.2025	<i>Вен</i>
Реализация процессов проектирования и развертывания CCC Starlink	1.03.2025 - 25.03.2025	<i>Вен</i>
Космические и наземные средства CCC Starlink	25.03.2025 - 20.04.2025	<i>Вен</i>
Расчет основных параметров CCC Starlink	20.04.2025 - 20.05.2025	<i>Вен</i>
Формирование разделов и оформление дипломной работы, отзывов, рецензии и прохождения процедур антиплагиата в соответствии с требованиями СТ КазННТУ 09-2019	20.05.2025-05.06.2025	Окончательная версия ДР не более 30 стр (без учета приложений), справка антиплагиата, отзыв и Рецензия

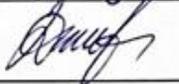
Научный руководитель  Джунусов Н.А.

Задание принял к исполнению обучающийся  Телеупова Д.Ш.

Дата « 28 » декабря 2024 г.

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Теоретическая часть	Старший преподаватель Джунусов Н.А.	02.05.2025	
Основная часть	Старший преподаватель Джунусов Н.А.	02.05.2025	
Нормоконтролер	Старший преподаватель Досбаев Ж.М.	05.05.2025	

Научный руководитель  Джунусов Н.А.

Задание принял к исполнению обучающийся  Телеупова Д.Ш.

Дата «28» декабрь 2024 г.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста Starlink спутниктік байланыс жүйелерін талдау және жобалау, олардың архитектурасына, орналастыру процестеріне және техникалық параметрлеріне ерекше назар аударылады. 1.0–2.0 спутниктік буындарын, лазерлік байланыстарды, жиілік жоспарларын және деректерді беру хаттамаларын зерттеуге ерекше назар аударылады. Жұмыста жаһандық байланысты кеңейту мүмкіндіктері талданады, әсіресе шалғай аймақтарда. Зерттеу нәтижелері Starlink жүйесі жаһандық жоғары жылдамдықты қол жеткізу үшін перспективалы технологиялық шешім болып табылатынын және цифрлық теңсіздікті азайтуға көмектесетінін көрсетті.

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе рассматриваются анализ и проектирование систем спутниковой связи Starlink с уделением особого внимания их архитектуре, процессам развертывания и техническим параметрам. Особое внимание уделяется исследованию спутниковых поколений 1.0–2.0, лазерной связи, частотных планов и протоколов передачи данных. В работе анализируются возможности расширения глобальной взаимосвязанности, особенно в отдаленных регионах. Результаты исследования показывают, что система Starlink представляет собой перспективное технологическое решение для глобального высокоскоростного доступа и может способствовать сокращению цифрового разрыва.

ANNOTATION

This thesis discusses the analysis and design of Starlink satellite communication systems, focusing on their architecture, deployment processes, and technical parameters. Particular attention is paid to the study of satellite generations 1.0–2.0, laser communications, frequency plans, and data transmission protocols. The paper analyzes the possibilities of expanding global connectivity, especially in remote regions. The results of the study show that the Starlink system is a promising technological solution for global high-speed access and can help reduce the digital divi

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Анализ спутниковой системы Starlink	9
1.1 Анализ структуры и принципа работы системы Starlink	10
1.2 Общее описание спутниковой платформы Starlink и ее устройств	12
1.3 Протоколы и технологии передачи данных системы Starlink	20
2 Реализация процессов проектирования и развертывания CCC Starlink	22
2.1 Создание инфраструктуры Starlink SCS: поэтапный анализ и ретроспектива развития	22
2.2 Развертывание спутниковой системы Starlink	29
2.3 Характеристики орбитального покрытия и управления лучом на первом этапе системы Starlink	31
2.4 Препятствия стоящие на пути использования CCC Starlink	35
3 Космические и наземные средства CCC Starlink	39
3.1 Наземные технические средства, принадлежащие системе Starlink SSS	39
3.2 Характеристики и развитие абонентских терминалов Starlink	39
3.3 Цены на терминалы и развитие	41
3.4 Наземная инфраструктура Starlink: шлюзовые станции	42
4 Расчет основных параметров CCC Starlink	46
4.1 Расчет пропускной способности	46
4.2 Зона покрытия и количество спутников	47
4.3 Радиус покрытия антенны	47
4.4 Время орбитального вращения	47
4.5 Расчет энергопотребления	48
Заключение	49
Список использованной литературы	51
Приложение А	53

ВВЕДЕНИЕ

В современном информационном обществе доступ к высокоскоростному и надежному Интернету является важным фактором социального, экономического и научного прогресса. Значительная часть населения мира по-прежнему лишена качественного интернет-обслуживания. Это особенно актуальная проблема для отдаленных районов со слаборазвитой инфраструктурой. Для решения этой проблемы предлагается спутниковая система связи Starlink, предлагаемая американской компанией SpaceX, которая направлена на обеспечение глобального доступа в Интернет посредством тысяч небольших спутников на низкой орбите. Эта система имеет преимущества перед традиционной геостационарной спутниковой связью, такие как низкая задержка, высокая пропускная способность и широкий географический охват.

Объектом исследования является система спутниковой связи Starlink.

Предметом исследования являются орбитальная архитектура системы, конфигурация излучения, спектральная эффективность и технологии передачи данных.

Целью дипломной работы является оценка эффективности системы спутниковой связи Starlink в сфере телекоммуникаций и обоснование перспектив ее дальнейшего использования путем комплексного исследования ее структурно-технических особенностей. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

Обобщить технические характеристики системы Starlink и проанализировать ее структуру;

Математическое исследование параметров орбиты и диаграмм излучения;

Расчет спектральной ширины полосы пропускания и энергоэффективности;

Анализ характеристик спутников нового поколения (1.5 и 2.0);

Научная новизна работы заключается в уточнении структурных моделей системы и расчетном доказательстве эффективности распространения луча путем технико-аналитического исследования низкоорбитальной спутниковой системы связи.

Практическая значимость – на научной основе продемонстрировать возможности использования системы Starlink в сфере телекоммуникаций, особенно при обеспечении доступа в Интернет в отдаленных регионах, организации связи в чрезвычайных ситуациях, интеграции с мобильными устройствами.

Структура работы состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. В каждом разделе систематически рассматриваются технические аспекты и проблемы системы Starlink, дополненные практическими рекомендациями.

1 Анализ спутниковой системы Starlink

1.1 Анализ структуры и принципа работы системы Starlink

Starlink – это система спутниковой связи, которая была разработана компанией SpaceX для того, чтобы обеспечивать глобальное интернет-покрытие при помощи низкоорбитальных спутников. В отличие от традиционно-исходных спутниковых сетей, которые в своем арсенале используют несколько геостационарных аппаратов, Starlink основывается на принципе массового развертывания тысяч малых спутников, находящихся на низкой околоземной орбите. Такое преимущество позволяет кратно уменьшить задержку сигнала и увеличить пропускную способность сети, позволяя усовершенствовать спутниковый интернет по сравнению с интернетом, раздача которого осуществляется с помощью определенных информационных технологий.

Принцип и основная идея работы такой системы кроется в создании глобальной сети спутников, которые движутся по низким орбитам на высоте 340–550 км. Спутник передает данные между земными станциями и конечными пользователями, используя радиочастотные каналы в единицах Ku- и Ka-диапазонов. В перспективе предполагается внедрение лазерных межспутниковых каналов, что позволит передавать данные напрямую между спутниками без необходимости подключения к наземным станциям.

Пользовательский терминал Starlink представляет собой фазированную антенную решетку, которая автоматически настраивается на ближайший доступный спутник. Такая технология позволяет быстро менять направление связи без механического поворота антенны, обеспечивая стабильное соединение. Терминалы спроектированы для работы в различных климатических условиях и могут устанавливаться как в стационарных точках, так и на подвижных объектах, включая автомобили, самолеты и корабли.

Для передачи данных система (1.1-рисунок) использует современные алгоритмы маршрутизации, которые позволяют оптимизировать траекторию прохождения сигнала. Так как спутники постоянно движутся, связь передается от одного спутника к другому, создавая динамическую сеть. Именно такое распределение нагрузки позволяет уменьшить перегрузку каналов и сделать данную систему отказоустойчивой.

Благодаря низкой орбите, Starlink достигает минимальной задержки сигнала – от 20 до 50 мс, что сравнимо с оптоволоконными сетями и значительно ниже, чем у традиционных спутниковых систем, работающих на геостационарных орбитах. Это делает систему пригодной не только для интернет-серфинга, но и для онлайн-игр, видеозвонков и облачных сервисов, которые требуют быстрого возвращения сигнала конечному пользователю.

Развертывание системы осуществляется поэтапно, с запуском новых спутников каждые несколько недель с помощью ракет-носителей Falcon 9. Такой подход позволяет постепенно увеличивать плотность покрытия и расширять географию работы сети. Прогнозируется, что на момент завершения развертывания система Starlink будет включать спутники в количестве десятков тысяч, что обеспечит высокоскоростной доступ в интернет даже в самых удаленных регионах планеты.

Starlink ориентирован на решение проблемы цифровой ограниченности (неравенства), предоставляя доступ в интернет жителям сельских и труднодоступных территорий. Помимо гражданского использования, система рассматривается для военных, научных и гуманитарных целей и позволяет обеспечивать связь в условиях стихийных бедствий, кризисных ситуаций и в районах с разрушенной инфраструктурой. Модернизация системы базируется на совершенствовании технологического прогресса, включая увеличение пропускной способности, улучшение энергоэффективности спутников и интеграцию с наземными 5G-сетями.

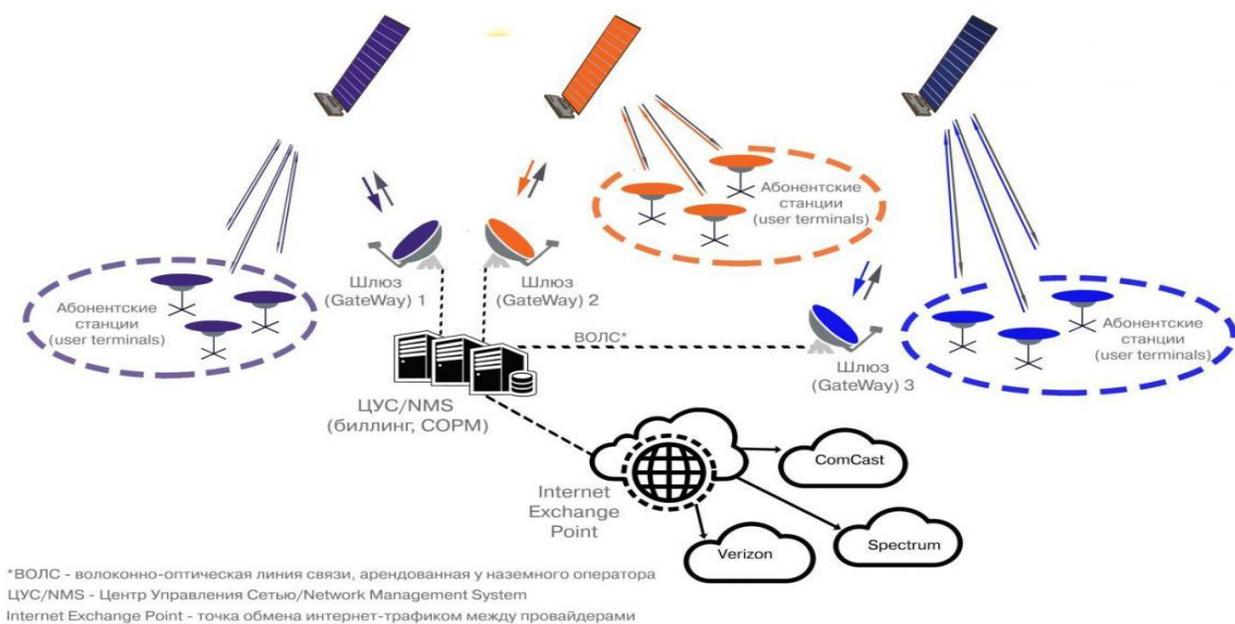


Рисунок 1.1 – Схема CCC Starlink

Орбитальная группировка Starlink включает в себя несколько тысяч спутников, которые размещены на низких приземных орбитах (LEO) на высоте около 340 до 550 км. В отличие от традиционно-используемых геостационарных спутников, которые находятся на высоте 35 786 км, спутники Starlink движутся с высокой

скоростью и бесперебойно передают сигнал другим спутникам. Низкая орбита позволяет минимизировать задержку сигнала до 20–50 мс, что делает систему пригодной для интерактивных сервисов, таких как видеозвонки, онлайн-игры и облачные технологии. Спутники (1.2 – рисунок) оснащены фазированными антенными решетками и лазерными межспутниковыми каналами, что позволяет передавать данные напрямую между спутниками, снижая зависимость от наземной инфраструктуры.

В настоящее время наблюдается отсутствие точной и полной информации о наземных станциях, используемых для спутниковой связи. Вопреки распространенному мнению, подключиться к сети Starlink напрямую и получить доступ в интернет с помощью обычного мобильного телефона невозможно. На самом деле для стран важно не ограничивать количество спутников на орбите, а контролировать интернет-рынок, регулируя ввоз на территорию страны устройств приема связи. Наземные станции являются посредниками и играют ключевую роль в подаче сигнала между глобальной интернет-сетью и спутниковой системой. Эти станции представляют собой мощные антенны, соединенные с интернет-провайдерами, которые передают трафик в спутниковую сеть [5]. В стартовой версии системы земные станции использовались для транспортировки всех данных, но на момент появления лазерной связи, зависимость их применения стала заметно падать.



Рисунок 1.2 – Телекоммуникационный спутник Starlink

Абонентские терминалы Starlink – это устройства, обеспечивающие удобное и автоматическое подключение к спутниковой системе. Они оснащены компактной фазированной антенной решеткой, которая автоматически настраивается на ближайший спутник, не требуя ручного управления. Терминалы подключаются к сети через маршрутизатор и предлагают высокоскоростной интернет (до нескольких сотен Мбит/с).

Устройства рассчитаны на работу в различных климатических условиях – холоде, жаре, осадках и сильном ветре. Связь между спутниками, наземными станциями и терминалами контролируется усовершенствованными алгоритмами маршрутизации, что сводит к минимуму потери сигнала и обеспечивает эффективную доставку данных.

Система Starlink основана на масштабируемой и отказоустойчивой архитектуре, поэтому она обеспечивает надежный доступ в Интернет по всему миру.

1.2 Общее описание спутниковой платформы Starlink и ее устройств

Спутники Starlink специально разработаны для массового производства с низкими затратами и одновременного запуска в больших количествах. Во время каждого запуска на борту ракеты Falcon 9 FT устанавливается сразу 60 спутников – они развертываются двумя группами по 30 спутников (рисунок 1.3). Сам спутник по форме напоминает плоский параллелепипед размерами примерно $3,2 \times 1,6 \times 0,2$ метра.

Солнечные панели (1.3 – рисунок) космического корабля во время полета располагаются в виде гармошки и состоят из 12 отдельных панелей. Длина каждого сегмента равна ширине спутника – 3,2 метра, а общий приблизительный размер одного сегмента составляет около $3 \times 0,8$ метра. Исходя из этого, общая площадь солнечных панелей составляет около $28,8 \text{ м}^2$.

По примерным расчетам: при коэффициенте использования полезной площади 0,9 (т.е. с учетом зазоров между панелями и потерь на периферийных участках), плотности солнечной мощности 1300 Вт/м^2 и эффективности солнечных элементов 18% - при таких условиях один спутник может вырабатывать около 6 киловатт электроэнергии.

Однако это наиболее выгодное, то есть наиболее эффективное значение. Фактическое количество энергии варьируется в зависимости от того, насколько правильно солнечные панели ориентированы по отношению к Солнцу. Наибольшая эффективность достигается, когда солнечный свет падает строго перпендикулярно на панель .

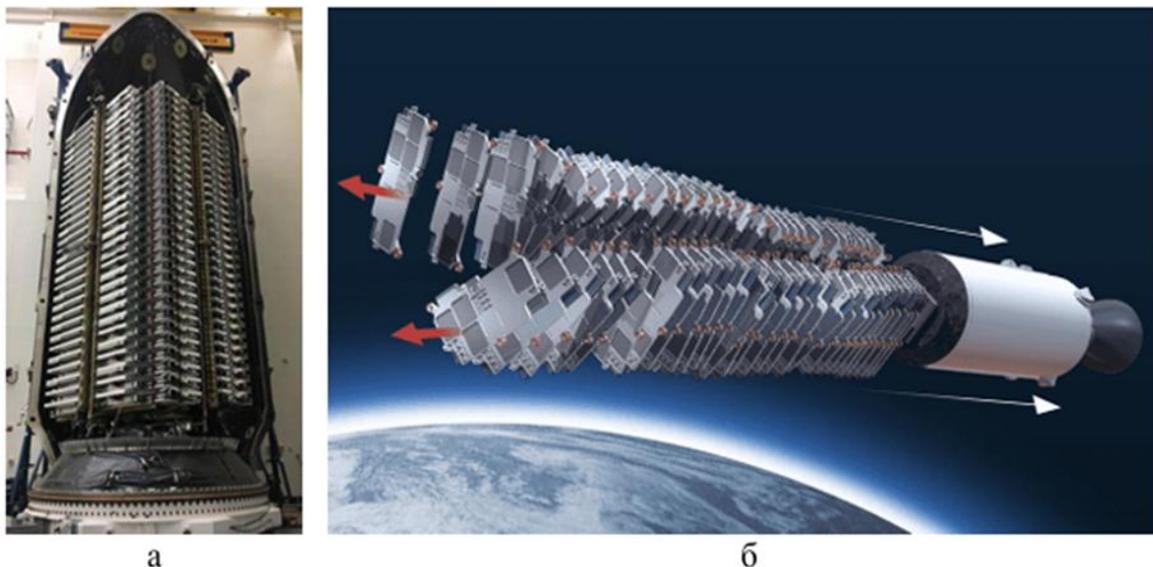


Рисунок 1.3 – Солнечные панели космического корабля

Ракетные двигатели на эффекте Холла используются для запуска, управления и обслуживания спутников Starlink. В качестве топлива в этих системах используется газ криптон. Если сравнивать этот двигатель с другими аналогичными системами, например, российским СПД-100 или зарубежным ионным двигателем ВНТ-1500, то их потребляемая мощность составляет около 1,5 кВт, тяга – 100 миллиньютонов, а удельный импульс – на уровне 1700-1800 секунд.

После запуска космического корабля ему требуется около 200 м/с, чтобы достичь стабильной орбиты, этот процесс занимает в среднем 4 месяца.

По информации на сентябрь 2022 года, известно о четырех различных модификациях спутника Starlink. Теперь давайте рассмотрим их по отдельности.

1. Спутниковая система Starlink версии 0.9.

Starlink версии 0.9 – это первый технологический экспериментальный шаг SpaceX на пути к запуску своей системы спутникового интернета. Данная версия не предназначена для полноценного коммерческого использования, а была выведена на орбиту для тестирования ключевых технических компонентов системы и проверки ее функциональности.

Начальная конфигурация. Эта версия, запущенная в 2019 году, состояла из первых 60 спутников. Их отправили на орбиту группой, чтобы проверить общую производительность системы и эффективность конструкторских решений. Эти спутники в основном служили прототипами аппаратного и программного обеспечения.

Технические характеристики:

Масса: Каждый спутник весил около 227 кг. Такой вес позволял легко и эффективно управлять устройством.

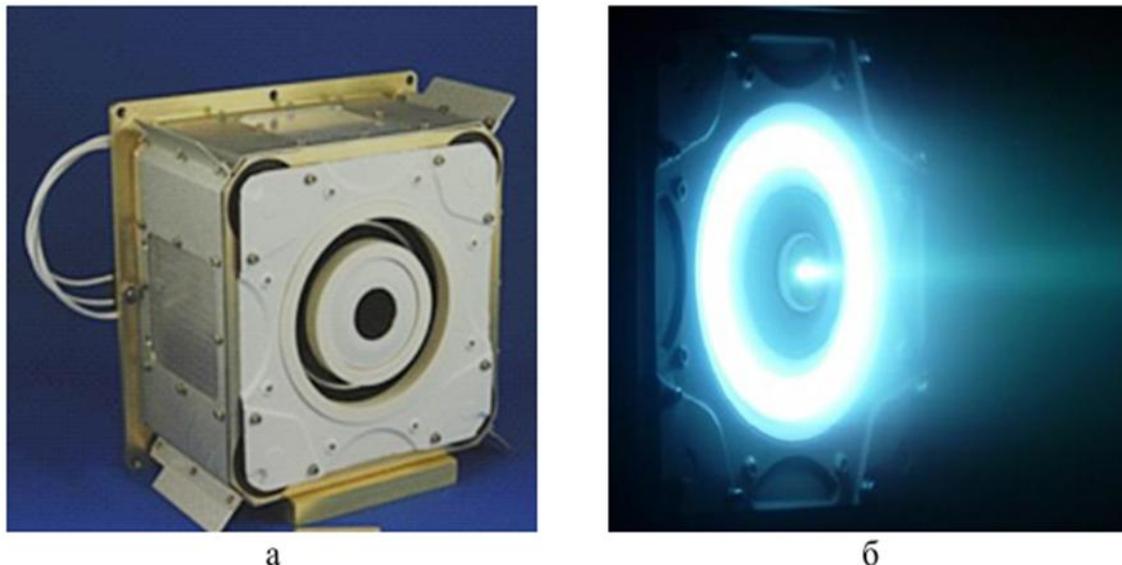


Рисунок 1.4 – Ориентировочный вид ЭРД КА Starlink 1.0 и 1.5

На основании результатов этих испытаний версии Starlink 1.0 и 1.5 (1.4-рисунок) были значительно улучшены и адаптированы для коммерческого запуска. Космический корабль оснащен системой предотвращения столкновений, работающей на основе информации Министерства обороны США о космических объектах;

Эта версия спутников спроектирована таким образом, что 95% из них полностью сгорают при возвращении в атмосферу Земли в конце своего жизненного цикла;

Текущее состояние: все аппараты сведены с орбиты и полностью уничтожены в атмосфере.

2. Starlink 1.0 и 1.5. Starlink версии 1.0 – первые спутники массового производства на первом этапе развертывания системы OG (Orbital Grouping). Они были выведены на орбиту в период с ноября 2019 года по июнь 2021 года.

По состоянию на 2025 год основными характеристиками спутников этой версии являются:

Спутник Starlink весит около 260 кг. Работает в диапазонах Ku и Ka и обеспечивает постоянную связь с наземными станциями и абонентскими терминалами. Для точного определения своего положения на орбите он использует систему Star Tracker на основе GPS. В целях безопасности система работает в координации с базой данных Министерства обороны США для предотвращения столкновений в космосе. Экология – спутник изготовлен из

полностью сгораемых материалов, поэтому после окончания срока службы он полностью разрушится в атмосфере Земли;

Уменьшение отражения света – в некоторых моделях использовались экраны, которые отражали меньше солнечного света, но это решение впоследствии было прекращено из-за проблем с терморегуляцией и инфракрасными помехами;

Срок службы – 5-10 лет;

Текущее состояние (2025 г.) – ряд спутников продолжают работать, но заметно, что эта версия устаревает.

3. Starlink версии 1.5

Спутники Starlink версии 1.5 – это серийные космические аппараты, разработанные для развертывания в рамках первой и второй фаз орбитальной группировки. Их конструкция показана на рисунке 4. Запуски этих аппаратов проводились с сентября 2020 года по июнь 2021 (рисунок 1.5).

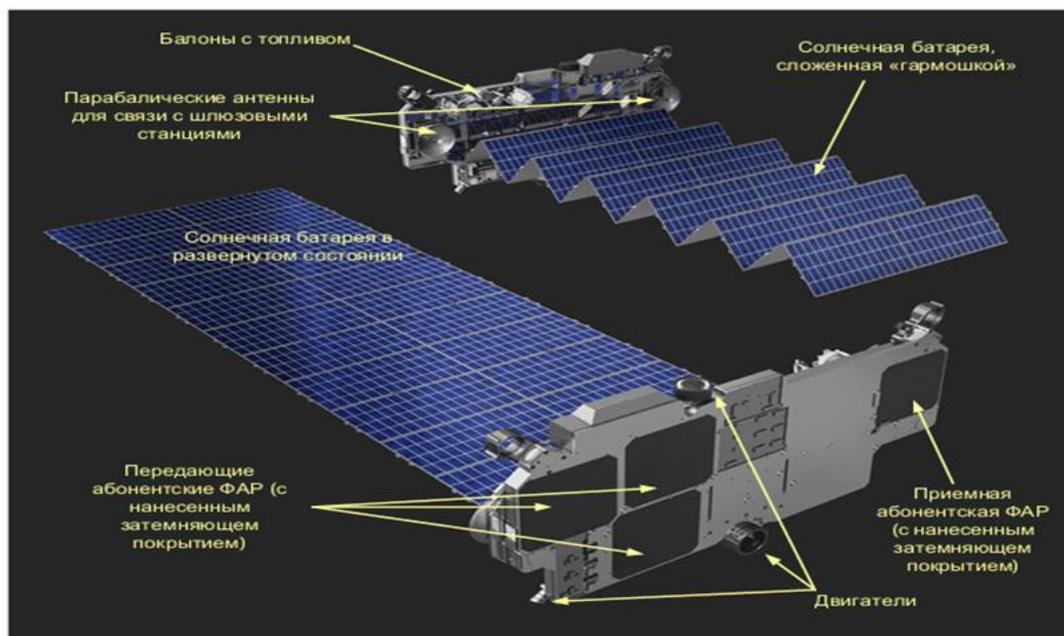


Рисунок 1.5 – Компонировка КА Starlink версии 1.5

Система на каждом спутнике Starlink 1.5 состоит примерно из 70 отдельных процессоров и около десятка микроконтроллеров. Все устройства работают на операционной системе Linux.

4. Спутники Starlink версии 2.0 — второе поколение

Starlink 2.0 – это новый, усовершенствованный набор космических аппаратов, разрабатываемый компанией SpaceX. Эти спутники будут мощнее предыдущих версий, иметь более высокую пропускную способность данных и будут оснащены усовершенствованными системами связи. Их цель – обеспечить

расширенное покрытие, постоянную скорость интернета и прямое подключение к мобильным устройствам.

Данные спутники планируется вывести на орбиту в рамках программы второго поколения компании SpaceX. В некоторых технических документах их называют «космическими аппаратами второго поколения». На данный момент точные технические подробности об этой версии не опубликованы.

Согласно официальному заявлению SpaceX, спутники Starlink 2.0 будут иметь гораздо более высокую пропускную способность, чем первая версия (Starlink 1.0). Кроме того, поскольку размеры этих спутников не помещаются в грузовой отсек ракеты Falcon 9, их запуск будет осуществляться только с помощью космического корабля Starship.

По данным на 2025 год, SpaceX разрабатывает серию Starlink 2.0 в двух различных конфигурациях. Первая версия представляет собой компактный формат, адаптированный для ракеты Falcon 9, а вторая – более крупная модификация длиной 7 метров, предназначенная для запуска с помощью Starship. Компактная конфигурация рассматривается как альтернативное решение на случай задержки запуска Starship. Это отражение гибкой стратегии компании.

Вес новых спутников составит до 1250 килограммов. Все аппараты оснащены лазерными системами связи (ЛС) и включают в себя бортовые модули связи, устойчиво работающие в диапазонах частот Ku, Ka и E.

Модернизация формирования диаграммы направленности также весьма обширна: спутники работают с 30 приемными лучами и 32 передающими лучами (включая два для каналов управления). Лучи, передаваемые спутниками Starlink 2.0, делятся поровну между абонентскими устройствами и наземными станциями. Этот метод оптимизирует поток данных и увеличивает общую пропускную способность в 3–10 раз по сравнению с предыдущим уровнем.

Для уменьшения отражения света от поверхности спутников и предотвращения помех при астрономических наблюдениях используются специальные диэлектрические покрытия. Такая технология позволит проектировать спутники, невидимые невооруженным глазом, не снижая при этом качество наблюдения за ночным небом.

Кроме того, эти спутники оснащены специальной антенной, которая может напрямую подключаться к мобильным устройствам. Эта функция открывает прямой доступ к Интернету в отдаленных районах или районах без инфраструктуры связи.

Особое внимание уделено безопасности устройств: каждый спутник покрыт защитным слоем алюминия толщиной 1 мм. Этот экран защищает их от микрометеоритов и космического мусора, предотвращая опасные ситуации даже в случае повреждения устройства.

Для обеспечения надежной работы системы спутники оснащены несколькими резервными приемниками и системами управления. Это

обеспечивает автономное управление и непрерывную связь. По внутренним расчетам, вероятность столкновения с космическим мусором размером более 1 мм составляет 0,000776, что крайне мало.

Ненужные спутники автоматически выводятся на низкую орбиту высотой 360 км и сгорают в атмосфере в течение 3 месяцев, что обеспечивает экологическую безопасность системы.

Вся поверхность Земли разделена на зоны обслуживания (в документах это понятие называется «ячейкой») диаметром 24 километра. Общая площадь каждого такого региона составляет примерно 379,6 км², что соответствует шкале широт, показанной на схеме. Когда спутниковая антенна (СА) направлена точно вниз, сигнал концентрируется внутри этой ячейки [5]. По оценкам SpaceX, в одной ячейке одновременно могут обслуживаться 125–130 активных наземных пользователей (АТ) (1.6-рисунок).

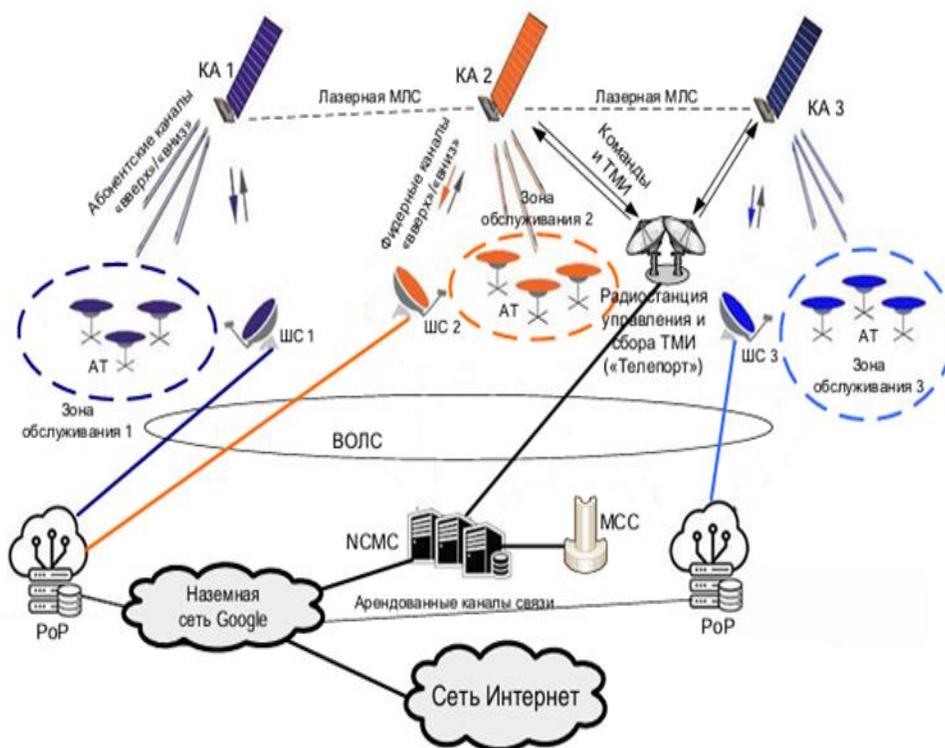


Рисунок 1.6 – Архитектура сети Starlink

Когда каждый спутник проходит над ячейкой по своей траектории, он получает данные от устройств АТ в этой области и ретранслирует их по фидерным каналам связи (в документах именуемым «Шлюз»). При этом шлюз (SS) не обязательно должен находиться в той же ячейке, но он должен находиться в пределах прямой радиосвязи со спутником.

Сеть спутниковой связи Starlink будет связана с наземной инфраструктурой посредством волоконно-оптических каналов на основе PoP (точек подключения) и будет интегрирована в общую наземную систему связи. Эти точки подключены к наземным магистральным сетям, обеспечивая дальнейшее подключение к глобальному Интернету. При благоприятных условиях система Starlink будет использовать в качестве наземного канала инфраструктуру Google, которая считается ее стратегическим партнером и акционером. Если это невозможно, связь будет осуществляться по сетям ВОЛС, принадлежащим или арендуемым SpaceX.

Компания стремится размещать инфраструктуру как можно ближе к зданиям точек присутствия, чтобы сократить затраты на развертывание. Однако это возможно не везде, поскольку некоторые места имеют сложную юридическую или географическую структуру.

С 2025 года спутники Starlink будут работать в базовом режиме прямой ретрансляции, то есть сигналы абонентских данных будут направляться непосредственно на наземные приемные станции. Функция встроенной обработки сигналов (OSP) на данном этапе не активирована. Кроме того, хотя на спутниках поколения 1.5 и выше установлены модули MLS для лазерного обмена данными между спутниками, эта функциональность реализована не в полной мере. Эту функцию планируется реализовать в будущих спутниках или посредством обновления программного обеспечения.

1.3 Система передачи данных

Технологии физического уровня (модуляция и кодирование).

Для передачи данных между спутниками, наземными станциями и пользовательскими терминалами Starlink применяет современные методы модуляции сигнала:

- DVB-S2X (Digital Video Broadcasting – Satellite – Second Generation Extended) – стандарт спутниковой связи, использующий адаптивную кодировку и модуляцию (Adaptive Coding and Modulation, ACM) для максимальной эффективности передачи данных;

- QPSK, 16APSK, 64APSK – типы модуляции, применяемые в зависимости от условий связи. Более сложные схемы (например, 64APSK) позволяют увеличить объем передаваемых данных, но требуют хороших условий сигнала;

- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – метод многоканальной передачи, повышающий устойчивость к помехам и многолучевому распространению сигнала.

Применение передовых протоколов и технологий передачи данных делает Starlink одной из самых инновационных спутниковых систем связи. Лазерная связь между спутниками, гибкая система маршрутизации, усовершенствованные

протоколы TCP/IP и использование современных технологий кодирования обеспечивают системе Starlink возможность обеспечивать высокую скорость и низкую задержку. Это решение делает спутниковый Интернет эффективным и доступным для различных нужд, таких как видеоконференции, онлайн-игры и постоянное подключение к сети для выполнения критически важных задач.

Наиболее распространенные совместимые интервалы в архитектуре DSS – 15 и 30 кГц. Эта система обеспечивает синхронизацию физического уровня (PHY) между LTE и NR.

В системе Starlink особое внимание уделяется безопасности. Обмен данными между пользователями и спутниками, а также наземными станциями шифруется на основе стандарта AES-256. Это считается одним из самых надежных алгоритмов шифрования, доступных сегодня. Кроме того, протоколы IPSec и TLS обеспечивают дополнительный уровень защиты всех каналов связи в системе, помогая поддерживать целостность и конфиденциальность данных.

Для поддержания стабильности и бесперебойной работы системы внедрена система автоматического обновления программного обеспечения спутников Starlink и пользовательских терминалов. Этот механизм позволяет быстро выявлять уязвимости безопасности, устранять их и повышать надежность системы. Таким образом, Starlink не только предоставляет глобальные услуги связи, но и становится высокоэффективной инфраструктурой, интегрирующей современные технологии безопасности, управления и передачи данных.

2 Реализация процессов проектирования и развертывания ССС Starlink

2.1 Создание инфраструктуры Starlink SCS: поэтапный анализ и ретроспектива развития

В январе 2015 года компания SpaceX официально объявила о запуске проекта Starlink. Основной целью проекта было обеспечение надежного, высокоскоростного и качественного доступа в Интернет в регионах мира, где отсутствует или очень слабый доступ в Интернет. Эта инициатива была представлена как совершенно новый уровень решения глобальной связи для регионов с ограниченной локальной инфраструктурой.

Разработчики рассчитывали, что их система будет обслуживать порядка 10% локального трафика, а также половину всего междугородного и международного интернет-трафика. При этом стоимость пользовательского оборудования планировалось удержать в разумных пределах – от 100 до 300 долларов, сохранив доступные тарифы на услуги связи.

В ноябре 2016 года, после нескольких лет подготовки, компания SpaceX подала официальную заявку в Федеральную комиссию по связи США (FCC), что стало одним из первых конкретных шагов на пути к реализации ее проекта спутникового интернета. Там компания намеревалась создать низкоорбитальную группировку из 4425 спутников. Эти аппараты должны были работать в диапазонах частот Ku и Ka и размещаться на высоте 1150-1325 км над поверхностью Земли. Проектная масса каждого спутника была определена в 386 кг, и предполагалось, что коммерческая эксплуатация системы начнется после вывода на орбиту первых 800 аппаратов.

Для проверки этой инициативы в феврале 2018 года на борту ракеты Falcon 9 FT в космос были запущены два экспериментальных спутника – Tintin-A и Tintin-B. Эти устройства использовались в качестве полигона для отработки технических решений системы, в частности, коммуникационных технологий.

Существенные изменения в проект были внесены в апреле 2019 года. SpaceX запросила изменение высоты орбиты, и FCC удовлетворила запрос. Соответственно, на высоте 550 км должны были работать 1584 спутника вместо ранее запланированных 1150 км. Они должны были вращаться по орбите под углом наклона 53° и располагаться в 24 отдельных плоскостях. Данное решение было направлено на сокращение задержки спутниковых сигналов и улучшение качества связи. Такое решение, по словам представителей SpaceX, позволило бы ускорить процесс развертывания группировки, сократить общее количество необходимых спутников, уменьшить задержку сигнала до 15 миллисекунд и снизить риски образования космического мусора.

Если спутник потеряет систему управления или его двигатели перестанут работать, он автоматически покинет свою орбиту, вернется в атмосферу и

полностью уничтожится в течение пяти лет. Это свидетельствует о том, что система Starlink была разработана с учетом требований безопасности и чистоты пространства. Кроме того, первоначально запланированное количество спутников в диапазонах Ka и Ku было пересмотрено и ограничено в общей сложности 4409 устройствами.

В мае 2019 года был проведен первый масштабный этап испытаний проекта Starlink. В ходе этой миссии на низкую околоземную орбиту (высотой 550 км и наклоном $53,2^\circ$) было запущено 60 тестовых спутников (Starlink v0.9). Целью этого этапа запуска было практическое отработывание процессов вывода спутников на орбиту, их развертывания и управления ими. Кроме того, на практике была оценена надежность используемых технологических решений.

Эти спутники могли устанавливать связь с наземными станциями, а также с имитаторами абонентских терминалов, которые не имели прямой системы связи между собой и работали только в Ku-диапазоне. Из запущенных аппаратов 57 успешно отработали и завершили программу испытаний. После окончания периода испытаний в мае 2022 года эти спутники были намеренно выведены с орбиты и уничтожены в атмосфере – шаг, демонстрирующий приверженность Starlink сохранению чистоты космоса.

В сентябре 2019 года SpaceX подала предложение Федеральной комиссии по связи США (FCC) внести изменения в структуру развертывания спутников. Согласно новому плану, количество самолетов на орбите на высоте 550 км должно было быть увеличено с 24 до 72. При каждом запуске предполагалось, что спутники будут распределены по трем орбитальным плоскостям и развернуты по 22 устройства в каждом. Эта инициатива получила официальное одобрение в декабре 2019 года.

Ранее, в октябре 2019 года, SpaceX направила дополнительно 20 заявок на регистрацию около 30 тысяч новых устройств с намерением масштабного внедрения спутников Starlink второго поколения. Планируется, что эти спутники будут находиться на орбитах в диапазоне 328-614 км.

Период реальной, полноценной работы системы Starlink начался в ноябре 2019 года. В то время первые 60 спутников модификации Starlink 1.0 были выведены на околоземную орбиту на высоте 550 км с наклоном 53° . В отличие от предыдущих тестовых моделей, эти устройства были значительно модернизированы: в четыре раза увеличена пропускная способность данных, в два раза увеличены антенные лучи, введено дополнительное оборудование связи Ka – диапазона. Кроме того, установлена система, обеспечивающая полное уничтожение всех из них в атмосфере. Каждый спутник весил около 260 кг.

Первоначально спутники были выведены на орбиту на высоте 280 км. Позже они самостоятельно поднялись на главную рабочую орбиту на высоте 550 км с помощью электрических двигателей с эффектом Холла, работающих на газе

криптон. Этот подход стал стратегическим шагом Starlink в повышении автономного управления и энергоэффективности.

В период с ноября 2019 года по май 2021 года орбита высотой 550 км и наклоном $53,8^\circ$ была полностью заполнена спутниками. Благодаря использованию многоразовой ракеты Falcon 9 FT компания смогла значительно увеличить частоту запусков и выводить на орбиту в среднем 120 спутников ежемесячно. Производственные мощности также были значительными за один день производилось шесть спутников .

Таблица 2.1 – Стратегия развертывания спутников Starlink Gen2 (2.0)

Показатель	Первая конфигурация	Вторая конфигурация
Количество спутников	29 988	29 996
Высота орбиты	340–614 км	328–614 км
Число орбитальных плоскостей	9	12
Углы наклона	Различные (в том числе экваториальные и полярные)	Разнообразный (для более широкого охвата)
Ракета-носитель	Starship (Super Heavy)	Falcon 9 FT
Особенности	Высокая производительность и быстрый запуск с ракетой нового поколения	Гибкость с уже используемыми технологиями
Целевое использование	Увеличение скорости запуска, прямой вывод на рабочую орбиту	Использование в качестве альтернативы, если Starship не готов

В августе 2020 года компания SpaceX подала в Федеральную комиссию по связи США (FCC) обновленную заявку на внесение изменений в свой план по развертыванию спутников Starlink второго поколения. Компания предлагала две конфигурации (2.1таблица):

– Первая конфигурация основана на спутниках, запускаемых ракетой Starship. Целью этого варианта является быстрый и эффективный вывод спутников на околоорбитальные высоты.

– Вторая конфигурация представляет собой резервный план использования ракеты-носителя Falcon 9 FT на случай задержки проекта Starship.

Оба варианта предусматривают развертывание около 30 000 спутников. Орбиты установлены на высотах 328-614 км с различными углами наклона, что позволяет охватывать всю Землю.

В 2022 году SpaceX официально выбрала первую конфигурацию в качестве основного маршрута. Кроме того, в сентябре и октябре 2020 года система показала положительные результаты в тестовом режиме: низкую задержку, высокую скорость и стабильное соединение. Скорость загрузки составляла до 500 Мбит/с, задержка – 20-40 мс, трафик – безлимитный.

В 2021 году было получено разрешение на запуск 10 спутников на орбиты с наклоном $97,6^\circ$ для покрытия полярных регионов, что позволит обеспечить покрытие интернетом в отдаленных регионах, таких как Аляска.

В апреле 2021 года компания SpaceX получила разрешение Федеральной комиссии по связи (FCC) на снижение высоты полета своих спутников. Это изменение предполагало размещение космического корабля на орбитах высотой от 540 до 570 км вместо первоначально запланированных 1100–1300 км. Данное решение направлено на сокращение задержек системы и повышение качества обслуживания.

К июню количество пользователей, подключенных к системе Starlink, достигло 10 000, и проект вступил в фазу масштабной реализации. В это же время интенсивно стали проводиться запуски спутников на орбиту с углом наклона $97,6^\circ$ и высотой 560 км.

В сентябре 2021 года произошло особенно важное событие – впервые был запущен 51 спутник Starlink 1.5 с лазерным модулем спутниковой связи. Эта система еще больше улучшила глобальную инфраструктуру, позволив осуществлять прямой обмен данными между спутниками. Вес каждого спутника составлял 295 кг. Однако SpaceX не раскрывает точные технические характеристики этой технологии. Этот запуск стал началом заполнения орбитальной плоскости наклоном 70° и высотой 570 км.

В том же месяце SpaceX и крупнейший японский поставщик телекоммуникационных услуг KDDI подписали соглашение о партнерстве. В рамках проекта более 1200 базовых вышек в отдаленных регионах страны будут подключены к Интернету через спутник.

В ноябре компания начала вывод очередной группы спутников на орбиту с углом наклона $53,2^\circ$ и высотой 550 км.

В феврале 2022 года SpaceX запустила новый коммерческий сервис под названием Starlink Business. Эта версия включала в себя терминал, оснащенный широкополосной антенной, со скоростью 150-500 Мбит/с. Его цена составляла 2500 долларов, а ежемесячный платеж – 500 долларов.

Новый сервис имел высокий рыночный успех: в марте 2022 года количество подписчиков достигло 250 тысяч, а в июне – 500 тысяч.

В июне 2022 года Федеральная комиссия по связи США (FCC) одобрила услугу спутниковой связи для мобильных транспортных средств, что позволило SpaceX внедрять свои решения для самолетов, морских транспортных средств и автомобилей в больших масштабах. Август 2022 года стал месяцем объявления о стратегическом партнёрстве с мобильным оператором T-Mobile. Совместная разработка направлена на интеграцию в сотовые телефоны возможности использования спутниковой связи в зонах со слабым покрытием или полным отсутствием наземной сотовой сети. T-Mobile намерена предложить данную функциональность операторам по всему миру в рамках роумингового партнёрства со SpaceX.

Для расширения возможностей глобальной мобильной связи в системе Starlink на спутниках устанавливаются специальные модули, соответствующие стандарту IMT-2000. Эта технология позволяет пользователям подключаться напрямую, без дополнительных устройств, то есть через простой мобильный телефон. Хотя система имеет ограниченную пропускную способность 2–4 Мбит/с, она может поддерживать 1000-2000 голосовых вызовов и до миллиона SMS-сообщений одновременно.

Хотя зона покрытия и точная дата запуска данной услуги изначально были неизвестны, в первой половине 2025 года услуга Direct-to-Cell вышла из пилотного формата и стала официально доступна в США, Канаде, Японии и некоторых отдаленных районах Южной Америки.

По состоянию на сентябрь 2022 года в сети Starlink зарегистрировано более 700 000 пользователей. Три года спустя, в мае 2025 года, эта цифра превысила 5 миллионов подписчиков, что свидетельствует о стремительном росте системы и ее глобальной популярности.

К 2025 году на орбиту будет выведено 8673 спутника, 7549 из которых все еще находятся на орбите, а 6676 устройств работают в полностью активном режиме, обеспечивая пользователям бесперебойный доступ в Интернет. Многие из этих спутников оснащены лазерными системами внутренней связи, которые позволяют осуществлять глобальную маршрутизацию данных без наземных станций.

В настоящее время услуги Starlink доступны в 125 странах. В этот список входят США, Канада, Австралия, Бразилия, Индия и многие страны Европейского Союза. В некоторых странах, где подключение пока невозможно, ведутся процессы авторизации.

В 2025 году Starlink расширил свои услуги не только на стационарные, но и на мобильные платформы – самолеты, корабли, поезда и автомобили. Этот шаг стал важной вехой на пути становления спутниковой связи как полноценной глобальной инфраструктуры.

Текущее состояние системы ССС Starlink: статистика и перспективы её развития

Точные размеры зоны покрытия для данного сервиса не были озвучены. Запуск коммерческого предоставления таких услуг намечен на 2023 год.

В сентябре 2022 года SpaceX сообщила о достижении нового рубежа – количество постоянных абонентов превысило 700 тысяч человек.

На момент 11 сентября 2022 года орбитальная группировка находилась в активной стадии формирования. Статистика выглядела следующим образом: всего было запущено 3293 космических аппарата, из которых 301 был сведен с орбиты по различным причинам. В космосе продолжали функционировать 3025 спутников, при этом в штатном рабочем режиме находились 2990 единиц.

На тот период система работала в экспериментальном режиме, предоставляя пользователям доступ к услугам в формате бета-тестирования. База постоянных клиентов превышала полмиллиона абонентов по всему миру.

К 2025 году услуга спутниковой связи Starlink будет официально доступна в 125 странах. К ним относятся США, Канада, Австралия, Бразилия, а также большинство государств-членов Европейского Союза. В настоящее время система стала эффективным решением для обеспечения стабильного доступа в Интернет не только в городских районах, но и в отдаленных сельских районах.

Кроме того, по состоянию на весну 2025 года в ряде стран, где запуск еще не состоялся, продолжается процесс получения лицензионного одобрения от национальных регулирующих органов. Ведутся переговоры о коммерческих и технических соглашениях для официального предоставления услуг Starlink в этих странах. Таким образом, компания ставит перед собой цель расширить глобальное покрытие и создать полноценную инфраструктуру спутниковой связи по всему миру.

Масштабы орбитальной группировки. К маю 2025 года масштабы проекта достигли впечатляющих размеров. SpaceX вывела на околоземные орбиты свыше 8367 космических аппаратов, из которых 7264 продолжают активное функционирование. Особого внимания заслуживают примерно 600 спутников с поддержкой технологии Direct-to-Cell, около 400 из которых уже введены в эксплуатацию.

Активность запусков в 2025 году поражает своей интенсивностью – только за этот период компания осуществила свыше тысячи пусков аппаратов Starlink. Показательным примером стала миссия 20 мая с мыса Канаверал, когда на орбиту были выведены 23 спутника.

Амбициозные планы компании предусматривают расширение группировки до 40 тысяч космических аппаратов. Такая конфигурация должна обеспечить действительно глобальное покрытие с высочайшей пропускной способностью сети.

Технологические достижения нового поколения. Современные спутники Starlink V2 Mini демонстрируют значительный технологический прорыв. Они оснащены аргоновыми ионными двигателями, которые обеспечивают в 2,4 раза

большую тягу и на половину выше удельный импульс по сравнению с предшественниками.

Революционным решением стало внедрение E-диапазона частот и усовершенствованных фазированных антенн. Благодаря этим инновациям пропускная способность каждого аппарата возросла почти в четыре раза.

Особое место занимает технология Direct-to-Cell, внедряемая с начала 2024 года. Спутники с такой функциональностью способны обеспечивать прямую связь с обычными мобильными телефонами в районах, лишённых наземной инфраструктуры.

К февралю 2025 года география предоставления услуг охватила более 125 государств мира. Клиентская база превысила 5 миллионов пользователей, что свидетельствует о стремительном росте популярности сервиса.

Индийский рынок остаётся в фокусе внимания – компания ожидает окончательных разрешений регулирующих органов для начала коммерческой деятельности в этой стране. Такой шаг станет значимой вехой в глобальной экспансии.

20 мая 2025 года состоялся официальный запуск услуг в Бангладеш. Местным пользователям предложен высокоскоростной интернет по цене 4200 така (около 35 долларов) ежемесячно.

Африканское направление развивается благодаря стратегическому партнёрству с Airtel Africa. Этот альянс призван обеспечить доступ к скоростному интернету в отдалённых и недостаточно обслуживаемых регионах континента.

Новые модели абонентских терминалов отличаются повышенной устойчивостью к неблагоприятным погодным условиям. Внедрение системы автоматического наведения гарантирует стабильную связь даже в сложных климатических условиях.

Параллельно ведётся масштабная работа по расширению и модернизации наземной инфраструктуры. Строительство новых шлюзовых станций направлено на обеспечение надёжности соединений и увеличение общей пропускной способности сети.

Прогнозируемый доход проекта в 2025 году составит около 12 миллиардов долларов. Эти цифры отражают коммерческий успех и стремительное развитие предприятия.

В конкурентной борьбе Starlink противостоят такие проекты, как Amazon Kuiper, OneWeb, а также китайские государственные инициативы Guowang и SpaceSail. Тем не менее, благодаря быстрому развёртыванию и передовым технологиям компании получается держать мировое лидерство лидирующие на развивающейся сфере рынка спутникового интернета.

2.2 Развертывание спутниковой системы Starlink

К сентябрю 2022 года корпорация SpaceX успела реализовать лишь часть первого этапа создания орбитальной группировки спутников связи Starlink. По состоянию на май 2025 года система спутниковой связи Starlink расширилась по всему миру, предоставляя высокоскоростной интернет-сервис более чем 4 миллионам пользователей. Система доступна более чем в 60 странах, включая Казахстан, и играет важную роль в обеспечении доступа в Интернет в отдаленных и слаборазвитых регионах.

17 апреля 2020 года компания SpaceX подала заявку в Федеральную комиссию по связи США (FCC) на размещение спутников на низкой околоземной орбите. Данная заявка была одобрена 27 апреля 2021 года, что дало новый импульс развитию системы Starlink. Благодаря этому разрешению спутники были размещены на высоте 540-570 км, что повысило качество и надежность обслуживания.

В 2025 году система Starlink расширила партнерство с операторами мобильной связи и начала предоставлять услуги спутниковой связи непосредственно на мобильные телефоны. Например, в сотрудничестве с T-Mobile в США была запущена бета-программа с целью покрытия 500 000 квадратных миль неподключенных территорий. Данная программа была доступна бесплатно абонентам всех операторов до июля 2025 года.

Кроме того, система Starlink также предоставляет услуги для морских, воздушных и мобильных транспортных средств. Эти услуги позволяют судам и самолетам обеспечивать стабильный и высокоскоростной Интернет.

Развитие и расширение системы Starlink является важным шагом на пути к расширению глобального доступа в Интернет. В планы компании входит дальнейшее совершенствование услуг спутниковой связи и выход на новые рынки.

Архитектура планируемой системы. Согласно утвержденным документам, спутниковая сеть Starlink должна включать несколько ключевых компонентов:

Первый этап развертывания предусматривает запуск 4408 космических аппаратов версий 1.0 и 1.5. Эти спутники будут функционировать в Ku-диапазоне (10,7-12,7 и 14-14,5 ГГц) и Ka-диапазоне (17,8-19,3 и 27,5-30 ГГц). Их разместят на орбитах высотой от 540 до 570 километров с различными наклонами: 53°, 53,2°, 70° и 97,6°.

Вторая фаза включает размещение 7518 космических аппаратов версии 1.5 (возможно, также 2.0) на высотах от 345 до 570 километров.

Заключительный этап Generation 2 завершит формирование конstellации. На орбиты высотой 345-570 км выведут 29988 спутников версии 2.0, работающих в E-диапазоне (71-79 ГГц и 81-86 ГГц).

Анализ таблиц 2.2 позволяет сделать вывод, что первая стадия создания орбитальной группировки (ОГ) спутниковой системы Starlink выполнена примерно на 69%. Остальные этапы пока находятся на стадии планирования.

Таблица 2.2 – Стратегия развертывания спутников Starlink Gen2 (2.0)

Показатель	Первая конфигурация	Вторая конфигурация
Количество спутников	29 988	29 996
Высота орбиты	340–614 км	328–614 км
Число орбитальных плоскостей	9	12
Углы наклона	Различные (в том числе экваториальные и полярные)	Разнообразный (для более широкого охвата)
Ракета-носитель	Starship (Super Heavy)	Falcon 9 FT
Особенности	Высокая производительность и быстрый запуск с ракетой нового поколения	Гибкость с уже используемыми технологиями
Целевое использование	Увеличение скорости запуска, прямой вывод на рабочую орбиту	Использование в качестве альтернативы, если Starship не готов

В ноябре 2018 года компания SpaceX подала заявку в Федеральную комиссию по связи США (FCC) на развертывание группировки из 7518 спутников на высоте 335–345 км и в том же году получила одобрение в рамках усилий по расширению своих низкоорбитальных спутниковых систем. Данная заявка была разработана для второй фазы спутниковой группировки Starlink и была направлена на обеспечение широкой зоны покрытия, особенно в регионах с высоким спросом.

Позднее, в августе 2020 года, SpaceX подала в FCC обновленную техническую заявку на официальную подачу заявки на второе поколение (Gen2) своей спутниковой системы. В рамках Gen2 спутники будут оснащены функциями, позволяющими напрямую взаимодействовать с мобильными устройствами, а также учитывается возможность прямой передачи данных между спутниками посредством лазерной связи. Эта система будет запущена в 2023 году и расширена к 2025 году, обслуживая несколько миллионов абонентов.

Компания SpaceX выполнила это условие раньше срока и разворачивает спутниковую инфраструктуру в больших масштабах. Это достижение является показателем стратегического успеха компании в преобразовании системы Starlink в глобальное интернет-решение.

Полностью завершить развертывание системы необходимо за девять лет.

Таким образом, чтобы соответствовать этим требованиям, компании SpaceX следует завершить вторую стадию запуска спутников к ноябрю 2027 года.

Полное же развертывание всей группировки должно быть выполнено в течение семи лет с момента получения официального разрешения на её создание.

2.3 Характеристики орбитального покрытия и управления лучом на первом этапе системы Starlink

На первом этапе развертывания системы Starlink спутники были выведены на орбиту высотой 550 км. Такие параметры орбиты позволяют обеспечить покрытие большой территории радиусом около 950 км при условии, что минимальный эффективный угол связи для наземных абонентских терминалов составит 25° . Однако для улучшения качества сигнала и устойчивости связи более благоприятными считаются углы 40° и более – это обеспечивает максимальную эффективность фазированных антенных решеток (ФАР).

Каждый спутник формирует диаграмму направленности, направленную вокруг подспутниковой точки. Этот луч можно отклонить на 3° - 5° , что означает, что спутник может направить свой луч в желаемом направлении и охватить определенную область. Угол широты луча увеличивается до $2,5^\circ$ в центре и 4° в периферийных секторах. Такая ширина луча создает на Земле сектор покрытия диаметром около 24 км (подробнее см. на рис. 2.1).

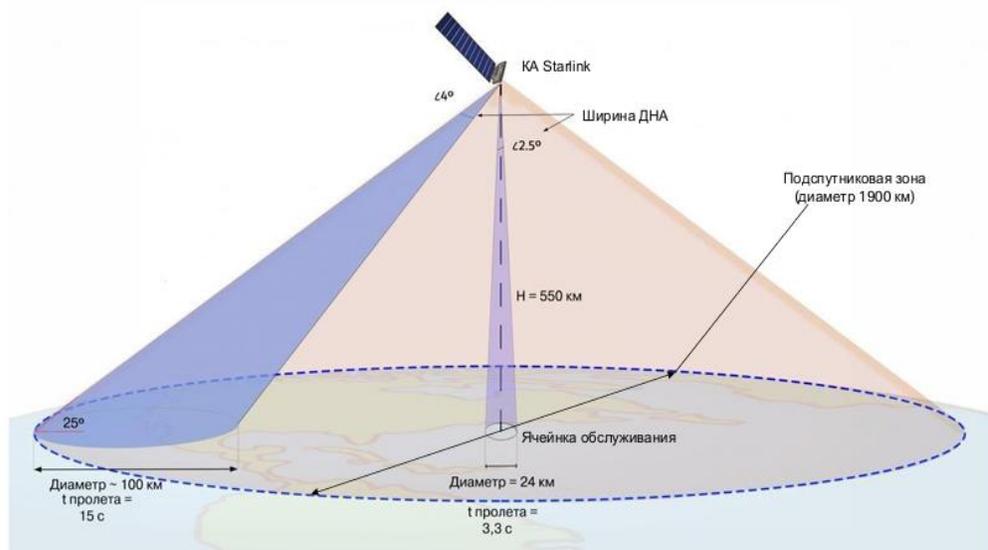


Рисунок 2.1 – Подспутниковая зона К и конфигурация ДНА лучей его ФАР

Теоретически один спутник может контролировать около 300 секторов луча одновременно или последовательно. Точное число этих направлений зависит от угла расширения луча и величины отклонения. Области, охватываемые на Земле,

называются «ячейками» – каждая из них имеет диаметр около 24 км и площадь около 380 км².

По расчетам SpaceX, в одной ячейке могут постоянно находиться на связи 125-130 активных терминалов. (рис.2.2)

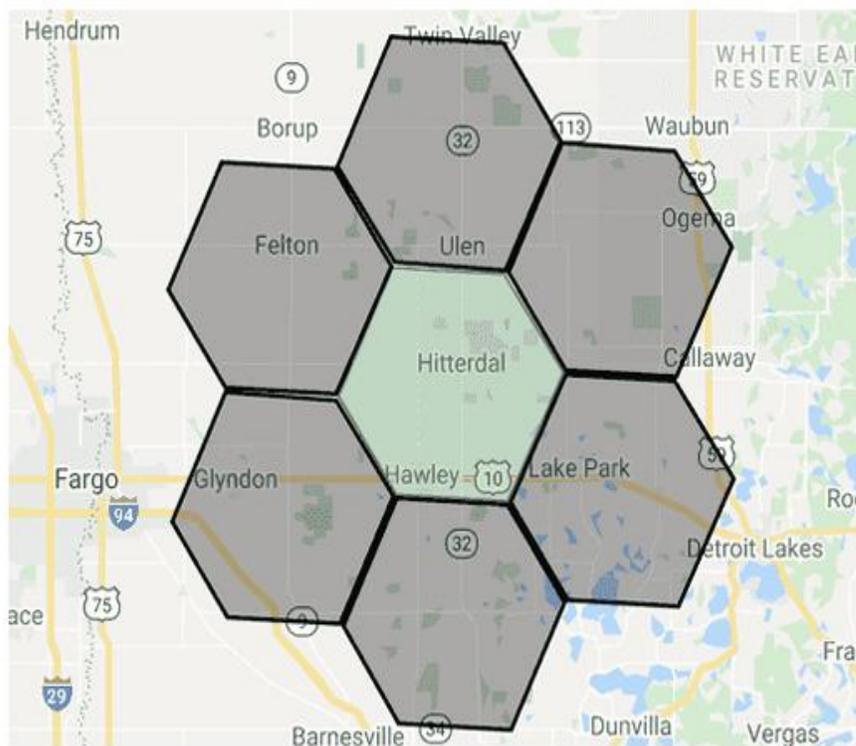


Рисунок 2.2 – Ячейки обслуживания («cells») ССС Starlink

Эти терминалы обслуживаются быстро переключающимися лучами – время переключения составляет всего 5-10 микросекунд, что значительно ниже типичных задержек (30-50 мс) и джиттера (25 мс) для интернет-трафика.

Для обслуживания ячеек, находящихся в подспутниковой зоне, лучи космического аппарата поочередно переключаются между ними (2.3 – рисунок).

SpaceX официально не уточнила, сколько лучей будет излучаться каждым спутником, технический анализ показывает, что оптимальное количество лучей может составлять 16. В этом сценарии фазированная антенная решетка каждого спутника может направлять до 8 лучей, работающих в двух различных поляризациях. Три из четырех стандартных фазированных решеток используются для сигналов нисходящей линии связи, а одна – для каналов восходящей связи. Соответственно, возможно создание 24 лучей в одной поляризации и 48 лучей при использовании двух поляризаций, однако данная конфигурация не реализована в полной мере.

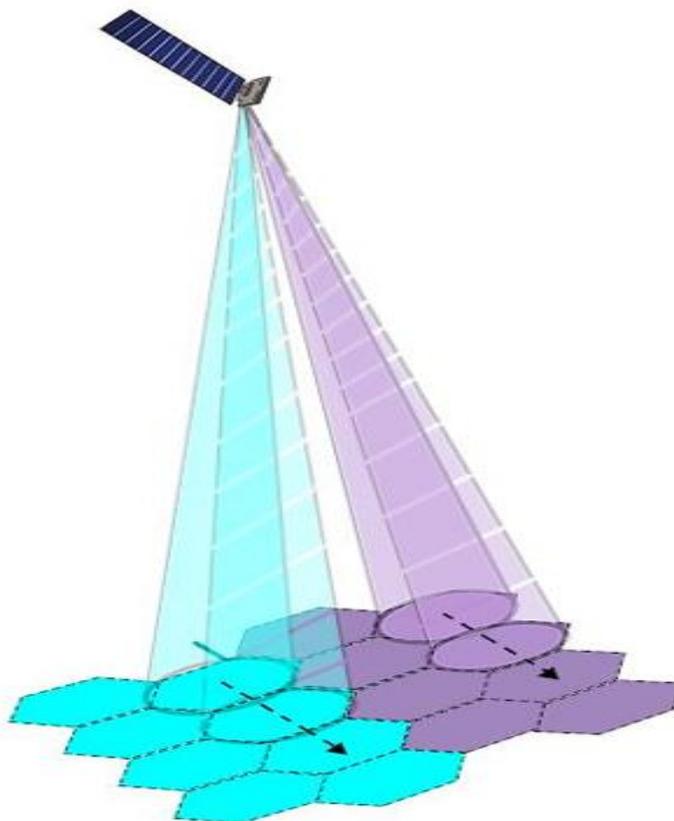


Рисунок 2.3 – Переключение лучей КА при обслуживании ячеек в подспутниковой зоне

Имеющийся частотный ресурс – около 4200 МГц в Ku-диапазоне (с учетом двух поляризаций) – в настоящее время эффективно используется в объеме 4000 МГц. С помощью этого ресурса можно создать 16 нисходящих лучей. Ширина каждого нижнего канала составляет 240 МГц, а ширина верхних каналов связи – около 60 МГц.

Спутник, летящий по орбите на высоте 550 км, проходит через сектор обзора терминала в среднем за 4,1 минуты, что составляет окно связи примерно в 250 секунд. Чтобы максимально эффективно использовать это время, Starlink может использовать стратегию постоянной «привязки» терминалов к определенному спутнику. При этом связь со спутником поддерживается постоянно, а терминал автоматически отслеживает необходимое направление (рис.2.4).

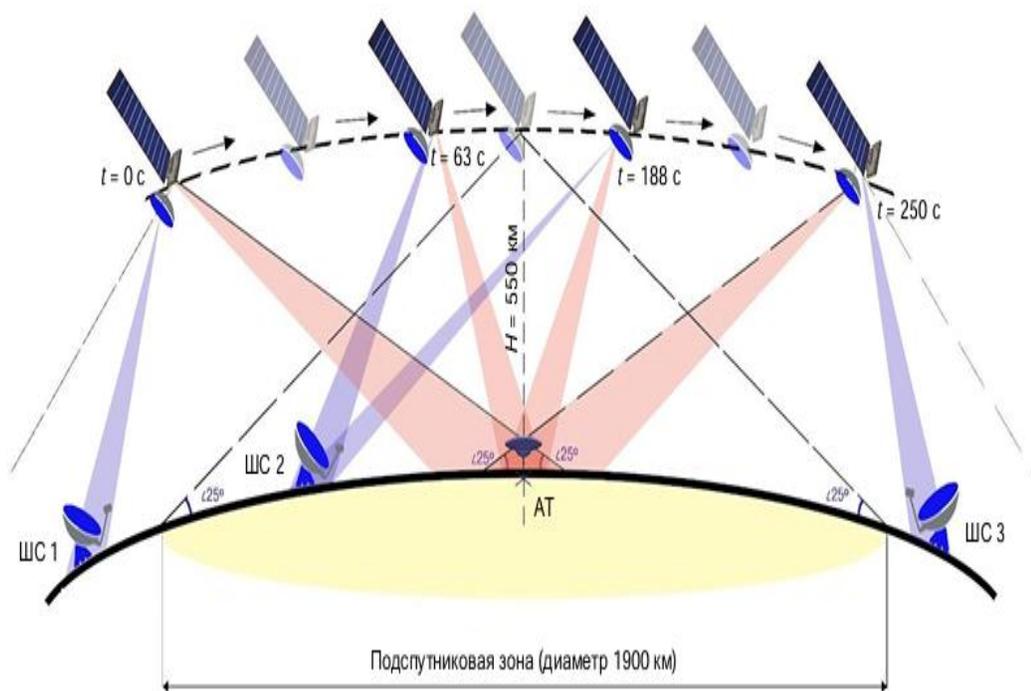


Рисунок 2.4 – Формирование лучей КА Starlink в подспутниковой зоне

В качестве альтернативы существует возможность отправки сигнала с каждого терминала на несколько спутников одновременно. Однако этот метод требует дополнительной технической нагрузки и большего количества спутников для системы. Поэтому первый подход – спутниковое слежение – считается наиболее целесообразным и ресурсо-эффективным решением в текущей архитектуре.

Из-за ограниченного количества лучей на спутниках Starlink возможность одновременного непрерывного покрытия большой площади ограничена. Эта ситуация объясняет необходимость запуска тысяч спутников для полного охвата системы во всем мире. В связи с этим SpaceX снизила минимальный рабочий угол спутниковых терминалов с 40° до 25° и оснастила их угловыми рычагами управления, приспособленными для изменения направления. Это изменение, особенно путем регулировки угла антенны, направленной непосредственно на спутник, позволяет охватить несколько ячеек одним лучом на краю субспутниковой области. Однако такой подход снижает точность наведения терминальных антенн и ограничивает пропускную способность. Механическая система управления, используемая для уточнения угла, настраивает плоскость антенны со спутником в максимально эффективном направлении (угол 90°) (Рисунок -2.5)

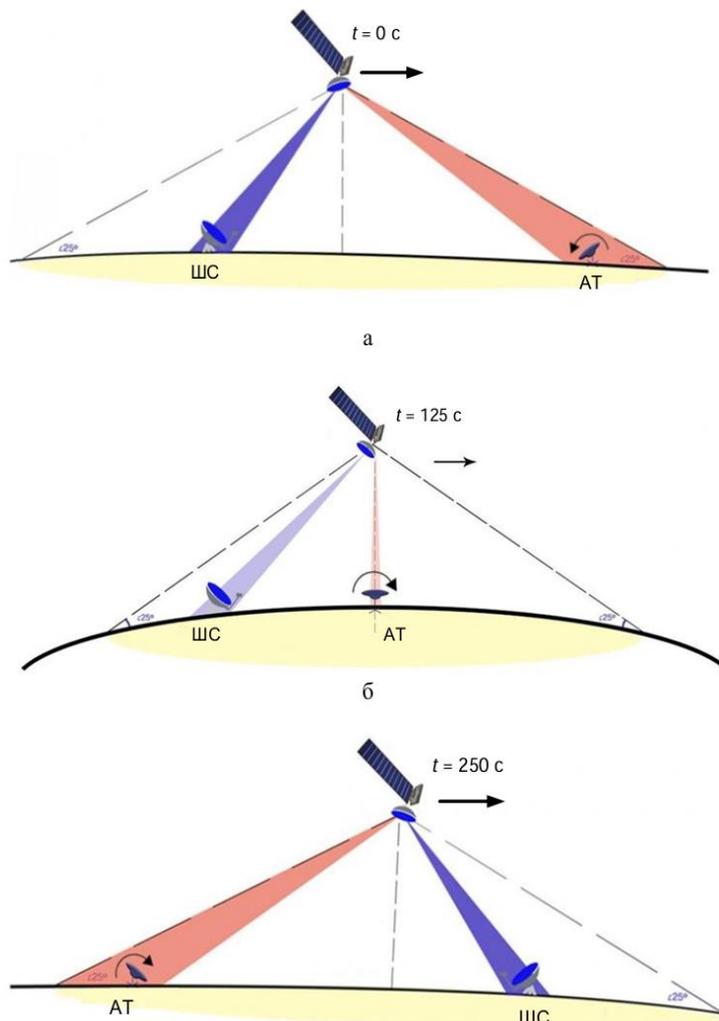


Рисунок 2.5 – Изменение по углу места антенны АТ при наведении на КА

Пропускная способность отдельного луча составляет около 760-800 Мбит/с, а общая пропускная способность одного спутника составляет 17-23 Гбит/с. Для связи используется нижняя часть Ку-диапазона (10,7-12,7 ГГц) и верхняя часть (14-14,5 ГГц). Доступна спектральная ширина до 2000 МГц при однополярности и 4000 МГц при двойной поляризации. Модуляция 64QAM от SpaceX может предложить эффективность до 6 бит/Гц, но для этого требуется SNR не менее 17 дБ.

В тестах на стадии Бета использовалась только положительная поляризация, что ограничивало пропускную способность до 2000 МГц. Кроме того, значение SNR, зарегистрированное на входах терминалов, находилось в диапазоне от 11,5 до 12,5 дБ, что недостаточно для использования 64QAM. В связи с этим система перешла на использование модуляций 16psk и 32apsk. Например, при 32APSK + FEC 4/5 обеспечивается эффективность 3,79 бит/Гц через SNR 14,4 дБ. Для

каналов Uplink в результате SNR до 18,5 дБ достигается спектральная эффективность около 5 бит/Гц.

Эксперименты, проведенные в Германии при низких нагрузках, показали, что downlink 240 МГц имеет скорость передачи 542 Мбит/с на канале, а uplink 60 МГц-39 Мбит/с на канале. Кроме того, SpaceX планирует внедрить упрощенный протокол маршрутизатора для маршрутизации данных, создавая меньшую нагрузку по сравнению со сложными системами, такими как IPv6. Весь обмен данными защищен шифрованием end-to-end.

Для организации фидерных каналов используются две параболические антенны, установленные по краям каждого спутника. Это позволяет спутникам связываться с двумя разными наземными шлюзовыми станциями одновременно. Однако с другими спутниковыми системами, работающими на тех же частотах, могут возникать радиоинтерференционные помехи.

SpaceX внедрила гибкий алгоритм управления для решения такой ситуации. Если при установлении связи спутника с одной станцией наблюдается помеха, она автоматически переключается на другую наземную станцию. Кроме того, Луч, расположенный в зоне сопротивления, временно отключается. Этот метод принципиально отличается от способа наклона луча по вертикали в OneWeb.

Для эффективной работы этой схемы в системе Starlink требуется избыточное количество наземных шлюзовых станций (GC). Это позволяет спутникам каждый раз выбирать альтернативные и чистые каналы. Однако такой динамический переход усложняет работу NCMC (Network Control and Management Center). Он должен четко отслеживать позиционную совместимость каждого спутника со спутниками не только в геостационарных (GEO), но и в низкоорбитальных системах (LEO – OneWeb, Kuiper, Telesat LEO) (Рисунок-2.6).

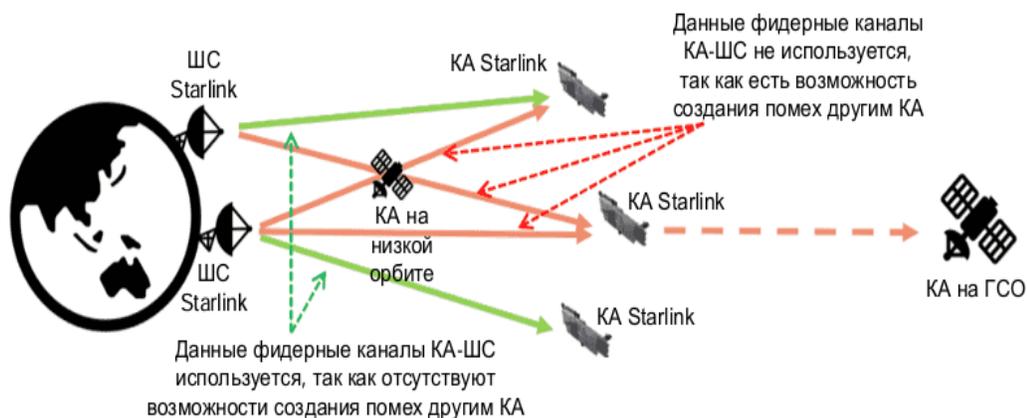


Рисунок 2.6 – Схема избегания помех для других ССС, работающих в том же направлении и в тех же диапазонах

В случае, если в ближайшем будущем тысячи спутников будут работать бок о бок на низкой орбите, управление этим процессом является технической задачей, требующей очень высокой точности и координации ресурсов. Несмотря на такую огромную нагрузку, SpaceX намерена управлять этой системой надежно и эффективно.

Обеспечение электромагнитной совместимости между низкоорбитальными спутниковыми группировками и геостационарными системами является сложной и многогранной инженерной задачей.

По состоянию на сентябрь 2022 года спутники Starlink работают в режиме прямой ретрансляции. Это означает, что спутники только пересылают сигналы с абонентских каналов в фидерные сети без какой-либо бортовой обработки (OSB). То есть данные передаются напрямую через спутник на наземную шлюзовую станцию (GST). Хотя спутники версий 1.5 и более поздних оснащены модулями лазерной межспутниковой связи (МСС), функция перенаправления трафика между спутниками в космосе пока не реализована в полной мере. Эта функция будет реализована в будущих спутниках или посредством обновления программного обеспечения (рис 2.7).

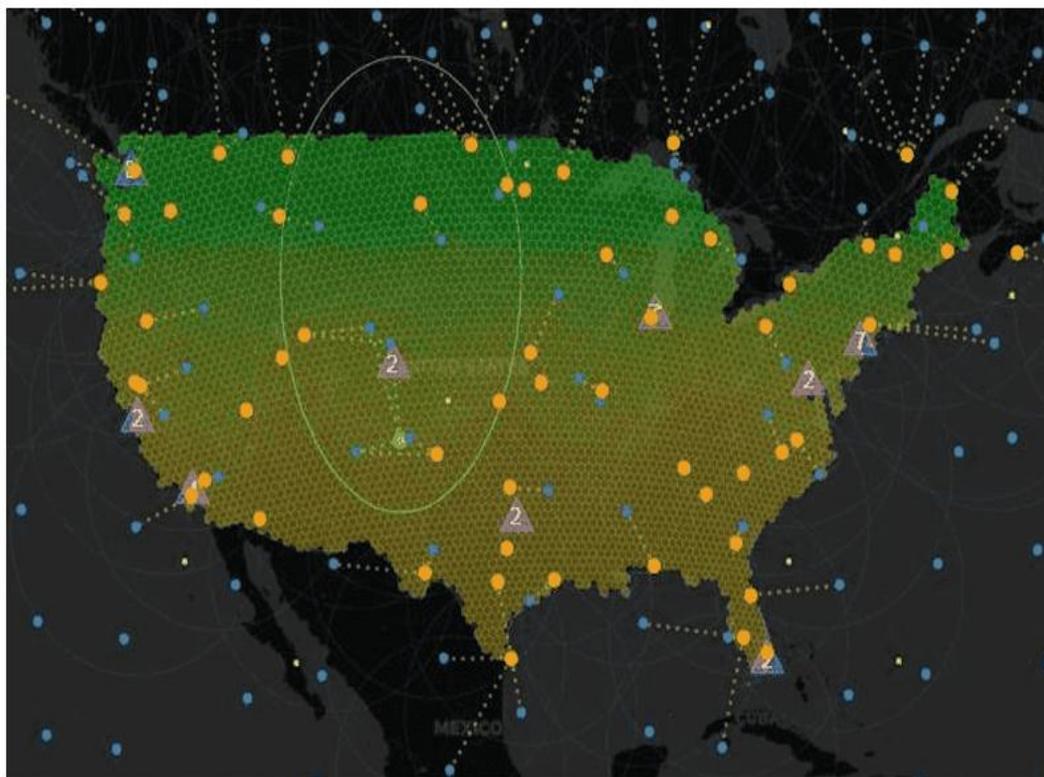


Рисунок 2.7 – Вариант подключения КА(синие точки) к ШС (желтые точки) фидерными линиями (пунктирные линии) над территорией США, разделенной на ячейки обслуживания

В текущей архитектуре данные по «верхним» и «нижним» каналам связи могут передаваться в фидерную сеть только тогда, когда спутник находится в контакте с одним спутником в своей зоне действия.

Начиная с 2021 года новые спутники Starlink будут оснащаться модулями лазерной связи (MLS). Однако данное оборудование пока находится на стадии испытаний и разработки, и официальная информация о точном режиме его работы и результатах не опубликована. [16] Источник утверждает, что эти модули могут быть поставлены немецкой компанией Tesat. Tesat – компания, специализирующаяся на оптоэлектронных системах, которая предлагает лазерные терминалы SmartLCT для малых спутников. Комплекс SmartLCT весит около 30 кг и способен передавать данные на расстояние до 45 000 км со скоростью 1,8 Гбит/с.

После того, как MLS будет полностью работоспособна, система Starlink сможет перейти в режим бортовой обработки (OSB). Этот режим позволяет спутникам обрабатывать входящий трафик, сопоставлять пакеты с отправителем и получателем и направлять данные в космосе по кратчайшему маршруту. В текущей архитектуре данные сначала передаются на Землю через один спутник, а затем по наземным сетям на принимающий спутник через другой спутник. Однако такой подход потребляет слишком много ресурсов.

Более эффективный метод – направлять сигналы напрямую между спутниками, не отправляя их на Землю. Этот метод уже успешно применяется в системе Iridium.

В настоящее время Starlink использует два диапазона частот:

- Ku (11/14 ГГц) – для абонентских каналов;
- Ka – для фидерных каналов.

В режиме прямой ретрансляции спутник изменяет только несущую частоту, сохраняя частотный диапазон. Это самый простой способ маршрутизации сигнала. Первым шагом внедрения технологии MLS является преобразование радиочастотных сигналов в оптические сигналы и перенаправление их на другой спутник. На данный момент бортовая обработка не требуется. Такой подход полезен, например, для спутников над океаном, т. е. в районах, где нет наземной станции.

А в более сложном сценарии выполняется полная бортовая обработка. В этом случае спутник демодулирует входящие сигналы, определяет адрес получателя из заголовка данных и направляет данные по лазерному каналу на соответствующий спутник в системе.

Лазерная связь особенно эффективна в районах, где нет наземных станций, например, над океанами или в малонаселенных районах. Однако эта технология усложняет управление всей сетью Starlink.

По данным SpaceX, один спутник Starlink может обеспечить среднюю пропускную способность 17-23 Гбит/с. Первые 60 спутников, добавленных в систему, обеспечили около 1 Тбит/с дополнительной пропускной способности.

Однако четко не указано, относится ли это значение ко всем каналам или только к «нижнему» каналу, ориентированному на абонентов.

Поскольку 70% поверхности Земли покрыто океаном, а спрос на связь в разных регионах различается, эффективнее оценивать возможности отдельных спутников, а не всей системы.

Технически для фидерных каналов доступна частота 4200 МГц с двойной поляризацией (диапазон Ка). На этих каналах пропускная способность около 20 Гбит/с может быть достигнута с использованием эффективной модуляции, такой как 64QAM.

Для абонентских каналов (Ku-диапазон) ситуация несколько иная. Современные терминалы используют модуляцию 16PSK или 32APSK из-за низкого отношения сигнал/шум. Это обеспечивает пропускную способность 6-14 Гбит/с при одной поляризации. В перспективе при использовании двух поляризаций этот показатель может возрасти до диапазона 12-30 Гбит/с.

2.4 Препятствия стоящие на пути использования ССС Starlink

Влияние на астрономические наблюдения.

С самого начала развертывания орбитальной группировки Starlink астрономическое сообщество выразило обеспокоенность большим числом спутников на низких орбитах. Ученые опасались, что эти аппараты создадут световое загрязнение, мешающее наблюдениям, из-за их яркости в оптическом и радиодиапазонах. Это может серьезно затруднить научные исследования.

Проблемы загрязнения околоземного пространства.

Развертывание крупных спутниковых группировок, таких как Starlink, на низких орбитах вызывает опасения, связанные с так называемым «эффектом Кesslera». Этот эффект может сделать доступ в космос невозможным из-за накопления космического мусора, который создает угрозу столкновений. Околоземное пространство становится все более загруженным. Спутники Starlink соседствуют с обломками и другим мусором. SpaceX уже запустила множество спутников, а в планах – довести их число до 40 тысяч для завершения орбитальной группировки. Наблюдения показывают, что каждую неделю фиксируется около 600-700 случаев опасного сближения спутников Starlink с другими объектами на расстоянии менее 1 км. Пока столкновений не произошло, но в случае аварии может начаться цепная реакция: обломки от одного столкновения породят новый мусор, который столкнется с другими спутниками, и так далее. Это может сделать целые орбиты непригодными для использования.

Хотя спутники Starlink оснащены системой, которая использует данные Министерства обороны США для автономного предотвращения столкновений, ее эффективность вызывает вопросы. Например, при запуске 24 мая 2019 года

первых 60 тестовых спутников версии 0.9 три из них потеряли связь с Землей. Наземные службы не смогли отправить команды для их сведения с орбиты. В результате эти спутники неуправляемо снижаются под действием атмосферного торможения и гравитации. По оценкам SpaceX, процесс их сгорания в атмосфере может занять до пяти лет.

В сентябре 2019 года чуть не произошло столкновение между спутником Starlink-44 и европейским аппаратом Aeolus. Изначально, 28 августа, вероятность аварии оценивалась как низкая (1 к 50 000), и операторы SpaceX и Европейского космического агентства (ESA) решили не предпринимать мер. Однако позже прогноз ухудшился до 1 к 1000 – это в десять раз выше порога ESA для маневров уклонения. Из-за сбоя в компьютерной системе SpaceX не получила сообщения от ESA, и 2 сентября европейцы самостоятельно провели маневр уклонения для Aeolus.

В 2021 году Китай направил жалобу в ООН, указав, что их космическая станция «Тяньгун» дважды, в июле и октябре 2020 года, выполняла маневры, чтобы избежать столкновения со спутниками Starlink. В жалобе отмечалось, что постоянные маневры спутников Starlink создают угрозу для безопасности космонавтов на борту станции.

Еще один инцидент произошел 3 февраля 2022 года, когда SpaceX запустила 49 спутников группы 4-7. На следующий день геомагнитная буря увеличила атмосферное сопротивление, из-за чего 38 спутников начали неконтролируемое снижение и сгорели в атмосфере к 12 февраля. Лишь 11 аппаратов смогли выйти на заданные орбиты.

Эти случаи подчеркивают, что крупные низкоорбитальные системы, такие как Starlink, несмотря на свои преимущества, могут способствовать засорению околоземного пространства. Это создает риски для дальнейшего освоения космоса человечеством.

Оценка того, сколько абонентских терминалов каждый спутник Starlink может эффективно обслуживать в своей зоне, является ключевым аспектом при расчете пропускной способности сети. Если объем данных, передаваемых одним спутником по каналу связи, принять равным 20 Гбит/с (с учетом двух поляризаций и мощности фидерного канала), то зону покрытия можно оценить следующим образом.

По данным за 2020 год, домохозяйства в США потребляют в среднем 281 ГБ интернет-трафика, что соответствует стабильной скорости загрузки около 0,9 Мбит/с. В пиковые периоды этот показатель может увеличиваться в 3 раза. Исходя из этих показателей, один спутник может обслуживать около 22 000 терминалов в средних условиях и до 5500-7400 терминалов при пиковой нагрузке.

Если в зоне покрытия спутника находится 7470 сот, то в среднем на одну соту приходится 3 терминала, а при пиковой нагрузке – только 1 терминал. Эти расчеты были выполнены с использованием современных методов

множественного доступа (CDMA, TDMA, FDMA). Однако эти цифры не соответствуют официальным данным SpaceX, в которых говорится, что на одну ячейку можно обслуживать до 125-130 устройств.

Чтобы компенсировать эту разницу, компания может использовать следующие методы:

- ограничение скорости абонента;
- установка лимита трафика;
- увеличение количества спутников;
- расширение частотного ресурса;
- эффективно перенаправляя лучи к клеткам.

Во многих случаях эти меры можно использовать в сочетании.

Результаты моделирования пропускной способности системы и радиационной нагрузки.

Одна из моделей, используемых для оценки производительности системы Starlink, позволяет анализировать производительность лучей в различных сценариях и нагрузку в зависимости от плотности терминалов. Из этой модели были сделаны следующие выводы:

Соты с большим количеством абонентов снабжаются лучами, передаваемыми с использованием нескольких частот или поляризации. Более частое или более длительное обслуживание таких ячеек достигается с помощью механизма TDMA.

Чтобы максимально использовать зону покрытия, лучи сначала направляются на внешние ячейки, а затем в центр.

В районах с высоким спросом на услуги следует увеличить количество шлюзовых станций, что позволит развернуть дополнительные спутники и увеличить пропускную способность.

Если поблизости нет станций, данные направляются на соседний спутник с помощью лазерной межспутниковой связи (LISL), которая затем ретранслирует данные на ближайшую станцию.

В некоторых географических районах могут действовать местные ограничения на использование частот, что может снизить способность системы предоставлять услуги в этих районах.

Скорости передачи данных и значения задержки в сети Starlink

При оценке производительности системы важны два основных фактора:

- Скорость передачи данных;
- Задержка.

Исследования, проведенные SpeedTest во втором квартале 2022 года, продемонстрировали эффективность Starlink в Европе, Северной и Южной Америке, а также Океании. Согласно этим исследованиям, средняя скорость в системе начала снижаться по мере того, как число пользователей превышало пропускную способность спутника.

Согласно результатам бета-тестирования, представленным SpaceX в FCC в сентябре 2020 года, в ходе испытания, проведенного с использованием 30 терминалов, было проведено более миллиона измерений. В 95% случаев задержка сети не превышала 42 мс, а в половине из них она была ниже 30 мс. Эти цифры свидетельствуют о том, что Starlink обеспечивает уровни задержки, близкие к оптоволоконным линиям связи.

Окончательная оценка

Система Starlink может стать альтернативой многим проводным провайдерам с точки зрения скорости и покрытия. Однако стабильность работы сервиса неравномерна и зависит от следующих факторов:

- время (какая часть суток);
- погода;
- фактическая нагрузка на ячейку;
- наличие поблизости шлюзовой станции.

Гибкость системы и ее архитектурные возможности повышают ее потенциал для глобального развития, однако следует отметить, что качество обслуживания может быть неравномерным.

3 Космические и наземные средства ССС Starlink

3.1 Наземные технические средства, принадлежащие системе Starlink SSS

Основным устройством, используемым в настоящее время, является терминал системы Starlink нового поколения UT-2. Его технические характеристики улучшены с учетом требований современной космической связи. Терминал UT-2 работает с высокой надежностью и сохраняет свою работоспособность в различных климатических условиях. Его основные параметры описаны ниже:

- Антенна представляет собой модель UT-2, оснащенную фазированной решеткой с электронным управлением. Этот тип антенны позволяет автоматически обнаруживать спутник и направлять сигнал;

- Угол направления – антенна устройства имеет возможность сканирования $\pm 60^\circ$. Такой широкий угол обзора обеспечивает непрерывную связь со спутником, даже если терминал находится в мобильном состоянии или на границе сети;

- Вес – сам терминал весит 2,9 кг, а вместе с подставкой – около 3,2 кг. Это легкое и портативное устройство, что позволяет устанавливать его в самых разных ситуациях;

- Степень защиты – UT-2 соответствует стандарту IP67. Это означает, что устройство полностью защищено от пыли и не выйдет из строя даже при кратковременном погружении в воду. То есть он приспособлен для работы в полевых условиях, даже в сильный дождь или снег.

3.2 Характеристики и развитие абонентских терминалов Starlink

Глобальная система спутниковой связи Starlink, запущенная компанией SpaceX, в своем развитии представила несколько поколений терминалов. Среди них важную роль сыграли терминалы UT-1 и UT-2 (Рисунок – 3.1). Эти устройства были разработаны для предоставления пользователям высокоскоростного спутникового Интернета, и каждое из них в свое время расширяло технические возможности сети.

Модель UT-1 была представлена в период бета-тестирования в 2020 году и обеспечила доступ в Интернет первым пользователям системы Starlink. Данный терминал был оснащен фазированной антенной решеткой, состоящей из 1675 элементов, попеременно выполняющей функции приема и передачи. Он поддерживал только правостороннюю круговую поляризацию. Использовались

типы модуляции от BPSK до 64QAM, работавшие в каналах шириной от 15 до 240 МГц.

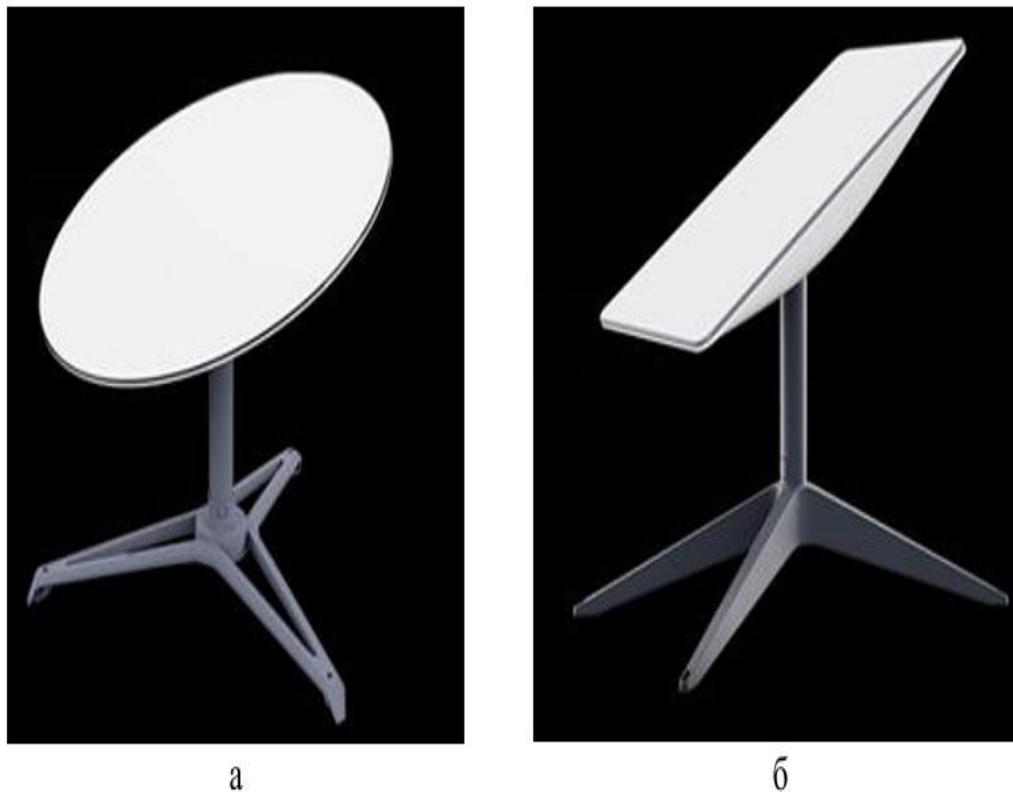


Рисунок – 3.1 AT Starlink: а – UT-1; б – UT-2

Модель UT-1 была представлена в период бета-тестирования в 2020 году и обеспечила доступ в Интернет первым пользователям системы Starlink. Данный терминал был оснащен фазированной антенной решеткой, состоящей из 1675 элементов, попеременно выполняющей функции приема и передачи. Он поддерживал только правостороннюю круговую поляризацию. Использовались типы модуляции от BPSK до 64QAM, работавшие в каналах шириной от 15 до 240 МГц.

Скорость загрузки терминала достигла 350 Мбит/с, а скорость отдачи – 130 Мбит/с. В ходе испытаний, проведенных в Германии, на незагруженном аккумуляторе была зафиксирована скорость загрузки 542 Мбит/с и скорость выгрузки 39 Мбит/с. Антенна UT-1 могла вращаться на 360° по горизонтали и до 60° по вертикали. Однако ее главным ограничением был перегрев антенны при температуре +50°C, что не позволяло ей работать непрерывно в течение длительного времени.

UT-2 – магистральный терминал нового поколения

В 2021 году SpaceX представила терминал UT-2. К 2025 году он станет основным пользовательским терминалом системы Starlink. Модель UT-2 устранила ограничения UT-1 и ввела новые функции. Данный терминал использует отдельные фазированные антенные решетки для приема и передачи, что позволяет ему работать с данными в обоих направлениях одновременно. Это не только повысило эффективность, но и решило проблему перегрева антенны [17].

Антенна UT-2 способна поддерживать уровень сигнала 4 дБ при угле наведения $\pm 60^\circ$, что обеспечивает устойчивость связи. Кроме того, данный терминал имеет возможность работы с двойной поляризацией, что значительно расширяет полосу пропускания.

Технические характеристики UT-2 -2 (2025).

Тип антенны: фазированная решетка с электронным управлением.

Угол прицеливания: $\pm 60^\circ$.

Вес: 2,9 кг (3,2 кг с подставкой).

Уровень защиты: IP67 (полная защита от пыли и воды).

Рабочая температура: от -30°C до $+50^\circ\text{C}$.

Ветроустойчивость: до 96 км/ч.

Система снеготаяния: может растапливать снеговую нагрузку 40 мм/ч.

Средняя потребляемая мощность: 75-100 Вт.

Терминал UT-2 легкий, очень портативный и рассчитан на работу в различных погодных условиях. Мощная антенна и усовершенствованная система терморегулирования обеспечивают долговременную стабильную работу.

Терминалы UT-1 и UT-2 представляют собой важные технологические вехи в развитии системы Starlink. В то время как UT-1 послужил для запуска первоначальных возможностей системы, UT-2 стал ключевым устройством для предоставления глобальных интернет-услуг с расширенной полосой пропускания, высокой надежностью и современными функциями безопасности.

В 2025 году модель UT-2 будет широко развернута, что выведет качество сети Starlink по всему миру на новый уровень. Терминалы UT-1 и UT-2 предназначены для стационарного использования. Как указано в [9], они быстро теряют связь при движении или колебаниях платформы. SpaceX работает над мобильным терминалом ESIM (Earth Station In Motion, см. рисунок 3.2)

Он еще не представлен официально, но данные из заявок SpaceX в FCC дают представление о его характеристиках. Площадь приемной ФАР в ESIM увеличена в 1,45 раза по сравнению с UT-2, но угол сканирования остался тем же – до $\pm 60^\circ$. Это, вероятно, указывает на трудности в создании доступной ФАР с более широким углом сканирования. ESIM будет контролировать излучение каждые 100 мс, автоматически снижая его уровень при превышении допустимых значений. Дополнительный контроль параметров излучения будет осуществляться центром мониторинга сети (NCMC). SpaceX гарантирует, что система определит

местоположение ESIM и, при его нахождении в воздушном пространстве или водах другого государства, автоматически адаптирует параметры излучения к местным нормам.



Рисунок 3.2 – Внешний вид самолетного AT ESIM

Для эффективной передачи данных по абонентским каналам системы Starlink используется метод OFDM (ортогональное частотное разделение каналов). Эта технология обеспечивает высокую спектральную эффективность при внутреннем распределении каналов. Система использует пилот-сигналы – они необходимы для компенсации доплеровского сдвига и нелинейных искажений, влияющих на качество сигнала. Эти сигналы, подобные маякам, на 5–20 дБ мощнее основного потока информации и имеют полосу пропускания около 2 МГц. Кроме того, они могут информировать терминал о том, что спутник находится прямо над ним.

Радиоинженеры могут отслеживать эти сигналы по всему миру, используя антенные системы и приборы спектрального анализа. На рисунках – 3.3 а и 3.3 б представлены примеры пилот-сигналов в структуре OFDM.

С точки зрения временной структуры сигналы разделены на кадры длительностью 1,3288 мс, с защитными интервалами между ними 4,55 мкс (рисунки 3.3а и 3.3б)

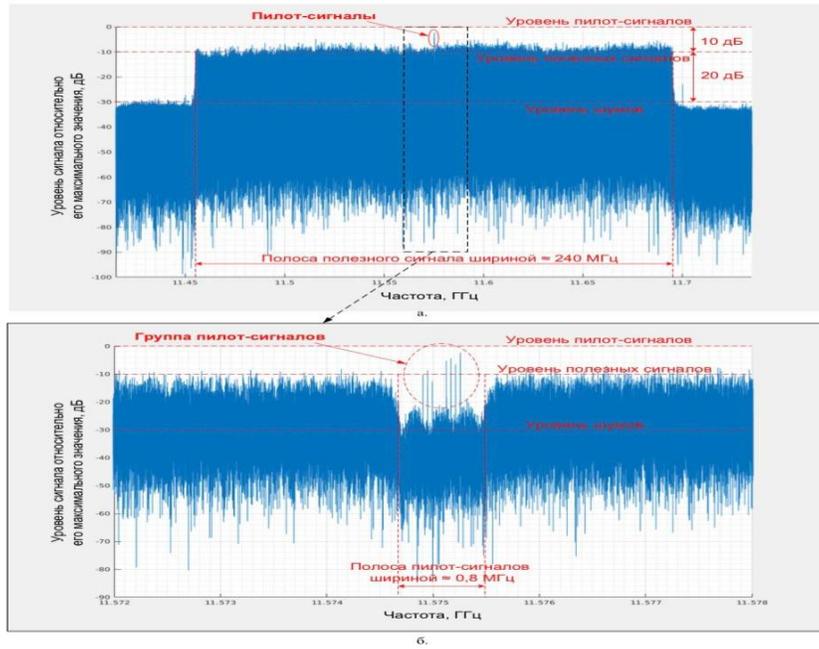


Рисунок 3.3 – Один из вариантов OFDM-сигнала в абонентском канале «вниз», принимаемый АТ, который ретранслируется КА от ШС: а – в полосе частот обзора анализатора спектра 240 МГц; б – в полосе частот обзора анализатора спектра 6 МГц на центральной частоте

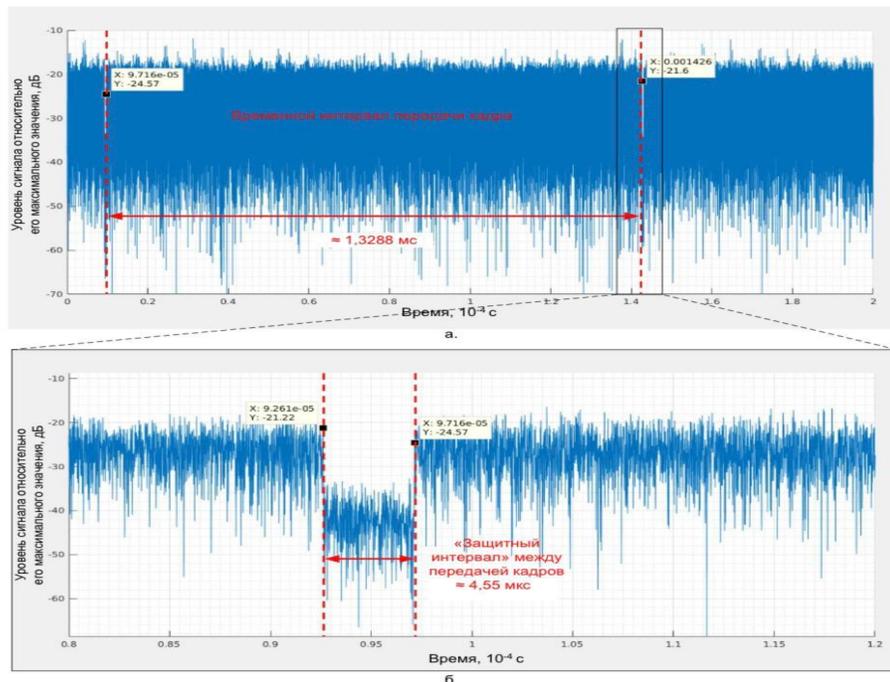


Рисунок 3.4 – Вариант формирования кадров в абонентском канале «вниз»: а- временной интервал передачи кадра; б – «защитный интервал» между кадрами

Уровень сигнала измеряется в децибелах, то есть относительно максимального значения.

3.3 Цены на терминалы и развитие

Хотя SpaceX публично не раскрывает точную стоимость производства терминалов, известно, что стандартные стационарные модели продаются по цене 499 долларов. Независимые эксперты оценили стоимость первого терминала UT-1 в сумму от 2500 до 3000 долларов США. В 2021 году эта сумма была снижена до 1500 долларов, а появление модели UT-2 снизило цену еще на 200 долларов. Компания планирует снизить цену до нескольких сотен долларов по мере увеличения объемов производства. Летом 2021 года компания подала заявку на получение лицензии на две новые модели терминалов. Заявка от 8 июня (SES-LIC-INTR2021-02141) описывает новое поколение терминалов, оснащенных компактной фазированной антенной решеткой (29×48 см) и имеющих мощность 2,44 Вт. Заявка от 3 августа (SES-LIC-INTR2021-03015) касается терминала HP ESIM, нацеленного на высокую производительность, специально адаптированного для работы на кораблях, самолетах и в суровых условиях. Это устройство улучшило усиление, сэкономило электроэнергию, а также увеличило прочность конструкции.

Фаза 2 и терминалы второго поколения. Во втором поколении системы Starlink намерена представить терминалы, поддерживающие не только Ku-, но и Ka-диапазон частот. Это нововведение значительно увеличивает пропускную способность:

Прием (нижний канал): 2000-3650 МГц.

Передача (высокий канал): 500-000 МГц.

С учетом двух поляризаций доступный частотный ресурс составляет 7300 МГц (низкий канал) и 4000 МГц (высокий канал). Кроме того, терминалы могут принимать несколько сигналов одновременно через несколько направленных лучей и передавать в диапазоне 125 МГц.

Это позволяет достичь скорости до 6 Гбит/с. Терминалы нового поколения оснащены интеллектуальными технологиями управления и являются самонастраивающимися, что позволяет избежать потенциальных помех со спутниками на близких орбитах или геостационарными спутниками. Если SpaceX полностью реализует свой проект, эти терминалы можно будет рассматривать как альтернативу сетям 5G или оптоволоконным сетям.

3.4 Наземная инфраструктура Starlink: шлюзовые станции

Основу наземной инфраструктуры составляют станции сопряжения (СШ). Хотя большинство из них находится в Соединенных Штатах, их число постоянно растет по всему миру. Типичная спутниковая антенна представляет собой комплекс из девяти параболических антенн под радиопрозрачным куполом. Здесь также размещены приемники и телекоммуникационные модули. Связь осуществляется по волоконно-оптическим сетям (ВОЛС), а некоторые точки обеспечены резервным каналом и автономным питанием.

Одна станция может работать с четырьмя спутниками одновременно. Для этого две антенны обслуживают один спутник – одна активно отслеживает его, а другая готовится переключиться на следующий спутник. Оставшаяся антенна находится в резерве. Кроме того, существует и мобильная спутниковая версия: система с четырьмя антеннами может работать с двумя спутниками.

Однако реализация системы установки спутника на подвижных объектах – например, на кораблях или самолетах – в настоящее время затруднена из-за требований синхронизации в реальном времени и необходимости бесперебойной связи с центром сети. Поэтому массового внедрения подобных решений в ближайшем будущем не предвидится.

Если структура антенной установки представлена на рисунке 3.5, то ее внешний вид представлен на рисунке 3.6. Параболическая антенна, используемая в этой системе, имеет диаметр 1,47 метра и рабочее напряжение от 220 до 230 В.

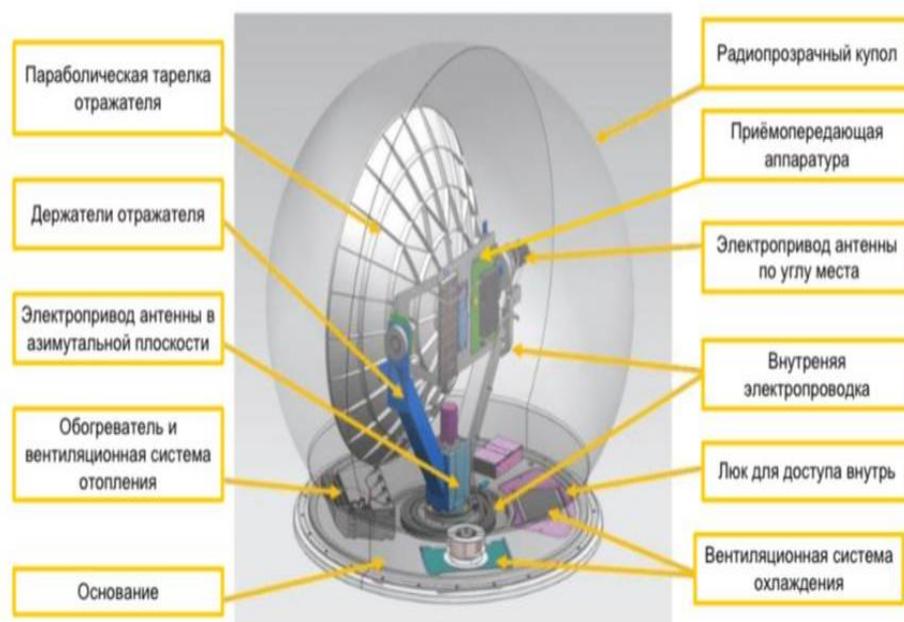


Рисунок 3.5 – Компоновка наземной антенны, используемой в ШС Starlink

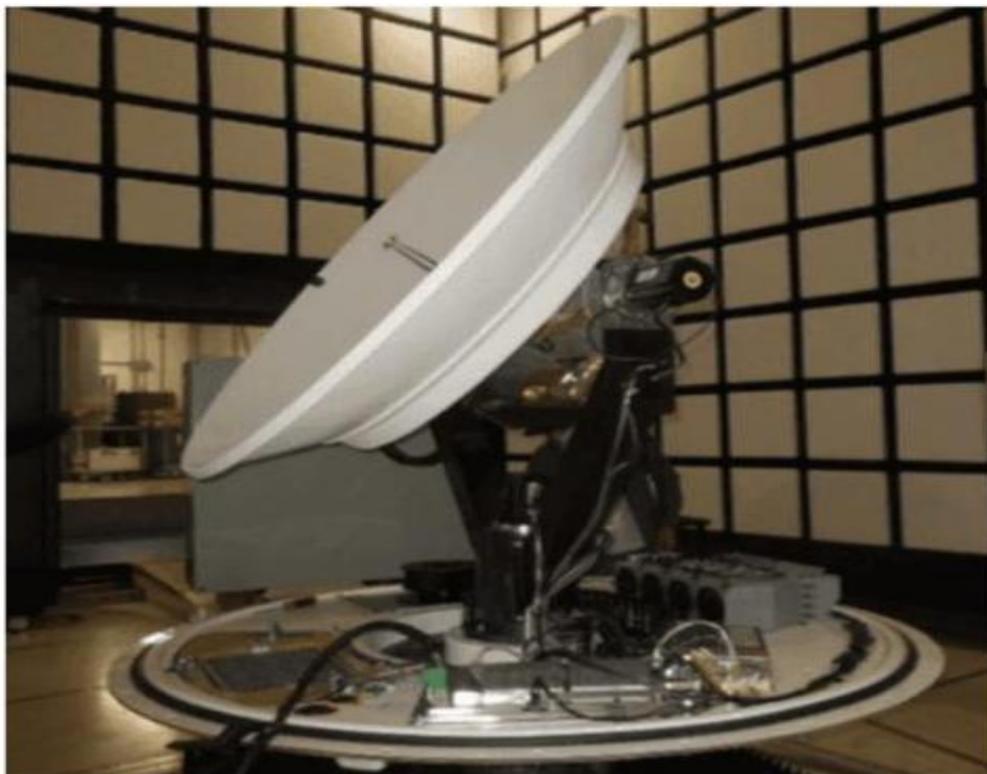


Рисунок 3.6 Внешний вид наземной антенны, используемой в ШС Starlink [5]

Технические характеристики антенной системы собраны в таблице 3.1. По сравнению с фазированными антенными решетками (fat) параболические антенны были выбраны из – за их способности работать с небольшими углами наклона (до 5°), что четко указано в официальных заявках SpaceX.

Станции шлюзов подключаются к наземным узлам PoP (Presence Point) и глобальной сети Интернет через волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Эти точки PoP, по-видимому, оснащены оборудованием для мониторинга трафика, управления клиентами и обеспечения безопасности связи и работают с программным обеспечением, отвечающим требованиям CALEA (закон о законном контроле за коммуникациями в США).

Трафик, поступающий со станций шлюза, сначала направляется на ближайший узел PoP, а затем передается в центры обмена интернет-трафиком – сетевые центры в Лос-Анджелесе, Сиэтле, Орландо, Нью-Йорке, Сан-Хосе, Далласе и Вашингтоне. Кроме того, SpaceX зарегистрировала соответствующий блок IP-адресов в Австралии, Новой Зеландии, Канаде, Великобритании, Германии и Испании.

Таблица 3.1 – Технические характеристики антенной системы

Характеристика	Линия «вверх»	Линия «вниз»
Диаметр, м		1,5
Площадь рефлектора м ²		1,7
Аппертурная эффективность, %		42
Максимальный рабочий цикл передачи, %		100
Длина волны, м		0,01
Рабочие частоты	27,5-29,1 ГГц 29,5-30 ГГц	17,8-18,6 ГГц 18,8-19,3 ГГц
Распределение каналов частоты	4 каналов по 500 МГц (всего 2 ГГц)	4 каналов по 500 МГц (всего 1,25 ГГц)
Минимальная полоса канала	62,5 МГц	250 МГц
Максимальная полоса канала	500	250 МГц
Поляризация	Двойная (круговая, левого и правого направлений вращений)	
Максимальная скорость передачи данных при использовании наиболее емких сигналов QAM64 и работе в обеих поляризациях)	до 4000 Мбит/с на полосу 500 МГц	до 2000 Мбит/с на полосу 250 МГц
Типовая скорость передачи данных (при работе в обеих поляризациях в надир)	до 3200 Мбит/с на полосу 500 МГц	до 1600 Гбит/с на полосу 250 МГц
Символьная скорость	до 480 Мсимв/с	-
Классы излучений	480MD7W 240MD7W 120MD7W 60M0D7W	240MD7W 120MD7W 60M0D7W
Тип модуляции несущей	QPSK, M-QAM (до 64QAM)	
Максимальная плотность ЭИИМ	33,7 дБВт/МГц (или эквивалент. 9,7 дБВт/4 кГц)	-
Максимальная ЭИИМ	66,5 дБВт	-
Коэффициент усиления антенны	-3 дБи (у линии горизонта)	46,9 дБи (на частоте 19 ГГц)
Мощность передатчика	50 Вт	-
Удельная излучаемая мощность на поверхности антенны, мВт/см ²		
Общая излучаемая мощность	66,5 дБВт	-
Максимальное изотропное усиление антенны	49,5 дБВт на частоте 29 ГГц	-
Минимальная мощность, подаваемая на передающую антенну	0,8 дБВт на канал 500 МГц	-
Максимальная мощность, подаваемая на передающую антенну	11 дБВт на канал 500 МГц	-

Минимальная спектральная плотность мощности	-86 дБВт/Гц	-
Максимальная спектральная плотность мощности	-76 дБВт/Гц	-
Ширина ДНА по линии 3 дБ	0,5°	0,8° -
Ширина ДНА по половине мощности	-	0,8°(на частоте 19 ГГц)
Минимальный угол места	25°	
Шумовая температура		275°К
Коэффициент С/Ν в условиях ясного неба		19 дБ

Компания зарегистрировала две автономные системы (AS): AS14593 и AS27277 (вторая может быть предназначена для внутренних корпоративных целей). Starlink в основном использует сеть Google для наземной связи, поскольку Google является акционером и стратегическим партнером SpaceX (это показано на рисунке 3.7).

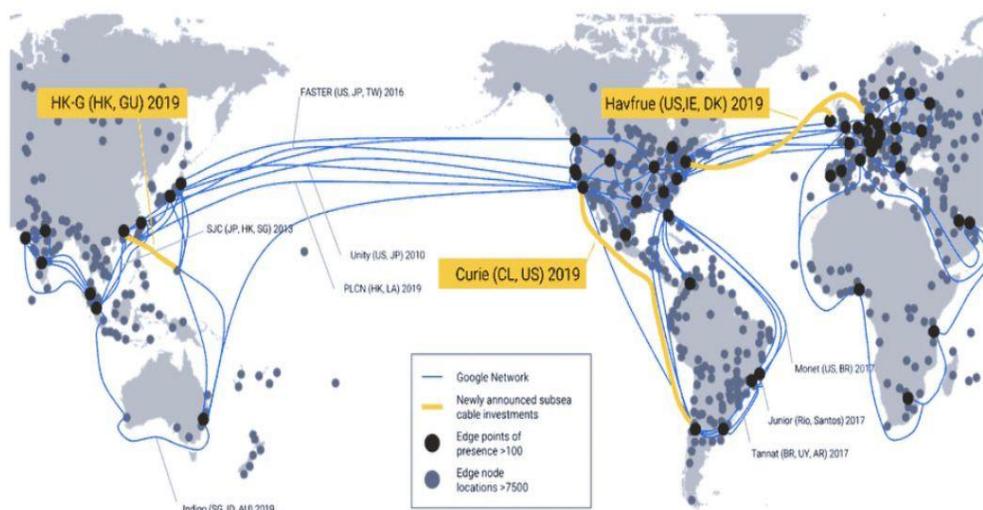


Рисунок 3.7 – Наземная сеть Google по состоянию на 2019 г.

Планируется, что спутники будут расположены в точках Google pop, чтобы снизить затраты на инфраструктуру. Однако законодательные ограничения вынуждают размещать некоторые станции в удаленных местах или труднодоступных районах – в таких случаях компания использует свои собственные или арендованные ВОЛС-линии.

Сеть Google AS36492 (GOOGLEWIFI), обычно используемая для общественного распространения Wi-Fi, также используется для распространения IP-адресов Starlink.

Примеры существующих блоков IP-адресов.

Австралия и Новая Зеландия:

IPv4: 103.152.126.0/24, 103.152.127.0/24.

IPv6: 2406:2d40:1000::/36, 2406:2d40::/36.

Канада:

IPv4: 143.131.2.0/24 – 143.131.7.0/24.

Европа:

Испания (Мадрид): 162.43.192.0/24, 162.43.193.0/24.

Великобритания (Лондон): 176.116.124.0/24, 176.116.125.0/24.

Германия (Франкфурт): 188.95.144.0/24, 188.95.145.0/24.

Фаза 2 и технические изменения фазы 2 Generation. Согласно второму поколению и расширенной фазе системы (Generation 2), Starlink рассматривает возможность использования не только диапазонов Ku и Ka, но и E-диапазона (60-90 ГГц) (см. таблицу - 3.2). Это позволит удвоить передачу данных в направлении вверх. Например, в Ku-диапазоне доступна полоса частот 500 МГц, а в e-диапазоне-полоса частот 5000 МГц.

Таблица 3.2 – Предполагаемый частотный план ШС Starlink после фазы развертывания Generation

Тип канала связи и направление приема-передачи	Диапазоны частот, ГГц	Доступно МГц в одной поляризации	Количество поляризаций	Общее количество доступных экв. МГц
линия «вверх» ШС – КА	27,5-29,1 29,5-30 81-86	1600 500 5000	2	14200
линия «вниз» КА – ШС	17,8-18,6 18,8-19,3 71-76	800 500 5000	2	12 600

В США этот спектр разделен на радиорелейные каналы связи и радиомосты (около 19 000 устройств). В связи с этим SpaceX необходимо проводить расчеты, чтобы избежать помех при развертывании спутников.

Центр управления и мониторинга сети (NCMC). Все задачи координации связи, распределения частотных ресурсов и управления качеством обслуживания в Starlink возложены на Центр мониторинга и управления сетью (NCMC). Этот центр расположен в Редмонде, штат Вашингтон, США.

Основные функции центра:

- Контроль и синхронизация работы станций шлюза и абонентских терминалов;
- Сохранение последовательной временной шкалы внутри системы;
- Персональное назначение полосы частот для спутников;

- Управление трафиком, мониторинг работы системы и сбор телеметрических данных;
- Качество обслуживания и проведение расчетных операций.

Для обеспечения непрерывной работы системы Starlink как глобальной сети спутниковой связи компания SpaceX внедрила многоуровневую архитектуру управления и контроля. Такая структура позволяет контролировать стабильную работу системы, быстро выявлять технические проблемы и эффективно распределять ресурсы.

Согласно требованиям Федеральной комиссии по связи США (FCC), каждая шлюзовая станция и пользовательский терминал проверяются каждые 100 миллисекунд. Такой высокочастотный мониторинг позволяет осуществлять точный мониторинг состояния устройств и при необходимости отправлять немедленные управляющие сигналы.

Наземный мониторинг осуществляется непосредственно через инфраструктуру, а мониторинг абонентских устройств осуществляется путем отправки пакетов служебных данных по спутниковому каналу.

По информации, предоставленной SpaceX, каждые 15 секунд система определяет наиболее оптимальный спутник для обслуживания терминалов в определенном районе. Эту функцию выполняет NCMC (Центр управления и координации сетей). NCMC разрабатывает эффективный график работ с учетом орбитальной траектории спутников, их технического состояния, а также возможных помех со стороны геостационарных спутников. Это помогает оптимизировать нагрузку на систему и сократить задержки при маршрутизации трафика.

Центр управления полетами (ЦУП) контролирует фактическое движение, технические параметры, маневренные действия и общую эффективность работы спутников. ЦУП посылает команды на спутники и собирает телеметрические данные с помощью четырех телеметрических радиостанций, работающих в диапазонах частот Ku и Ka. В среднем каналы связи активны на каждом спутнике в течение 2,5 часов в сутки, а продолжительность приема телеметрической информации составляет около 60 минут в сутки.

Для экспериментальной проверки надежности системы компания SpaceX создала наземную испытательную сеть, состоящую из шести стационарных и трех мобильных испытательных станций. Эти объекты предназначены для оценки производительности сети Starlink в различных географических и климатических регионах.

Стационарные и мобильные испытательные точки расположены в ряде стратегических мест. Эти точки предназначены для тестирования инфраструктуры, технического оборудования и систем связи крупных технологических компаний, таких как SpaceX и Tesla.

В штате Калифорния есть два основных пункта: центральный офис SpaceX, расположенный в Хоторне, и штаб-квартира Tesla во Фремонте. В этих местах будут изучены высокотехнологичные испытания и совместимость систем связи.

Техас также является домом для нескольких важных точек тестирования. Испытательный полигон SpaceX в Макгрегоре-это место, где проходят испытания ракетных двигателей и спутникового оборудования. А инженерный комплекс в городе Браунсвилл – это площадка для проектирования новых инженерных решений и спутниковых систем.

Инженерный центр Редмонда и комплекс сетевой инфраструктуры Брюстера, расположенный в штате Вашингтон, являются важными платформами для изучения технических аспектов наземной и спутниковой связи.

Кроме того, SpaceX использует три мобильных испытательных фургона (Broadband Test Van 1, 2 и 3). Эти мобильные лаборатории используются для оценки качества интернет-сигнала, зоны покрытия и надежности связи в различных географических регионах. Они позволяют тестировать работу системы в реальных условиях, что, в свою очередь, поддерживает процесс совершенствования и расширения технологии.

4 Расчет основных параметров CCC Starlink

4.1 Расчет пропускной способности

В этой главе рассчитываются основные технические параметры системы спутниковой связи Starlink и анализируется их влияние на эффективность системы. Расчеты проводились на основе технических характеристик и орбитальных показателей действующих спутников Starlink 1..

Общая пропускная способность спутниковой системы зависит от используемой полосы частот и спектральной эффективности:

$$C = B \cdot \eta \quad (4.1)$$

где:

B – ширина полосы частот, то есть диапазон частот, в котором может передаваться сигнал;

η – спектральная эффективность, измеряемая в битах на Герц (бит/Гц). Она показывает, сколько информации можно передать за одну секунду на один Герц полосы частот.

Для Starlink указаны два направления связи:

Восходящая линия (uplink) – передача сигнала от пользователя к спутнику:

$$B_{up} = 500 \text{ МГц} = 500 \times 10^6 \text{ Гц} \text{ верхняя полоса частот канала};$$

$$\eta_{up} = 3,5 \text{ бит/Гц}$$

Нисходящая линия (downlink) – передача сигнала от спутника к пользователю:

$$B_{down} = 2000 \text{ МГц} = 2 \times 10^9 \text{ Гц} \text{ полоса нижних частот};$$

$$\eta_{down} = 5,5 \text{ бит/Гц}$$

Таким образом, общая пропускная способность для каждой линии рассчитывается как произведение ширины полосы и спектральной эффективности:

uplink

$$C_{up} = 500 \times 10^6 \cdot 3,5 = 1,75 \times 10^9 \text{ бит/с} = 1,75 \text{ Гбит/с}$$

Downlink

$$C_{down} = 2 \times 10^9 \cdot 5,5 = 11 \times 10^9 \text{ бит/с} = 11 \text{ Гбит/с}$$

4.2 Зона покрытия и количество спутников

Система Starlink состоит из 22 спутников, размещенных в 72 орбитальных плоскостях:

Отчет: $N = 72 \times 22 = 1584$ спутник

Каждый спутник имеет средний $A_{cell} = 379 \text{ км}^2$ охватывает территорию:

$$A_{cell} = N \times A_{cell} = 1584 \times 379.6 = 601126,4 \text{ км}^2 \quad (4.2)$$

где

A_{cell} – площадь, которую один спутник покрывает на Земле.

N – это общее количество спутников в системе.

4.3 Радиус покрытия антенны

$$R = h \cdot \tan(\theta) \quad (4.3)$$

где

R – радиус покрытия антенны (на поверхности Земли),

h – высота орбиты,

θ – угол направленности антенны.

Направление антенны $\theta = 25^\circ$ и высота орбиты $h = 550 = 550000 \text{ м}$

Отчет: $R = 550000 \tan(25) \approx 256.5 \text{ км}$

4.4 Время орбитального вращения

R – Радиус Земли $R_{earth} = 6371 \text{ км} = 6371000 \text{ м}$

h – высота орбиты спутника: 550 км или 550 000 м

G – гравитационная постоянная: 6.67430×10^{-11}

M – масса Земли: $5.972 \times 10^{24} \text{ кг}$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(R+h)^3}{GM}} \quad (4.4)$$

$$G = 6,67430 \times \frac{10^{-11} \text{ м}^3}{\text{кг}} \cdot \text{с}^2$$

$$M = 5,972 \times 10^{24} \text{ кг}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(6371000 + 550000)^3}{6667340 \times 10^{-11} \times 5,972 \times 10^{24}}} \approx 5730 \text{ секунд} = 95,5 \text{ минут}$$

4.5 Расчет энергопотребления

Потребляемая мощность каждого спутника:
 мощность, которую потребляет спутник $P = 50$ Вт, время $t = 24$ ч

$$E = P \times t = 50 \times 24 = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \quad (4.5)$$

4.6 Отношение сигнал/шум (SNR) в канале спутниковой связи

$$SNR = \frac{P_r}{N} = \frac{P_t \cdot G_r \cdot G_t \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot N} \quad (4.6)$$

P_r – принятая мощность сигнала на антенне приемника;
 P_t – передаваемая мощность сигнала с антенны передатчика;
 G_r, G_t — коэффициенты усиления передающей и принимающей антенн соответственно;
 λ^2 – длина волны радиосигнала;
 d – расстояние между антеннами;
 N – мощность шума в канале передачи.

Расстояние до спутника (орбита): 550 км
 Рабочая частота Ku-диапазона: 12 ГГц (значит, длина волны $\lambda \approx 0,025$ м
 Антенны с усилением (предположим, как в Starlink): 35 дБ $\rightarrow G_t = G_r = 3162$
 Мощность передатчика $P_t = 20$ Вт (реалистичное значение)
 Шумовая мощность $N = 10^{-13}$ Вт

$$SNR = \frac{20 \cdot 3162 \cdot 3162 \cdot 0,025}{(4\pi)^2 \cdot (550000)^2 \cdot 10^{-13}}$$

$$SNR_{dB} \approx 44,2 \text{ Дб}$$

Расчёт отношения сигнал/шум (SNR) показал очень хороший результат: 44 дБ, что соответствует качественной и надёжной спутниковой связи Starlink.

В целях верификации теоретических расчётов, приведённых выше, была выполнена программная реализация вычислений в среде MATLAB. Это позволило более точно определить параметры спутниковой системы и продемонстрировать возможности численного моделирования. В приложении А приведены основные фрагменты программного кода, использованного для расчёта. Проведённые численные расчёты подтвердили корректность теоретических формул и продемонстрировали применимость MATLAB для анализа параметров спутниковых систем связи.

В данной 4 главе были рассмотрены основные параметры спутниковой системы ССС Starlink были проанализированы на математической основе и рассчитаны с использованием специальных формул. Система демонстрирует высокую пропускную способность, зону покрытия, орбитальное время и энергоэффективность. Эти данные являются основой для инженерного анализа, проектирования и дальнейшей оптимизации систе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной дипломной работы была выполнена комплексная оценка спутниковой системы связи Starlink с учётом её архитектурных, технических и эксплуатационных характеристик. Основное внимание было уделено анализу структуры сети, конфигурации спутников, технологии передачи данных, а также перспективам развития и внедрения системы на глобальном уровне и в контексте Республики Казахстан.

Поставленные задачи исследования были успешно решены:

- обобщены и систематизированы ключевые технические характеристики спутников Starlink поколений 1.0, 1.5 и 2.0;
- произведён анализ орбитальных параметров, покрытий и параметров излучения, включая расчёт зон обслуживания и пропускной способности сети;
- рассмотрены принципы работы лазерной связи и протоколов передачи данных, обеспечивающих низкую задержку и высокую надёжность;
- дана количественная оценка эффективности системы в условиях реального развертывания, включая расчёты по зонам покрытия, времени орбитального прохождения, энергопотреблению и спектральной эффективности;
- выделены ограничения и риски, связанные с эксплуатацией сети, включая загрязнение околоземного пространства и влияние на астрономические наблюдения.

Результаты проведённого исследования подтвердили, что система Starlink представляет собой перспективную технологию для обеспечения широкополосного доступа в интернет, особенно в отдалённых и труднодоступных регионах. Возможность масштабируемого развертывания, низкая задержка сигнала и высокая пропускная способность позволяют рассматривать её как эффективное решение для устранения цифрового неравенства и поддержки устойчивой телекоммуникационной инфраструктуры в условиях кризисных ситуаций.

Научная новизна работы выражается в уточнении архитектурных моделей и параметров связи в условиях массового размещения спутников на низких орбитах, а также в систематизации преимуществ и ограничений Starlink как инженерной системы. Практическая значимость подтверждается актуальностью применения таких систем в рамках цифровизации экономики и телекоммуникационного суверенитета государств. В дальнейшем перспективными направлениями являются анализ взаимодействия Starlink с наземными мобильными сетями (включая 5G), оптимизация распределения трафика в мультиспутниковых системах и изучение правовых аспектов транснационального использования космической инфраструктуры.

Перечень сокращений

- КА – Космический аппарат
- ССС – Система спутниковой связи
- ФАР – Фазированная антенная решётка
- ФСС – Фидерная спутниковая сеть
- Ku/Ka/E – Частотные диапазоны Ku (12–18 ГГц), Ka (26–40 ГГц), E (71–86 ГГц)
- L2 – Второй уровень протокола передачи
- TDMA – Time Division Multiple Access (множественный доступ с временным разделением)
- FDMA – Frequency Division Multiple Access (множественный доступ с частотным разделением)
- CDMA – Code Division Multiple Access (множественный доступ с кодовым разделением)
- RTT – Round Trip Time (время прохождения сигнала туда и обратно)
- QPSK/APSK – Методы модуляции сигнала
- MLS – Межспутниковая лазерная связь
- OSB – Бортовая обработка сигнала
- РоP – Point of Presence (точка присутствия)
- GC – Gateway Center (шлюзовой центр)
- AT – Абонентский терминал
- SS – Шлюзовая станция
- LISL – Laser Inter-Satellite Link (лазерная межспутниковая связь)

Перечень терминов

Орбитальная группировка – совокупность спутников, размещённых на определённых орбитах с целью покрытия поверхности Земли.

Абонентский терминал (АТ) – устройство на стороне пользователя, обеспечивающее приём и передачу данных между спутником и пользователем.

Фазированная антенная решётка (ФАР) – тип антенны, которая формирует луч сигнала электронным способом, без механического поворота.

Шлюзовая станция (SS) – наземная станция, соединяющая спутниковую сеть с глобальной интернет-инфраструктурой.

Межспутниковая лазерная связь (MLS) – технология передачи данных напрямую между спутниками с использованием лазера.

Пропускная способность – максимальный объём данных, который может быть передан за единицу времени через определённый канал связи.

Диаграмма направленности – характеристика антенны, определяющая распределение мощности сигнала в пространстве.

Зона покрытия (ячейка) – участок поверхности Земли, который может быть обслужен одним спутником в определённый момент.

Спектральная эффективность – количество информации, передаваемой в одном герце частоты за секунду.

Фидерный канал – канал связи между спутником и шлюзовой станцией.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Буйдинов Е. В., Кузовкова Т. А., Шаравова О. А. Методика и результаты оценки внешней эффективности развития инфраструктуры спутниковой связи на основе метода экстерналий // Электросвязь. – 2018. – № 4. – С. 29–33. – DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2022-04/07-Pehterev.pdf> (дата обращения: 15.03.2025).
- 2 Кузовкова Т. А., Кузовков Д. В., Шаравова О. И. Методические особенности комплексной оценки эффективности инфраструктурных проектов развития спутниковой связи // Век качества. – 2017. – № 1. – С. 97–109.
- 3 Аджемов А. С., Буйдинов Е. В., Кузовкова Т. А. Применение интегральной модели для оценки эффективности построения системы спутниковой связи // Электросвязь. – 2016. – № 4. – С. 25–29.
- 4 Пехтерев С. Энциклопедия StarLink // CommNews [Электронный ресурс]. – 07.10.2020. – URL: <https://www.comnews.ru/content/209438/2020-10-07/2020-w41/enciklopediya-starlink> (дата обращения: 15.03.2025).
- 5 Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 1 // Хабр [Электронный ресурс]. – 02.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/526154/> (дата обращения: 15.03.2025).
- 6 Musk E. Starlink: Delivering Broadband Internet to the World. – SpaceX Technical Report, 2019.
- 7 ITU-R S.1503-3. Technical and operational requirements for non-geostationary satellite systems. – Geneva: ITU, 2021.
- 8 MIL-STD-188-164C. Interoperability Standard for Satellite Communications. – United States Department of Defense, 2020.
- 9 IEEE 802.11ac-2021. Standard for Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications. – IEEE Standards Association, 2021.
- 10 Ka-band Satellite Communication Systems // Journal of Space Communications. – 2022. – Vol. 35, No. 2.
- 11 SpaceX Official Website. Starlink Technical Overview [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.spacex.com/starlink> (дата обращения: 15.03.2025).
- 12 Federal Communications Commission (FCC). Regulatory Framework for Low Earth Orbit Satellite Networks. – Washington D.C., 2021.
- 13 Amazon Kuiper Project. Technical White Paper [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.aboutamazon.com/kuiper> (дата обращения: 15.03.2025).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчёт ключевых параметров спутниковой системы Starlink в MATLAB

```
%% Расчёт параметров спутниковой системы Starlink
clc; clear;
%% 1. Константы
G = 6.67430e-11;           % Гравитационная постоянная, м^3/(кг·с^2)
M = 5.972e24;             % Масса Земли, кг
R_earth = 6371000;        % Радиус Земли, м
h = 550000;               % Высота орбиты спутника, м
theta_deg = 25;           % Угол направленности антенны, градусов
theta_rad = deg2rad(theta_deg); % Угол в радианах
%% 2. Время орбитального обращения спутника
T_sec = 2 * pi * sqrt(((R_earth + h)^3) / (G * M)); % время в
секундах
T_min = T_sec / 60; % в минутах
fprintf('Время орбитального обращения: %.2f минут\n', T_min);
%% 3. Расчёт радиуса зоны покрытия
R_coverage = h * tan(theta_rad); % в метрах
R_km = R_coverage / 1000;
fprintf('Радиус зоны покрытия (при  $\theta = %d^\circ$ ): %.2f км\n', theta_deg,
R_km);
%% 4. Пропускная способность
B_up = 500e6;             % Восходящая полоса частот, Гц
eta_up = 3.5;             % Спектральная эффективность, бит/Гц
B_down = 2000e6;         % Нисходящая полоса частот, Гц
eta_down = 5.5;          % Спектральная эффективность, бит/Гц
C_up = B_up * eta_up;     % бит/с
C_down = B_down * eta_down; % бит/с
fprintf('Пропускная способность (uplink): %.2f Гбит/с\n', C_up /
1e9);
fprintf('Пропускная способность (downlink): %.2f Гбит/с\n', C_down /
1e9);
%% 5. Энергопотребление спутника
P = 50;                   % Мощность, Вт
t_hours = 24;             % Время, ч
E = P * t_hours; % Вт·ч
fprintf('Суточное энергопотребление спутника: %.0f Вт·ч\n', E
```

На графике представлена пропускная способность спутниковой системы Starlink:

Uplink (восходящая линия): 1.75 Гбит/с
Downlink (нисходящая линия): 11.0 Гбит/с

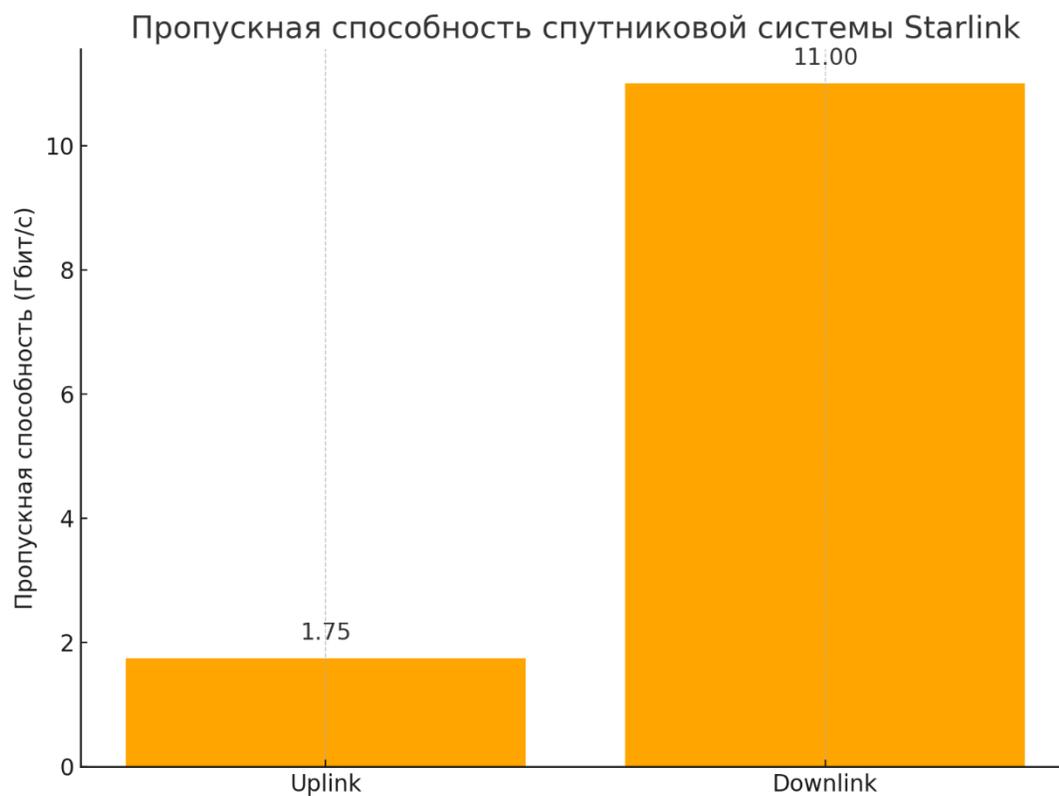


Рисунок - 4.1 - Сравнительный график пропускной способности восходящей и нисходящей линий связи в системе Starlink

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

На дипломную работу

Телеупова Дильназ Шавхатовна

6B06201-Телекоммуникации

Тема: «Проектирование спутниковой системы Starlink»

Данная дипломная работа студента, выполненная на тему «Проектирование спутниковой системы Starlink», является актуальной и перспективной в области космических телекоммуникационных технологий. В работе рассмотрены принципы построения и функционирования спутниковых систем связи на низкой околоземной орбите, проанализированы архитектура и особенности системы Starlink, предложены подходы к моделированию и оптимизации конфигурации спутниковой группировки.

Студент показал хороший уровень теоретической подготовки, владение современными методами инженерного анализа и уверенные навыки работы с прикладным программным обеспечением. В дипломной работе выбраны космические и наземные средства CCC Starlink. Следует отметить самостоятельность студента при выполнении ключевых этапов проекта: от постановки задач до проведения расчетов и анализа результатов. Представленные в работе материалы подтверждают готовность выпускника к профессиональной деятельности в области проектирования космических и телекоммуникационных систем.

В расчётной части рассчитаны основные параметры CCC Starlink. Работа выполнена на хорошем уровне, соответствует требованиям, предъявляемым к ДР, и заслуживает оценки «хорошо» 75 /В-/ , а студент, Телеупова Дильназ, заслуживает получения академической степени бакалавра информационных и коммуникационных технологий по образовательной программе 6B06201-«Телекоммуникация».

Научный руководитель

Старший преподаватель кафедры ЭТиКТ

(должность, уч. степень, звание)

 Джунусов Н.А.

(подпись)

« 30 » мая 2025 г.



РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Телеупова Дильназ Шавхатовна

6B06201 – Телекоммуникация

Тема: «Проектирование спутниковой системы Starlink»

Выполнено:

а) разделов в дипломе: 4

б) страниц в дипломе: 48

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Некоторые разделы могли бы быть дополнены более подробными выводами, что улучшило бы обобщение представленного материала.

Оценка работы

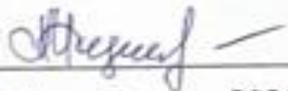
Дипломная работа Телеуповой Дильназ Шавхатовны посвящена разработке и анализу параметров глобальной спутниковой системы Starlink. В работе рассмотрены технические характеристики спутников, структура орбитальной группировки, особенности фазированной антенной решётки, а также проведены инженерные расчёты таких параметров, как пропускная способность, зона покрытия, радиус действия и время обращения спутников.

Автор грамотно использует математический аппарат, применяет программные средства (в том числе MATLAB) и демонстрирует высокий уровень подготовки в области телекоммуникационных систем.

Дипломная работа оценена на «отлично» (А, 90%), а студент(ка) Телеупова Дильназ Шавхатовна рекомендована к присвоению академической степени бакалавра информационных и коммуникационных технологий по образовательной программе 6B06201 «Телекоммуникация».

Рецензент

К.ф.м.н., профессор
НАО АУЭС имени Г.Даукеева
Академик МАИН


Хизирова М.А.
"29" 05 2025 г.



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Телеупова Дильназ Шавхатовна

Тақырыбы: Проектирование спутниковой системы Starlink

Жетекшісі: Нуридин Джунусов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 4.2

2-ұқсастық коэффициенті (5): 1.4

Дәйексөз (35): 0.5

Әріптерді ауыстыру: 2

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 5

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

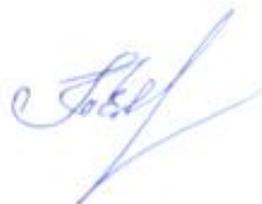
Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2025-05-24

Күні



Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Телеупова Дильназ Шавхатовна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Проектирование спутниковой системы Starlink

Научный руководитель: Нуридин Джунусов

Коэффициент Подобия 1: 4.2

Коэффициент Подобия 2: 1.4

Микропробелы: 5

Знаки из других алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2025-05-24

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Телеупова Дильназ Шавхатовна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Проектирование спутниковой системы Starlink

Научный руководитель: Нуридин Джунусов

Коэффициент Подобия 1: 4.2

Коэффициент Подобия 2: 1.4

Микропробелы: 5

Знаки из других алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2025-05-24

Дата



Сүңгат Марксұлы

проверяющий эксперт