

Анализ низкоорбитальных спутниковых систем широкополосного доступа на примере развития Starlink

Ю.М. Урличич, ФГБУ НИИР, советник генерального директора, профессор, д.т.н.; yury.urlichich@mail.ru

УДК 621.391

DOI: 10.34832/ELSV.2024.56.7.003

Аннотация. Представлены оценки требуемого угла сканирования активной фазированной антенной решётки (АФАР) абонентского терминала системы Starlink и потенциала снижения его себестоимости в зависимости от «мощности» орбитальной группировки спутниковой системы широкополосного доступа. Показано, что имеется возможность существенного снижения себестоимости абонентского терминала, если численность КА в орбитальной группировке достигнет нескольких десятков тысяч. Приведен анализ темпов наращивания орбитальной группировки и абонентской базы системы Starlink. Результаты анализа показывают значительное отставание от планов, намеченных в бизнес-модели Starlink, нецелесообразность создания коммерческих низкоорбитальных спутниковых систем широкополосного доступа для решения задачи массового обслуживания и необходимость поиска новых системных решений, в частности создания систем прямого спутникового доступа типа Direct-to-Device.

Ключевые слова: низкоорбитальная система, спутниковая связь, Starlink, ШПД.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня активно продолжают обсуждаться и анализироваться перспективы развития низкоорбитальных систем широкополосного доступа (ШПД) [1–3]. Уже работают две такие системы в Ku-диапазоне, это Starlink и OneWeb. Если система OneWeb претерпела банкротство [4] и пока не вышла на режим штатной эксплуатации, то Starlink, по заявлениям руководителей компании SpaceX, успешно развивается [5]. Публикуются оптимистические статистические данные о скорости каналов, задержке и ценовых параметрах для абонентов [6]. Заинтересованный человек может и сам оценить статистику скорости и задержки в каналах на независимом сайте [7], который объединяет примерно 50 независимых профессиональных подписчиков Starlink в США и Канаде, Европе, Австралии и в других регионах, которые регулярно предоставляют данные о своих измерениях. Результаты независимой статистики оказываются не столь впечатляющими как в рекламных публикациях, но значение круговой задержки (round-trip-time), как правило, не превышает 100 мс, что уже вполне приемлемо для сетевых геймеров, количество которых растет с каждым годом (сегодня их доля составляет порядка 10% от всех пользователей интернет).

Заявлено создание еще нескольких низкоорбитальных систем ШПД в Ku- и Ka-диапазонах (табл. 1). Китайские проекты спутникового ШПД, по-видимому, являются копиями системы Starlink, но конкурентов у Starlink пока нет. И едва ли они появятся, поскольку для создания подобной системы требуются инвестиции в десятки миллиардов долларов без перспектив их возврата в обозримом буду-

щем. Например, по состоянию на начало 2024 г. только субсидирование продаж абонентских терминалов (АТ) от компании SpaceX по минимальной оценке составило около \$3 млрд, и эта сумма будет увеличиваться примерно на \$2 млрд в год по мере наращивания абонентского сегмента. И это кроме затрат на производство спутников, их запуски, создание наземной инфраструктуры системы и поддержание ее в рабочем состоянии.

КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Ключевой проблемой всех систем спутникового ШПД является создание дешёвой АФАР для абонентского терминала. Себестоимость АФАР определяет стоимость АТ. В начале развития проекта Starlink было заявлено, что приемлемая цена АТ для массового рынка должна находиться в интервале \$100–\$300 [8]. Кроме того, общей проблемой не только спутниковых систем ШПД и системы Starlink в частности, но и всех без исключения современных спутниковых систем связи, независимо от их назначения, является использование проприетарных протоколов для организации множественного доступа. В итоге, каналообразующее оборудование и программное обеспечение всегда уникальны и невозможно достичь массовости производства составных частей АТ, а следовательно, и конкурентных на телекоммуникационном рынке цен на АТ.

Преодолеть проблему снижения себестоимости АТ в системе Starlink, по-видимому, в компании SpaceX решили за счет наращивания «мощности» орбитальной группировки (ОГ) [9], поскольку компания SpaceX достигла впечатляющих резуль-

Таблица 1

Низкоорбитальные системы ШПД

Система	Страна	Максимальное планируемое число КА	Частотный диапазон	Состояние на 2024 г.	Примечания
Starlink	США	42 000	Ku	Эксплуатация	Высокая стоимость АТ. 75–80% АТ установлены в Северной Америке по состоянию на первый квартал 2024 г.
G60 Starlink	Китай	12 000	Ku	План	Копирование Starlink. Планируется производство 300 КА в год
Guo wang	Китай	12 992	Ka	План	О развитии проекта нет сведений
OneWeb	Великобритания	648	Ku	Переход к эксплуатации	Очень высокая стоимость АТ, только для коллективного применения
IRIS ²	ЕС	170	нет данных	План	АТ для коллективного применения. Обсуждается целесообразность проекта
Telesat Light-speed	Канада	198	Ka	План	Первый экспериментальный КА запущен в 2018 г. АТ только для коллективного применения. О развитии проекта нет сведений
Kuiper	США	3236	Ka	План	Два экспериментальных КА запущены в 2023 г. О развитии проекта нет сведений
Rivada	США	600	Ka	План	Предположительно для коллективного ШПД
Рассвет	РФ	900	Ku	План	Проект ООО «Бюро 1440». Запущено три экспериментальных спутника в 2023 г. и три в 2024 г. О развитии проекта нет сведений

татов в серийном производстве ракет-носителей (РН). Действительно, если ОГ низкоорбитальной системы будет состоять из десятков тысяч КА, то АТ, находясь в зоне обслуживания, будет видеть сразу много спутников в любом направлении, и сканировать лучом АФАР АТ достаточно будет только в небольшом угловом секторе, а если ОГ состоит из сотен тысяч КА, то сканировать вообще не придется [9]. На каком-то тапе можно будет отказаться и от механического привода в АТ для начальной ориентации АФАР, что уже фактически и произошло после того как «мощность» ОГ превысила 5000 КА.

В общем виде взаимосвязь между углом сканирования и «мощностью» ОГ рассмотрена в [10].

СНИЖЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ АФАР АБОНЕНТСКОГО ТЕРМИНАЛА

Из [10] следует, что при большом числе спутников требуемый сектор сканирования АФАР АТ может быть оценен с помощью формулы:

$$\theta_c \approx 2,8 \frac{R_3 + H}{H} \frac{1}{\sqrt{N}},$$

где R_3 — радиус Земли; H — высота спутника над поверхностью Земли; $2\theta_c$ — сектор сканирования АФАР

АТ (в радианах); N — количество спутников в составе ОГ ($N \gg 1$, для орбит ниже 500 км $N > 1000$).

На рис. 1 приведена зависимость размера сектора сканирования от количества спутников в группировке $2\theta_c(N)$ для высот орбит $H=750$ км и 550 км. Средняя высота орбит КА Starlink — 550 км, а максимальное число спутников, намеченное в планах Starlink, составляет $N=42\,000$ (но оно еще не одобрено Федеральной комиссией по связи США (FCC)). В начале 2024 г. FCC отказала SpaceX в запуске КА на орбиты высотой 340–360 км, поскольку это опасно для Международной космической станции. Если в итоге будет запущено 42 тыс. КА, то требуемый полный угол сканирования луча АФАР АТ составит $2\theta_{cx}=19,7^\circ$. По состоянию на апрель 2024 г. в составе ОГ работает примерно 5000 КА (всего запущено более 6000 КА) и сегодня для АФАР АТ нужно обеспечить угол сканирования $2\theta_{cy}=56,7^\circ$. Если принять, что предельная минимальная себестоимость АФАР обусловлена ценой множества чипов системы формирования луча [11], то она будет активно снижаться по мере увеличения числа спутников. Если все чипы идентичны, то потенциальное снижение себестоимости ξ можно оценить следующим образом:

$$(2\theta_{cy})^2 / (2\theta_{cx})^2 \approx \xi.$$

Руководство SpaceX официально заявило [12–15], что себестоимость АТ изначально составляла \$3000, но потом она была снижена до \$1300, при этом продажная цена АТ всегда была ниже себестоимости. Например, в 2023 г. новые АТ (V4 standard) уже не имели в своем составе механического привода (начальная установка АТ осуществляется по результатам анализа видимости спутников [16] с использованием специального приложения для смартфона). При условии развертывания ОГ в составе 42 тыс. КА действительно можно ожидать снижения себестоимости АФАР до \$157, что подтверждает намерения SpaceX довести себестоимость АТ до \$250, а затем и до \$125, но это уже будут разные по своей конструкции АФАР. Таким образом, на начальном этапе развития низкоорбитальной системы нужны сложные и дорогие АФАР, а на завершающем этапе можно применить более простые и, соответственно, более дешевые АФАР АТ с меньшим числом управляемых элементов. Но ответ на вопрос о том, сколько КА необходимо иметь в составе ОГ, чтобы перейти к более дешевым АФАР АТ, не является однозначным.

РАЗВЕРТЫВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ

Создать столь мощную ОГ из 42 тыс. КА за короткий промежуток времени невозможно. Для это потребуется осуществить множество запусков РН Falcon 9. Напомним, что расчётный срок активного существования (САС) КА Starlink составляет пять лет, и может получиться, что пока идет запуск новых КА, старые уже будут заканчивать свою работу и переходить на орбиту захоронения. Конечно, указанный САС — это результат расчета на основе оценки массы рабочего тела КА, достаточной для коррекции, удержания и возможных маневров КА на орбите. Кроме того, при назначении САС учитывается радиационное воздействие на аппаратуру КА, деградация солнечных батарей, количество зарядов и разрядов аккумуляторных батарей и т.п. Поэтому САС — это достаточно условный расчетный параметр. Имеются примеры работы КА далеко за пределами назначенного САС (например, КА Iridium). Но при формировании бизнес-моделей и финансовых планов оператор системы все же исходит из расчетного значения САС. Соответственно, и при оценке временного интервала развертывания ОГ должен учитываться САС КА.

Задачу можно сформулировать так: сколько месяцев потребуется для развертывания ОГ, в составе которой N спутников? Решение следует из простого и очевидного уравнения

$$\Delta T = N / (n_o - \Delta) + \Delta t, \text{ при } \Delta T_{\max} < \text{САС}, \quad (1)$$

где ΔT — число месяцев с начала развертывания ОГ (например для ОГ Starlink целесообразно начать отсчет с февраля 2021 г.); Δ — число КА, отказавших в течение месяца (для Starlink оно составляет порядка

Рисунок 1

Зависимость требуемого угла сканирования АФАР АТ ($2\theta_c$) от числа КА в составе орбитальной группировки

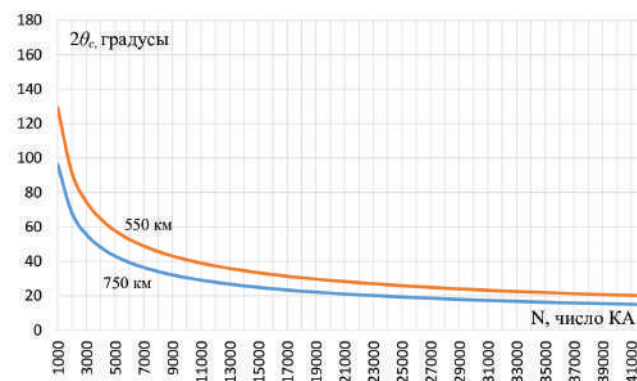


Рисунок 2

Число запусков РН Falcon 9 в месяц

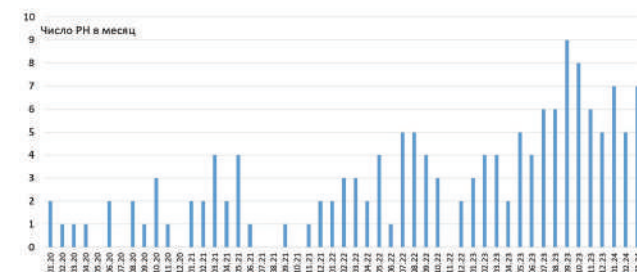


Рисунок 3

Число запущенных КА Starlink в месяц



Рисунок 4

Усреднённый темп (n_o) наращивания ОГ по годам



0,05); n_0 — среднее число КА, запускаемых в месяц; Δt — время от запуска группы КА до начала их штатной работы; $\Delta T_{\max}$ — максимально допустимое время развертывания ОГ.

Темп запуска РН Falcon 9 при наращивании ОГ Starlink в период с января 2020 г. по март 2024 г. показан на рис. 2. Число запущенных КА, приведенное к месяцу, показано на рис. 3.

Из этих данных можно получить усредненное значение КА, запускаемых в месяц по годам (рис. 4).

Очевидно, что темп наращивания ОГ возрастает. Но задача усложняется тем, что КА Starlink непрерывно модифицируются, и их масса растет, это иллюстрируется в табл. 2, где представлены оценочные данные.

Модификация спутников Starlink и увеличение их массы, обусловлено тем, что число АТ растет, соответственно, скорость каналов, доступных абонентам, падает [17]. Приходится наращивать не только число спутников, но и их емкость, что обеспечивается увеличением числа бортовых АФАР и соответствующим увеличением емкости фидерных линий. Кроме того, необходимо создавать межспутниковые каналы для КА на приполярных орбитах, поскольку не везде можно построить станции сопряжения в арктических регионах. Соответственно, число КА, размещаемых на одной РН Falcon 9, уменьшается, что иллюстрируется на рис. 5. Чтобы не потерять темп развития ОГ, приходится увеличивать темп запусков РН Falcon 9 (рис. 6).

При развертывании Starlink Gen2 (КА версий V2.0 и V2.0 mini) максимальное число запускаемых КА в месяц, по-видимому, не будет превосходить 160. Возвращаясь к формуле (1), получим, что для создания ОГ в составе 42 тыс. КА потребуется 248 месяцев или почти 21 год! Но есть условие, что $\Delta T_{\max} < \text{САС}$. Для КА Starlink заявленное значение САС составляет пять лет. Получается, что это условие явно не выполняется и процесс закичивается.

В планах SpaceX перейти на запуски КА с использованием РН Starship, что позволит одной РН запустить группу из 400 КА Starlink V1.5 или примерно до 90–95 КА Starlink V2.0. Такое решение потенциально увеличивает темп наращивания ОГ, но максимум в три раза. Соответственно, минимальное время развертывания ОГ снижается до семи лет, но все же желаемый временной интервал в пределах САС (менее пяти лет) не достигается.

Следует отметить, что пока SpaceX имеет разрешение FCC на запуск 7512 КА Starlink Gen2. В перспективе планируется создание спутников Starlink V3.0 массой 1500 кг, которые будут запускаться только с помощью РН Starship, при этом частоту запусков предполагается довести до 44 в год. Если себестоимость спутников V1.0 (масса 260 кг) оценивается в \$0,2 млн, то спутники V3.0 стоят уже \$1,2 млн [18].

Таблица 2
Модификации КА Starlink

Год	КА Starlink			
	V0.9	V1.0	V1.5	V2.0 mini/2.0
	227 кг	260 кг	295 кг/ 306 кг	790 кг/ 1250 кг
2019				
2020				
2021				
2022				
2023				V2.0 mini
2024				V2.0 mini +D2D

Примечание: на КА Starlink V2.0 также предполагается наличие ретранслятора для прямой связи со смартфоном, но их запуски планируются на РН Starship

Рисунок 5
Среднее число КА Starlink на одной РН, приведенное к году

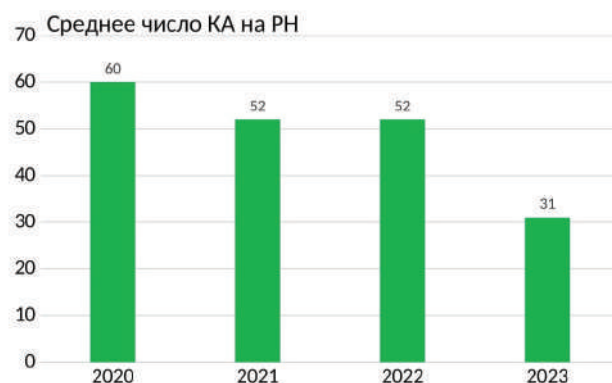


Рисунок 6
Число запусков РН в год



Рисунок 7

Динамика среднего темпа наращивания абонентской базы в месяц в 2021–2030 гг. (жёлтый цвет – фактические данные)



Рисунок 8

Число АТ в сети Starlink с нарастающим итогом (прогноз, начиная с 2024 г.)



НАРАЩИВАНИЕ АБОНЕНТСКОГО СЕГМЕНТА

Как следует из [6, 12, 13], по состоянию на начало 2024 г. не менее 60% подписчиков Starlink находятся на территории США, а общую долю Северной Америки можно оценить как 75–80%. Но по мере наращивания абонентского сегмента возникают проблемы, обусловленные локальной перегрузкой сети. Для их парирования оператор увеличивает тарифы на услугу для регионов, в которых наблюдается ограничение емкости системы.

По состоянию на 2023 г. темп наращивания абонентской базы составлял примерно 1 млн АТ в год. Можно предположить, что темп будет нарастать и составит в перспективе 2 млн в год (рис. 7). Тогда к 2030 г. число АТ в сети Starlink может достигнуть 16 млн (рис. 8). Это очень значительное число для

спутниковых систем, но оно в 6 раз ниже, чем это предусмотрено в 2030 г. финансовым планом системы Starlink [3] для достижения точки окупаемости затрат на систему. Если за разумный период времени точка окупаемости не достигается, то и говорить о прибыльности системы Starlink нет оснований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный выше анализ развития системы Starlink показывает, что ключевой проблемой является невозможность достижения себестоимости АТ, даже близкой к значению в \$200–\$300. Этот ценовой параметр АТ заложен в финансовой модели системы и считается приемлемым для развития массового рынка спутникового ШПД. Экстенсивное наращивание «мощности» орбитальной группировки до нескольких десятков тысяч КА могло бы частично демпфировать проблему и снизить себестоимость АТ, но результаты анализа показывают, что и это не приводит к желаемому результату в разумный временной интервал, который в идеальном случае должен быть меньше срока активного существования КА. Кроме того, темп наращивания абонентской базы ограничен, например, для системы Starlink наращивание абонентской базы отстает минимум в 6 раз от намеченных планов, а требуемое субсидирование с каждым годом растет.

Таким образом, рассматривать Starlink и подобные ей низкоорбитальные спутниковые системы ШПД как коммерческие системы нет оснований. Однако и развитие таких систем как государственных инфраструктурных проектов сильно напоминает повторное втягивание страны в «Звездные войны-2».

По-видимому, негласное осознание этой проблемы уже постепенно происходит. Об этом говорят споры о целесообразности создания европейской системы IRIS² [19]. Это понимают и руководители SpaceX, о чем свидетельствуют активные работы по дополнению системы Starlink второго поколения (Starlink Gen2) спутниками для предоставления сервиса типа Direct-to-Device (в заявках SpaceX в FCC он назван Direct-to-Cell). Этому процессу содействует и новое (принято 22.02.2024 г.) нормативное правило FCC США [20] о радиочастотном обеспечении (дополнительное обслуживание из космоса), которое предусматривает возможность использования спутниковой системой полос частот сотовых сетей и сетей LPWAN в диапазоне от 694/698 МГц до 2,7 ГГц. Подобное правило радиочастотного обеспечения планируется принять как международное положение на ВКР-27 [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы Starlink и нужен ли российский проект спутникового ШПД типа Starlink // Технологии и средства связи. – 2023. – № S1. – С. 42-55. – https://cs.groteck.ru/SATCOM_2024/45/index.html (дата обращения 22.04.2024).
2. **Урличич, Ю.М.** Легенды о Starlink / Ю.М. Урличич // Первая миля. – 2023. – № 6. – С. 64-71.
3. **Анпилогов, В.Р.** Стагнация рынка спутниковой связи и новые проекты / В.Р. Анпилогов. – Беспроводные технологии. – 2021. – № 1. – С. 6-9.
4. **Урличич, Ю.М.** Банкротство технологичных многоспутниковых низкоорбитальных систем широкополосного доступа или банкротство компаний? / Ю.М. Урличич // Технологии и средства связи. – 2020. – № S1. – С. 30-38.
5. **Ludlow, E.** SpaceX eyes \$15 billion in 2024 sales on Starlink strength / E. Ludlow, G. Tan / Los Angeles Times. – <https://www.latimes.com/business/story/2023-11-07/spacex-eyes-15-billion-in-2024-sales-on-starlink-strength> (дата обращения 22.04.2024).
6. **Westover, B.** 2024 Starlink Tests: SpaceX's Satellite Internet Keeps Getting Better / B. Westover / PCMag. – <https://www.pcmag.com/articles/2024-starlink-speed-tests-spacex-satellite-internet> (дата обращения 22.04.2024).
7. Starlink Statuspage. – <https://starlinkstatus.space/> (дата обращения 29.04.2024).
8. **Mosher, D.** Elon Musk says Starlink needs to drastically cut the cost of its 'UFO on a stick' terminals to steer the project clear of bankruptcy / D. Mosher / Business Insider. – <https://www.businessinsider.com/elon-musk-spacex-starlink-satellite-internet-user-terminal-challenges-cost-2020-6> (дата обращения 29.04.2024).
9. **Анпилогов, В.Р.** Сколько спутников нужно в составе орбитальной группировки широкополосного доступа? / В.Р. Анпилогов, А.А. Гриценко // Технологии и средства связи. – 2023. – № S1. – С. 78-82.
10. **Анпилогов, В.** Проблемы создания антенн с электрическим сканированием луча для абонентских терминалов спутниковых систем связи в Ku- и Ka-диапазонах / В. Анпилогов, В. Денисенко, И. Зимин и др. // Первая миля. – 2019. – № 3. – С. 16-27.
11. **Анпилогов, В.Р.** О серийности и себестоимости абонентских терминалов спутниковой системы широкополосного доступа / В.Р. Анпилогов // Технологии и средства связи. – 2023. – № S1. – С. 36-41.
12. **Omoedeh, E.** 20+ Starlink Statistics You Need to Know in 2024 / E. Omoedeh / VPNCentral.com. – <https://vpncentral.com/starlink-statistics/> (дата обращения 22.04.2024).
13. **Victor.** Starlink By The Numbers: 20 Facts That Highlight Its Stellar Growth / Victor / Starlink Insider. – <https://starlinkinsider.com/starlink-statistics/> (дата обращения 22.04.2024).
14. **Kan, M.** SpaceX Prepares to Cut Starlink Dish Cost by Half Later This Year / M. Kan / PCMag. – <https://uk.pcmag.com/networking/135290/spacex-prepares-to-cut-starlink-dish-cost-by-half-later-this-year> (дата обращения 22.04.2024).
15. **Brodkin, J.** Starlink's "next-generation" user terminal will cost a lot less, Musk say / J. Brodtkin / Ars Technica. – <https://arstechnica.com/information-technology/2021/06/musk-aims-to-cut-starlink-user-terminal-price-from-500-to-as-low-as-250/> (дата обращения 22.04.2024).
16. **Clarkem, N.** Starlink Obstructions, How Much Is Too Much? / N. Clarkem / Starlink Hardware. – <https://www.starlinkhardware.com/starlink-obstructions-how-much-is-too-much/> (дата обращения 22.04.2024).
17. **Анпилогов, В.Р.** Методика вероятностной оценки пропускной способности многолучевой спутниковой сети массового обслуживания / В.Р. Анпилогов, А.А. Афонин // Электросвязь. – 2011. – № 7. – С. 45-47.
18. SpaceX Starlink / MForum.ru [сайт]. – <http://www.mforum.ru/news/article/126526.htm> (дата обращения 22.04.2024).
19. **Fasse, M.** Streit um Starlink-Alternative – Kosten steigen stark / M. Fasse, T. Jahn, J. Olk et al. / Handelsblatt. – <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/raumfahrt-streit-um-starlink-alternative-kosten-steigen-stark/100035051.html> (дата обращения 22.04.2024).
20. Single Network Future: Supplemental Coverage From Space; Space Innovation / Federal Register. – <https://www.federalregister.gov/documents/2024/04/30/2024-06668/single-network-future-supplemental-coverage-from-space-space-innovation> (дата обращения 22.04.2024).
21. Final Acts WRC-23. – <https://www.itu.int/hub/publication/r-act-wrc-16-2024/> (дата обращения 22.04.2024).

Получено 06.06.24