

УДК 629.78

## Описательная модель системы спутниковой связи Starlink

Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А.

**Актуальность.** Обеспечение услугами доступа в сеть Интернет с высокой скоростью и с приемлемой задержкой требует создания многоспутниковых низкоорбитальных систем спутниковой связи (ССС). В настоящее время в России разрабатывается несколько проектов таких СССР, например, проекты «Скиф», «Марафон» и «Мегафон-1440». При этом, обоснование технических решений для этих СССР требует формирования исходных данных для моделирования различных вариантов организации связи. Для формирования таких исходных данных может быть использована другая технологически развитая многоспутниковая система – Starlink, которая может рассматриваться как прототип СССР. **Целью работы** является формирование описательной модели СССР Starlink. Данная описательная модель может использоваться для разработки исходных данных при моделировании связанных процессов в отечественных многоспутниковых низкоорбитальных СССР в интересах научно-обоснованного выбора принципов организации связи в ней. Для разработки описательной модели СССР Starlink были использованы только открытые источники. **Результаты и их новизна.** Элементом практической новизны работы являются выявленные общие технологические особенности построения многоспутниковых низкоорбитальных СССР на примере системы Starlink. В частности, описаны общие закономерности формирования орбитальной группировки на основе космических аппаратов различных типов, принципы каналаообразования в абонентских и фидерных линиях «вверх» и «вниз», особенности реализации абонентских терминалов и шлюзовых станций. **Практическая значимость.** Представленная в работе описательная модель будет полезна техническим специалистам для обоснования новых технологических решений для отечественных многоспутниковых низкоорбитальных СССР. Кроме того, данная модель будет полезна научным работникам и соискателям, ведущим научные исследования в области спутниковой связи.

**Ключевые слова:** модель, описательная модель, система спутниковой связи, многоспутниковая низкоорбитальная система спутниковой связи, Старлинк, Starlink, SpaceX.

### Введение

В настоящее время в различных областях экономики важным является использование систем спутниковой связи (ССС), имеющих глобальные зоны покрытия Земли. Высокая экономическая значимость данных СССР подтверждается работами [1-3]. При этом, особое значение приобретают многоспутниковые низкоорбитальные СССР, способные не только обеспечить связью абонентов на всей поверхности Земли (в том числе и в приполярных районах), но и высокоскоростную связь с низкой задержкой, что является критически важным для доступа к современным мультимедийным информационным ресурсам в сети Интернет. В 2015 г. американская компания SpaceX, возглавляемая И. Маском, представила революционный проект обеспечения доступом в сеть Интернет всех жителей Земли на основе многоспутниковой низкоорбитальной СССР

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190-255. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255

#### Reference for citation:

Pehterev S. V., Makarenko S. I., Kovalsky A. A. Descriptive Model of Starlink Satellite Communication System. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 4, pp. 190-255 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255

Starlink собственной разработки. Несмотря на первоначальное скептическое отношение большинства экспертов космической отрасли к проекту Starlink, уже в начале 2018 г. компанией SpaceX были запущены первые тестовые космические аппараты (КА), а с 2020 г. CCC Starlink перешла в режим тестовой эксплуатации. Необходимо отметить что в CCC Starlink применяется множество передовых технологических решений, ранее не применявшихся в космической связи, что делает актуальным рассмотрение этой CCC как передового прототипа других перспективных многоспутниковых низкоорбитальных CCC, разрабатываемых как в нашей стране, так и за рубежом. К числу таких проектов можно отнести новое поколение отечественной CCC «Гонец», а также CCC, разрабатываемые в рамках проектов «Скиф», «Марафон» и «Мегафон-1440». К зарубежным проектам многоспутниковых низкоорбитальных CCC можно отнести OneWeb и ORBCOMM.

Целью статьи является разработка описательной модели CCC Starlink в интересах формирования исходных данных для моделирования связанных процессов и обзора новых технологических решений в перспективных проектах отечественных многоспутниковых низкоорбитальных CCC, прототипом которых может служить CCC Starlink.

Описательная модель сформирована на основе работ [4-19] и дополнена материалом работ [20, 21, 29-37]. По своей сути, данная статья продолжает цикл публикаций авторов [4, 5, 22-27], посвященных формированию описательных моделей систем связи специального назначения [22-24], а также описательных моделей CCC [4, 5, 25-27].

Ввиду объемности, материал статьи был декомпозирован на ряд подразделов:

1. Общая информация о CCC Starlink.
  - 1.1. Ретроспективный анализ процессов проектирования и развертывания CCC Starlink.
  - 1.2. Орбитальная группировка CCC Starlink.
  - 1.3. Обзор спутниковой платформы КА Starlink и бортового оборудования.
    - 1.3.1. КА Starlink версии 0.9.
    - 1.3.2. КА Starlink версии 1.0.
    - 1.3.3. КА Starlink версии 1.5.
    - 1.3.4. КА Starlink версии 2.0 (Generation 2).
    - 1.3.5. Стоимость КА Starlink.
    - 1.3.6. Надежность КА Starlink.
  - 1.4. Архитектура CCC Starlink.
  - 1.5. Проблемные вопросы использования CCC Starlink.
    - 1.5.1. Проблемы астрономических наблюдений.
    - 1.5.2. Проблемы загрязнения космического пространства.
  - 1.6. Возможности военного использования CCC Starlink.
2. Организации связи в CCC Starlink.
  - 2.1. Краткая характеристика бортового связного оборудования КА Starlink.

- 2.2. Частотный план CCC Starlink.
- 2.3. Особенности организации связи в абонентских линиях.
- 2.4. Особенности организации связи в фидерных линиях.
- 2.5. Особенности организации связи в лазерных МЛС.
- 2.6. Оценка пропускной способности КА Starlink.
- 2.7. Качество обслуживания в CCC Starlink.
- 3. Наземные средства CCC Starlink.
  - 3.1. Абонентские терминалы.
  - 3.2. Средства связи шлюзовых станций (ШС).
  - 3.3. Система управления.
- 4. Промежуточные итоги и перспективы развития CCC Starlink.

## **1. Общая информация о CCC Starlink**

### **1.1. Ретроспективный анализ процессов проектирования и развертывания CCC Starlink**

Ретроспективный анализ процессов проектирования и развертывания CCC Starlink представлен на основе обобщения данных из материалов [4-6, 20, 21, 29].

При старте проекта CCC Starlink в январе 2015 г., компанией SpaceX была заявлена цель обеспечения высокоскоростным широкополосным спутниковым доступом в Интернет в местах Земли, где он был ненадёжным, дорогим или полностью недоступным. При этом предполагалось что примерно 10% местного трафика и 50% междугородного и международного интернет трафика будет передаваться через CCC Starlink, при относительно дешёвой стоимости абонентских терминалов (АТ) (примерно 100-300\$) и приемлемой цене на услуги связи.

В ноябре 2016 г. компания SpaceX подала заявку в Федеральную комиссию по связи США – FCC (Federal Communications Commission) на размещение 4425 КА связи на орбитах высотой 1150-1325 км, обеспечивающим высокоскоростной доступ в сеть Интернет с использованием Ku (10,7-18 ГГц) и Ka (26,5-40 ГГц) диапазонов. Услуги связи предполагалось предоставлять уже после выведения первых 800 КА, при этом масса каждого КА должна была составить 386 кг.

В феврале 2018 г. с помощью ракеты-носителя (РН) Falcon 9 FT, компания SpaceX вывела на орбиту 2 экспериментальных КА Tintin-A и Tintin-B, предназначенных для практической отработки спутниковой платформы и технологий связи в будущей CCC Starlink.

В марте 2018 г. FCC одобрила заявку SpaceX на создание, развёртывание и эксплуатацию орбитальной группировки (ОГ) из 4425 КА на низкой околоземной орбите для предоставления широкополосного доступа в Интернет абонентам в США и в остальном мире. Согласно правилам FCC, вся ОГ должна быть развернута за 9 лет, при этом по меньшей мере 50% КА должны быть запущены и начать эксплуатацию в течение 6 лет с момента одобрения заявки. В случае несоблюдения этого требования комиссия имеет право ограничить вели-

чину ОГ только теми КА, которые были запущены до истечения указанного срока.

В апреле 2019 г. FCC одобрила запрос SpaceX на снижение высоты орбиты для 1584 КА, работающих в Ku и Ka диапазонах, с первоначальных 1150 км до 550 км. Эти КА будут размещены в 24 орбитальных плоскостях с наклоном орбиты  $53^\circ$ . Согласно заявлению SpaceX, снижение высоты орбиты позволит ускорить процесс развертывания ОГ и снизить количество КА, с одновременным снижением задержки прохождения сигнала (до 15 мс), а также снизить вероятность появления космического мусора, т.к. в случае неполадок двигательной установки КА он неуправляемо сойдёт с орбиты и сгорит в атмосфере значительно быстрее – в течение максимум 5 лет. Общее планируемое количество КА, работающих в Ka и Ku диапазонах, в составе ОГ снизилось до 4409.

В мае 2019 г. компания SpaceX вывела 60 тестовых КА Starlink (версии 0.9) на околоземную орбиту высотой 550 км с наклоном  $53,2^\circ$ . Эти КА были предназначены для отработки схемы компоновки платформы КА, тестирования процессов выведения и отделения КА, размещения их на орбите, свода с орбиты, а также подтверждения работоспособности проектных и технологических решений. В данных КА отсутствовала система межспутниковой связи, они поддерживали связь исключительно с земными станциями (ЗС) – имитаторами АТ, работающими только в Ku диапазоне. После запуска 57 из 60 КА успешно вышли на связь и отработали программу тестовых испытаний. В мае 2022 г. эти 57 тестовых КА были сведены с орбиты в атмосферу Земли для «уменьшения засорения орбиты».

В сентябре 2019 г. компания SpaceX подала заявку в FCC на увеличение количества орбитальных плоскостей с 24 до 72 для КА на высоте 550 км. Каждый запуск должен будет выводить КА сразу в 3 орбитальные плоскости, при этом в каждой плоскости будет располагаться по 22 КА. Эта заявка была одобрена FCC в декабре 2019 г.

В октябре 2019 г. компания SpaceX подала в FCC еще 20 заявок на размещение суммарно порядка 30 000 дополнительных КА Starlink версии 2.0 для работы на орбитах с высотой 328-614 км.

В ноябре 2019 г. компания SpaceX приступила к первой фазе развертывания ОГ CCC Starlink путем заполнения околоземной орбиты на высоте 550 км с наклоном  $53^\circ$  выведя первые рабочие 60 КА Starlink версии 1.0. КА версии 1.0 относительно тестовых КА получили ряд улучшений: пропускная способность КА была увеличена на 400%; удвоено количество лучей, формируемых бортовой фазированной антенной решеткой (ФАР); добавлено приемопередающее оборудование Ka диапазона; обеспечено 100%-сгорание КА в атмосфере при его сходе с орбиты после завершения эксплуатации. Масса КА составила 260 кг. КА первоначально были выведены на орбиту высотой 280 км, откуда они будут подниматься в свои орбитальные плоскости на высоте 550 км используя электрические ракетные двигатели (ЭРД), работающие на эффекте Холла, с использованием криптона в качестве рабочего тела.



В 2020 г. выводимые КА Starlink получили ряд улучшений, направленных на снижение оптической заметности КА для астрономических наблюдений. В частности, было использовано тёмное покрытие КА и затемняющий козырёк.

В марте 2020 г. компания SpaceX получила лицензию на использование 1 млн пользовательских АТ для связи с КА Starlink. В дальнейшем, уже в августе 2020 г. SpaceX обратилась в FCC с просьбой расширить разрешение на количество АТ до 5 млн, обосновав это тем, что к ее системе проявлен огромный интерес и компания получила огромное количество заявок на подключение к CCC Starlink.

В апреле 2020 г. в комиссию FCC была подана заявка компании SpaceX на изменение высоты орбиты оставшихся 2824 КА первой фазы ОГ. Вместо орбит на высоте 1100-1325 км с наклонениями 53,8°, 70°, 74° и 81° компания SpaceX планирует размещать ОГ КА на высоте 540-570 км с наклонениями орбит 53,2°, 70° и 97,6°. В новой заявке SpaceX упомянуто уже 4408 КА, т.е. на один КА меньше, чем указывалось в предыдущей заявке.

В период с ноября 2019 г. по май 2021 г. обеспечено заполнение орбиты на высоте 550 км с наклонением 53,8°. В среднем, компания SpaceX, путем использования многоразовой РН Falcon 9 FT, обеспечила в этот период интенсивность наращивания ОГ примерно 120 КА в месяц. По заявлению SpaceX средний темп производства спутников составил 6 КА в сутки.

В августе 2020 г. компания SpaceX попросила FCC внести изменения в свою заявку по конфигурации ОГ ранее поданную в октябре 2019 г. В этой заявке SpaceX указало на следующий этап развертывания ОГ, получивший наименование Generation 2, направленный на дополнительный вывод почти 30 000 КА. В новой версии заявки SpaceX представила 2 возможные конфигурации ОГ, состоящих из КА версии 2.0, дополнительно использующих Е диапазон (60-90 ГГц) на частотах 71-79 ГГц и 81-86 ГГц. Первая конфигурация ОГ, более предпочтительная для SpaceX, предполагает размещение 29 988 КА на высотах 340-614 км, в 9 орбитальных плоскостях разного наклонения. Эта конфигурация ОГ основывается на выведении КА с помощью полностью многоразовой сверх-тяжелой РН Starship (Super Heavy), в настоящее время всё еще разрабатываемой SpaceX, что позволит сразу выводить КА ближе к их рабочим орбитам и вводить их в эксплуатацию значительно быстрее. Вторая конфигурация ОГ предполагает выведение КА с помощью РН Falcon 9 FT (в случае задержек в разработке РН Starship) и состоит из 29 996 КА на высотах 328-614 км в 12 орбитальных плоскостях разного наклонения. В дальнейшем, в письме SpaceX в FCC от января 2022 г. было озвучено решение компании сосредоточиться на 1-й конфигурации ОГ CCC в связи с хорошим прогрессом в разработке как самих КА версии 2.0 (Gen2 или Generation 2), так и в разработке РН Starship.

В сентябре 2020 г. компания SpaceX сообщила, что на начальных стадиях тестирования качества услуг связи были продемонстрированы низкая задержка сигнала и скорость передачи в канале «КА–АТ» более 100 Мбит/с.

В это же время были проведены первые тесты по организации передачи данных между КА с использованием лазерной межспутниковой линии связи (МЛС).

В октябре 2020 г. компания SpaceX начало публичное бета-тестирование предоставления услуг связи CCC Starlink. Пользователям из США, которые выразили желание участвовать в этом тестировании, были предложены АТ Starlink, стоимостью 499\$ долларов, с ежемесячным платежом за услуги связи в размере 99\$ (без учета налогов). В рамках услуг связи обеспечивается скорость доступа в Интернет до 500 Мбит/с (при отсутствии других абонентов в этой ячейке) без ограничения объема трафика с задержкой 20-40 мс.

В январе 2021 г. комиссия FCC разрешила SpaceX вывести 10 КА Starlink на полярную орбиту высотой 560 км с наклоном 97,6°. Это позволит CCC предоставить услуги в полярных районах северного полушария, в частности на территории Аляски. Тогда же компания SpaceX начало заполнение этой орбиты вывев на нее первые КА.

В апреле 2021 г. комиссия FCC одобрила запрос SpaceX на снижение высоты орбиты оставшихся 2814 КА первой фазы ОГ с 1100-1300 км до 540-570 км.

В июне 2021 г. компания SpaceX объявила, что число постоянных подписчиков на услуги связи CCC Starlink достигла 10 000 пользователей.

В этом же месяце начато заполнение КА орбиты на высоте 560 км с наклоном 97,6°.

В сентябре 2021 г. впервые на орбиту с высотой 570 км с наклоном 70° был выведен 51 КА Starlink версии 1.5. Вес КА Starlink версии 1.5 составил 295 кг. Отличительной особенностью КА этого поколения является наличие штатного оборудования лазерной МЛС для организации высокоскоростной связи между КА при этом SpaceX не раскрывает технических деталей функционирования лазерных МЛС. Запуск этих КА также положил начало заполнению орбиты на высоте 570 км с наклоном 70°.

В этом же месяце крупнейший оператор сотовой связи Японии KDDI объявил о начале сотрудничества со SpaceX в вопросе использования АТ Starlink для ретрансляции данных с 1200 удаленных вышек сотовой связи в сельской местности.

В ноябре 2021 г. начато заполнение орбиты на высоте 550 км с наклоном 53,2°.

В феврале 2022 г. компания SpaceX представила пакет более скоростной услуги связи – Starlink Business. В рамках этого пакета предлагается АТ с более крупной антенной, обеспечивающий скорость связи 150-500 Мбит/с. Стоимость такого АТ составляет 2500\$, а ежемесячная плата за услуги связи – 500\$.

В марте 2022 г. компания SpaceX объявила, что число постоянных подписчиков на услуги связи CCC Starlink достигла 250 000 пользователей.

В июне 2022 г. компания SpaceX объявила, что число постоянных подписчиков на услуги связи CCC Starlink достигла 500 000 пользователей. В этом же месяце комиссия FCC одобрила оказание услуг связи CCC Starlink для лодок, самолетов и движущихся транспортных средств. Компания SpaceX плани-

рует предоставить услуги связи CCC Starlink на рейсах самолетов, морских и речных судов.

В августе 2022 г. SpaceX объявила о совместной с компанией мобильной связи T-Mobile разработке, направленной на встраивание в сотовые телефоны возможности по предоставлению услуг спутниковой связи Starlink в зонах со слабым или отсутствующим сигналом наземной сотовой сети. T-Mobile предполагает использовать разрабатываемый функционал на сотовые сети по всему миру, если операторы сотовой связи в других странах захотят обменяться услугами роуминга в рамках партнерства T-Mobile и SpaceX. Для этого, возможно, на КА Starlink будет установлен дополнительный комплект оборудования PCS (personal communications service) предположительно стандарта IMT-2000. Пропускная способность разрабатываемого решения будет ограничена скоростью от 2 до 4 Мбит/с, 1000-2000 голосовыми вызовами и 1 млн коротких текстовых сообщений в зоне, но будет работать со стандартными сотовыми телефонами. Размер такой зоны покрытия не уточнялся. Планируемый срок начала предоставления услуг связи – 2023 г.

В сентябре 2022 г. компания SpaceX объявила, что число постоянных подписчиков на услуги связи CCC Starlink достигла 700 000 пользователей.

По состоянию на 11 сентября 2022 г. CCC Starlink находится в процессе формирования ОГ: выведено 3293 КА, сведено с орбиты 301 КА, находится на орбите 3025 КА, из них в рабочих, штатно функционирующих – 2990 КА. Ведется опытная эксплуатация CCC Starlink путем предоставления пользователям услуг связи в режиме бета-тестирования. Количество постоянных подписчиков на услуги связи CCC Starlink превышает 500 000 пользователей. Услуги связи CCC Starlink обеспечиваются в 40 странах (в том числе в США, Канаде, Австралии, Бразилии, большинстве стран ЕС), в большом количестве стран заявки на предоставление услуг связи ожидают одобрения национальных регулирующих органов.

## 1.2. Орбитальная группировка CCC Starlink

По состоянию на сентябрь 2022 г. компания SpaceX частично провела только 1-ю фазу развертывания ОГ CCC Starlink. Общий планируемый состав ОГ CCC Starlink в соответствии с последней заявкой SpaceX в FCC от 17 апреля 2020 г. (заявка одобрена FCC 27 апреля 2021 г.) представлен в таблице 1. В соответствии с этой заявкой ОГ CCC Starlink состоит из следующих подсистем [4-6, 29]:

- КА версий 1.0 и 1.5, работающих в Ku (10,7-12,7 и 14-14,5 ГГц) и Ka (17,8-19,3 и 27,5-30 ГГц) диапазонах, в количестве 4408 шт. развертываемые в рамках 1-й фазы формирования ОГ CCC на высотах 540-570 км с наклонениями орбит 53°, 53,2°, 70° и 97,6°;
- КА версии 1.5 (и возможно 2.0), развертываемые в количестве 7518 шт. на высоте 345-570 км в рамках 2-й фазы формирования ОГ CCC;

- КА версии 2.0, работающих в Е диапазоне (71-79 ГГц и 81-86 ГГц), развертываемые в количестве 29 988 шт. на высоте 345-570 км в рамках фазы Generation 2, завершающей формирование ОГ CCC Starlink.

Текущее состояние развертывания ОГ CCC Starlink по состоянию на 5 сентября 2022 г. представлено в таблице 2. Вид различных групп КА 1-го этапа развертывания ОГ приведен на рис. 1 (КА разных групп показаны различным цветом).

Таблица 1 – Общий планируемый состав ОГ CCC Starlink в соответствии с заявкой SpaceX в FCC от 17 апреля 2020 г. (заявка одобрена FCC 27 апреля 2021 г.) [29]

Фаза развертывания ОГ	Обозначение группы КА в составе ОГ	Высота	Наклонение	Орбитальных плоскостей	Кол-во КА в плоскости	Всего КА на сфере в данной группе	Время завершения развертывания	
							Половины группы	Всей группы
1	Group 1	550 км	53°	72	22	1584	март 2022 г.	март 2027 г.
	Group 2	570 км	70°	36	20	720	март 2022 г.	март 2027 г.
	Group 3	560 км	97,6°	6	58	348	март 2022 г.	март 2027 г.
	Group 4	540 км	53,2°	72	22	1584	март 2022 г.	март 2027 г.
	Group 5	560 км	97,6°	4	43	172	март 2022 г.	март 2027 г.
	Всего в составе 1-й фазы ОГ					4408		
2	–	335,9 км	42°	–	–	2493	ноябрь 2024 г.	ноябрь 2027 г.
	–	340,8 км	48°	–	–	2478	ноябрь 2024 г.	ноябрь 2027 г.
	–	345,6 км	53°	–	–	2547	ноябрь 2024 г.	ноябрь 2027 г.
	Всего в составе 2-й фазы ОГ					7518		
Generation 2 (1-й вариант конфигурации ОГ)	–	340	53°	48	110	5280	август 2029 г.	август 2029 г.
	–	345	46°	48	110	5280		
	–	350	38°	48	110	5280		
	–	360	96,9°	30	120	3600		
	–	525	53°	28	120	3360		
	–	530	43°	28	120	3360		
	–	535	33°	28	120	3360		
	–	604	148°	12	12	144		
	–	614	115,7°	18	18	324		
	Всего в составе Generation 2					29 988		



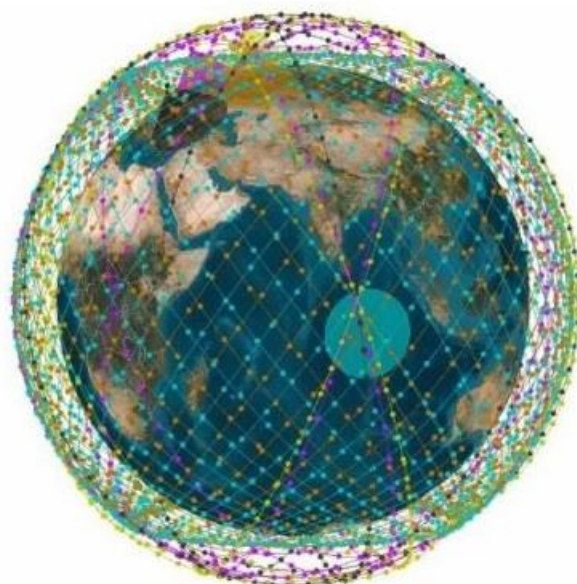


Рис. 1. ОГ CCC Starlink  
1-го этапа развертывания [5]

Таблица 2 – Текущее состояние развертывания ОГ CCC Starlink  
по состоянию на 5 сентября 2022 г. [29]

Фаза развертывания ОГ	Обозначение группы КА в составе ОГ	Высота	Наклонение	Планируемое число КА в группе	Кол-во запущенных и работоспособных КА	Кол-во сведенных с орбиты или отказавших КА	Процент укомплектованн ости группы
1	Group 1	550 км	53°	1584	1488	237	93%
	Group 2	570 км	70°	720	50	1	7%
	Group 3	560 км	97,6°	348	187	10	53%
	Group 4	540 км	53,2°	1584	1318	52	83%
	Group 5	560 км	97,6°	172	0	—	0%
	Всего в составе 1-й фазы			4408	3043	300	69%

Анализируя таблицы 1 и 2 можно сделать вывод что 1-я фаза развертывания ОГ CCC Starlink завершена на 69%. Остальные фазы находятся в относительных планах.

Отметим, что заявка по 2-й фазе развертывания ОГ (7518 КА на орбитах с высотой 335-345 км) была подана SpaceX в FCC и одобрена последней в ноябре 2018 г., а заявка на развертывание Generation 2 – в августе 2020 г.

Согласно резолюции 35 Всемирной конференции радиосвязи 2019 г. (ВКР-19) и правил FCC в редакции 2017 г., операторы негеостационарных CCC 50% ОГ должны развернуть в течении 6 лет, а всю ОГ – в течении 9 лет [29].

Таким, образом, для выполнения этих правил компании SpaceX нужно завершить 2-ю фазу развертывания ОГ к ноябрю 2027 г., а развертывание всей ОГ – в течение 7 лет после получения лицензии на развертывание этой ОГ.

### 1.3. Обзор спутниковой платформы КА Starlink и бортового оборудования

Компоновка КА Starlink максимально адаптирована для их удешевления, массового производства и «пачечного» запуска. Во время запуска под обтекателем РН Falcon 9 FT размещается одновременно 60 КА – две стопки по 30 КА (рис. 2). Сам КА представляет собой «плоский» параллелепипед с ориентировочными размерами  $3,2 \times 1,6 \times 0,2$  м.

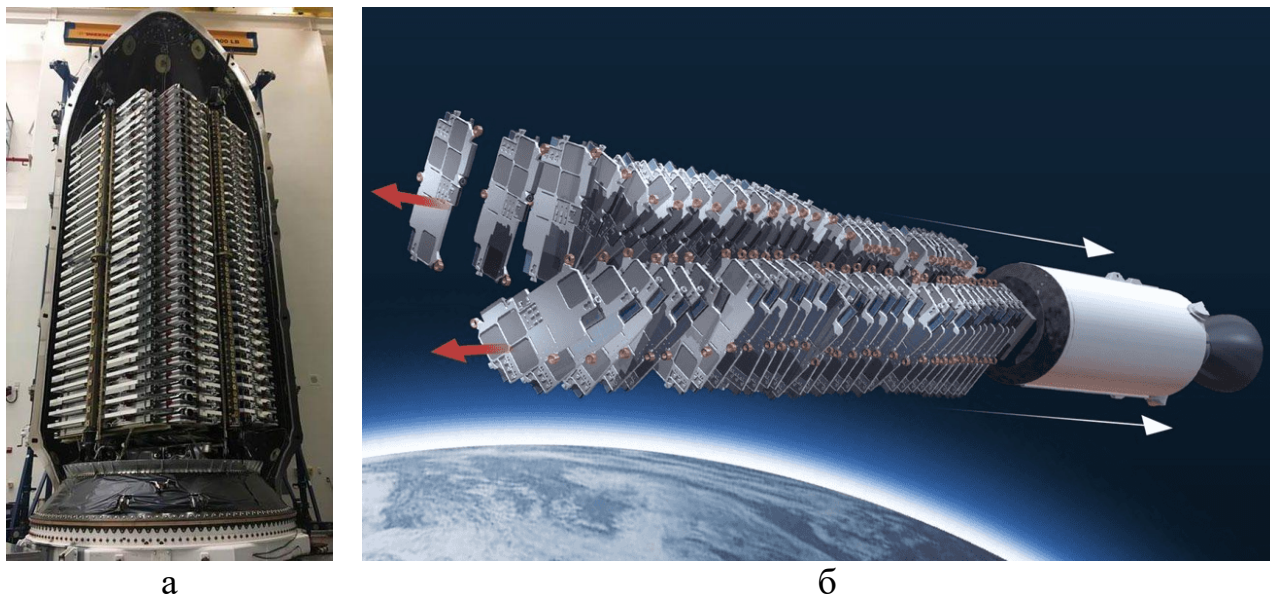
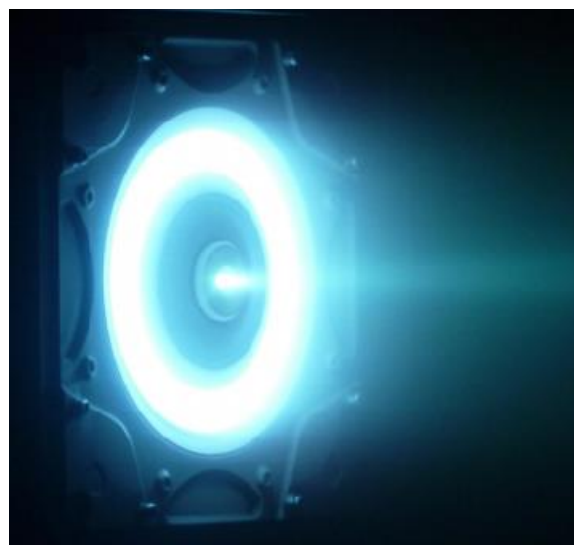
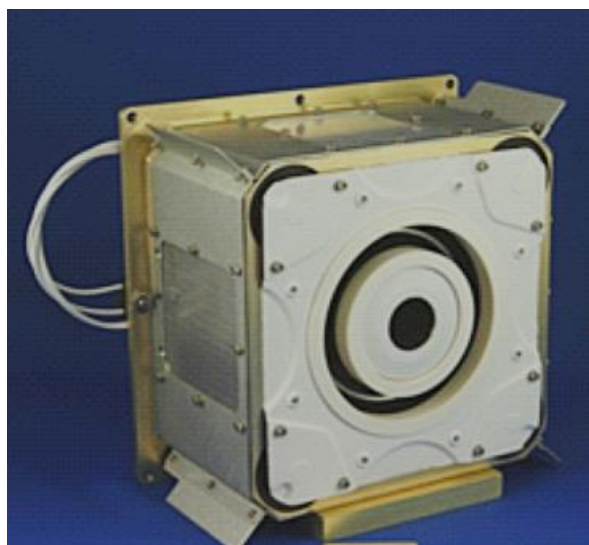


Рис. 2. Компоновка КА Starlink при запуске: а – положение под обтекателем РН; б – разведение КА при выводе на околоземную орбиту [5, 7]

Солнечные батареи КА при запуске сложены «гармошкой» и имеют 12 сегментов, где длинная сторона каждого сегмента равна ширине спутника (3,2 м). При приблизительном размере  $3 \times 0,8$  м каждого сегмента примерная общая площадь солнечной батареи составляет  $12 \times 3 \times 0,8 = 28,8$  м<sup>2</sup>. Приняв допущения: о коэффициенте заполнения равен 0,9 (из-за потерь между солнечными элементами и по краям); плотности потока солнечного излучения как 1300 Вт/м<sup>2</sup>, КПД панелей в 18%. При таких допущения получим примерно 6 кВт максимальной (пиковой) электрической мощности снимаемых с солнечных батарей на один КА. Реальная вырабатываемая мощность зависит от положения панелей солнечных батарей относительно Солнца: оптимально падение лучей на панель – под прямым углом [5, 7].

Для вывода на рабочую орбиту, удержания на ней и сведения с орбиты КА Starlink используют ЭРД на эффекте Холла с криптоном в качестве топлива. Если сравнивать двигатель, используемый на КА Starlink, с аналогичными двигателями для малых КА типа российских СПД-100 либо зарубежных ВНТ-1500, то их потребляемая мощность равна примерно 1,5 кВт, тяга 100 мН, при удельном импульсе на уровне 1700-1800 с. ЭРД КА Starlink выглядит, примерно, как на рис. 3, и имеет приблизительные габариты примерно  $20 \times 20 \times 15$  см. ЭРД имеют запас криптона ориентировочно 5-10 кг, который заправлен в шаробаллоны высокого давления. Этот запас позволит поднять КА на

круговую орбиту 550 км, удерживать КА на ней в течение 5 лет, а потом изменить орбиту таким образом, чтобы за счет торможения об атмосферу КА достаточно быстро затормозил и сгорел. Подъем КА на рабочую орбиту после выведения требует ускорения примерно в 200 м/с и занимает в среднем 4 месяца [5, 7].



а б  
Рис. 3. Ориентировочный вид ЭРД КА Starlink

По состоянию на сентябрь 2022 г. известно о 4-х версиях КА Starlink. Рассмотрим их более подробно.

### 1.3.1. КА Starlink версии 0.9

Версия 0.9 – это 60 КА первого серийно запуска, которые были предназначены для первоначальной отработки технологических решений. Эти КА имели следующие тактико-технические характеристики (ТТХ) [29]:

- масса: 227 кг;
- бортовой комплекс связи: связь только в Ku диапазоне (обеспечивается 4-мя фазированными антенными решетками (ФАР)), работающими на передачу и на прием);
- навигационная система Star Tracker (на основе обработки данных спутниковой навигационной системы GPS) для точного определения местоположения КА;
- возможность использовать данные о космических объектах, предоставленные Министерством обороны (МО) США, для автономного предотвращения столкновения;
- 95% всех компонентов этой версии КА быстро сгорают в атмосфере Земли в конце жизненного цикла;
- статус: сведены с орбиты и сгорели в атмосфере.

### 1.3.2. КА Starlink версии 1.0

Версия 1.0 – это те серийно выпускаемые КА которые предназначены для размещения в 1-й фазе развертывания ОГ. Запускались с ноября 2019 г. по июнь 2021 г. Эти КА имеют следующие ТТХ [29]:

- масса: 260 кг;
- бортовой комплекс связи: абонентская связь и связь с шлюзовыми станциями (ШС) в Ku и Ka диапазонах;
- навигационная система Star Tracker (на основе обработки данных спутниковой навигационной системы GPS) для точного определения местоположения КА;
- возможность использовать данные о космических объектах, предоставленные МО США, для автономного предотвращения столкновения;
- 100% всех компонентов этой версии КА быстро сгорают в атмосфере Земли в конце жизненного цикла;
- КА, запущенные с момента 9-го запуска в августе 2020 г., имеют специальные солнечно-защитные козырьки, которые блокируют отражение солнечного света от частей КА и снижают его альбедо.
- срок активного существования: 5-10 лет;
- статус: работают.

У одного из КА версии 1.0 альбедо было уменьшено с помощью специального покрытия, но от этого метода отказались из-за тепловых проблем и отражающей способности инфракрасного излучения.

### 1.3.3. КА Starlink версии 1.5

Версия 1.5 – это те серийно выпускаемые КА, которые предназначены для размещения в 1-й и 2-й фазе развертывания ОГ. Компоновка КА Starlink версии 1.5 представлена на рис. 4. Запускаются с сентября 2021 г. по июнь 2021 г. Эти КА имеют следующие ТТХ [29]:

- масса: 295 кг;
- бортовой комплекс связи: абонентская связь и связь с ШС в Ku и Ka диапазонах; добавлена лазерная МЛС для связи между КА в соседних орбитальных позициях; для КА, развертываемых в рамках 2-й фазы на орбитах с высотой 335-345 км, планируется использовать оборудование связи, работающие в E диапазоне;
- навигационная система Star Tracker (на основе обработки данных спутниковой навигационной системы GPS) для точного определения местоположения КА;
- возможность использовать данные о космических объектах, предоставленные Министерством обороны, для автономного предотвращения столкновения;
- 100% всех компонентов этой версии КА быстро сгорают в атмосфере Земли в конце жизненного цикла;
- козырьки, блокирующие солнечный свет, были сняты с КА, запущенных с сентября 2021 г.;
- срок активного существования: 3-10 лет;
- статус: работают.



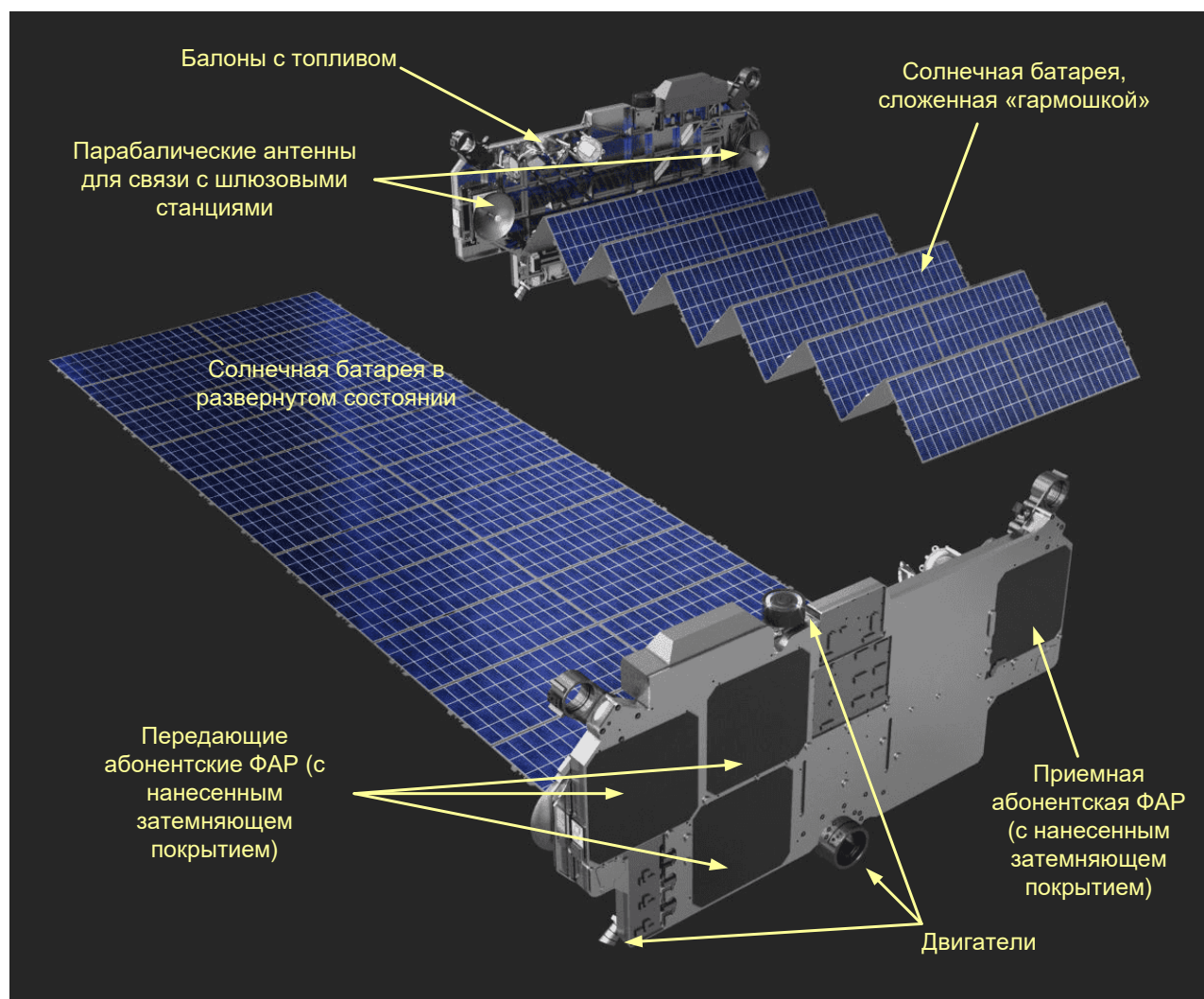


Рис. 4. Компоновка КА Starlink версии 1.5

На борту каждого КА Starlink версии 1.5 находится около 70 отдельных процессоров под управлением операционной системы Linux и порядка 10 микроконтроллеров [7].

#### 1.3.4. КА Starlink версии 2.0 (Generation 2)

Версия 2.0 – это разрабатываемые КА, которые планируется использовать при развертывании в фазе Generation 2. В отдельных документах эти КА фигурируют как КА Generation 2. Точной достоверной информации по КА этой версии нет. По пресс-релизам компании SpaceX эти КА «будут почти на порядок более производительными, чем КА Starlink версии 1.0 с точки зрения пропускной способности связи» и «КА Starlink версии 2.0 предназначены для запуска на РН Starship, поскольку они слишком велики, чтобы поместиться в обтекателе Falcon 9». В августе 2022 г. SpaceX подала официальные документы в FCC, в которых указывалось, что они будут создавать КА Starlink версии 2.0 в 2-х разных форм-факторах: один с компонентами, расположенными таким образом, чтобы их можно было запустить в РН Falcon 9, и один, в форм-факторе 7-метровой длины, который можно было запустить только в РН Starship. КА меньшего форм-фактора планируется использовать в качестве резервного в



случае, если регулярные запуски РН Starship с доставкой КА Starlink 2.0 не произойдут так скоро, как хотелось бы SpaceX. Масса этих КА составит порядка 1250 кг. Все КА будут оборудованы лазерной МЛС. Бортовой комплекс связи будет работать в Ku, Ka и E диапазонах. Количество лучей, формируемых КА возрастет – 30 лучей, работающих на прием (из них 2 луча для управления КА и передачи ТМИ) и 32 луча, работающих на передачу (из них 2 для управления КА и передачи ТМИ). Это количество лучей будет делиться на фидерные (между КА и ШС) и абонентские (между КА и АТ). Пропускная способность КА должна вырасти в 3-10 раз. Планируются дальнейшие улучшения по снижению яркости КА, включая использование диэлектрической зеркальной пленки. Так же сообщалось что КА этой версии будут нести дополнительную большую антенну, которая позволит клиентам сетей сотовой связи иметь возможность подключаться к КА посредством своих обычных мобильных устройств [29].

Помимо указанного, важные элементы КА Starlink 2.0 будут защищены алюминиевым экраном толщиной 1 мм для защиты от космического мусора и микрометеоритов. Таким образом, даже если экран и баки с криптоном будут пробиты, это не вызовет взрыва КА и образования обломков диаметром более 1 мм. Многие из бортовых приемников командной радиолинии, передатчиков ТМИ и управляющей электроники КА Starlink 2.0 будут резервированы для предотвращения потери управления КА в полете. Расчеты по собственной методике SpaceX показывают, что вероятность потери управления КА из-за столкновения с космическим мусором диаметром более 1 мм составляет 0,000776 за весь срок активного существования КА. SpaceX будет мониторить состояние топливных баков и аккумуляторов во время работы КА и не будет их разряжать по окончании работы. Размещение КА Starlink 2.0 на орбитах 360 км обеспечит то, что КА, в случае его неисправности, будет освобождать орбиту (сгорать в атмосфере) всего лишь за 3 месяца [13].

### 1.3.5. Стоимость КА Starlink

Точной стоимости производства одного КА Starlink компания SpaceX не разглашает, но по экспертным оценкам она составляет порядка 200-500 тыс. долларов США за КА. По меркам космической индустрии, подобная цена является революционной, вследствие того, что традиционно КА проектируются и производятся по индивидуальному проекту, а КА Starlink стали первыми в истории космической индустрии по-настоящему серийными спутниками, которые выпускаются на заводах в промышленных масштабах.

### 1.3.6. Надежность КА Starlink

По истечении более 2 лет с момента запуска первой партии КА Starlink можно сделать первые выводы об их надежности. Судя по материалам работы [32] по состоянию на февраль 2022 г. всего выведено 2019 КА. Из них:

- 214 КА – сошли с орбиты и сгорели в атмосфере, в том числе:
  - 71 КА – оказался неисправен сразу же после вывода или в процессе подъема на рабочую орбиту;

- 8 КА – неконтролируемый сход с орбиты после аварии;
- 135 КА – плановая утилизация КА путем автоматического или полуавтоматического сведения с рабочей орбиты в связи с истечением срока службы или неисправностью бортовых систем;
- 25 КА – после вывода на рабочую орбиту сломались, не маневрируют;
- 1516 КА – находятся на рабочих орбитах и работают в штатном режиме;
- 270 КА – поднимаются на рабочую орбиту или находятся в дрейфе для достижения нужного наклона орбиты;
- 66 КА – находятся в резерве или на нецелевых орбитах.

Предварительно можно сделать вывод о том, что надежность КА Starlink составляет порядка 0,89 – вероятность вывода на рабочую орбиту и штатного функционирования на ней запланированный срок активного существования КА. То есть каждый 10-й КА Starlink неисправен – 11% аварийности КА по всему массиву запущенных аппаратов. Такой низкий, для традиционной космической техники, уровень надежности определяется следующими факторами. Во-первых, высокий процент неисправных КА (необычный для космической техники) является компромиссом между относительно низкой стоимостью КА, скоростью их изготовления и надежностью. КА построенные на электронных комплектующих класса industrial (изначально не предназначенных для работы в космическом пространстве) позволяют развернуть ОГ ССС за меньшие деньги и в более быстром темпе, по сравнению с традиционным подходом. Во-вторых, проблемы с надежностью вызваны новизной общего подхода к производству и развертыванию КА, когда проблемы выявляются и устраняются не в процессе наземных испытаний, а в рабочем процессе вывода и функционирования КА. Надежность растет, количество неисправных спутников уменьшается. Это подтверждает статистикой эксплуатации: в 1-й период 2020 г. – аварийность КА до 20%; во 2-й период до апреля 2021 г. – до 10%; в 3-й период до конца 2021 г. – до 5%.

#### 1.4. Архитектура ССС Starlink

Архитектура ССС Starlink схематично представлена на рис. 5.

Вся поверхность Земли разбита на ячейки обслуживания (в оригинальной документации используется термин «cell» – ячейка) диаметром 24 км. Площадь такой зоны составляет 379,6 км<sup>2</sup>, а ее размер, соответствует ширине диаграммы направленности антенны (ДНА) КА при ее направлении строго вниз [5]. В каждой ячейке, по расчетам SpaceX, предполагается обслуживать 125-130 активных АТ.

Каждый КА пролетая над соответствующей ячейкой обслуживания обеспечивает прием/передачу данных от АТ пользователей в этой ячейке и ретрансляцию их по фидерным линиям на ШС (в оригинальной документации используется термин «Gateway»). При этом ШС не обязательно должна быть расположена в самой ячейке обслуживания, для обеспечения ретрансляции данных от АТ этой ячейке, однако она должна обязательно быть в зоне радиовидимости КА.

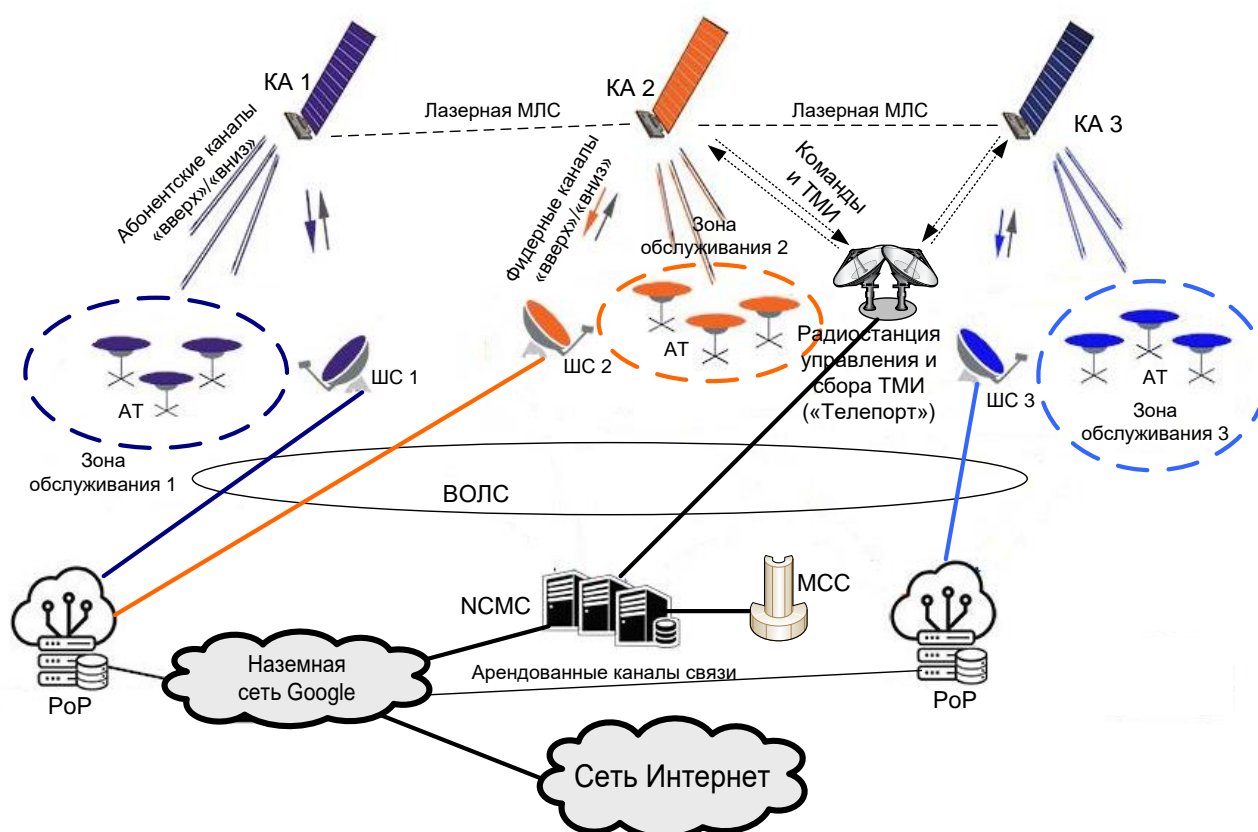


Рис. 5. Архитектура CCC Starlink [5]

ШС через узлы доступа PoP (Point of Presence) посредством волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) подключаются к наземной сети, а далее – к сети Интернет. В качестве наземной сети CCC Starlink используется там, где этой возможно, сеть Google, которая является стратегическим партнером и акционером компании SpaceX. В случае невозможности использования сети Google используются собственные или арендованные ВОЛС. Для снижения затрат на развертывание наземной инфраструктуры, там, где возможно, SpaceX старается размещать ШС прямо за зданиях PoP сети Google, но это не всегда возможно. Из-за законодательных ограничений часть ШС размещаются в труднодоступных районах [5].

По состоянию на сентябрь 2022 г. КА Starlink работают в наиболее простом режиме – в режиме прямой ретрансляции, коммутируя абонентские каналы в фидерную линию связи с ШС. Таким образом обработка сигналов на борту (ОСБ) отсутствует. Так же пока не реализован функционал ретрансляции абонентских данных между КА несмотря на наличие в КА Starlink версии 1.5 и выше оборудования для организации лазерной МЛС. Реализация режима ОСБ и маршрутизации абонентского трафика по космическому сегменту CCC Starlink с использованием МЛС планируется в последующих версиях КА и путем обновления программного обеспечения (ПО) КА в дальнейшем.

Задачи управления связью и распределения радиоресурса в CCC Starlink решает центр мониторинга и управления сетью NCMC (network control and monitoring center). Управление КА в составе ОГ CCC Starlink занимается другая структура SpaceX – MCC (mission control center). MCC обеспечивает управле-

ние КА, оценкой их работоспособности, обеспечивает их маневры на орбите [5]. Управление осуществляется через 4 станции (телепорта), где установлены радиостанции управления и сбора телеметрии, работающие в Ku и Ka диапазонах.

## 1.5. Проблемные вопросы использования CCC Starlink

### 1.5.1. Проблемы астрономических наблюдений

На раннем этапе развертывания ОГ CCC Starlink планируемое большое количество КА на низких орбитах было встречено критикой со стороны астрономического сообщества из-за опасений светового загрязнения проводимых ими наблюдений. Астрономы утверждают, что большое количество и высокая яркость КА как в оптическом, так и в радиодиапазоне сильно повлияет на научные исследования.

SpaceX попыталась смягчить проблемы астрономии, внедрив несколько обновленных технических решений, направленных на снижение яркости (альбедо) КА в оптическом диапазоне.

Так один КА Starlink (Starlink 1130/DarkSat) был запущен с экспериментальным покрытием DarkSat для снижения его альбедо. Уменьшение величины g-диапазона для этого КА составляет 0,8 величины (55%), однако несмотря на это, астрономы указали, что КА все еще был слишком ярким, что привело к отказу от технологии DarkSat.

В апреле 2020 г. SpaceX указала в заявлении FCC, что протестирует новые способы уменьшения светового загрязнения, а также предоставит астрономам доступ к данным спутникового слежения, чтобы помочь им «лучше координировать свои наблюдения с нашими спутниками». В результате на вновь запускаемых КА был оборудован солнцезащитный козырек, предназначенный для уменьшения яркости КА Starlink. По состоянию на октябрь 2020 г., более 200 КА Starlink имели солнцезащитный козырек. Анализ их яркости, проведенный в октябре 2020 г., однако показал, что она лишь немного слабее, чем DarkSat. Исследование, проведенное в январе 2021 г., показало, что яркость КА составляет 31% от их исходного значения, что является недостаточным [6, 29].

В феврале 2022 г. Международный астрономический союз (МАС) создал центр, чтобы помочь астрономам справиться с неблагоприятным воздействием низкоорбитальных ОГ КА, таких как CCC Starlink. Работа будет включать разработку ПО для астрономов, продвижение национальной и международной политики, работу с общественностью и работу с промышленностью над соответствующими технологиями. В июне 2022 г. МАС запустил веб-сайт для астрономов, чтобы справиться с некоторыми неблагоприятными последствиями с помощью спутникового слежения. Это позволит астрономам отслеживать КА, рассчитывать их время для минимального влияния на текущую работу и избегать их [29].



### 1.5.2. Проблемы загрязнения космического пространства

Развертывание многоспутниковых ОГ КА на низких орбитах, подобных CCC Starlink, может привести к так называемому «эффекту Кесслера» – невозможности человечества доступа в космос вследствие чрезвычайно плотного загрязнения околоземного пространства космическим мусором.

На околоземной орбите Земли становится тесно. Спутниковые группировки летают вперемешку с космическим мусором. Компания SpaceX уже запустила большое число КА и около 40 тыс. планирует запустить в продолжение развертывания ОГ CCC Starlink. Наблюдение за этими КА уже сейчас фиксируют, что практически каждую неделю происходит порядка 600-700 опасных сближений КА Starlink с другими космическими объектами на расстояние 1 км или менее [29]. Пока столкновений не было. Однако если это произойдет, то никто не дает гарантий, что это не приведет к «эффекту домино» – КА столкнувшись с космическим мусором, будет порождать новый космический мусор, который будет сталкивается с новыми КА и другими объектами, и так далее по нарастающей пока вся конкретная орбита не окажется непригодной для дальнейшего использования.

Несмотря на то, что в КА Starlink встроена возможность использования данных о космических объектах, предоставленные службой контроля космического пространства МО США, для автономного предотвращения столкновения КА, реализация этой возможности вызывает вопросы.

Так при запуске 24 мая 2019 г. первых тестовых 60 КА Starlink версии 0.9 три спутника не вышли на связь. В результате наземные службы не смогли передать команды свода этих КА с орбиты и в настоящее время они самостоятельно, за счет торможения о верхние слои атмосферы и под действием гравитации Земли, медленно неуправляемо дрейфуют вниз. Процесс их торможения, последующего входа в атмосферу и сгорания по оценке SpaceX может занять до 5 лет [29].

В сентябре 2019 г. произошёл инцидент потенциального столкновения между КА Starlink-44 и европейским КА Aeolus. Изначально, 28 августа, вероятность столкновения КА была признана низкой (1 к 50 000) и специалисты команды управления SpaceX и Европейского космического агентства ESA приняли решение не предпринимать каких-либо действий. В дальнейшем прогноз вероятности столкновения ухудшился до 1 к 1000, что в 10 раз превышает пороговое значение ESA для выполнения маневров уклонения, но ошибки компьютерной системы не позволили оператору SpaceX получить сообщения от операторов ЕКА. В результате 2 сентября 2019 г., в отсутствие контакта со SpaceX, Европейским агентством ESA было принято решение выполнить манёвр уклонения КА Aeolus [29].

В 2021 г. китайские власти подали жалобу в ООН, заявив, что их пилотируемая космическая станция в предыдущем году выполняла маневры уклонения, чтобы избежать столкновения с КА Starlink. В жалобе китайских властей заявляется, что непрерывно маневрирующие КА Starlink представляют собой опасность, а два потенциально близких столкновения с КА Starlink в июле и ок-



тябре 2020 г. представляли опасность для жизни или здоровья космонавтов на борту китайской космической станции «Тяньгун» [29].

3 февраля 2022 г. было запущено 49 КА Starlink Group 4-7. Однако, из-за значительного увеличения атмосферного сопротивления, вызванного геомагнитной бурей 4 февраля 2022 г., 38 КА из 49 вернулись в атмосферу к 12 февраля, перешли к неконтролируемому снижению и в результате сгорели, а остальные 11 КА смогли выйти свои орбиты [29].

Вышеуказанные факты показывают, что многоспутниковые низкоорбитальные ССС, в частности ССС Starlink, имеют не только преимущества в использовании, но могут представлять опасность для засорения околоземного пространства и препятствовать допуску человечества в космос.

### 1.6. Возможности военного использования ССС Starlink

С момента начала проектирования и развертывания ССС Starlink, компания SpaceX пыталась приобрести среди органов военного управления Вооруженных сил (ВС) США и стран НАТО постоянных заказчиков. Однако, военные органы только «присматриваются» к системе, отдельные подразделения ВС США тестируют ССС Starlink для собственных нужд, но до стадии массового «принятия на вооружение» или «заключения контрактов на услуги» еще далеко, что, в общем то, вполне объяснимо, так как предоставляемые услуги связи пока не вышли за рамки бета-тестирования даже для гражданского сектора. В настоящее время можно отметить следующие факты, имеющие отношение к потенциалу использования ССС Starlink в военных целях.

В 2018 г. компания SpaceX подает заявку на участие в программе BlackJack агентства перспективных исследований США – DARPA. Эта программа предусматривает исследование возможностей и выработку технологических решений по созданию разведывательной ОГ на базе небольших КА (до 90 шт.) на низкой орбите. Ставится задача использовать уже существующие модули/платформы гражданских КА связи и оснащение их разведывательной полезной нагрузкой. За счет серийности в производстве гражданских КА агентством DARPA ожидалось значительное снижение стоимости разведывательной ОГ, а за счет совмещения связной и разведывательной полезных нагрузок – повышение оперативности ретрансляции разведанных на наземные пункты приема и обработки информации. В результате рассмотрения предложений компания SpaceX проигрывает канадской TeleSat, которая в результате становится головным разработчиком по программе BlackJack в 117 млн долларов США. Вместе с тем сам факт участия в конкурсе по данной программе демонстрирует «скрытые возможности» использования ОГ КА Starlink не только как связной системы, но и как платформы для размещения дополнительного военного оборудования, в том числе и разведывательного [29].

В декабре 2018 г. Военно-воздушные силы (ВВС) США заключили со SpaceX контракт на 28 млн долларов, предусматривающий изучение различных вариантов и возможностей использования ССС Starlink для военных нужд. В 2019 г., в рамках испытаний по программе Defense Experimentation Using the Commercial Space Internet одного из вариантов такого использования, был орга-

низован сеанс связи с военно-транспортным самолётом C-12J Huron, в котором продемонстрирована скорость передачи данных 610 Мбит/с. Эксперимент был признан успешным, и началась разработка специализированных АТ Starlink, которые планируется разместить на самолетах огневой поддержки сухопутных войск AC-130 Spectre, самолётах-заправщиках KC-135 Stratotanker, ударных самолетах F-22 Raptor и F-35 Lightning II, а также возможности обмена информацией с многоразовым беспилотным космическим кораблем X-37B Orbital Test Vehicle (OTV) [10, 29].

В мае 2020 г. ВС США подписали со SpaceX соглашение по тестированию CCC Starlink для передачи данных между своими наземными подразделениями. Соглашение рассчитано на 3 года [10, 29].

В октябре 2020 г. Агентство космического развития SDA (Space Development Agency) в составе МО США заключило со SpaceX первоначальный контракт на сумму 150 млн долларов на проведение ряда работ в рамках реализации проекта Национальной космической оборонной архитектуры NDSA (National Defense Space Architecture). NDSA будет состоять из 7-и уровней с определенными функциями: передача данных, управление боевыми подразделениями, отслеживание запуска ракет, управление и наведение оружия, навигация, сдерживание и поддержка наземных войск. Исторически сложилось так, что концепции противоракетной обороны (ПРО) космического базирования были довольно дорогими, что препятствовало их проектированию и развертыванию. Однако, согласно анализу, проведенному Бюджетным управлением Конгресса США в 2019 г., многоразовые пусковые системы SpaceX позволили существенно снизить затраты. Проект NDSA предполагает использование существующего научно-технического задела в области коммерческих космических систем, в первую очередь таких как CCC Starlink, для снижения затрат при проектировании и развертывании космических систем военного назначения. Первая группа КА, разработанная в рамках программы NDSA, была первоначально запланирована к запуску в сентябре 2022 г. Однако график запуска был перенесен на середину декабря 2022 г. из-за трудностей с цепочкой поставок изделий радиотехники и микроэлектроники [29].

В 2020 г. исследование Т. Humphreys и Р. Iannucci [28] из Радионавигационной лаборатории Техасского университета (г. Остин), финансируемое ВС США, показало потенциальные возможности использования низкоорбитальных CCC, подобных Starlink, в качестве недорогой, высокоточной и помехозащищенной альтернативы по отношению к существующей спутниковой радионавигационной системе (СРНС) GPS/NavStar. Основная идея [28] состоит в том, чтобы использовать КА Starlink в качестве своеобразных ретрансляторов сигналов СРНС GPS, в которые, после обработки на борту КА Starlink, могут включать в себя новые данные, многократно повышающие точность позиционирования.

В феврале 2022 г., после начала специальной военной операции (СВО) ВС РФ на Украине компания SpaceX организовала поставки АТ Starlink в ВС Украины. К августу 2022 г. по различным оценкам на Украину было поставлено от 15 до 40 тыс. АТ Starlink, использование которых было широко внедрено в

практику органов всех звеньев военного управления. В результате CCC Starlink фактически стала составной частью системы государственного и военного управления Украины. Так в ВС Украины, CCC Starlink зачастую используется в качестве основного средства связи между тактическими подразделениями, при наведения оружия, управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и корректировки огня артиллерии [29]. После передачи АТ Starlink в ВС Украины и начала их использования, по непроверенным данным, в марте 2022 г. российские ВС предприняли попытки радиоэлектронной борьбы (РЭБ) с CCC Starlink путем использования для этого комплекса РЭБ «Красуха» [30]. Однако, по сообщению от SpaceX [31], обновление ПО, выполненное на следующий день, а также высокая плотность ОГ, оставило все эти попытки РЭБ неэффективными. В октябре 2022 г. подразделения ВС Украины стали указывать на факты массовых отказов АТ Starlink при проведении операций на херсонском и харьковском театрах военных действий (ТВД) [35]. Отдельные российские эксперты эти факты связали с применением комплекса РЭБ «Триада-2С» [36], однако достоверных данных о том, что какие-либо комплексы РЭБ способны эффективно подавлять работу CCC Starlink нет. Можно предположить, что, возможно, факты отказов АТ Starlink были связаны с тем, что в процессе наступления ВС Украины, возимые ими АТ оказались на де-факто российской территории и, в соответствии с внутренней программой функционирования, АТ отключились во избежание попыток использования российскими ВС захваченных АТ для нарушения связи в данной зоне обслуживания. В настоящее время положительное использование CCC Starlink в составе системы управления войсками и оружием ВС Украины является наиболее зримым подтверждением высокой эффективности этой CCC для решения военно-прикладных задач.

Вместе с тем, при высокой положительной оценке CCC Starlink, опыт массового использования АТ Starlink в полевых условиях выявил существенные недостатки их конструкции, предназначенной для типового использования в стационарных «бытовых» условиях. При эксплуатации в полевых условиях украинскими ВС имели место частые выходы АТ Starlink из строя – основные причины отказов обусловлены: поломкой Ethernet интерфейсов, износом и разрушением механизмов привода плоскости ФАР (в АТ используются пластмассовые шестерни), повреждением кабеля АТ, нарушении работы радиоэлектронных компонент АТ вследствие попадания влаги внутрь устройства, и только в редких случаях – повреждения АТ пулями или осколками.

Вдохновленное успехами использования CCC Starlink на Украине в августе 2022 г., командование ВВС США в Европе и Африке подписало контракт со SpaceX на предоставление услуг связи со стороны CCC Starlink для 86-го авиакрыла ВВС США, базирующегося на авиабазе Рамштайн (Германия). Годовой контракт стоимостью 1,92 млн долларов представлен как временное решение до достижения более широкого соглашения между ВВС США и SpaceX. В обосновывающем контракт документе, CCC Starlink описана как единственная доступная на данный момент коммерческая система, способная предоставлять услуги высокоскоростной связи как в Европе, так и в Африке. При этом в

обосновании возможностей военного использования в документе указывается на положительный опыт использования системы CCC Starlink на Украине [29].

В декабре 2022 г. компания SpaceX опубликовала релиз о запуске на основе CCC Starlink новой программы Starshield, ориентированной исключительно на военных заказчиков, прежде всего, обеспечение нужд ВС США. В рамках данной программы предполагается размещение на КА Starlink дополнительной полезной нагрузки, в интересах военных заказчиков: аппаратуры дистанционного зондирования Земли, дополнительных модулей радиосвязи с высоким уровнем криптозащиты, модулей лазерной связи в интересах высокоскоростной и скрытной передачи через КА Starlink информации с других КА, военного назначения, а также сброса больших объемов данных на Землю, а также другой аппаратуры специального назначения [42].

В 2022 г. в журнале Naked Science была опубликована работа Н.А. Цыгикало [37] в которой указывается что плотная сеть КА в составе ОГ CCC Starlink потенциально может использоваться как распределённая система орбитального перехвата. КА Starlink могут быть использованы для кинетического поражения других космических объектов путем одиночного или группового перевода КА Starlink на орбиты, ведущие к соударению с «недружественными» КА или выводимыми РН. Низкая орбита, многоуровневое построение ОГ CCC Starlink и высокая скорость движения КА могут использоваться для перекрытия доступа в космическое пространство «недружественным» странам (в том числе и России), в случае обострения геополитической ситуации, в частности – воспрепятствовать доступ и наращивание числа КА на средних и геостационарной околоземных орбитах (ГСО), на которых традиционно разворачиваются ОГ СРНС и CCC. Маневры торможения, с последующим управляемым спуском КА Starlink «вниз», могут использоваться для кинетического поражения КА на низких орбитах, на которых традиционно разворачиваются разведывательные ОГ. Однако, автор статьи [37] не приводит расчетов по времени, необходимому для выполнения орбитальных маневра, что является критичным для такого варианта боевого применения ОГ CCC Starlink. Необходимо отметить, что тяга ЭРД, имеющихся на борту КА Starlink, составляет всего несколько граммов, поэтому маневр по существенному изменению орбиты КА (более чем на 10 км) может занять несколько дней или даже недель, что существенно снижает своевременность проведения орбитальных маневров и, соответственно, делает возможность подобного использования ОГ Starlink весьма и весьма маловероятной.

Вышеуказанные примеры фактов военного использования CCC Starlink показывают, что SpaceX удалось создать универсальную космическую систему сектор применения которой в военной сфере весьма широк – от использования ее КА в качестве платформ для средств связи и возможного носителя дополнительного разведывательного оборудования, до потенциального применения КА Starlink в качестве орбитальных перехватчиков в интересах противодействия КА «недружественных» стран. По мере разворачивания ОГ CCC Starlink следует ожидать расширения диапазона ее военного применения. Судя по всему, по мере всё большего охвата услугами связи населения Земли к их числу добавиться глобальная компьютерная разведка, проводимая путем доступа и фильтрации



данных, передаваемых посредством CCC Starlink пользователями системы, а также информационная поддержка и обеспечение связью диверсионных групп и незаконных политических формирований, действующих на территориях «недружественных» стран.

В целом есть основания предполагать, что под прикрытием чисто гражданского частного коммерческого сервиса США, действуя силами компании SpaceX, разворачивают систему дистанционного управления информационными и ударными комплексами военного назначения, не только чрезвычайно устойчивую к противодействию противника, но и высоко защищенную в смысле маскировки.

Использование подобных многоспутниковых систем ставит дополнительные проблемы с точки зрения организации противодействия им, как системам военного и двойного назначения:

- использование многоспутниковой ОГ (тысячи КА, многослойное построение группировки) затрудняет и делает затратной использование традиционных практик перехвата КА;
- при создании и развертывании многоспутниковых ОГ закладывается штатное восполнение десятков КА в год;
- многоспутниковые системы позиционируются как системы гражданского назначения, что обуславливает возможность серьезных политических последствий в случае уничтожения (подавления) элементов системы (сети).

Недавние испытания системы Starlink в интересах ВВС США, трёхлетнее соглашение с ВВС США и сотрудничество с платформой Microsoft Azure позволили компании SpaceX обеспечивать ВВС США облачно-связной средой в любой точке планеты. Успешно проведённые демонстрации в реальном времени, связанные с пожаротушениями и восстановительными работами в Тихоокеанском Северо-Западном районе Земли, только дополняют перспективы использования Starlink силовыми структурами правительства США.

## 2. Организация связи в CCC Starlink

В настоящее время ОГ CCC Starlink развернута не полностью, в связи с этим сложно судить о принципах организации связи в окончательно развернутой системе.

Однако развертывание 1-й группы КА на высоте 550 км с наклоном  $53^\circ$  в составе 1-й фазы ОГ практически завершено (рис. 6) и CCC перешла в режим опытной эксплуатации (бета-тестирования). По итогам этого бета-тестирования предварительно можно судить о принципах организации связи в CCC Starlink. Однако эти выводы не являются окончательными. По мере развертывания ОГ в рамках 2-й фазы и фазы Generation 2, по мере совершенствования аппаратной платформы КА и АТ, управляющего ПО принципы организации связи также будут совершенствоваться.



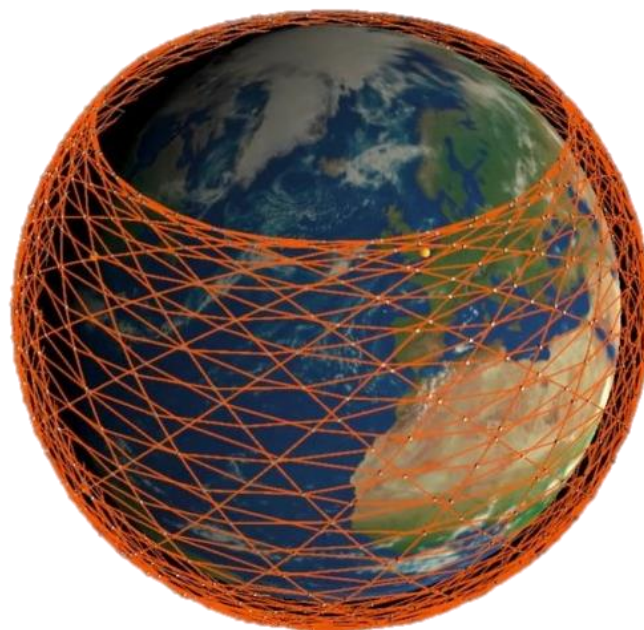


Рис. 6. Орбиты 1-й группы КА на высоте 550 км с наклонением  $53^\circ$  в составе 1-й фазы ОГ CCC Starlink [5]

## 2.1. Краткая характеристика бортового связного оборудования КА Starlink

Бортовая аппаратура связи КА Starlink версии 1.5 включает в себя оборудование следующих типов [5, 7]:

- 1) оборудование формирования абонентских каналов «КА – АТ» в Ku диапазоне (14-14,5 / 10,7-12,7 ГГц), работающие в режиме поляризационно-пространственно-временного разделения АТ;
- 2) оборудование формирования фидерных каналов «КА – ШС» в Ka диапазоне (27,5-29,1; 29,5-30 / 17,8-18,6; 18,8-19,3 ГГц), прямой ретрансляции абонентских каналов путем переноса несущей частоты;
- 3) оборудование формирования служебных каналов управления, приема команд и ретрансляции ТМИ в Ku (13,85-14 / 12,15-12,25; 18,55-18,6 ГГц);
- 4) оборудование для организации лазерных МЛС (в настоящее время не используется в ретрансляции абонентского трафика, работает в режиме опытной эксплуатации);
- 5) оборудование ОСБ для организации обработки сетевых пакетов и маршрутизации трафика между абонентскими и фидерными каналами, а также МЛС (в настоящее время не используется в ретрансляции абонентского трафика, работает в режиме опытной эксплуатации).

Антенная система Starlink версии 1.5 включает в себя:

- три передающих ФАР, работающих Ku диапазоне (10,7-12,7 ГГц), формирующие лучи с электронным управлением формой ДНА и их направлением, предназначенные для формирования абонентских линий «вниз». Кроме того, эти же антенны, по всей видимости, используются для формирования каналов сброса ТМИ на служебные станции управления, работающие в Ku диапазоне (12,15-12,25; 18,55-18,6 ГГц);

- одна приемная ФАР, работающая в Ку диапазоне (14-14,5 ГГц), формирующая лучи с электронным управлением формой ДНА и их направлением, предназначенные для формирования абонентских линий «вверх». Кроме того, эта же антенна, по всей видимости, используется для приема команд и обновления ПО от служебных станций управления, работающих в Ку диапазоне (13,85-14 ГГц);
- две приемо-передающих параболических антенны, работающие в Ка диапазоне (27,5-29,1; 29,5-30 / 17,8-18,6; 18,8-19,3 ГГц), формирующие узкие лучи по направлению на ШС, предназначенные для формирования фидерных линий «вверх» и «вниз».

## 2.2. Частотный план ССС Starlink

Частотный план ССС Starlink 1-й фазы развертывания представлен в таблице 3. Повторное использование частот в ССС достигается использованием развязки по поляризации – используется круговая поляризация с левым и правым направлениями вращения.

Таблица 3 – Частотный план ССС Starlink 1-й фазы развертывания [7]

Тип канала связи и направление приема-передачи	Диапазоны частот, ГГц	Доступно МГц в одной поляризации	Количество поляризаций	Общее количество доступных экв. МГц
<b>Направление связи «АТ – КА»:</b>				
линия «вверх»	14-14,5	500	1 (2)*	500 (1000)*
линия «вниз»	10,7-12,7	2000	1 (2)*	2000 (4000)*
<b>Направление связи «ШС – КА»:</b>				
линия «вверх»	27,5-29,1 29,5-30	1600 500	2	4200
линия «вниз»	17,8-18,6 18,8-19,3	800 500	2	2600
<b>Направление связи «Командная станция (телепорт) – КА»:</b>				
линия управления и ТМИ «вверх»	13,85-14	150	2	300
линия управления и ТМИ «вниз»	12,15-12,25 18,55-18,6	100 50	2	300

Примечание: \*сейчас в АТ используется только один тип поляризации – круговая, правого направления вращения. В дальнейшем планируется задействовать обе поляризации.

Как следует из таблицы для организации связи с АТ каждый КА использует 500 МГц в линии «вверх» и 2000 МГц в линии «вниз» в Ку диапазоне. Сейчас в АТ используется только один тип поляризации – круговая, правого направления вращения. В перспективе с началом использования обеих типов поляризации эквивалентной частотной ресурс абонентских линий составит 1000 МГц для линий «вверх» и 4000 МГц для линий «вниз».

Поступающая от АТ информация передается на ШС. Для организации фидерных линий связи с ШС каждый КА использует 2100 МГц в линии «вверх» и 1300 МГц в линии «вниз» в Ка диапазоне. С учетом развязки по поляризации

это соответствует эквивалентному частотному ресурсу 4200 МГц в линии «вверх» и 2600 МГц в линии «вниз».

Передача команд и сброс ТМИ с КА осуществляется через командные станции (телепорты), где установлены радиостанции управления и сбора телеметрии, использующие по 150 МГц на прием и передачу, соответственно в Ка и Ку диапазонах.

В настоящее время АТ работают в одной поляризации – правой. С расширением системы, по всей видимости, в АТ будут задействованы обе поляризации – как правая, так и левая.

Кроме того, отметим, что в КА Starlink версии 2.0 планируется дополнительно реализовать использование Е диапазона (60-90 ГГц).

Предполагаемый частотный план CCC Starlink после развертывания фазы Generation 2 представлен на рис. 7 и в таблице 4 в соответствии с материалами заявок на использование частот, поданных SpaceX в FCC.

Таблица 4 – Частотный план CCC Starlink  
после фазы развертывания Generation 2 [13]

Тип канала связи и направление приема-передачи	Диапазоны частот, ГГц	Доступно МГц в одной поляризации	Количество поляризаций	Общее количество доступных экв. МГц
Направление связи «АТ – КА»:				
линия «вверх»	12,75-13,25	500	2	4 000
	14-14,5	500		
	18,8-19,3	500		
	19,7-20,2	500		
линия «вниз»	10,7-12,75	2050	2	7 300
	17,8-18,6	800		
	18,8-19,3	300		
	19,7-20,2	500		
Направление связи «ШС – КА»:				
линия «вверх»	27,5-29,1	1600	2	14 200
	29,5-30	500		
	81-86	5000		
линия «вниз»	17,8-18,6	800	2	12 600
	18,8-19,3	500		
	71-76	5000		
Направление связи «Командная станция (телепорт) – КА»:				
линия управления и ТМИ «вверх»	13,85-14	150	2	300
линия управления и ТМИ «вниз»	12,15-12,25 18,55-18,6	100 50	2	300

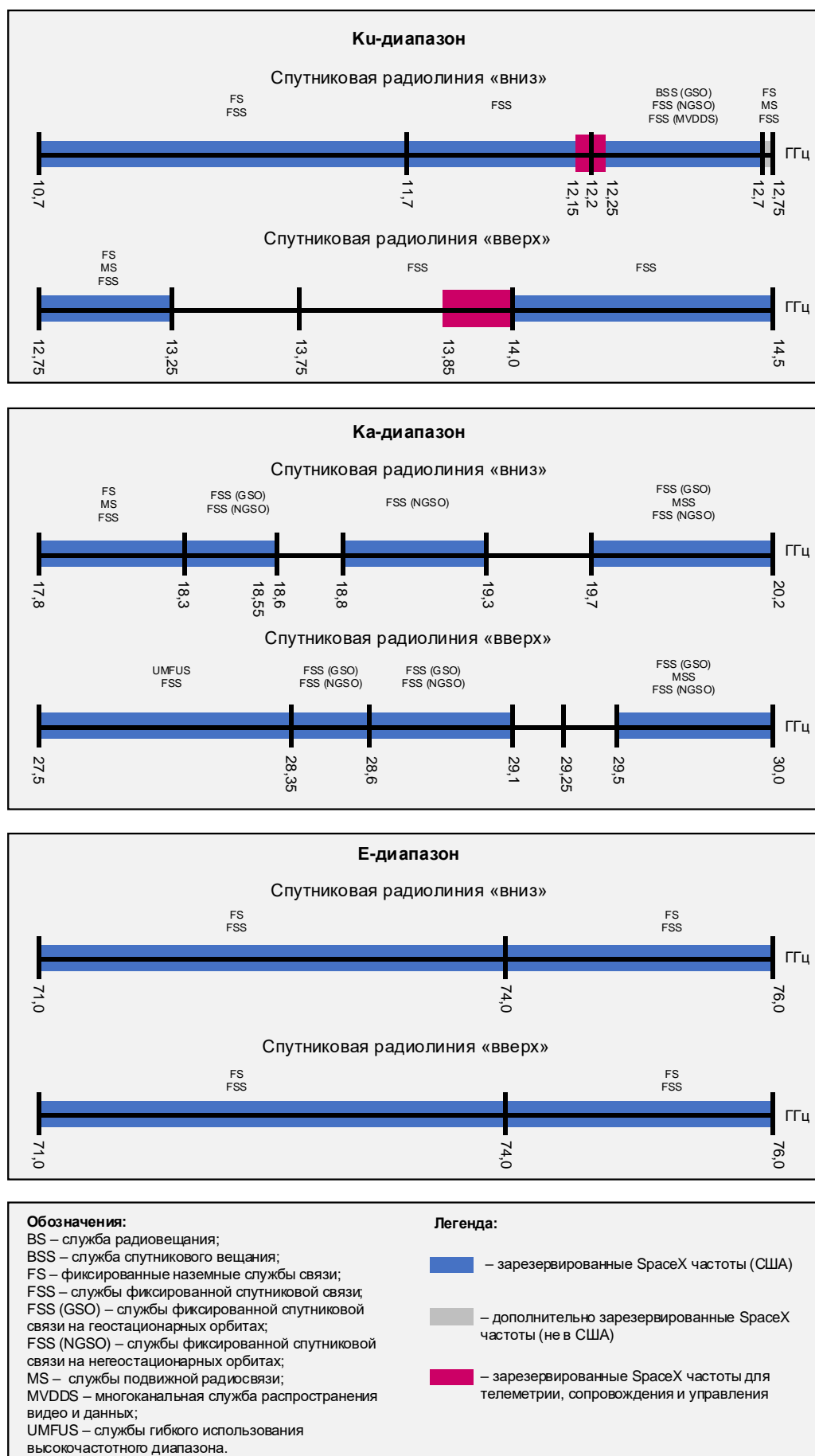


Рис. 7. Частотный план CCC Starlink, после фазы развертывания Generation 2 [41]

### 2.3. Особенности организации связи в абонентских линиях

Находясь на орбите в 550 км, КА Starlink в составе 1-й фазы развертывания ОГ может покрыть своим сигналом подспутниковую зону на Земле радиусом 950 км (диаметром примерно 1900 км) при условии, что угол места для АТ будет не менее  $25^\circ$  (отметим, что эффективная работа АТ с ФАР возможна при угле места  $40^\circ$  и более) [7].

ФАР на КА обеспечивает отклонение главного луча ДНА в пределах подспутниковой зоны от  $3^\circ$  до  $5^\circ$  (чем дальше от линии надира, тем больше угол), с одновременным изменением ширины луча от  $2,5^\circ$  (в надире) до  $4^\circ$  у края зоны. При этом диаметр луча на Земле, соответствующий ширине ДНА  $2,5^\circ$ , непосредственно под КА составит 24 км (рис. 8) [5, 7].

Таким образом, один КА может теоретически иметь до 300 таких зон, соответствующих определённым значениям отклонения и ширины лучей ДНА в подспутниковой зоне обслуживания.

В результате вся поверхность Земли, а также подспутниковая зона каждого КА, разбита на участки минимального покрытия луча ДНА, при его ширине  $2,5^\circ$  и направлении луча в надир – на ячейки обслуживания (в оригинальной документации используется термин «cell») диаметром 24 км (рис. 9). Площадь такой ячейки составляет  $379,6 \text{ км}^2$ . В каждой такой ячейке, по расчетам SpaceX, предполагается обслуживать 125-130 активных АТ [5].

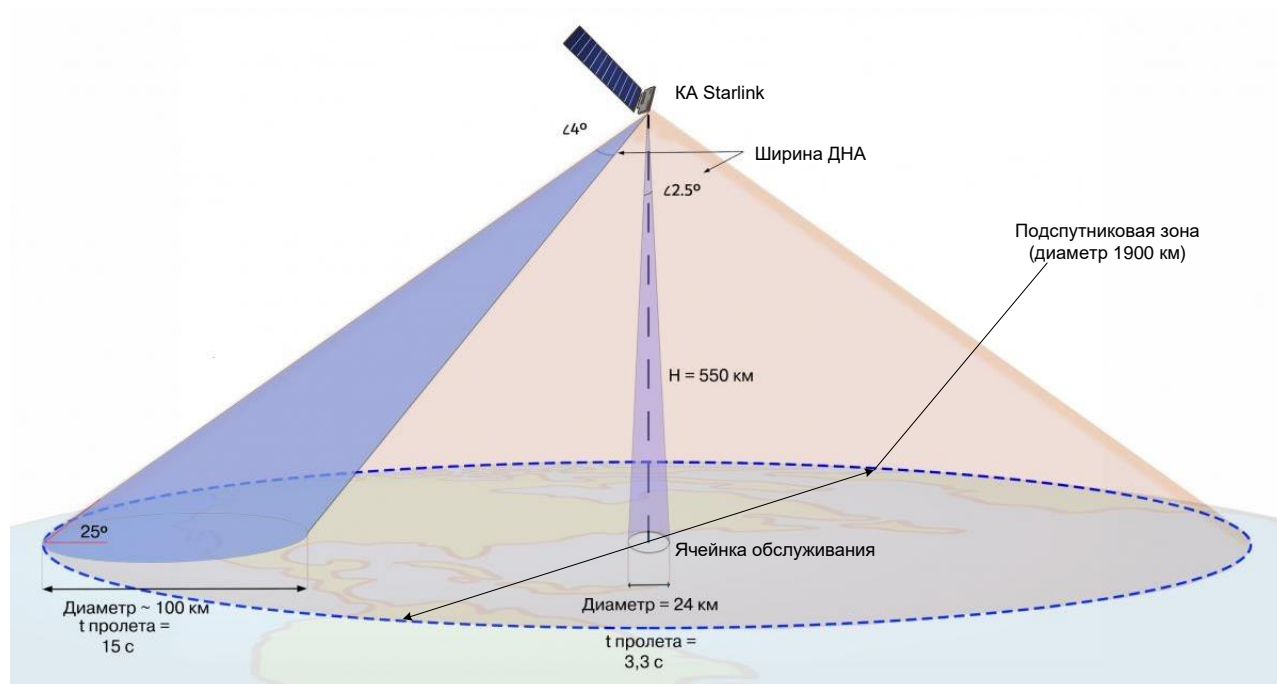


Рис. 8. Подспутниковая зона КА и конфигурация ДНА лучей его ФАР [5, 7]



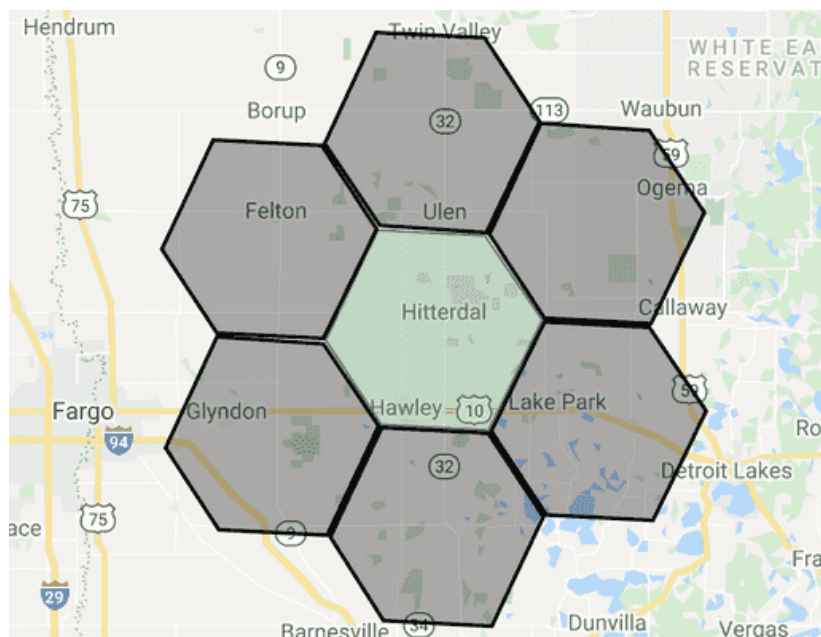


Рис. 9. Ячейки обслуживания («cells») CCC Starlink [5]

Для обслуживания всех ячеек, находящихся в подспутниковой зоне, обслуживания лучи КА «пробегают», путем последовательного переключения, по обслуживаемым ячейкам (рис. 10).

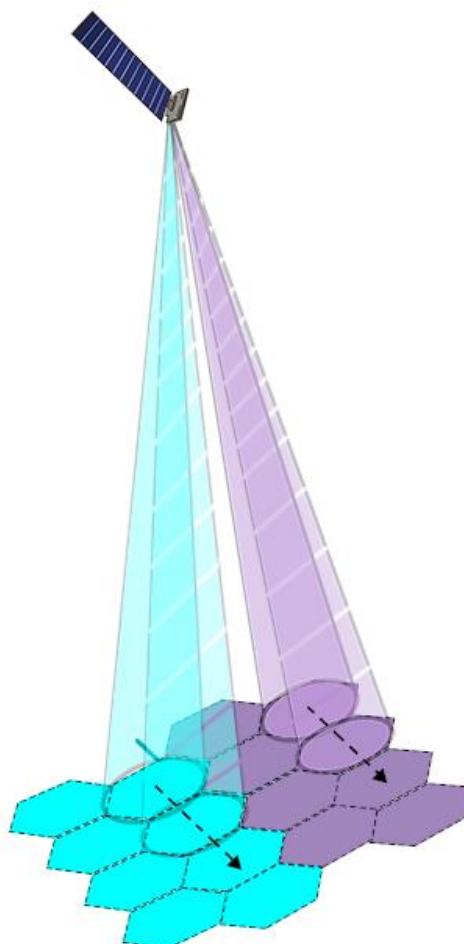


Рис. 10. Переключение лучей КА при обслуживании ячеек в подспутниковой зоне [5, 7]

С точки зрения АТ это не приводит к перерывам связи, так как для ФАР с электронным управлением лучом время переключения луча между различными направлениями составляет порядка 5-10 мкс, что намного меньше допустимого значения джиттера (25 мс) и типичной задержки (30-50 мс) при передаче данных в сети Интернет [5, 7]. При этом, в рамках сеанса связи с АТ одной ячейкой, абоненты разделяются по времени в соответствии со стандартом TDMA (Time Division Multiple Access).

При таком пространственно-временном разделении обслуживания ячеек, надо понимать, что чем больше ячеек должен обойти луч, тем меньше реальная скорость и тем больше задержка передачи/приема данных АТ из-за того, что меньше длительность времени, в течении которого луч КА направлен на ячейку с этим АТ [5, 7].

Одним из способов повышения скорости «обхода» ячеек в подспутниковой зоне, компания SpaceX видит в группировании АТ малыми группами, а также приоритетное и более частое обслуживание ячеек с высокой плотностью АТ. Кроме того, на краях подспутниковой зоны один луч может за раз покрыть больше ячеек (рис. 11), чем в центре [7].

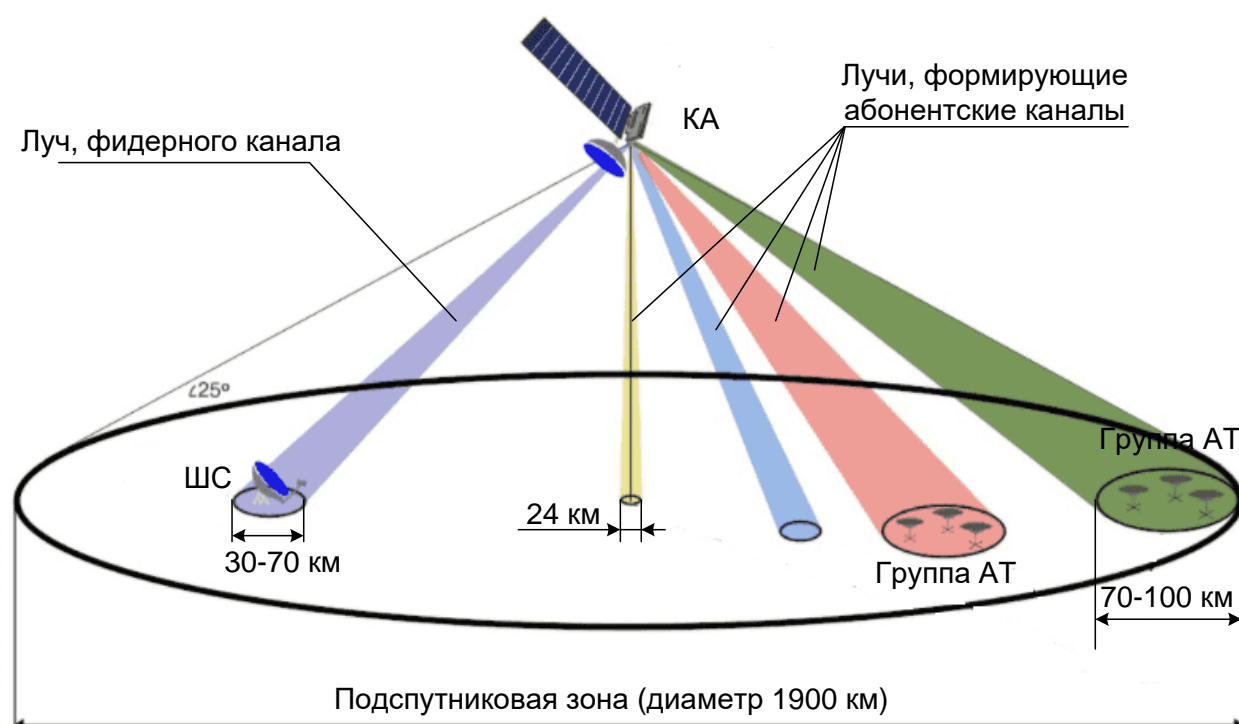


Рис. 11. Формирование лучей КА Starlink в подспутниковой зоне [7]

Количество лучей, формируемых КА Starlink, из документов SpaceX точно неясно. В работе [7] показывается что рациональным значением количества лучей одного КА является 16. В работе [38] указывается что каждая ФАР КА может формировать 8 лучей в 2 поляризациях. Из 4-х ФАР на КА три работают на передачу, формируя абонентские каналы «вниз», а 1 ФАР – на прием, формируя абонентские каналы «вверх». Таким образом один КА может формировать до 24 лучей «вниз» при использовании одной поляризации и до 48 лучей при использовании двух типов поляризаций (в настоящее время эта возмож-

На высоте 550 км КА движется с такой скоростью, что время его пролета в зоне видимости АТ составляет всего 4,1 мин (примерно 250 с). Если в ССС Starlink будет реализован принцип максимизации времени обслуживания КА находящихся в одной ячейке АТ и минимизации количества переключений (handover) АТ между различными КА, то каждый КА должен сопровождать группу АТ в процессе полета над ней (рис. 12). Другой принцип работы предполагает, что луч на КА зафиксирован в каком-то одном положении (угле наклона) на Землю, а задача АТ «навестись» своим лучом ДНА на КА и попасть в его луч. Однако, для этого необходимо весьма большое число КА с учетом того, что ДНА АТ невелика, в связи с чем можно предположить, что в ССС Starlink реализуется первый принцип [7].



Небольшое число лучей, формируемых КА осложняет для CCC Starlink задачу 100% покрытия территории и дает ответ на вопрос зачем SpaceX вынужден запускать так много КА. Что еще интереснее, это же дает ответ, почему SpaceX вынуждено уменьшить минимальный рабочий угол места ДНА АТ с  $40^\circ$  до  $25^\circ$ , несмотря на то, что при этом резко снижается эффективность его ФАР, а также почему АТ оснащен приводом по углу места [5, 7].

Очевидно, что с точки зрения максимизации количества ячеек, покрываемых одним лучом КА, эффективнее работать с лучами, направленными от КА не в надир (подспутниковую точку), а к краю подспутниковой зоны, несмотря на то, что там эффективная площадь антенны АТ (а значит и ее пропускная способность) резко снижается. В этом случае механизм поворота по углу места в АТ StarLink обеспечивает поворот антенны в сторону КА таким образом, чтобы обеспечить оптимальный угол между плоскостью ФАР АТ и направлением на КА (в идеале  $90^\circ$ ) – рис. 13 [7].

При этом надо учитывать, что пропускная способность одного луча КА Starlink при работе с нынешними АТ не превышает 760-800 Мбит/с, а всего КА – порядка 17-23 Гбит/с [7].

КА Starlink версии 1.5 для организации абонентских линий располагают частотным ресурсом в диапазоне 10,7-12,7 ГГц на линии «вниз» и частотами 1,4-1,45 ГГц на линии «вверх». В сумме это 2000 МГц в линии «вниз» (с учетом 2-х поляризаций – 4000 МГц). При использовании сигналов 64QAM, заявленных SpaceX в 2016 г. в проекте ССС, можно ожидать спектральной эффективности абонентской линии «вниз» до 6 бит/Гц – например, использование 64QAM с FEC и скоростью кодирования 0,87, что обеспечит спектральную эффективность 5,11 бит/Гц [7].

Однако, на данный момент, в процессе бета-тестирования реальная пропускная способность каналов связи с абонентами оказалась значительно ниже. По всей видимости это обусловлено следующими причинами. Во-первых, в настоящее время используется только одна поляризация (для АТ это правая), то есть доступная для использования АТ полоса частот – это 2000 МГц (на линии «вниз»). Во-вторых, в среднем отношение сигнал-шум (ОСШ) на входе АТ составляет порядка 11,5-12,5 дБ, что не позволяет использовать заявленные сигналы 64QAM (для использования которых нужно иметь ОСШ 17 дБ и более) и скорее используются сигналы-аналоги 16PSK и 32APSK, которые соответствуют спектральной эффективности порядка 3,5 бит/Гц (таблица 5). Проведенные расчеты показывают, что максимальный запас по ОСШ для АТ равен 14,4 дБ, что соответствует в идеальном случае модуляции 32APSK и кодированию FEC со скоростью кодирования 4/5, то есть спектральной эффективности 3,79 бит/Гц [7].

Для абонентской линии «вверх», согласно расчетам, ситуация обстоит несколько лучше. ОСШ в среднем равно 18,5 дБ и спектральная эффективность находится в районе 5 бит/Гц [7].

Тестирование ССС Starlink в Германии, которое проводилось в минимально загруженной сети, для абонентских каналов с шириной полосы «вниз» 240 МГц и 60 МГц «вверх», показали максимальную пропускную способность 542 Мбит/с в канале «вниз» и 39 Мбит/с в канале «вверх» [7].



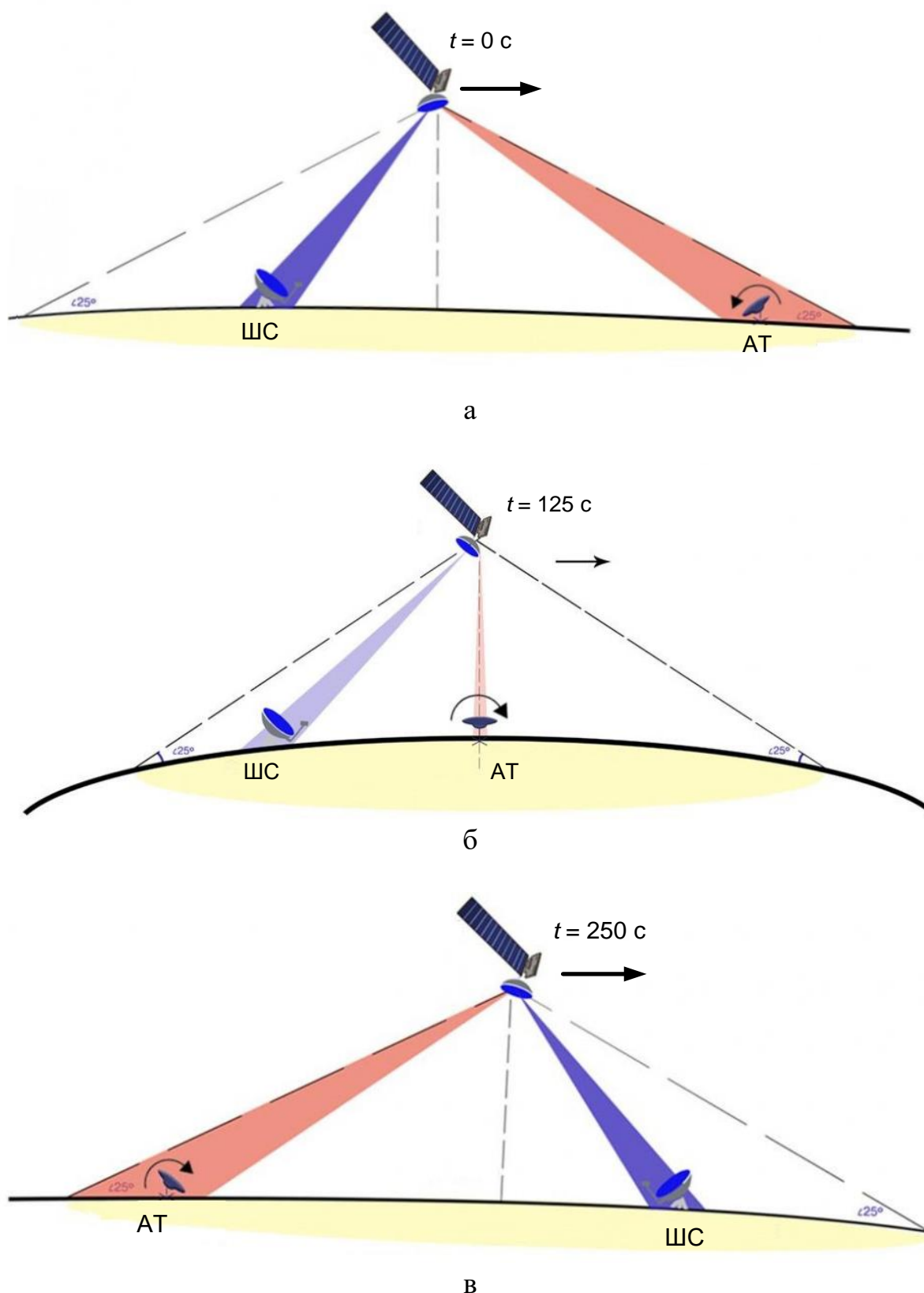


Рис. 13. Изменение по углу места антенны АТ при наведении на КА [7]

Таблица 5 – Спектральная эффективность сигнально-кодовых конструкций, получивших широкое распространение в CCC [18]

Тип сигнала	Кодовая скорость FEC	Спектральная эффективность сигнально-кодовой конструкции, бит/Гц	Минимально требуемое значение ОСШ на входе приёмника, дБ
QPSK	0,5	0,989	1
8PSK	0,75	2,228	7,91
8PSK	0,833	2,479	9,35
16APSK	0,666	2,637	8,97
16APSK	0,83	3,3	11,61
16APSK	0,88	3,53	12,89
32APSK	0,75	3,7	12,73
64QAM	0,772	4,5234	более 17
64QAM	0,873	5,1152	более 17
64QAM	0,948	5,5547	более 17

Согласно заявлению SpaceX, в CCC Starlink для маршрутизации трафика будет использоваться собственный проприетарный протокол, который будет проще чем IPv6 и иметь небольшой размер заголовков. Также для обеспечения конфиденциальности передаваемых данных в CCC Starlink будет использоваться сквозное шифрование трафика [7].

#### 2.4. Особенности организации связи в фидерных линиях

Для организации фидерных линий на КА используются две независимые параболические антенны, закреплённые по краям КА (рис. 4). Это позволяет подключить КА к 2-м различным ШС, находящимся в подспутниковой зоне.

При формировании фидерных линий КА–ШС в CCC Starlink весьма вероятна ситуация, когда их сигналы будут создавать помехи другим CCC, работающим в этом же диапазоне. Для разрешения этой проблемной ситуации SpaceX предлагает, что КА при работе с ШС, которая может создать помехи другим КА, будет просто переключается на другую ШС (рис. 14), а ШС которая будет создавать помехи не будет формировать лучи для фидерных каналов в этом направлении. Такая схема избегания взаимных помех, отличается от принятой в CCC OneWEB, где КА должен был отклоняться на несколько градусов от вертикальной линии на Землю [8].

Для реализации такого способа избегания взаимных помех, SpaceX необходимо иметь избыточное число наземных ШС, чтобы КА имел возможность выбора рабочей ШС из нескольких ШС, находящихся в своей подспутниковой зоне, в интересах избегания создания помех другим CCC. Это накладывает на центр мониторинга и управления сетью NCMC необходимость постоянного расчета взаимного положения каждого КА StarLink относительно других КА на ГСО, и, что самое трудное, со всеми КА других CCC, которые будут размещены на низких орбитах и работающих в тех же диапазонах частот. Как центр NCMC будет справляться с этой задачей в будущем, если на низкой орбите бу-

дот запущены тысячи КА таких многоспутниковых ССС как Kuiper, OneWEB, TeleSat LEO, а также других ССС использующих Ku и Ka диапазоны, оценить сейчас сложно, но поставленная задача выглядит весьма непростой [8].

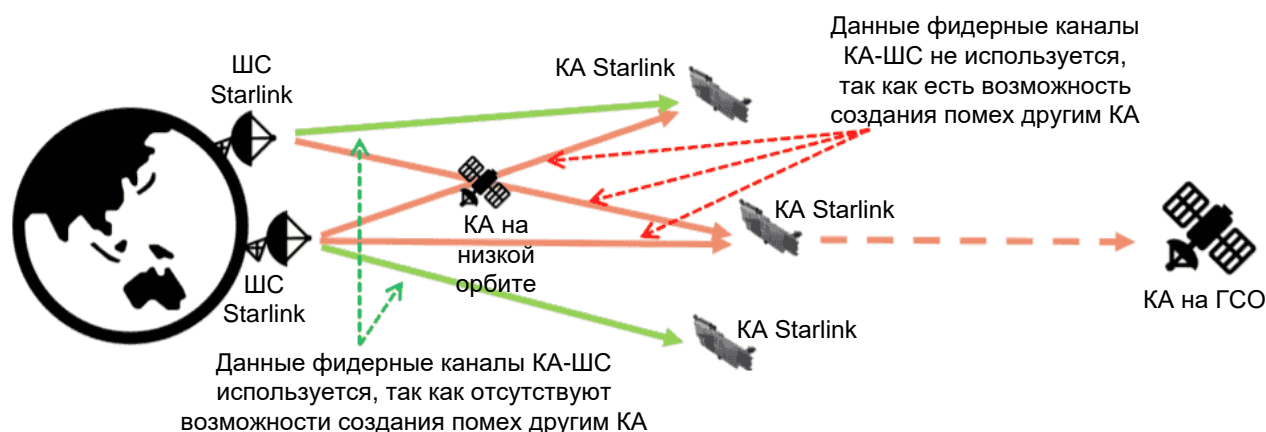


Рис. 14. Схема избегания помех для других ССС, работающих в этом же направлении и в этих же диапазонах [8]

В целом вопросы обеспечения электромагнитной совместимости между многоспутниковых ССС на низкой орбите как между собой, так и с ССС на ГСО является весьма непростым и многогранным. Более подробная информация по данному вопросу представлена в [15].

По состоянию на сентябрь 2022 г. КА Starlink работают в наиболее простом режиме – в режиме прямой ретрансляции, коммутируя абонентские каналы в фидерную линию связи с ШС. Таким образом режим ОСБ в КА отсутствует. Так же пока не реализован функционал ретрансляции абонентских данных между КА несмотря на наличие в КА Starlink версии 1.5 и выше оборудования для организации лазерной МЛС. Реализация режима ОСБ и маршрутизации абонентского трафика по космическому сегменту ССС Starlink с использованием МЛС планируется в последующих версиях КА и путем обновления про ПО КА в дальнейшем.

С учетом этого, в настоящее время, по всей видимости, абонентские линии «вверх»/«вниз», коммутируются прямым переносом с изменением несущей частоты в фидерные линии. Таким образом, КА может обслуживать АТ в подспутниковой зоне, только в том случае если в ней имеется по меньшей мере одна ШС. Вариант подключения КА к ШС фидерными линиями над территорией США представлен на рис. 15.



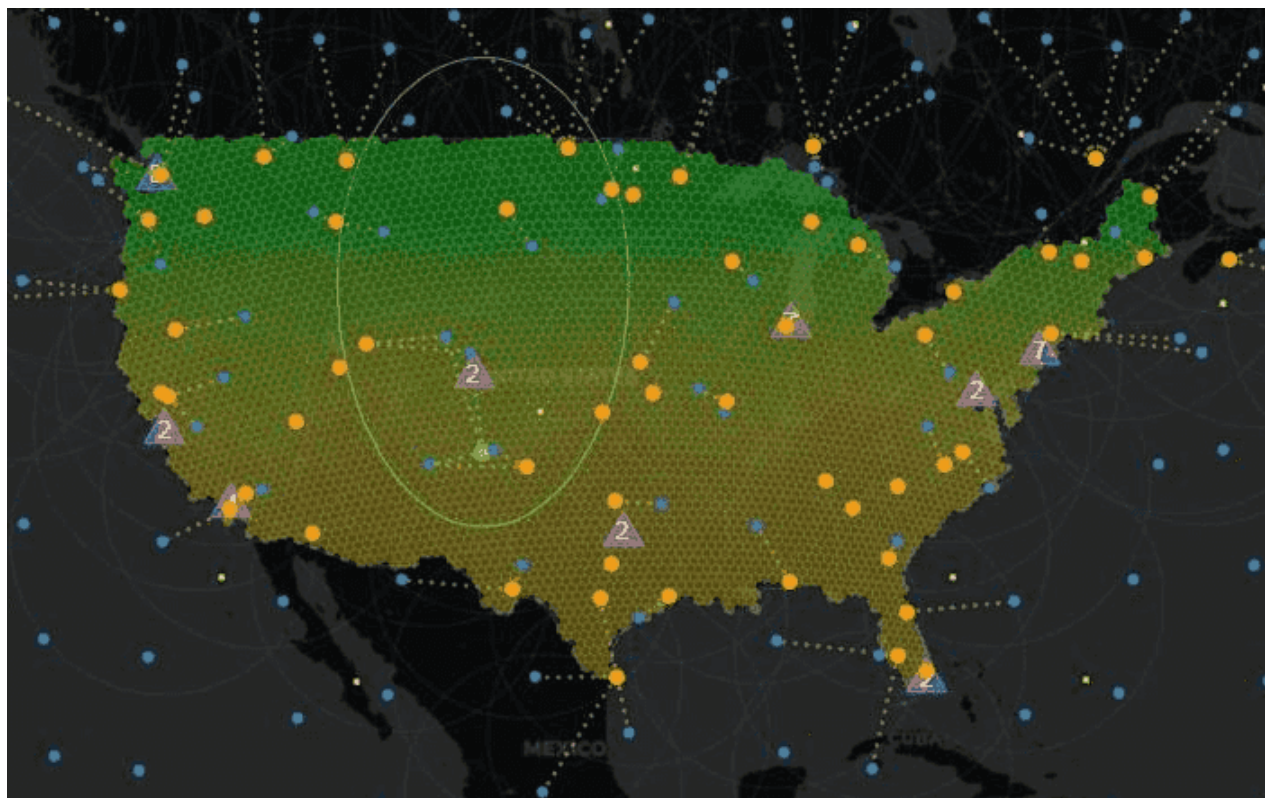


Рис. 15. Вариант подключения КА (синие точки) к ШС (желтые точки) фидерными линиями (пунктирные линии) над территорией США, разделенной на ячейки обслуживания

## 2.5. Особенности организации связи в лазерных МЛС

По состоянию на настоящее время (сентябрь 2021 г.) оборудование организации лазерных МЛС установлено на КА Starlink версии 1.5 (рис. 16), при этом само оборудование, по всей видимости, находится в режиме отладки и тестовой эксплуатации. Достоверных данных о принципах функционирования этого оборудования и вводе его в штатную эксплуатацию пока нет.

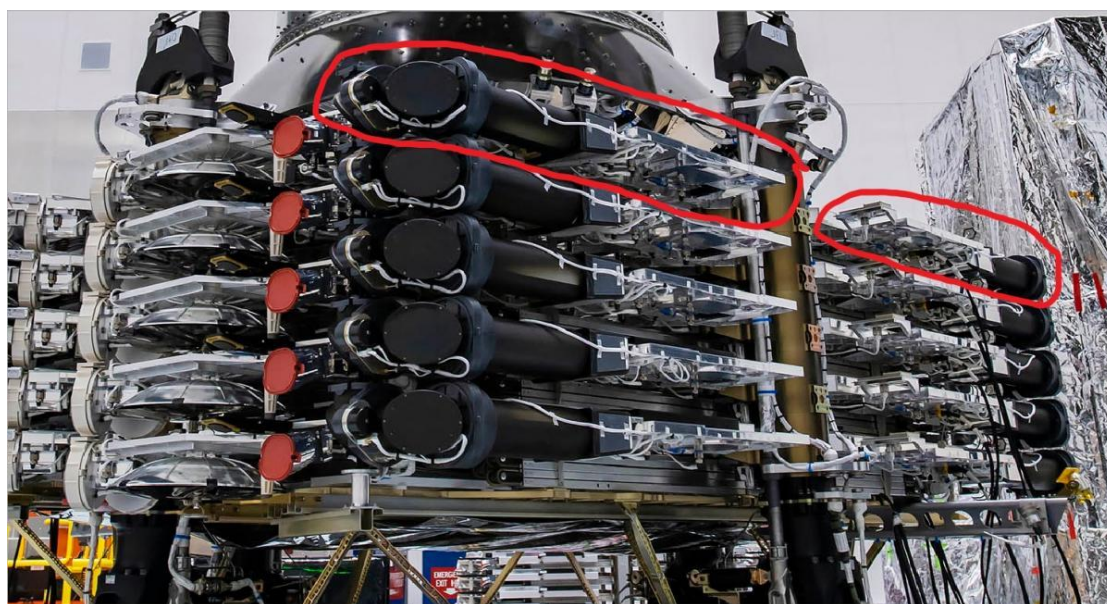


Рис. 16. КА Starlink v. 1.5 с оборудованием для лазерной МЛС [5]



В работе [15] было выдвинуто предположение о том, что поставщиком оборудования для организации лазерных МЛС является немецкая компания Tesat из Германии [33]. Данная компания поставляет широкий спектр оптоэлектронного оборудования. Для организации МЛС в ССС на низких околоземных орбитах компания предлагает комплект SmartLCT (рис. 17) для формирования лазерных МЛС, который можно установить на малых КА с большой экономией веса и размера. Данный комплект весит около 30 кг и обеспечивает передачу данных на расстояние до 45 000 км на скорости до 1,8 Гбит/с [33].

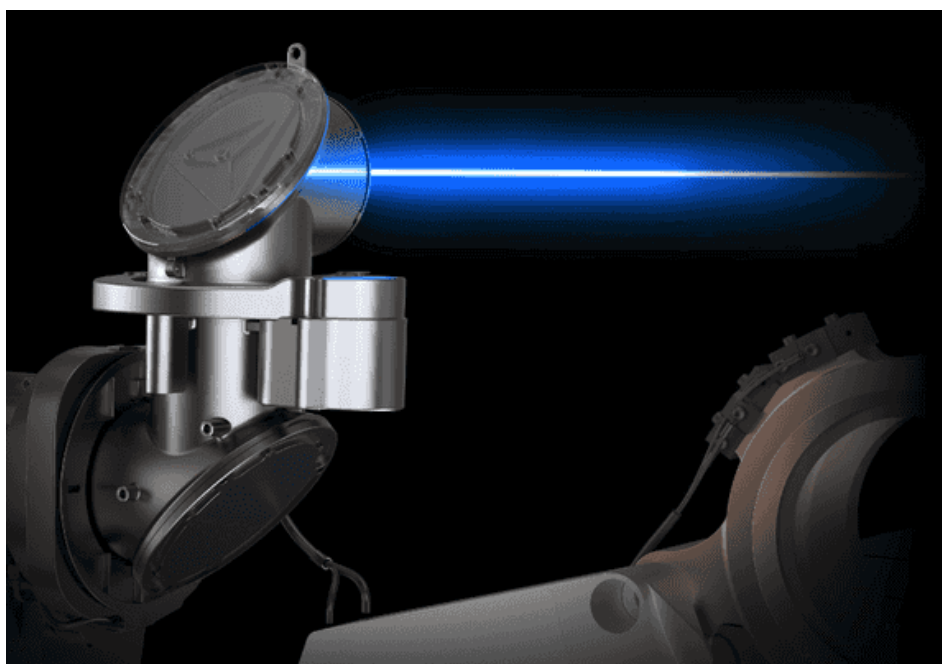


Рис. 17. Комплект формирования лазерной МЛС для КА Starlink [38]

Важным вопросом организации МЛС является обеспечение режима ОСБ на КА. Этот режим обеспечивает «распаковку» трафика, поступающего по фидерным и абонентским каналам на КА, определение кратчайшего пути между АТ-источником и АТ получателем и, если эти АТ находятся в зонах обслуживания разных КА, то обеспечение маршрутизации трафика между этими КА. Довольно частым решением при ОСБ является передача трафика АТ-источника через КА на ИС и выполнение маршрутизации в наземной сети ССС до ИС к которой подключен КА обслуживающий АТ-получатель. Однако, более эффективным способом реализации ОСБ является маршрутизация трафика между АТ-источником и АТ получателем через КА, входящие в космический сегмент, без «спуска» трафика в наземную сеть с последующим его «подъёмом» снова в космический сегмент. Подобный подход реализован в ССС Iridium [25].

Сейчас ССС Starlink использует 2 диапазона: Ku диапазон (11/14 ГГц) для абонентских линий и Ka диапазон для фидерных линий. При работе КА в режиме прямой ретрансляции с переносом несущей частоты современные КА переносят сигналы на одной частоте в сигнал той же ширины на другой частоте. Передаваемые сигналы и их полоса частот остается той же, изменяется только несущая частота. Самый простой способ использования лазерной МЛС – пере-

нести сигналы из абонентских линий Ku диапазона или из фидерных линий Ka диапазона изменив радио-несущую на оптическую несущую. В этом случае как таковая «обработка на борту» будет отсутствовать. Такой вариант прямой ретрансляции через МЛС можно использовать, например, для приема и ретрансляции абонентских каналов в КА, пролетающих над океаном, когда ШС в зоне их радиовидимости отсутствуют.

Более сложный вариант – реализация полноценного режима ОСБ на борту КА. В этом случае все принимаемые сигналы демодулируются, данные обрабатываются до уровня распаковки заголовка сетевого уровня из которого извлекается сетевой адрес АТ-получателя. После чего определяется к какому КА в космическом сегменте ССС подключен АТ-получатель и через МЛС осуществляется маршрутизация до него.

Другой важный вопрос организации МЛС – это управление и наведение лазерного луча. Неясно будут ли МЛС в ССС Starlink организованы только между КА в соседних позициях на одной орбитальной плоскости, как это сделано, например, в ССС Iridium, или же будет реализована более сложная топология МЛС – в том числе связь между КА находящимися на орбитах с различными высотами, наклонениями и плоскостями. В этом случае оборудование МЛС должно обеспечивать взаимный расчет местоположения, наведения и сопровождение лазерным лучом других КА. Более простой способ – замкнуть «в кольцо» все КА находящиеся в одной орбитальной плоскости, обеспечив МЛС с КА находящимися в «верхней» и «нижней» позиции, а маршрутизацию трафика между «кольцами» осуществлять через ШС и наземный сегмент.

Подводя итоги можно отметить следующее. Наличие лазерных МЛС с одной стороны позволит обеспечить связь в тех районах где ШС отсутствуют, прежде всего это малонаселенные районы земли и акватории мирового океана, однако существенно усложнит принципы функционирования как КА, так и системы управления ССС в целом.

## 2.6. Оценка пропускной способности КА Starlink

В первой заявке, поданной SpaceX в FCC, указывалось, что пропускная способность одного КА составит 17-23 Гбит/с, и в среднем принималась значен- ние 20 Гбит/с. Позднее в одном из сообщений SpaceX указывалось, что каждый запуск 60 КА Starlink версии 1.0 добавляет около 1 Тбит/с к пропускной способности ССС, то есть пропускная способность одного КА версии 1.0 ближе к 16-17 Гбит/с. Также не уточнялось, суммарная ли это пропускная способность КА в обоих направлениях «вверх»/«вниз» или только по направлению «вниз» к АТ. По всей видимости, нет смысла определять пропускную способность всей ССС Starlink, так как она вряд ли когда-нибудь может быть реализована вся полностью т.к. 70% Земли покрыто морями и океанами, кроме того, востребованность услуг связи сильно различается для густонаселенных и малонаселенных районов. Поэтому целесообразно говорить не о пропускной способности ССС, а о пропускной способности одного КА и оценивать, сколько АТ он может обслужить.

Рассмотрим по отдельности пропускную способность КА Starlink в Ku и Ka диапазонах.

Ka диапазон, отведен в КА версии 1.5 под фидерную линию «вверх» и здесь имеется эквивалентный частотный ресурс в 4200 МГц при одновременном использовании 2 поляризаций (таблица 3). Учитывая заявленное SpaceX использование на этой линии модуляции до 64QAM, то в ней обеспечивается спектральная эффективность порядка 6 бит/Гц, (проведенная оценка бюджета фидерной радиолинии показала, что такая спектральная эффективность вполне достижима). В результате можно сделать вывод, что оценка пропускной способности в 20 Гбит/с в фидерной линии «вверх» ШС–КА является вполне достижимой.

Однако, в абонентских линиях «вниз» КА–АТ, как показано ранее, спектральная эффективность составляет 1,5-3,5 бит/Гц (при использовании АТ UT-1, значении ОСШ порядка 11,5-12,5 дБ, использовании сигналов-аналогов 16PSK и 32APSK, одной поляризации). Таким образом, если в наземной абонентской сети будут только АТ этого типа, то пропускная способность абонентских линий «вниз» одного КА составит 6-14 Гбит/с при использовании одной поляризации (как сейчас) и 12-30 Гбит/с – при использовании обеих поляризаций (планируется в перспективе).

Также возможно оценить максимальное число АТ, которое может обслужить один КА Starlink в подспутниковой зоне. Примем суммарную пропускную способность КА по отношению к абонентским линиям «вниз» в 20 Гбит/с (с учетом работы КА в режиме прямой ретрансляции, использовании частотного ресурса в обеих поляризациях и пропускной способности фидерной линии «вверх» 20 Гбит/с). Учтем, что среднее потребление одного домохозяйства США, подключенного к сети Интернет проводными каналами связи, в 2020 г. составило 281 Гбайт в месяц, что эквивалентно 0,9 Мбит/с при равномерной ежемесячной загрузке, и то, что среднемесячная и пиковая загрузка в сетях интернет-провайдеров обычно соотносится как 1 к 3-4. В таких условиях, максимальное количество абонентов, использующих АТ UT-1, которое может обслужить один КА Starlink в подспутниковой зоне, составляет около 22 200 активных абонентов при среднем потреблении трафика (0,9 Мбит/с) и 5500-7400 при пиковом потреблении трафика (2,7-3,6 Мбит/с). С учетом того, что в подспутниковой зоне одного КА находится порядка 7 470 ячеек диаметром 24 км, получим что в каждой ячейке на уровне проводного сервиса можно обслужить всего 3 активных абонентов при среднем потреблении трафика и только 1 абонента – при пиковом потреблении трафика! Указанные рассуждения применимы в случае если 1 КА обслуживает все ячейки в своей подспутниковой зоне, а в абонентских каналах используются современные методы множественного доступа к частотному ресурсу КА (CDMA/TDMA/FDMA), а не закреплённых каналов типа SCPC. Полученные цифры слабо коррелируют с расчетами SpaceX, которая предполагает обслуживать 125-130 активных АТ в ячейке.

Для получения заявленных SpaceX значений нужно либо существенно снижать скорость передачи данных, либо вводить тарифные планы обслуживания абонентов с ограниченным лимитом переданных/принятых данных, либо

существенно наращивать число спутников, расширять используемый ими частотный ресурс, оптимизировать систему обслуживания КА наземных ячеек. Можно предположить, что в процессе развития CCC StarLink, будут использованы все вышеуказанные способы повышения количества обслуживаемых абонентов.

На ресурсе [38] представлена программно-имитационная модель, позволяющая оценить пропускную способность CCC Starlink в зависимости от различных режимов организации связи. По итогам исследования этой модели в [38] делаются следующие выводы:

- для более эффективного обслуживания ячеек с высокой плотностью АТ, каждую такую ячейку может обслуживать несколько лучей, разнесенных по частоте и/или по поляризации, в том числе формируемых разными КА. Кроме того, лучи КА могут производить обслуживание ячеек с высокой плотностью АТ в режиме TDMA чаще и/или дольше при последовательном обходе лучом ячеек в подспутниковой зоне (рис. 10);
- для того чтобы каждый луч КА охватывал как можно большее количество ячеек в подспутниковой зоне в первую очередь обслуживаются ячейки у края зоны, где в пятно луча попадает максимальное число ячеек, а в дальнейшем – ячейки, расположенные ближе к центру подспутниковой зоны (ее надиру) (рис. 8, 11);
- в местах где имеется большое количество ячеек с высокой плотностью АТ целесообразно устанавливать большее количество ШС для того чтобы обеспечить возможность подключения большего числа КА, которые одновременно обслуживают эти высокоплотные ячейки, а также больший частный ресурс фидерных линий, в которые коммутируются абонентские линии на борту КА;
- в местах где отсутствуют ШС или ее плотности недостаточно, для коммутации абонентских каналов, могут задействоваться МЛС. В этом случае КА может распределять информационные потоки к/от своих абонентов к соседним КА, которые будут ретранслировать их далее до достижения ближайшего ШС;
- в некоторых ячейках мощность лучей и отдельные полосы частот могут быть ограничены, в соответствии с решениями местных органов, занимающихся контролем электромагнитного спектра, что приведет к дополнительному снижению способности CCC обслуживать АТ в таких ячейках.

## 2.7. Качество обслуживания в CCC Starlink

К основным показателям качества обслуживания (QoS – Quality of Service) в CCC относятся:

- обеспечиваемая скорость загрузки и передачи данных к/от абонентов;
- задержка передачи данных.

При оценке скорости передачи данных стоит учесть данные сервиса SpeedTest [34], который в 2-м квартале 2022 г. провел масштабное исследование



скорости передачи данных и задержки в CCC Starlink на территории Европы, Океании, Северной и Южной Америке. Результаты тестов сведены в таблицу 6.

По оценке сервиса SpeedTest [34], в период с 1 по 2 квартал 2022 г. скорость передачи через CCC Starlink во всем мире в среднем снизилась, что, по всей видимости, обусловлено опережающим ростом числа пользователей CCC относительно роста числа КА в ОГ и их возможностей по обработке пользовательского трафика.

Таблица 6 – Результаты измерений скорости передачи данных и задержки в CCC Starlink на территории Европы, Океании, Северной и Южной Америке, по состоянию на 2й квартал 2022 г. [34]

Регион	Средняя скорость передачи данных, обеспечиваемая для одного АТ в канале «вниз», Мбит/с	Средняя скорость передачи данных, обеспечиваемая для одного АТ в канале «вверх», Мбит/с	Средняя задержка передачи данных, мс
Европа	55-123	10-28	43-98
Северная Америка	62-112	7-14	48-98
Южная Америка	94-128	19-26	38
Океания	105-45	10-19	49-98

Относительно оценки задержки передачи данных дополнительно отметим следующее. В сентябре 2020 г. SpaceX направила в FCC письмо, в котором привела данные (рис. 18), полученные при недельном бета-тестировании группы в 30 АТ, с передачей файлов в течение 15 с. Было проведено более 1 млн измерений времени задержки. Как видно из графика на рис. 18 в 95% случаев задержка передачи данных к пользователю была менее 42 мс, и в 50% – менее 30 мс [17].

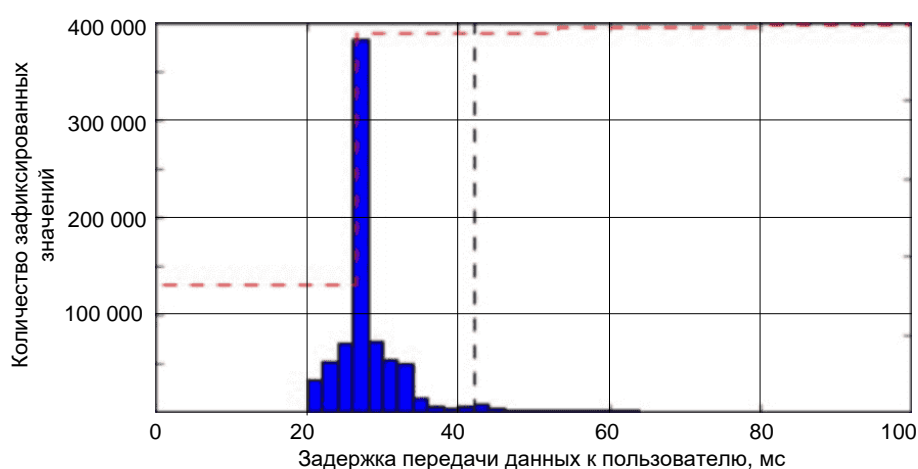


Рис. 18. Гистограмма распределения значений задержки передачи данных к пользователю в CCC Starlink [17]

В целом, CCC Starlink предоставляет уровень услуг доступа в сеть Интернет сравнимый с проводными провайдерами. Однако этот доступ отличается неравномерностью предоставления услуг связи и широким варьированием скорости передачи в зависимости от времени суток, погодных условий, загрузки ячеек обслуживания и месторасположением ИС.

### 3. Наземные средства CCC Starlink

#### 3.1. Абонентские терминалы

К сентябрю 2021 года, по словам президента SpaceX Г. Шотвелл, компания поставила более 100 тыс. АТ. Первоначально для использования в бета-тестировании услуг связи CCC Starlink предоставлялся АТ UT-1. Данный терминал был основан на единой 1675-элементной ФАР, работающей поочередно на прием и на передачу. В настоящее время АТ работают только с одной поляризацией – круговой, правого вращения, однако в документах CCC Starlink, утверждается о возможности наземных АТ использовать 2 типа поляризации – левого и правого вращения (подробнее информация о сложностях использования двух типов поляризации в АТ подробно изложено в [14]). UT-1 работает с каналами на прием 5 номиналов ширины: в 15, 30, 60, 120 и 240 МГц и с каналами на передачу 3 номиналов ширины: в 15, 30 и 60 МГц. Это позволяет передать соответственно 15, 30, 60, 120 и 240 Мсимв./с, что при использовании сигналов от BPSK до 64QAM обеспечивало битовую скорость до 350 Мбит/с на прием и до 130 Мбит/с на передачу. Максимум скорости АТ был зарегистрирован при тестировании в Германии в полностью незагруженной ячейке, когда при ширине полосы «вниз» 240 МГц и 60 МГц полосы «вверх» была обеспечена скорость передачи 542 Мбит/с в канале «вниз» и 39 Мбит/с в канале «вверх» [7]. Мощность передатчика АТ UT-1 меняется в зависимости от его наклона относительно линии в зенит. В случае, когда луч ДНА направлен в зенит, мощность, выдаваемая на антенну, составляет 0,76 Вт, при предельном отклонении от вертикали – 4,06 Вт. Эти ограничения задаются санитарными нормами США на плотность потока радиоизлучения. В составе АТ используется 2 электродвигателя, которые обеспечивают вращение антенна в горизонтальной плоскости на 360° и отклонение ее на 50°-60° в вертикальной плоскости [9].

В июне 2021 г. компания SpaceX представила вторую версию АТ – UT-2 (рис. 19). К настоящему времени именно эта версия АТ является основной.

При переходе от АТ UT-1 к UT-2 из основных доработок следует отметить следующее. В UT-2 приемная ФАР и передающая ФАР представляют собой отдельные антенные решетки, в отличие от единой ФАР, работающей на прием и передачу в режиме разделения по времени в АТ UT-1. Это позволяет не только обеспечить одновременный прием и передачу, но и увеличить время непрерывной работы передающей ФАР, которое в UT-1 было ограничено ее нагревом до +50°C. Кроме того, в АТ UT-2 обеспечивается угол сканирования ФАР в пределах почти ±60° при 4 дБ [19].



а

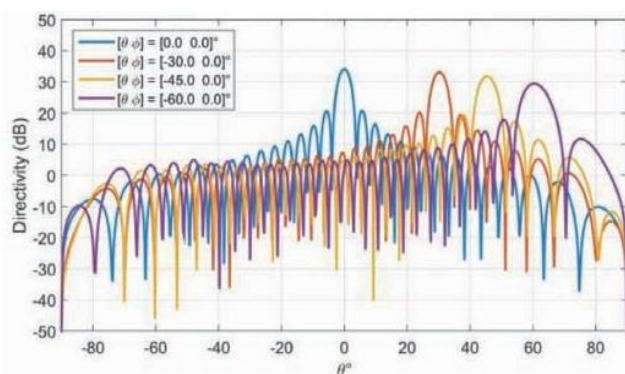


б

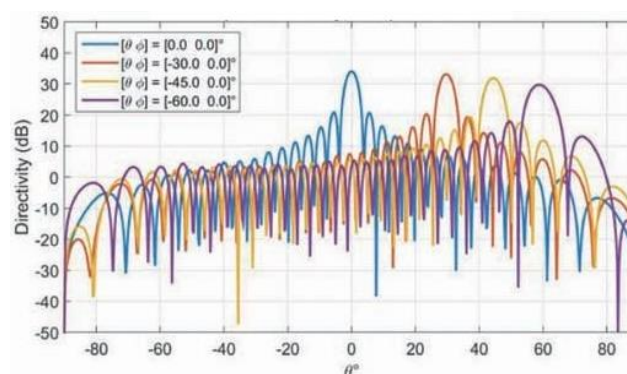
Рис. 19. AT Starlink: а – UT-1; б – UT-2 [19]

ДНА AT UT-2 для «прямого» и «косого» сечений антенны при различных значениях угла места при наведении ДНА на КА приведены на рис. 20.

AT UT-1 и UT-2 являются стационарными и, как показано в работе [9], быстро теряют связь при раскачивании или движении платформы, на которой они закреплены. SpaceX ведет работу по созданию мобильного AT – ESIM (Earth Station In Motion) (рис. 21).



а



б

Рис. 20. ДНА AT UT-2, передающего на частоте 14,125 ГГц, при различных значениях угла места при наведении ДНА на КА:  
а – «прямое» сечение ФАР; б – «косое» сечение ФАР [19]

В настоящее время данный терминал еще официально не представлен, но о его ТТХ можно судить по заявкам, которые SpaceX направила в FCC для получения разрешения на экспериментальную отработку ESIM. Обращает на себя внимание, что, в отличие от AT UT-2, в ESIM увеличен размер приемной ФАР (площадь апертуры увеличена в 1,45 раза). Но угол сканирования аналогичен углу сканирования в UT-2, то есть не более  $\pm 60^\circ$ . По всей видимости это отражает то, что проблема SpaceX в деле создания дешевой ФАР с сектором сканирования более  $60^\circ$  пока далека от своего практического разрешения. По заявке

нию SpaceX терминалы ESIM будут иметь возможности измерения и контроля своего излучения каждые 100 мс. Если оно выходит за допустимые пределы, ESIM будет самостоятельно уменьшать свой уровень излучения. Кроме этого, будет вестись дополнительный мониторинг параметров излучения ESIM со стороны центра мониторинга и управления сетью NCMC. Компания SpaceX, в документации на ESIM, дало гарантию, что будет постоянно определять местонахождение ESIM-терминала и в случае, если он попадет в воздушное пространство или территориальные воды другого государства, система автоматически перенастроит допустимые параметры излучения согласно действующим нормам для данного государства [19].



Рис. 21. Внешний вид самолетного АТ ESIM

ТТХ терминалов UT-1, UT-2 и ESIM представлены в таблице 7.

В абонентских каналах используется OFDM-мультиплексирование подканалов пользователей, а для контроля эффекта Доплера и нелинейных искажений полезных сигналов используются относительно узкополосные пилот-сигналы, которые в англоязычной литературе называются «маяками». Пилот-сигналы имеют более высокую энергетику чем полезные сигналы (на значения от 5 до 20 Дб) и формируются в области, имеющей ширину до 2 МГц. По всей видимости, эти же пилот-сигналы используются для оповещения АТ о наличии над ними КА.

После начала этапа опытной эксплуатации CCC Starlink радиоинженеры по всему миру с помощью наземных антенных систем, приемных устройств и анализатора спектра фиксируют сигналы абонентских каналов «вниз». Один из вариантов такого общего OFDM-сигнала с группой пилот-сигналов на центральной частоте в абонентском канале «вниз» представлен на рис. 22 а. При

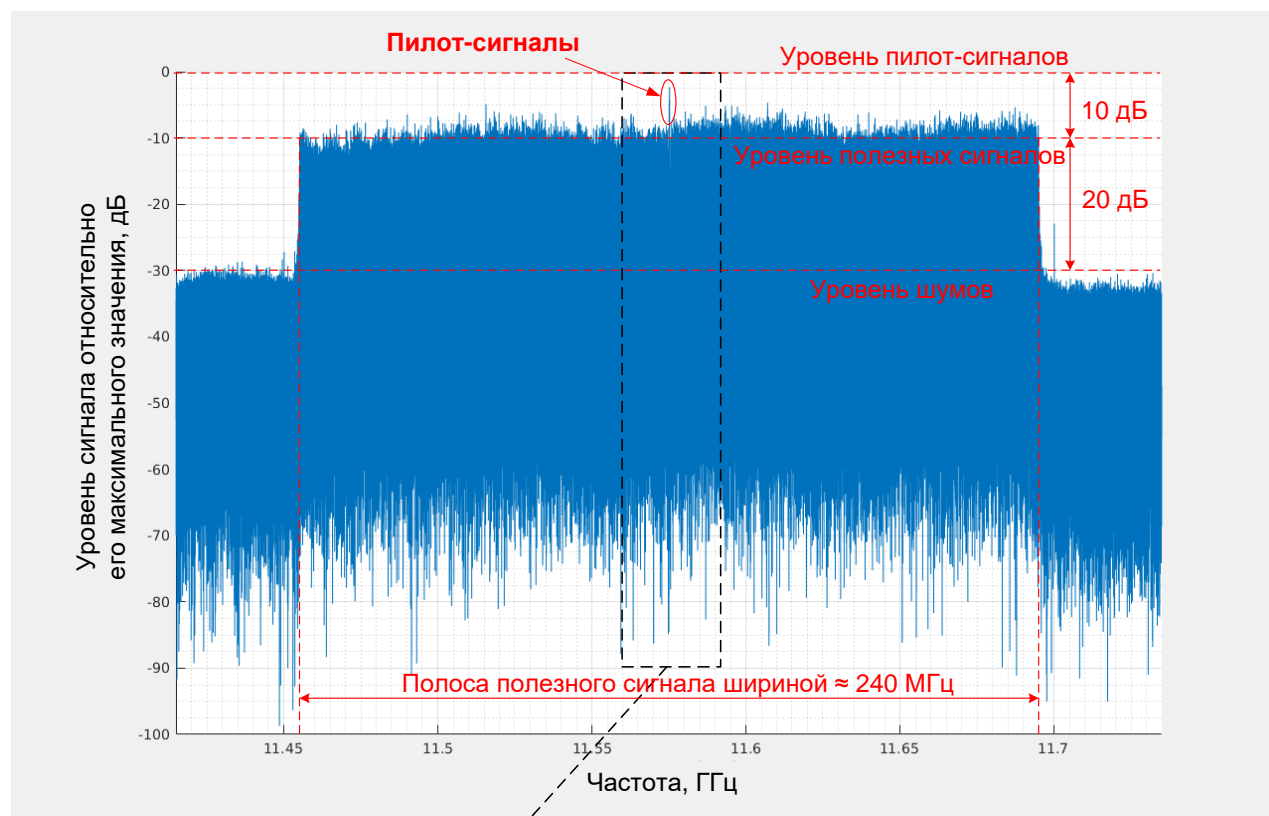


детальном рассмотрении полосы частот до 6 МГц в абонентском канале можно наблюдать несколько пилот-сигналов, в составе этой группы (рис. 22 б) [39, 40].

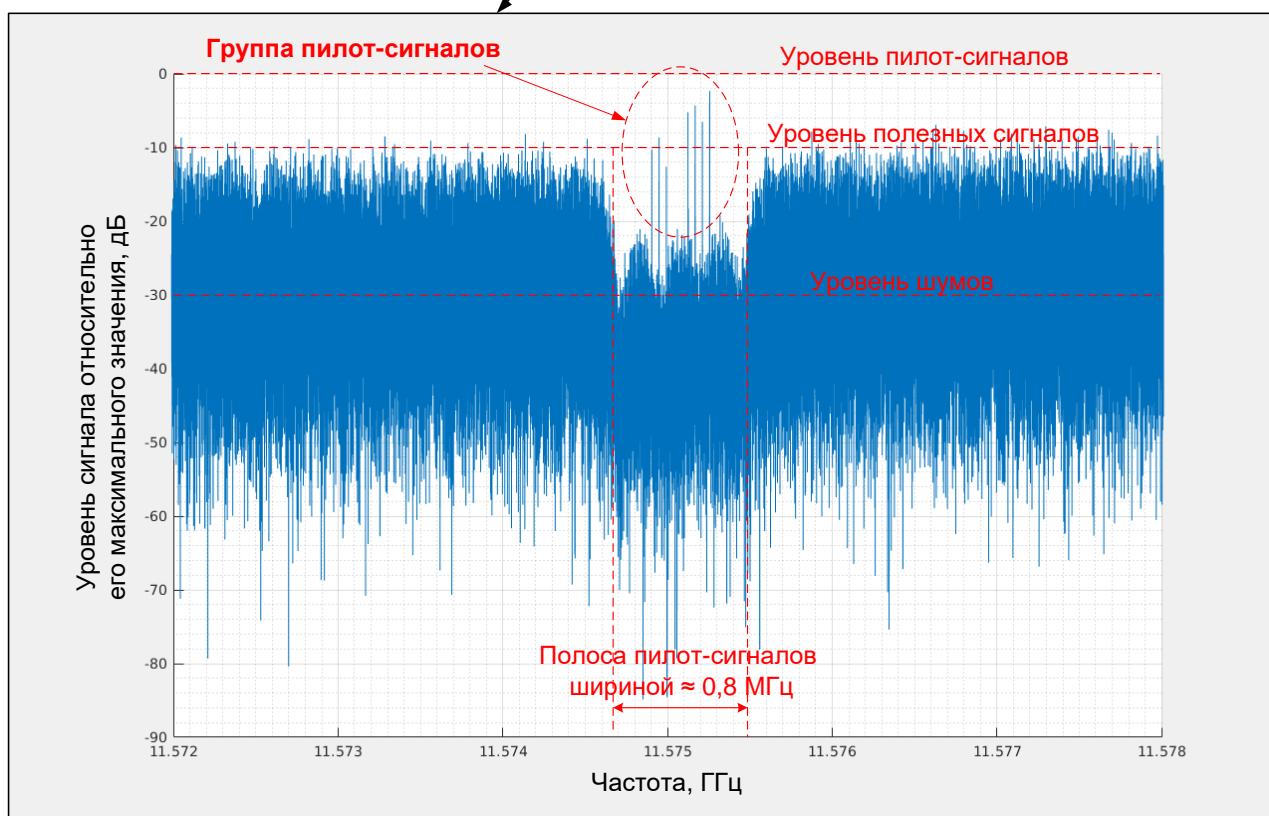
Таблица 7 – ТТХ терминалов UT-1, UT-2 и ESIM [9, 19]

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

Примечание: н/д – нет данных. Информация по ESIM дана по данным из заявки SpaceX в FCC и может отличаться от ТТХ конечного изделия.



а.

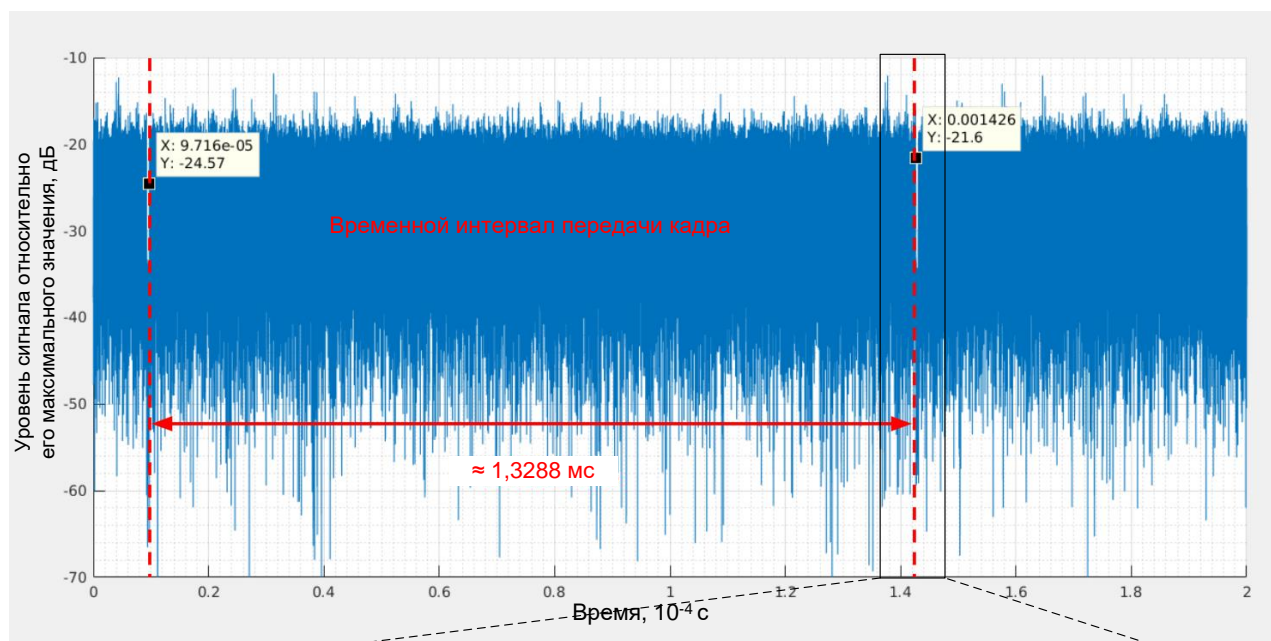


б.

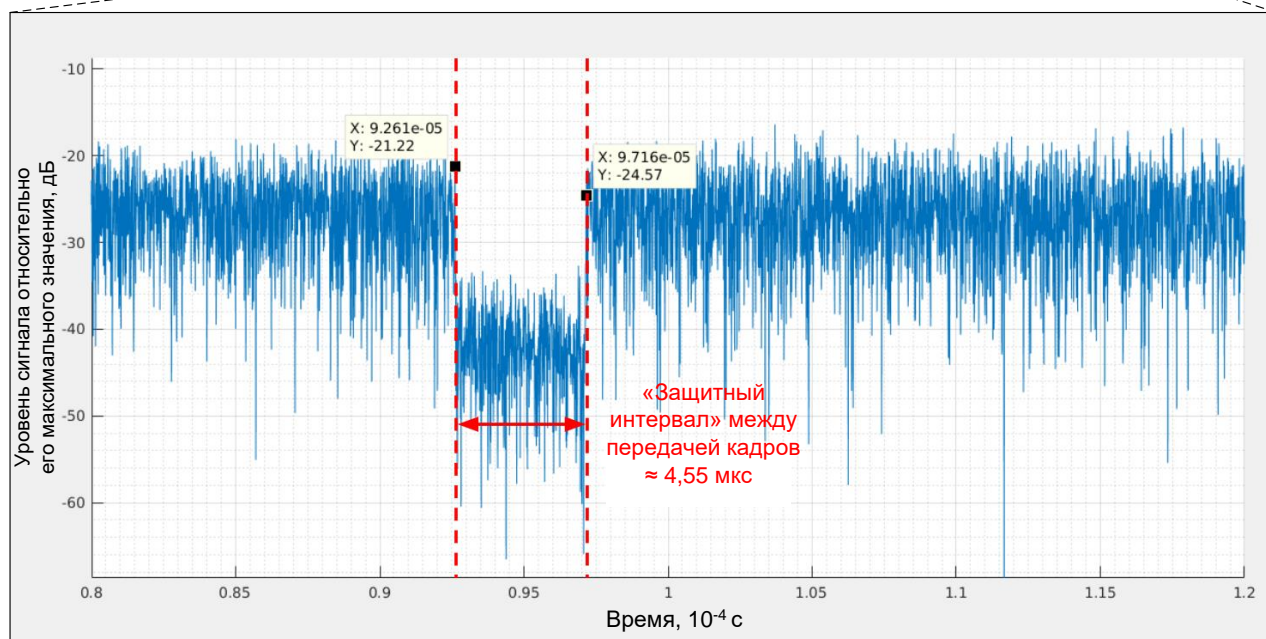
Рис. 22. Один из вариантов OFDM-сигнала в абонентском канале «вниз», принимаемый АТ, который ретранслируется КА от ШС: а – в полосе частот обзора анализатора спектра 240 МГц; б – в полосе частот обзора анализатора спектра 6 МГц на центральной частоте [39, 40]

При анализе временных параметров сигналов в абонентском канале «вниз» можно различить отдельные кадры (рис. 23). Временной интервал передачи кадра составляет 1,3288 мс (рис. 23 а). Кадры разделяется друг от друга «защитным интервалом» в 4,55 мкс (рис. 23 б) [39, 40].

Необходимо отметить, что на рис. 22 и 23 по вертикальной оси для измерения использован не абсолютный уровень сигнала, а относительный уровень сигнала (в дБ), относительно максимального (пикового) уровня принимаемого сигнала.



а.



б.

Рис. 23. Вариант формирования кадров в абонентском канале «вниз»:  
а – временной интервал передачи кадра; б – «защитный интервал»  
между кадрами [40]

SpaceX традиционно не раскрывает себестоимость АТ Starlink. Известно, что терминал для стационарного применения продается абонентам по цене 499\$ или эквиваленту этой цены в других странах. Эксперты считают, что терминал UT-1 изначально обходился компании в 2500-3000\$. В апреле 2021 г. SpaceX сообщила, что удалось снизить себестоимость АТ с 3000\$ до 1500\$, при этом запуск в производство второй версии АТ (видимо, речь идет об АТ UT-2) еще примерно на 200\$ снизит его себестоимость. При этом в SpaceX надеются, что дальнейшее увеличение количества производимых АТ позволит снизить их себестоимость до «нескольких сотен долларов» [19].

Летом 2021 г. SpaceX подал заявки на 2 дополнительных варианта АТ. Первая, от 8 июня 2021 г. (SES-LIC-INTR2021-02141), содержит информацию о АТ нового поколения (внутренний индекс UTA-205/206/207) с уменьшенным размером антенны (будет иметь, скорее всего, ФАР прямоугольной формы размером 29×48 см, и меньшую мощность приемопередатчика – 2,44 Вт, вместо нынешних 4 Вт. Вторая заявка – SES-LIC-INTR2021-03015 от 3 августа 2021 г., содержит информацию о терминале HP ESIM (HP – high-performance), предназначенном для работы в движении вне корпуса автомобилей, судов или самолетов и в суровых климатических условиях. «Эта высокопроизводительная модель HP ESIM будет работать с более высоким коэффициентом усиления и меньшей мощностью передачи (таким образом, сохраняя постоянную ЭИИМ по сравнению с другими пользовательскими терминалами), более высоким углом сканирования и функциями, которые делают устройство более прочным для использования в суровых условиях окружающей среды», – указала компания SpaceX в своей заявке.

В дальнейшем, в соответствии с планом развертывания CCC Starlink, планируется что будет развернута 2-я фаза ОГ CCC, а затем фаза Generation 2. Предполагается что в отличие от АТ 1-й фазы CCC, АТ Generation 2 будет дополнительно работать не только в Ku, но и в Ka диапазонах (таблица 8). При этом АТ для 1-й фазы будут работать и с KA Generation 2 [13].

Таблица 8 – Предполагаемый частотный план АТ Starlink  
после фазы развертывания Generation 2 [13]

Тип канала связи и направление приема-передачи	Диапазоны частот, ГГц	Доступно МГц в одной поляризации	Количество поляризаций	Общее количество доступных экв. МГц
линия «вверх» АТ – КА	12,75-13,25	500	2	4 000
	14-14,5	500		
	18,8-19,3	500		
	19,7-20,2	500		
линия «вниз» КА – АТ	10,7-12,75	2050	2	7 300
	17,8-18,6	800		
	18,8-19,3	300		
	19,7-20,2	500		

Это даст больше пропускной способности для абонентских линий. Увеличатся полосы частот с 2000 до 3650 МГц в абонентской линии «вниз» и с 500



до 2000 МГц в линии «вверх». С учетом повторного использования частот на основе поляризационной развязки получим увеличение эквивалентного частного ресурса с 4000 до 7300 МГц в абонентской линии «вниз» и с 1000 до 4000 МГц в линии «вверх» [13].

Кроме того, благодаря большому числу КА в ОГ Starlink Generation 2 на видимом для АТ участке неба, он сможет выбирать для работы те КА, которые незатенены для него препятствиями (деревьями или более высокими домами), то есть АТ получит очень высокую гибкость. АТ Generation 2 будет обладать интеллектуальной адаптивностью, позволяющей АТ отключать/выбирать для работы те КА и их лучи, которые не ставят помехи другим системам на низкой или геостационарной орбите. АТ Generation 2 сможет принимать сигнал нескольких отдельных лучей КА суммарной полосой частот до 2000 МГц (с эквивалентной скоростью не менее 6 Гбит/с) и передавать в суммарной полосе до 125 МГц (с эквивалентной скоростью не менее 125 Мбит/с) [13].

В целом, при реализации всего того, что задумано SpaceX в АТ Generation 2, этот терминал обеспечит предоставление услуг связи (в части задержки и скорости) на том уровне, который имеют сейчас жители мегаполисов в США, подключенные к сети Интернет по оптике или будущей сотовой сети 5G.

### 3.2. Средства связи шлюзовых станций

Сеть ШС (GateWay) является основой наземного комплекса CCC Starlink. Основная часть ШС Starlink размещена на территории США (рис. 24), однако, эта сеть постоянно увеличивается, а охват поверхности Земли увеличивается.

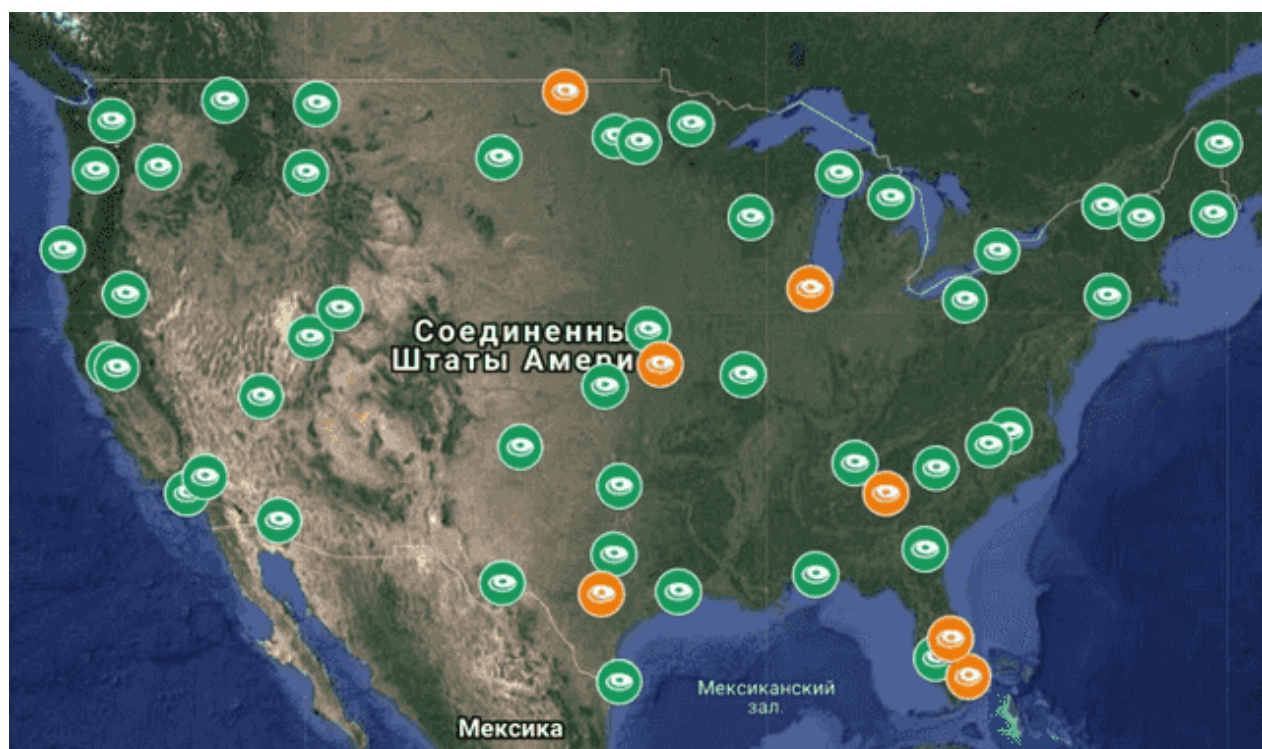


Рис. 24. Сеть ШС развернутых на территории США по состоянию на август 2021 г. [5]

Типовая стационарная ШС, как правило, представляет собой площадку, на которой размещается 9 параболических антенн (накрытых радиопрозрачным куполом), приёмопередающая аппаратура и телекоммуникационной оборудование (рис. 25).



Рис. 25. Общий вид типовой стационарной ШС Starlink [5]

ШС подключается к наземной сети посредством ВОЛС. В отдельных случаях ШС оборудуется дублирующим каналом ВОЛС и резервным электропитанием. Девять антенн позволяет одной стационарной ШС работать с 4-мя КА, т.к. каждый КА требует две антенны (первая антенна сопровождает КА, а 2-я возвращается в исходное положение, чтобы навестись на новый КА). Одна антенна находится в горячем резерве. Помимо стационарных ШС компания SpaceX разработала и мобильную ШС с 4-мя антеннами, которая обслуживает 2 КА (рис. 26).



Рис. 26. Вариант мобильной ШС Starlink

Так как важной частью функциональности CCC Starlink является обеспечение системы единого времени и фиксированной задержки прохождения дан-



ных между ШС и центром NCMC, то в связи с этим размещение ШС на движущихся, даже с небольшой скоростью, объектах (например, на плавучих океанских платформах) может оказаться трудно решаемой задачей и в ближайшее время такие ШС, по всей видимости, не будут представлены или введены в эксплуатацию[8].

Компоновка наземной антенны, используемой в ШС, представлена на рис. 27. Внешний вид – на рис. 28. Диаметр антенны 1,47 м. Питание осуществляется от стационарной сети 220-230 В. ТТХ антенной системы ШС приведены в таблице 9. Использование параболических антенн обусловлено тем, что они, в отличие от антенн с ФАР, могут работать при малых углах места (до  $5^\circ$ , как указано в заявке SpaceX) [5, 8].

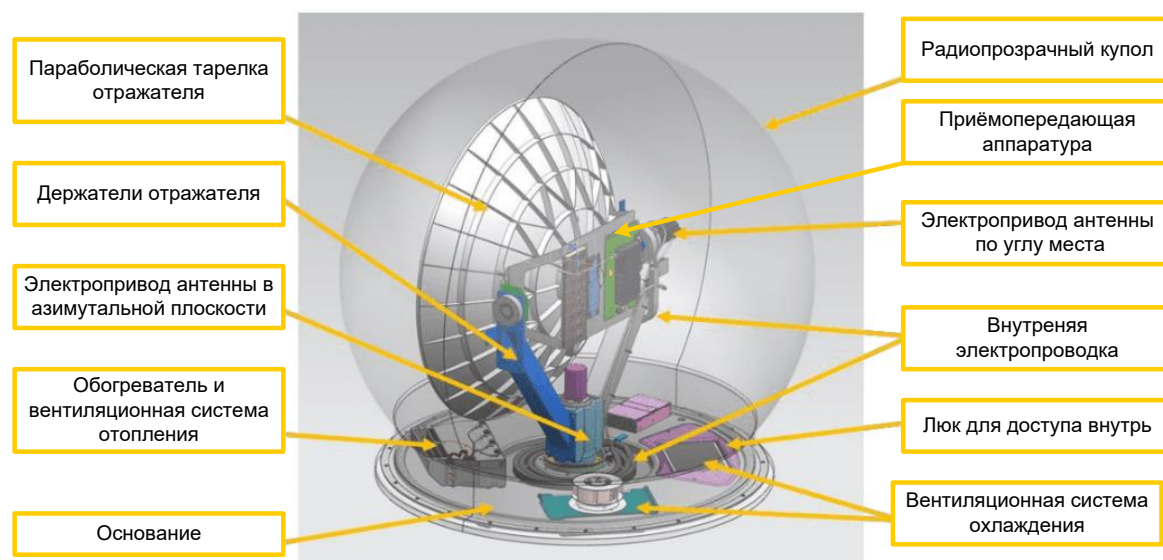


Рис. 27. Компоновка наземной антенны, используемой в ШС Starlink [5]

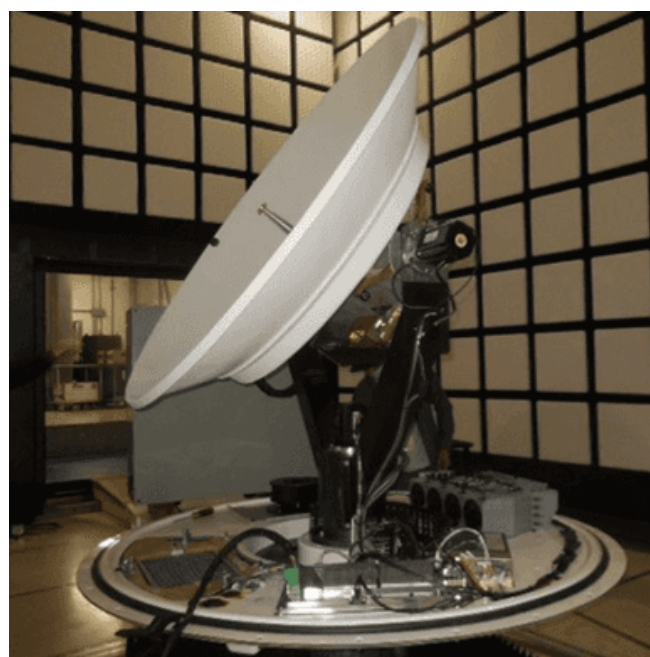


Рис. 28. Внешний вид наземной антенны, используемой в ШС Starlink [5]

Таблица 9 – ТТХ антенной системы ШС Starlink [5]

Характеристика	Линия «вверх»	Линия «вниз»
Диаметр, м	1,5	
Площадь рефлектора, м <sup>2</sup>	1,7	
Апертурная 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 по частотам	4 канала по 500 МГц (всего 2 ГГц)	5 каналов по 250 МГц (всего 1,25 ГГц)
Минимальная полоса канала	62,5 МГц	250 МГц
Максимальная полоса канала	500 МГц	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	-3дБи (у линии горизонта)	46,9 дБи (на частоте 19 ГГц)
Мощность передатчика	50 Вт	–
Удельная излучаемая мощность на поверхности антенны, мВт/см <sup>2</sup>	2,1	
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 C/N в условиях ясного неба	–	19 дБ



ШС посредством ВОЛС подключаются к узлам доступа PoP (Point of Presence) наземной сети, а далее – к сети Интернет. Узлы PoP, по всей видимости, оборудованы системой биллинга, управления клиентским трафиком и оборудованием системы компьютерного мониторинга трафика CALEA (Communications Assistance for Law Enforcement Act) – американского аналога отечественной системы СОПМ (система оперативно-розыскных мероприятий). Данные абонентов от ШС через PoP будет маршрутизироваться по ВОЛС на ближайшие узлы обмена трафиком наземной сети с сетью Интернет. В США такие узлы обмена размещены в Лос-Анджелесе, Сиэтле, Орландо, Нью-Йорке, Сан-Хосе, Далласе и Вашингтоне. Кроме того, на SpaceX зарегистрированы IP-адреса в Австралии, Новой Зеландии, Канаде, Великобритании, Германии и Испании.

На саму SpaceX зарегистрировано всего 2 автономных сети – AS14593 и AS27277 (последняя, возможно, используется в качестве внутренней сети SpaceX). Поэтому в качестве основной наземной сети CCC Starlink используется там, где этой возможно, сеть Google (рис. 29), которая является стратегическим партнером и акционером компании SpaceX. Для снижения затрат на развертывание наземной инфраструктуры, там, где возможно, SpaceX старается размещать ШС прямо в зданиях PoP сети Google, но это не всегда возможно, т.к. из-за законодательных ограничений часть ШС размещаются в труднодоступных районах. В случае невозможности использования сети Google используются собственные или арендованные ВОЛС [6, 8].

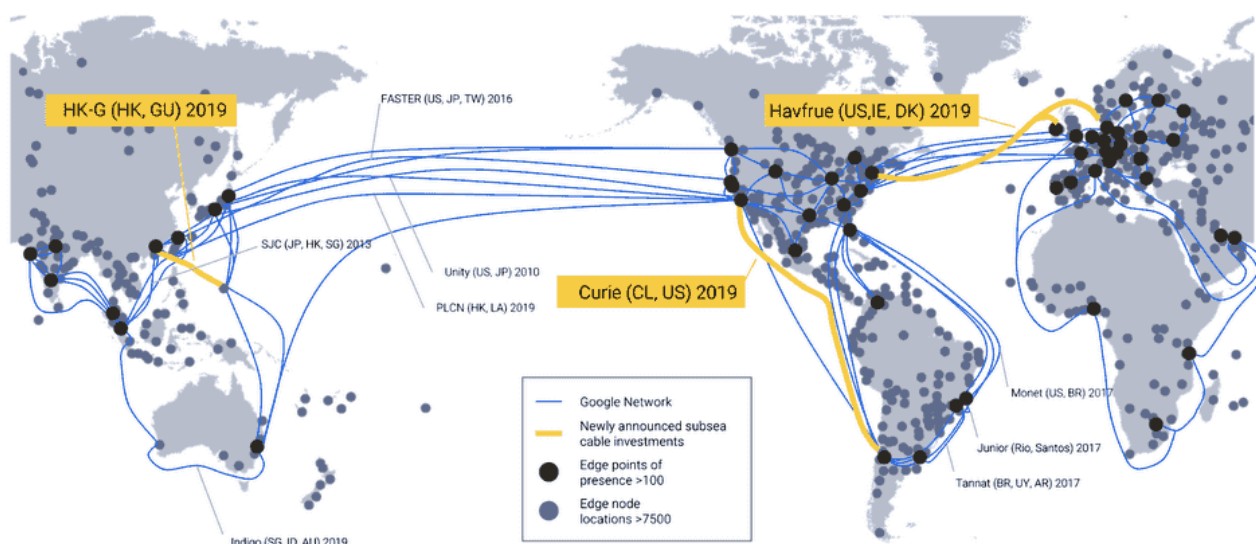


Рис. 29. Наземная сеть Google по состоянию на 2019 г.

Сеть AS36492 используется Google под названием «GOOGLEWIFI» для подключения общедоступных точек доступа Wi-Fi, но ее ресурс IP-адресов также используется и CCC Starlink. У SpaceX зарегистрированы IP-адреса Австралии, Новой Зеландии, Канады, Великобритании, Германии и Испании.

Для Австралии и Новой Зеландии есть два диапазона [6]:

Ipv4:

103.152.126.0/24 Starlink Sydney PoP 1 user addresses (New Zealand),

103.152.127.0/24 Starlink Sydney PoP 2 user addresses,  
Ipv6  
2406:2d40:1000::/36 Starlink Sydney PoP 2 user addresses,  
2406:2d40::/36 Starlink Sydney PoP 1 user addresses (New Zealand).

Для Канады [6]:

143.131.2.0/24 SpaceX Canada Corp.  
143.131.3.0/24 SpaceX Canada Corp.  
143.131.4.0/24 SpaceX Canada Corp.  
143.131.5.0/24 SpaceX Canada Corp.  
143.131.6.0/24 SpaceX Canada Corp.  
143.131.7.0/24 SpaceX Canada Corp.

Для Европы [6]:

162.43.192.0/24 SpaceX Services, Inc. (ES, Madrid),  
162.43.193.0/24 SpaceX Services, Inc. (ES, Madrid),  
176.116.124.0/24 SpaceX Services, Inc. (UK, London),  
176.116.125.0/24 SpaceX Services, Inc. (UK, London),  
188.95.144.0/24 SpaceX Services, Inc. (DE, Frankfurt),  
188.95.145.0/24 SpaceX Services, Inc. (DE, Frankfurt).

В дальнейшем, в соответствии с планом развертывания CCC Starlink, планируется что будет развернута 2-я фаза ОГ CCC, а затем фаза Generation 2. Предполагается что в отличие от ШС 1-й фазы CCC, ШС Generation 2 будет дополнительно работать еще и в Е диапазоне (таблица 10).

Таблица 10 – Предполагаемый частотный план ШС Starlink  
после фазы развертывания Generation 2 [13]

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	14 200
линия «вниз» КА – ШС	17,8-18,6 18,8-19,3 71-76	800 500 5000	2	12 600

Этот диапазон SpaceX решил использовать впервые в спутниковой связи для того чтобы обеспечить передачу по линии «вверх» вдвое большего количества данных. В Е диапазоне для организации фидерных каналов связи можно использовать не 500 МГц как в Ku, а в 10 раз больше – 5000 МГц. Надо отметить, что сейчас в США Е диапазон используется только для организации наземных РРЛ (радиорелейных линий) и радиомостов (радиоканалов между вышками). Всего в США всего лишь около 19000 таких устройств. Соответственно SpaceX должна выбирать места для своих ШС так, чтобы не ставить помехи этим радиомостам [13].

### 3.3. Система управления

Задачи управления связью и распределения радиоресурса в CCC Starlink решает центр мониторинга и управления сетью NCMC (network control and

monitoring center). NCMC обеспечивает управление связью всей ССС, координацию работы ШС и АТ, задание единого времени в сети, выделение частотных полос на КА для работы с ШС и АТ, ведение биллинга, сбора данных о переданной и полученной информации, сбор данных о состоянии системы. NCMC находится в г. Редмонде (шт. Вашингтон, США). Подробная функциональность NCMC компанией SpaceX не афишируется, однако, судя по поданным в FCC документам, NCMC опрашивает каждый АТ и ШС в ССС не реже чем один раз в 100 мс, проводит оценку их работоспособности и мощности излучения и, при необходимости, дает команды на управление связью. ШС опрашивается через наземную сеть, а АТ посредством передачи служебных пакетов через КА [8].

Имеется заявление SpaceX, что в ССС Starlink каждые 15 с происходит анализ, какой КА оптимален для обслуживания определенной зоны с АТ, можно предположить, что именно NCMC, располагая самыми последними данными об орбитах КА (они могут меняться, например, для расхождения с космическим мусором), состояния КА (вывод его для ремонта или регламентных работ, необходимости избежать интерференции с сигналом от КА на геостационарной орбите) и прочее, составляет некое расписание, согласно которому «живет ССС». То есть определяет, какой КА будет обслуживать конкретную зону и, возможно, с какой частотой ее посещать. При этом можно предположить, что для простоты каждая зона однозначно привязана к конкретной ШС и нет необходимости в перемаршрутизации трафика от одной ШС к другой при обслуживании конкретной зоны (АТ пользователя) [5, 8].

Управление КА в составе ОГ ССС Starlink занимается другая структура SpaceX – MCC (mission control center). MCC обеспечивает управление КА, оценкой их работоспособности, обеспечивает их маневры на орбите [5].

Для передачи команд управления на КА и приема от них телеметрической информации (ТМИ) в ССС Starlink используется 4 станции (телепорта), где установлены радиостанции управления и сбора телеметрии в Ku и Ka диапазонах. ТТХ радиостанций, размещенных в телепортах указаны в таблице 11.

Канал управления и телеметрии в Ku и Ka диапазонах для каждого КА может быть активным до 2,5 ч в день (12 мин на один оборот вокруг Земли), хотя расчетное время сеансов сброса ТМИ составляет 60 мин в день [8].

Так же SpaceX сформировал сеть наземных тестовых станций для тестирования качества услуг связи в ССС StarLink. Наземные тестовые станции включают 6 стационарных станций и 3 мобильные станции. Адреса стационарных станций [8]:

- штаб-квартира SpaceX: г. Хоторн, шт. Калифорния, США;
- штаб-квартира Tesla Motors: Фремонт, шт. Калифорния, США;
- испытательный центр SpaceX: г. МакГрегор, Техас, США;
- SpaceX Brownsville: г. Браунсвилл, шт. Техас, США;
- SpaceX Redmond: г. Редмонд, шт. Вашингтон, США;
- SpaceX Brewster: г. Брюстер, шт. Вашингтон, США;
- SpaceX Broadband Test Van 1: мобильная станция (рис. 26);
- SpaceX Broadband Test Van 2: мобильная станция;
- SpaceX Broadband Test Van 3: мобильная станция.

Таблица 11 – Станции SpaceX для управления КА Starlink и передачи ТМИ, работающие в Ku и Ka диапазонах [8]

Обозначение станции	BR1	CD1	TR1	AW1
Местоположение	г. Брюстер (шт. Вашингтон, США)	г. Кордова (Аргентина)	г. Тромсё (Норвегия)	г. Аваруа (Новая Зеландия)
Компания-владелец	SpaceX	SpaceX	SpaceX	SpaceX
Широта	48,1°	-31,5°	69,7°	-46,5°
Долгота	-119,7°	-64,5°	18,9°	168,4°
Диаметр антенны	5 м	5 м	5 м	5 м
Площадь рефлектора, м <sup>2</sup>	20	20	20	20
Апертурная эффективность, %	60	60	60	60
Максимальный рабочий цикл передачи, %	100	100	100	100
Длина волны, м	0,02	0,02	0,02	0,02
Удельная излучаемая мощность на поверхности антенны, мВт/см <sup>2</sup>	0,8	0,8	0,8	0,8
Рабочие частоты, ГГц линия «вверх» линия «вниз»	13,85-14 12,15-12,25; 18,55-18,6			
Коэффициент усиления антенны на прием в Ka диапазоне	57 дБи	57 дБи	57 дБи	57 дБи
Коэффициент усиления антенны на прием в Ku диапазоне	52 дБи	52 дБи	52 дБи	52 дБи
Коэффициент усиления антенны на передачу в Ku диапазоне	56 дБи	56 дБи	56 дБи	56 дБи
Ширина ДНА на уровне половины мощности в Ku диапазоне в режиме передачи	0,22°	0,22°	0,22°	0,22°
Мощность передатчика	40 Вт	40 Вт	40 Вт	40 Вт
Эффективная излучаемая мощность передатчика	9706 кВт	9706 кВт	9706 кВт	9706 кВт
ЭИИМ	72 дБВт	72 дБВт	72 дБВт	72 дБВт
Добротность приемника	31 дБ/К	31 дБ/К	31 дБ/К	31 дБ/К
Поляризация	Круговая (левого и правого направления вращения)			
Тип сигналов	BPSK в линии «вверх»; SS-OQPSK в линии «вниз»			
Скорость передачи	1-15,36 Мбит/с в линии «вверх»; 0,05-15,36 Мбит/с в линии «вниз»			
Тип сигналов	BPSK в линии «вверх»; SS-OQPSK в линии «вниз»			

#### 4. Промежуточные итоги и перспективы развития CCC Starlink

По состоянию на 11 сентября 2022 г. CCC Starlink находится в процессе формирования ОГ: выведено 3293 КА, сведено с орбиты 301 КА, находится на орбите 3025 КА, из них в рабочих, штатно функционирующих – 2990 КА.

Ведется опытная эксплуатация CCC Starlink путем предоставления пользователям услуг связи в режиме бета-тестирования. Услуги связи CCC Starlink обеспечиваются в 40 странах (в том числе в США, Канаде, Австралии, Бразилии, большинстве стран ЕС), в большом количестве стран заявки на предостав-



ление услуг связи ожидают одобрения национальных регулирующих органов. Количество постоянных подписчиков на услуги связи CCC Starlink по состоянию на сентябрь 2022 г. превышает 700 000 пользователей. Качество услуг связи для пользователей характеризуется следующими значениями – средняя скорость передаваемых данных в абонентских каналах «вниз» в различных регионах Земли составляет от 55 до 123 Мбит/с, в абонентских каналах «вверх» – от 7 до 28 Мбит/с, задержка передачи – от 38 до 98 мс. Стоимость услуг связи в виде однократных затрат 500\$ на покупку АТ и абонентской платы 100\$ в месяц, по отзывам пользователей, соответствуют качеству оказываемых услуг.

Ведется опытная эксплуатация и тестирование работы лазерных МЛС на КА Starlink версии 1.5. Идет разработка принципиально новой спутниковой платформы и доработка бортового связного оборудования для КА версии 2.0 в составе Generation 2. Данный КА для увеличения пропускной способности дополнительно будет использовать новые полосы частот в уже используемых Ka и Ku диапазонах, а также новый E диапазон (60-90 ГГц) на частотах 71-79 ГГц и 81-86 ГГц. Первая отправка на орбиту КА Starlink версии 2.0 запланировано на 2023 г. после завершения работ по РН Starship. Завершение 2-й фазы развертывания ОГ Starlink компанией SpaceX запланировано к ноябрю 2027 г., а развертывание ОГ Generation 2 – к августу 2029 г.

SpaceX фактически завершило разработку АТ для мобильных платформ – ESIM в нескольких версиях для различных условий эксплуатации. В июне 2022 г. комиссия FCC одобрила оказание услуг связи CCC Starlink для лодок, самолетов и движущихся транспортных средств. Компания SpaceX планирует предоставить услуги связи CCC Starlink на рейсах самолетов, морских и речных судов и уже начала заключать контракты в этой сфере.

В августе 2022 г. SpaceX объявила о совместной с компанией мобильной связи T-Mobile разработке, направленной на оказание услуг связи CCC Starlink пользователям сотовых операторов в зонах со слабым или отсутствующим сигналом наземной сотовой сети. Подобный функционал прорабатывается совместно с операторами сотовых сетей связи.

Опыт эксплуатации CCC Starlink в период СВО на Украине продемонстрировал возможность использования этой CCC как ядра системы государственного и военного управления в условиях реально ведущихся боевых действий, а также положительный опыт интеграции CCC Starlink в системы управления войсками и оружием. В декабре 2022 г. SpaceX объявила о предоставлении возможности размещения на КА Starlink специальных полезных нагрузок в интересах дистанционного зондирования Земли и предоставления высокоскоростной криптоустойчивой связи абонентам силовых ведомств, прежде всего ВС США и стран НАТО.

Все вышеуказанные факты демонстрирует высокий темп развития CCC Starlink. а также как команда SpaceX нетривиально и успешно решает технические и экономические вызовы, стоящие перед ними в процессе разработки принципиально новой CCC.

К проблемным вопросам проекта следует, прежде всего, отнести снижение качества услуг связи при увеличении абонентской базы. Именно это фактор

был отмечен сервисом SpeedTest в обзоре [34] – опережающий рост числа пользователей CCC Starlink относительно роста числа КА в ОГ и их возможностей по обработке пользовательского трафика привел к тому что в период с 1 по 2 квартал 2022 г. скорость передачи через CCC Starlink во всем мире в среднем снизилась. В настоящее время CCC Starlink активно набирает пользователей, при этом по-прежнему предоставляя услуги связи в режиме бета-тестирования. Некоторые ячейки обслуживания оказываются перегруженными АТ в результате SpaceX закрывает в них возможность подключения новых пользователей. В других ячейках наблюдаются обрывы связи и снижения скорости передачи по мере роста абонентской базы. Отсутствие на текущих КА штатно функционирующих МЛС, через которые можно ретранслировать «лишний» трафик, ограниченные возможности по установке ШС (невозможность их использования в акватории мирового океана) усугубляют эту проблему.

Другим проблемным вопросом эксплуатации CCC Starlink является «невнятность» экономической целесообразности развития проекта, сроки его выхода на самоокупаемость, а в дальнейшем – на устойчивую прибыль. В настоящее время проект является убыточным, но ведет активное привлечение денежных средств инвесторов. Стоит отметить что предыдущие схожие проекты CCC – Teledesic, Iridium, ORBCOMM и «Гонец» так и не вышли на самоокупаемость и, в результате, либо обанкротились, либо продолжают существовать в дотационном режиме. Данная проблема усугубляется тем, что в ближайшее время помимо SpaceX свои низкоорбитальные многоспутниковые CCC планируют развернуть и другие компании. В частности, речь идет о CCC OneWeb, CCC Kuiper от компании Amazon, CCC «Марафон» и «Скиф» в рамках российского проекта «Сфера», китайской низкоорбитальной многоспутниковой CCC. Все это резко обострит конкуренцию в этом сегменте оказания услуг спутниковой связи и поставит под вопрос рентабельность как проекта Starlink, так и других проектов.

### Заключение

В статье представлена описательная модель CCC Starlink. Данная модель может использоваться для формирования исходных данных при формализации связных процессов, по аналогии с некоторыми отечественными много спутниковыми низкоорбитальными CCC. Кроме того, данная модель может быть использована при проектировании АТ, функционирующих совместно как с CCC Starlink, в перспективных международных проектах обеспечения услугами связи и доступа в сеть Интернет жителей Земли.

*Отдельные, частные результаты этой работы получены в рамках исследований по бюджетной теме FFZF-2022-0004.*

### Литература

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.

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 доступа 14.09.2022).
5. Пехтерев С. Энциклопедия Starlink. Год спустя // CommNews [Электронный ресурс], 12.10.2021. – URL: <https://www.comnews.ru/content/216301/2021-10-12/2021-w41/enciklopediya-starlink-god-spustya> (дата доступа 14.09.2022).
6. 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).
7. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 2. Сеть Starlink // Хабр [Электронный ресурс], 03.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/526204/> (дата доступа 14.09.2022).
8. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 3. Наземный комплекс // Хабр [Электронный ресурс], 04.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/526386/> (дата доступа 14.09.2022).
9. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 4. Абонентский терминал // Хабр [Электронный ресурс], 05.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/526512/> (дата доступа 14.09.2022).
10. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 10. Starlink и Пентагон // Хабр [Электронный ресурс], 15.11.2021. – URL: <https://habr.com/ru/post/527424/> (дата доступа 14.09.2022).
11. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 14. Межспутниковые каналы связи // Хабр [Электронный ресурс], 05.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/526512/> (дата доступа 14.09.2022).
12. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 38. Новый терминал StarLink UT-2 // Хабр [Электронный ресурс], 15.11.2021. – URL: <https://habr.com/ru/post/528156/> (дата доступа 14.09.2022).
13. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 17. Второе поколение Starlink 2 // Хабр [Электронный ресурс], 19.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/528156/> (дата доступа 14.09.2022).
14. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 21. SL и проблемы поляризации // Хабр [Электронный ресурс], 16.12.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/533270/> (дата доступа 14.09.2022).
15. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 22. Проблемы электромагнитной совместимости с другими спутниками // Хабр [Электронный ресурс], 19.01.2021. – URL: <https://habr.com/ru/post/538184/> (дата доступа 14.09.2022).

16. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 24. Лазерные Каналы-2 // Хабр [Электронный ресурс], 10.02.2021. – URL: <https://habr.com/ru/post/541700/> (дата доступа 14.09.2022).
17. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 13. Спутниковая задержка в сети и доступ к радиочастотному спектру // Хабр [Электронный ресурс], 14.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/528072/?ysclid=l8zpftv0hi8979433> (дата доступа 14.09.2022).
18. Пехтерев С. В. Пропускная способность группировки StarLink в США и оценка ее потенциальной абонентской базы // Технологии и средства связи. 2022. № S1. С. 69-74.
19. Анпилогов В., Пехтерев С., Шишлов А. Анализ терминалов, планируемых для применения в системах Starlink и OneWeb // Технологии и средства связи. 2022. № S1. С. 30-36.
20. Starlink Satellite Constellation of SpaceX // eoPortal Directory [Электронный ресурс], 2021. – URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/starlink> (дата доступа 14.09.2022).
21. Starlink Compendium // ElonX [Электронный ресурс], 30.06.2021. – URL: <https://www.elonx.net/starlink-compendium/#content> (дата доступа 14.09.2022).
22. Макаренко С. И. Описательная модель сети связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 113-164. DOI: 10.24411/2410-9916-2017-10205
23. Макаренко С. И. Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 18-68. DOI: 10.24411/2410-9916-2017-10202
24. Макаренко С. И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. – 337 с.
25. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 1-34. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10401
26. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Inmarsat // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 64-91. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10404
27. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи MUOS // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 89-116. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10306
28. Iannucci P. A., Humphreys T. E. Fused Low-Earth-Orbit GNSS // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2009.12334> (дата доступа 20.09.2022).
29. Starlink // Wikipedia [Электронный ресурс], 10.09.2022. – URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink> (дата доступа 14.09.2022).
30. Watling J., Reynolds N. Ukraine at War. Paving the Road from Survival to Victory. – Royal United Services Institute for Defence and Security Studies, 2022. –



25 с. – URL: [https://static.rusi.org/special-report-202207-ukraine-final-web\\_0.pdf](https://static.rusi.org/special-report-202207-ukraine-final-web_0.pdf) (дата доступа 14.09.2022).

31. Explained: How Starlink of Elon Musk Prevented Russian Electromagnetic Attack in Ukraine // Outlook [Электронный ресурс], 23.04.2022. – URL: <https://www.outlookindia.com/international/spacex-countered-russia-s-electromagnetic-warfare-in-ukraine-faster-than-us-military-pentagon-news-192868> (дата доступа 14.09.2022).

32. Ермолин В. Давайте разберемся. Состояние спутниковой группировки Starlink // Хабр [Электронный ресурс], 18.02.2022. – URL: <https://habr.com/ru/post/652467/> (дата доступа 14.09.2022).

33. Tesat [Электронный ресурс], 2022. – URL: <https://www.tesat.de/products#laser> (дата доступа 14.09.2022).

34. Starlink Slowed in Q2, Competitors Mounting Challenges // Ookla [Электронный ресурс], 20.09.2022. – URL: <https://www.ookla.com/articles/starlink-hughesnet-viasat-performance-q2-2022> (дата доступа 25.09.2022).

35. Ukrainian forces report Starlink outages during push against Russia // Financial Times [Электронный ресурс], 07.10.2022. – URL: <https://www.ft.com/content/9a7b922b-2435-4ac7-acdb-0ec9a6dc8397> (дата доступа 08.10.2022).

36. Похоже, наша «Тирада» вышла в поле: ВСУ теряют связь со спутниками Starlink // Военное обозрение [Электронный ресурс], 08.10.2022. – URL: <https://topwar.ru/203010-pohozhe-nasha-tirada-vyshla-v-pole-vsu-terjajut-svjaz-so-sputnikami-starlink.html> (дата доступа 08.10.2022).

37. Цыгикало Н. А. Группировка Starlink - система орбитального перехвата принципиально нового типа // Naked Science [Электронный ресурс], 28.01.2022. – URL: <https://naked-science.ru/article/tech/starlink-perehvat> (дата доступа 25.09.2022).

38. Puchol M. Modeling Starlink capacity // Medium.com [Электронный ресурс], 02.10.2022. – URL: <https://mikepuchol.com/modeling-starlink-capacity-843b2387f501> (дата доступа 25.09.2022).

39. Observations of Starlink Satellite-to-User Downlink / Software Defined Radio // Starlink Engineering [Электронный ресурс], 20.09.2022. – URL: [https://www.reddit.com/r/StarlinkEngineering/comments/qwm1v5/observations\\_of\\_starlink\\_satellite\\_to\\_user/](https://www.reddit.com/r/StarlinkEngineering/comments/qwm1v5/observations_of_starlink_satellite_to_user/) (дата доступа 25.09.2022).

40. Receiving Starlink Beacons with an RTL-SDR and LNB [Электронный ресурс], 20.09.2022. – URL: <https://sgcderek.github.io/blog/starlink-beacons.html> (дата доступа 25.09.2022).

41. SpaceX Gen2 non-geostationary satellite system. Attachment A. Technical Information to Supplement Schedule S [Электронный ресурс], 20.09.2022. – URL: <https://starlink.com/resources.html> (дата доступа 25.09.2022).

42. Starshield. Supporting national security // SpaceX [Электронный ресурс], 10.12.2022. – URL: <https://www.spacex.com/starshield> (дата доступа 10.12.2022).

## References

1. Buydinov E. V., Kuzovkova T. A., Kuzovkov D. V. The rationale for the selection of effective satellite communications project based on expert qualimetry method. *Electrosvyaz*, 2018, no. 4, pp. 25-33 (in Russian).
2. Kuzovkova T. A., Kuzovkov D. V., Sharavova O. I. Methodological features of complex evaluation of efficiency of infrastructure projects of satellite communication. *Age of Quality*, 2017, no. 1, pp. 97-109 (in Russian).
3. Adjemov A. S., Buydinov E. V., Kuzovkova T. A. The application of the integrated model to assess the effectiveness of constructing a system of satellite communication. *Electrosvyaz*, 2016, no. 4, pp. 25-29 (in Russian).
4. Pekhterev S. Entsiklopediya StarLink [StarLink Encyclopedia]. *CommNews*, 07.10.2020. Available at: <https://www.comnews.ru/content/209438/2020-10-07/2020-w41/enciklopediya-starlink> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
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> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
6. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast 1 [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 1]. *Habr*, 02.11.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/526154/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
7. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast 2. Set' Starlink [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 2. Starlink Network]. *Habr*, 03.11.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/526204/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
8. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast' 3. Nazemnyy kompleks [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 3. Ground complex]. *Habr*, 04.11.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/526386/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
9. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast' 4. Abonentskiy terminal [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 4. Subscriber terminal]. *Habr*, 05.11.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/526512/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
10. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast' 10. Starlink i Pentagon [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 10. Starlink and the Pentagon]. *Habr*, 15.11.2021. Available at: <https://habr.com/ru/post/527424/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
11. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast' 14. Mezhsputnikovye kanaly svyazi [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 14. Inter-satellite communication channels]. *Habr*, 05.11.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/526512/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
12. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast' 38. Novyy terminal StarLink UT-2 [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 38. New StarLink UT-2 terminal]. *Habr*, 15.11.2021. Available at: <https://habr.com/ru/post/528156/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).

13. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast' 17. Vtoroe pokolenie Starlink 2 [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 17. Second Generation Starlink 2]. *Habr*, 19.11.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/528156/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
14. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast' 21. SL i problemy polarizatsii [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 21. SL and polarization problems]. *Habr*, 16.12.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/533270/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
15. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast' 22. Problemy elektromagnitnoy sovmestimosti s drugimi sputnikami [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 22. Problems of electromagnetic compatibility with other satellites]. *Habr*, 19.01.2021. Available at: <https://habr.com/ru/post/538184/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
16. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast' 24. Lazernye Kanaly-2 [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 24. Laser Channels-2]. *Habr*, 10.02.2021. Available at: <https://habr.com/ru/post/541700/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
17. Pekhterev S. Vse o proekte «Sputnikovyy internet Starlink». Chast' 13. Sputnikovaya zaderzhka v seti i dostup k radiochastotnomu spektru [All about the Starlink Satellite Internet project. Part 13. Satellite network latency and access to the radio frequency spectrum]. *Habr*, 14.11.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/528072/?ysclid=l8zpftv0hi8979433> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
18. Pekhterev S. V. The bandwidth of the StarLink constellation and the assessment of its potential subscriber base in USA. *Tekhnologii i sredstva svyazi [Technologies and means of communication]*, 2022, no. S1, pp. 69-74 (in Russian).
19. Anpilogov V., Pekhterev S., Shishlov A. Analysis of subscriber terminals planned for use in Starlink and OneWeb systems. *Tekhnologii i sredstva svyazi [Technologies and means of communication]*, 2022, no. S1, pp. 30-36 (in Russian).
20. Starlink Satellite Constellation of SpaceX. *eoPortal Directory*, 2021. Available at: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/starlink> (accessed 14.09.2022).
21. Starlink Compendium. *ElonX*, 30.06.2021. Available at: <https://www.elonx.net/starlink-compendium/#content> (accessed 14.09.2022).
22. Makarenko S. I. Descriptive Model of a Special Purpose Communication Network. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 113-164 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2017-10205
23. Makarenko S. I. Prospects and Problems of Development of Communication Networks of Special Purpose. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 18-68 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2017-10202
24. Makarenko S. I. *Modeli sistemy svyazi v usloviyakh prednamerennykh destabilizirujushhih vozdeystvij i vedenija razvedki. Monografiya [Models of communication systems in conditions of deliberate destabilizing impacts and*

*intelligence. Monograph*]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tehnologii Publ., 2020. 337 p. (in Russian).

25. Makarenko S. I. Descriptive Model of Iridium Satellite Communication System. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 1-34 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10401

26. Makarenko S. I. Descriptive Model of Inmarsat Satellite Communication System. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 64-91 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10404

27. Makarenko S. I. Descriptive Model of MUOS satellite communication system. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 89-116. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10306 (in Russian).

28. Iannucci P. A., Humphreys T. E. Fused Low-Earth-Orbit GNSS. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022. Available at: <https://arxiv.org/abs/2009.12334> (accessed 20.09.2022).

29. Starlink. *Wikipedia*, 10.09.2022. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink> (accessed 14.09.2022).

30. Watling J., Reynolds N. *Ukraine at War. Paving the Road from Survival to Victory*. Royal United Services Institute for Defence and Security Studies, 2022. 25 p. Available at: [https://static.rusi.org/special-report-202207-ukraine-final-web\\_0.pdf](https://static.rusi.org/special-report-202207-ukraine-final-web_0.pdf) (accessed 14.09.2022).

31. Explained: How Starlink Of Elon Musk Prevented Russian Electromagnetic Attack In Ukraine. *Outlook*, 23.04.2022. Available at: <https://www.outlookindia.com/international/spacex-counterred-russia-s-electromagnetic-warfare-in-ukraine-faster-than-us-military-pentagon-news-192868> (accessed 14.09.2022).

32. Ermolin V. Davaite razberemsiya. Sostoianie sputnikovoi gruppirovki Starlink. *Habr*, 18.02.2021. Available at: <https://habr.com/ru/post/652467/> (accessed 14.09.2022) (in Russian).

33. *Tesat*, 2022. Available at: <https://www.tesat.de/products#laser> (accessed 14.09.2022).

34. Starlink Slowed in Q2, Competitors Mounting Challenges. *Ookla*, 20.09.2022. Available at: <https://www.ookla.com/articles/starlink-hughesnet-viasat-performance-q2-2022> (accessed 25.09.2022).

35. Ukrainian forces report Starlink outages during push against Russia. *Financial Times*, 07.10.2022. Available at: <https://www.ft.com/content/9a7b922b-2435-4ac7-acdb-0ec9a6dc8397> (accessed 08.10.2022).

36. Pohozhe chto nasha «Tirada» vishla v pole:VSU teryaut svyaz so sputnikami Starlink. *Military review*, 08.10.2022. Available at: <https://topwar.ru/203010-pohozhe-nasha-tirada-vyshla-v-pole-vsu-terjajut-svjaz-so-sputnikami-starlink.html> (accessed 08.10.2022) (in Russian).

37. Cigikalo N. Gruppirovka Starlink – sistema orbitalnogo perehvata principial. *Naked Science*, 28.01.2022. Available at: <https://naked-science.ru/article/tech/starlink-perehvat> (accessed 25.09.2022) (in Russian).



38. Puchol M. Modeling Starlink capacity. *Medium.com*, 02.10.2022. Available at: <https://mikepuchol.com/modeling-starlink-capacity-843b2387f501> (accessed 25.09.2022).
39. Observations of Starlink Satellite-to-User Downlink / Software Defined Radio. *Starlink Engineering*, 20.09.2022. Available at: [https://www.reddit.com/r/StarlinkEngineering/comments/qwm1v5/observations\\_of\\_starlink\\_satellite\\_to\\_user/](https://www.reddit.com/r/StarlinkEngineering/comments/qwm1v5/observations_of_starlink_satellite_to_user/) (accessed 25.09.2022).
40. *Receiving Starlink Beacons with an RTL-SDR and LNB*, 20.09.2022. Available at: <https://sgcderek.github.io/blog/starlink-beacons.html> (accessed 25.09.2022).
41. *SpaceX Gen2 non-geostationary satellite system. Attachment A. Technical Information to Supplement Schedule S*, 20.09.2022. Available at: <https://starlink.com/resources.html> (accessed 25.09.2022).
42. Starshield. Supporting national security. *SpaceX*, 10.12.2022. Available at: <https://www.spacex.com/starshield> (accessed 10.12.2022).

Статья поступила 26 октября 2022 г.

### Информация об авторе

*Пехтерев Сергей Валерьевич* – кандидат технических наук. Эксперт. Группа компаний Altegrosky. Область научных интересов: сети и системы спутниковой связи. E-mail: [s.pekhterev@altegrosky.ru](mailto:s.pekhterev@altegrosky.ru)

Адрес: Россия, 129085, г. Москва, ул. Звездный бульвар, д. 19, стр. 1.

*Макаренко Сергей Иванович* – доктор технических наук, доцент. Ведущий научный сотрудник. Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН. Профессор кафедры информационной безопасности. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: [mak-serg@yandex.ru](mailto:mak-serg@yandex.ru)

Адрес: 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия, д. 39.

*Ковальский Александр Александрович* – кандидат технических наук, доцент. Докторант. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; эффективность целенаправленных процессов. E-mail: [sake636@mail.ru](mailto:sake636@mail.ru)

Адрес: 197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13.

---

## Descriptive Model of Starlink Satellite Communication System

S. V. Pehterev, S. I. Makarenko, A. A. Kovalsky

**Relevance.** Providing Internet access services at high speed and with acceptable latency throughout the Earth requires the creation of low-orbit multi-satellite communication systems (SatComm). Currently, several projects of such SatComm, for example, the Russian projects "Skif", "Marathon" and "Megafon-1440" are being developed in Russia. To substantiate technical solutions for these SatComm, the Starlink

system can be used, which can be considered as a prototype of this Russian SatComms. **The aim of the paper** is to form a descriptive model of Starlink satellite system as a prototype of low-orbit multi-satellite communication systems. Only open sources were used to make a descriptive model of the Starlink system. **Results and their novelty.** The element of practical novelty of the paper is the revealed general technological features of a low-orbit multi-satellite SatComm on the example of the Starlink system. Formation of orbital grouping satellites, organization channels in "up" and "down" lines, using of signal-code structures in channels, protocols are described in the paper. In addition, the prospects for the development of the Starlink system are presented in the paper. **Practical significance.** Technical specialists to justify new technological solutions for Russian projects "Skif", "Marathon" and "Megafon-1440" will use this descriptive model, which is presented in the paper. In addition, the model will be useful to scientists who conduct research in the field of satellite communications.

**Keywords:** model, descriptive model, satellite communication system, multi-satellite low-orbit satellite communication system, SatComm, Starlink, SpaceX.

### Information about Authors

*Sergey Valerevich Pehterev* – Ph.D. Expert. AltegroSky Companies Group. Field of research: satellite communication systems and networks. E-mail: s.pehterev@altegrosky.ru

Address: Russia, 129085, Moscow, Zvezdny bulvar str., 19, p. 1.

*Sergey Ivanovich Makarenko* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Leading Researcher. St. Petersburg Federal research center of the Russian Academy of Sciences. Professor of Information Security Department. Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: 197376, Russia, Saint Petersburg, 14th Linia, 39.

*Alexander Alexandrovich Kovalsky* – Ph.D., Docent. Doctoral student. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. Research interests: networks and communication systems; electronic warfare; efficiency of targeted processes. Email: sake636@mail.ru

Address: 197082, Russia, Saint Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.