

УДК 629.783

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ГРУППИРОВОК СВЯЗИ В КОНТЕКСТЕ ФОРМИРОВАНИЯ НОВЫХ СЕРВИСОВ НА РЫНКЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСЛУГ

© 2021 г. А. А. Харлан¹ *, Ш. Н. Биктимиров¹, А. Б. Иванов¹

¹Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

*alexander.kharlan@skoltech.ru

Поступила в редакцию 13.11.2019 г.

После доработки 17.02.2020 г.

Принята к публикации 05.03.2020 г.

Рассматривается методика оценки рынка перспективных глобальных телекоммуникационных сетей, включающих космический сегмент в виде мегагруппировок связи с глобальным покрытием. Согласно полученным результатам, к 2022 г. потребление трафика мобильными устройствами 5G по всему миру будет составлять около 8.5 ЭБ/мес. Возможная стоимость затрат на развертывание мегагруппировки связи для обеспечения широкополосного доступа в интернет в любой точке Земли может колебаться в диапазоне от 5 до 50 млрд долл. в зависимости от требований к сервису. Доказана возможность интеграции современных и перспективных космических группировок связи в состав глобальной телекоммуникационной инфраструктуры нового поколения. Показано, что при развертывании группировки из 600 и более аппаратов, стоимостью около \$ 10 млрд возможно предоставление сервиса транзита трафика от базовых станций в отдаленных районах при обеспечении населения широкополосным интернетом в сетях 5G.

DOI: 10.31857/S0023420621020047

ВВЕДЕНИЕ

Беспроводная связь пятого поколения (5G) нацелена на значительное расширение возможностей наземных беспроводных сетей. Внедрение технологий 5 поколения позволит поднять на качественно иной уровень телемедицину, беспилотный автотранспорт, реализовать концепцию “умных городов” (smart cities), “интернета вещей” (IoT), а также децентрализованную (P2P) связь на основе VR (IEEE 5G and Beyond Technology Roadmap White Paper, <https://5g.ieee.org/images/files/pdf/ieee-5g-roadmap-white-paper.pdf>).

В последнее время началось развитие глобальных телекоммуникационных спутниковых сетей нового поколения [2, 4]. По состоянию на 2019 г. соответствующие космические средства и технологии уже частично испытаны на орбите (Starlink Mission – SpaceX, <https://www.spacex.com/news/2019/05/24/starlink-mission>). И хотя эти сети не ориентированы на работу с существующими коммерческими телекоммуникационными сетями, а их абоненты должны для подключения использовать специальное оборудование, разработчики глобальных космических решений заявляют характеристики, сравнимые с развивающимися стандартами мобильных сетей 5G. На первый взгляд кажется, что использование “космическо-

го” решения заведомо не конкурентоспособно по сравнению с наземными сетями ввиду дороговизны космической инфраструктуры, однако при ближайшем рассмотрении видно, что космические решения свободны, в частности, от таких недостатков наземных сетей, как высокая стоимость прокладки оптических линий в труднодоступных районах и высокая задержка при транспортировке пакета через несколько наземных хабов. Некоторые исследования уже сейчас описывают возможные сценарии использования космического сегмента в глобальной 5G-архитектуре (см., например, [1]), (диапазон 1) и 20–60 ГГц (диапазон 2). Диапазон 2 предполагает использование миллиметровых волн [5], что приводит к снижению возможного размера сот, что, в свою очередь, соответствует тенденции повышения спектральной и энергетической эффективности сети. К тому же, такие антенны меньше размером – до нескольких сантиметров.

Сектор радиокommunikаций Международного союза электросвязи (ITU-R) приводит три основных сценария пользования 5G: сценарий eMBB (улучшенный широкополосный мобильный доступ) подразумевает использование 5G как логического продолжения 4GLTE с улучшенными характеристиками; URLLC (сверхнадежная связь

Таблица 1. Определения сценариев развития 5G. В данной табл. I – “пессимистичный сценарий”, II – “реалистичный”, III – “оптимистичный”

Сценарий	I	II	III
Non-standalone-5G удовлетворяет критериям сценария eMBB	–	+	+
Число операторов, запустивших 5G	к 2021	10	40
	к 2024	80	145
	к 2027	150	250
NB-IoT и eMTC интегрируются в 5G по сценарию mMTC	–	+	+
Китайские компании могут работать на западном рынке	–	–	+
Полномасштабный запуск standalone-5G в миллиметровом диапазоне	2027	2025	2023
Освобождение нелицензируемых частот 5ГГц под 5G	–	+/-	+
Трудности с получением частот по числу операторов связи	60%	35%	10%
Повсеместный доступ к 5G-устройствам	2025	2023	2021
Вытеснение стационарных кабельных подключений 5G-подключениями (fixedwireless)	–	15% к 2027	30% к 2027

снизкой задержкой) предполагает использование сети в ситуациях, когда необходим бесперебойный, устойчивый и надежный доступ с низкой задержкой; mMTC (многоточечная машинная связь) предполагает соединение большого числа маломощных дешевых устройств, распределенных по широкой зоне покрытия. Следует отметить, что вероятность реализации требований по сценариям URLLC и mMTC до 2021 г. невысока, отчасти потому, что планируемая в 5G-сетях “внутрисетевая” задержка составляет 1–4 мс, однако на 2019 г. в тестируемых сетях удалось достичь лишь значения 9–12 мс (“New Services & Applications With 5G Ultra-reliable Low Latency Communications” (PDF). 5G Americas).

Отметим, что рассматривать космический сегмент в сетях 5G можно лишь по сценарию eMBB. Низкая задержка недостижима ввиду значительно большего расстояния до спутника на орбите, а mMTC – ввиду высокой плотности устройств.

Цель данной работы – выяснить, какое место глобальные телекоммуникационные спутниковые сети могут занять на мировом рынке связи с учетом планов развертывания наземных сетей 5 поколения. Для этого проанализирован возможный рост спроса на интернет-трафик, связанный с развитием новых сервисов на базе сетей 5G, а также текущие значения цен на трафик для конечных потребителей и IP-транзит; сделана оценка затрат на развертывание космических группировок связи нового поколения; приведен анализ возможного сценария предоставления услуг связи при помощи спутниковой группировки и сделан вывод о возможности занятия космическими группировками части глобального рынка мобильной связи как при прямом обслуживании абонентов, так и при предоставлении услуг

транзита трафика от базовых станций (“backhaul”-канал).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РОСТА СПРОСА НА ИНТЕРНЕТ-ТРАФИК

Предположения о росте спроса на трафик, количестве подключений и абонентов мобильных сетей, делаются исследователями на основании ряда допущений. В работе (LTE and 5G Market Statistics – Global Mobile Suppliers Association, report, 8 April 2019, <https://gsacom.com/paper/lte-5g-market-statistics-8-april-2019/?utm=reports4g>) прогноз опирается, в частности, на количество операторов, заявивших о намерении перейти на 5G. Кроме того, прогнозные предположения могут основываться на политической и экономической ситуации в мире, результатах тестирования оборудования и других факторах.

В табл. 2 описываются параметры сценариев со слабым (I), реалистичным (II) и бурным (III) ростом спроса на трафик. За основу для прогнозирования спроса используются данные компании Ericsson (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>), примерно соответствующими “реалистичному” сценарию развития мобильных сетей. Для формирования “реалистичного” прогноза числа абонентов 5G используем данные (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>) и экстраполируем их до 2027 г. с учетом данных о количестве подключенных операторов, приведенных в (LTE and 5G Market Statistics – Global Mobile Suppliers Association, report, 8 April 2019, <https://gsacom.com/paper/lte-5g-market-statistics-8-april-2019/?utm=reports4g>)

и воспользуемся данными о распределении подключений из (IoT connections outlook – Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/november-2018/iot-connections-outlook>). При этом из IoT-устройств будем учитывать только подключенные к сетям мобильных операторов. Количество таких устройств, по данным Ericsson, достигнет 1.5 млрд к 2022 г., и его рост не будет столь бурным, как рост общего числа IoT-устройств. Эти оценки хорошо коррелируют с оценками компании Cisco (Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, whitepaper <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf>), согласно которым количество 5G-подключений к 2022 г. достигнет 430 млн (3% всех подключений), причем каждое из них будет в среднем потреблять 22 Гб данных в месяц, что составит до 12% от всего мобильного трафика в мире.

При этом количество пользовательских мобильных подключений (всех поколений) после 2022 г. не будет расти так же быстро, как в 2015–2019 гг. (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>) – (Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, whitepaper <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf>) ввиду насыщения азиатского и африканского рынков и достижения естественного потолка проникновения мобильной связи. Количество же сотовых IoT-устройств, напротив, будет расти все более высокими темпами. Этот фактор приведет к небольшому замедлению роста трафика, потребляемого в единицу времени средним абонентом 5G-сетей.

Зависимость общемирового потребления трафика от времени получена путем экстраполяции данных (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>) – (Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, whitepaper <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf>) с использованием в качестве опорных точек статистических данных за 2017–2019 гг. и введения поправок на допущения о возможных сценариях, описанных в табл. 2 (рис. 1).

Значения потребления для сценария II (умеренный рост потребления) примерно совпадают с данными Ericsson и Cisco (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>) – (Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, whitepaper <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf>).

Таблица 2. Параметры для оценки бюджета радиосвязи. Предполагается канал с аддитивным белым Гауссовым шумом

Параметр	Значение
Коэффициент усиления антенны КА	50 дБ
Коэффициент усиления антенны наземной станции	45 дБ
Частота	12 ГГц
Потери на прохождение тропосферы	0.07 дБ/км
Требуемое соотношение Eb/N0	25 дБ
Шумовая температура	500 К
Коэффициент помехоустойчивого кодирования	0.5
Суммарные потери в трактах	4 дБ

lateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf). Так, согласно этим данным, к 2022 г. потребление трафика 5G устройствами по всему миру будет составлять около 8.5 ЭБ/мес, что подтверждается результатами расчета.

Подробную оценку потребления проведем по модели, описанной в [10]. Модель генерирует абонентскую активность в любой зоне, при этом учитываются следующие факторы: географическое положение; тип местности: городской, пригородный, сельский, отдаленный; время суток.

Для моделирования населения используются данные NASA (SEDAC) (Gridded Population of the World (GPW) – NASASEDAC <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4>). Для работы алгоритма используется база данных городов Geo names.org (Geo names – open data base <http://www.geonames.org>). Данные по интенсивности потребления берутся из статистических источников (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>) – (Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, whitepaper <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf>, а также отчетов статистических агентств (Daily mobile internet usage per capita world wide 2011–2021 – Statista <https://www.statista.com/statistics/433877/daily-mobile-internet-usage-worldwide/>), (Digital, Social & Mobile World wide In 2015 – Wearesocial <https://wearesocial.com/uk/special-reports/digital-social-mobile-worldwide-2015>). Ненадежность этих данных может приводить к небольшим локальным искажениям результатов моделирования, однако все коэффициенты нормированы с учетом среднемировых показателей потребления, и потому не будут влиять на результаты моделирования в общемировом масштабе. Достоверность используемых

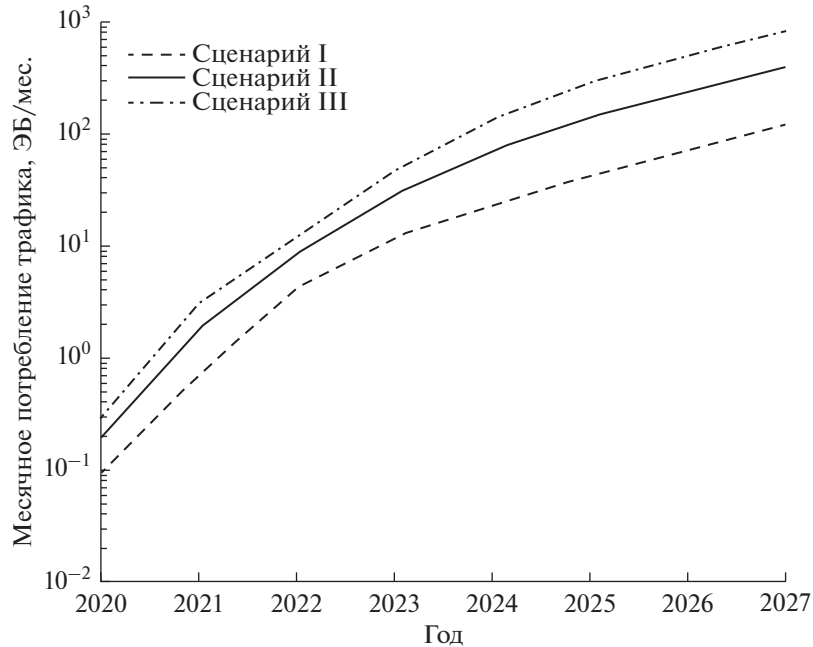


Рис. 1. Ежемесячное потребление трафика при разных сценариях развития рынка мобильной связи.

в настоящем исследовании статистических данных предлагается принять в качестве допущения.

Трафик, потребляемый на некоторой площади S за время $\Delta t = (t_1; t_2)$, можно вычислить, как

$$T_s = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \cdot \iint_S N(\varphi, \lambda) \cdot U(\varphi, \lambda) \cdot P(\varphi, \lambda) d\varphi d\lambda, \quad (1)$$

где $N(\varphi, \lambda)$ – население ячейки с географическими координатами (широта, долгота) φ, λ ; $U(\varphi, \lambda)$ – поправка на интенсивность потребления в ячейке по типу местности и стране; $P(\varphi, \lambda)$ – коэффициент проникновения (число устройств на душу населения); $p(t)$ – суточный профиль потребления (усредненное потребление с учетом неравномерности по времени суток, байт/с).

Далее, будем применять зависимость вида (1) для подсчета трафика в произвольной зоне путем сложения значений, вычисленных в ячейках малого размера, полученных по данным (Gridded Population of the World (GPW) – NASA SEDAC <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4>).

Согласно прогнозам, к 2021 г. сети 5G будут развернуты в ограниченном количестве городов, а общая доля подключений 5G среди всех мобильных абонентов в мире будет составлять не более 1%. Тогда оценка пикового трафика в зоне обслуживания гипотетического низкоорбитального спутника может быть сведена к оценке трафика, генерируемого пользователями тестовых сетей в таких городах. Так, например, общее чис-

ло абонентов 5G агломерации Шанхая составляет в 2021 г. около 2.2 млн, то есть примерно 7% всего населения зоны. Это примерно соответствует ситуации, когда небольшая доля представленных на рынке операторов перешла на 5G, при этом большинство (более 85%) пользователей этих сетей еще не обзавелись устройствами, поддерживающими новые стандарты.

Общее значение трафика, генерируемого абонентами в данной зоне, может быть посчитано с учетом известного значения средней пропускной способности канала. Так, для скорости 512 Мбит/с, в зоне, изображенной на рис. 3, в секунду генерируется около 217 Гбит трафика. Это максимальное значение, соответствующее вечернему пику абонентской активности. При таком сценарии в среднем в мире всеми 5G-абонентами генерируется в секунду до 1.5 Тбит трафика. В дальнейшем значения трафика, получаемые таким образом, будут использованы в качестве исходных данных для расчета пропускной способности спутниковых сетей.

К 2027 г. большинство абонентов сетей, поддерживающих 5G, уже будут обладать соответствующими устройствами, количество сетей возрастет, сервисом будут обеспечены небольшие города, а число 5G IoT-устройств будет превышать число пользовательских устройств более, чем в 1.5 раза. Тогда, если вновь говорить о крупных городах, то к 2027 г. спрос на 5G-трафик в агломерациях мегаполисов может возрасти в 100–200 раз (если за исходное значение общемирового потребления взять прогнозное значение с графика на рис. 1).

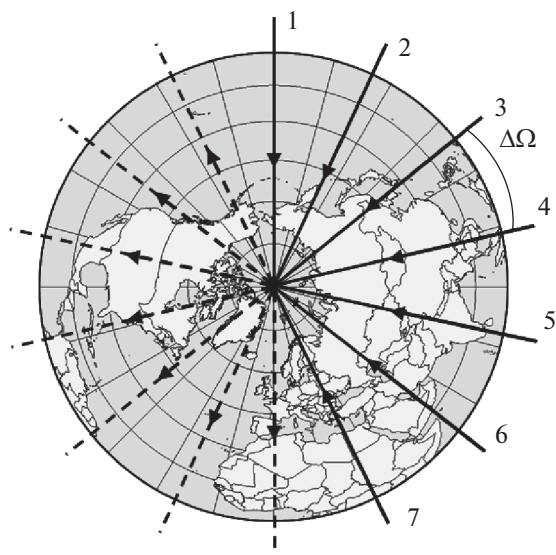


Рис. 2. Расположение орбитальных плоскостей для спутниковой группировки полного непрерывного покрытия поверхности Земли.

В контексте задач настоящего исследования имеет смысл также оценить объем трафика, проходящий на зону обслуживания одного гипотетического спутника связи. И хотя орбиты таких спутников еще не были определены, для оценки порядка величин можно использовать размер зоны обслуживания из работы [10], т.е. считать зону

обслуживания кругом радиусом 750 км (значение радиуса варьируется в зависимости от высоты орбиты КА и параметров его антенной системы).

ОЦЕНКА ЗАТРАТ НА КОСМИЧЕСКУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ

Стоимость интернет-трафика для абонентов по мере развития технологий в пределах одного поколения мобильных сетей меняется довольно слабо. Цены в разных странах очень сильно отличаются друг от друга (от \$0.26 за 1 ГБ в Индии до \$20.22 в Швейцарии (IP Transit Forecast Service – Tele Geography <https://www2.telegeography.com/ip-transit-forecast-service>), однако, согласно данным источников (The Cost Of Mobile Internet Around The World [Infographic] – Forbes/Statista <https://www.forbes.com/sites/niallmccarthy/2019/03/05/the-cost-of-mobile-internet-around-the-world-in-fographic/#32ad5a87226e>) – (Out look for IP Transit Prices in 2018 – Tele Geography <https://blog.telegeography.com/outlook-for-ip-transit-prices-in-2018>) цены на трафик в разных странах будут выравниваться при общем повсеместном снижении цены на фоне конкурентной борьбы операторов связи на рынке 5G. Вместе с тем, на развитие инфраструктуры тратятся значительные средства: согласно опубликованным данным ITU (ITU’s flagship IC Tregulatoryreport – ITU http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2016/12.aspx#.XW_cGEVR2Un), порядка \$ 30 млрд ежегодно вкла-

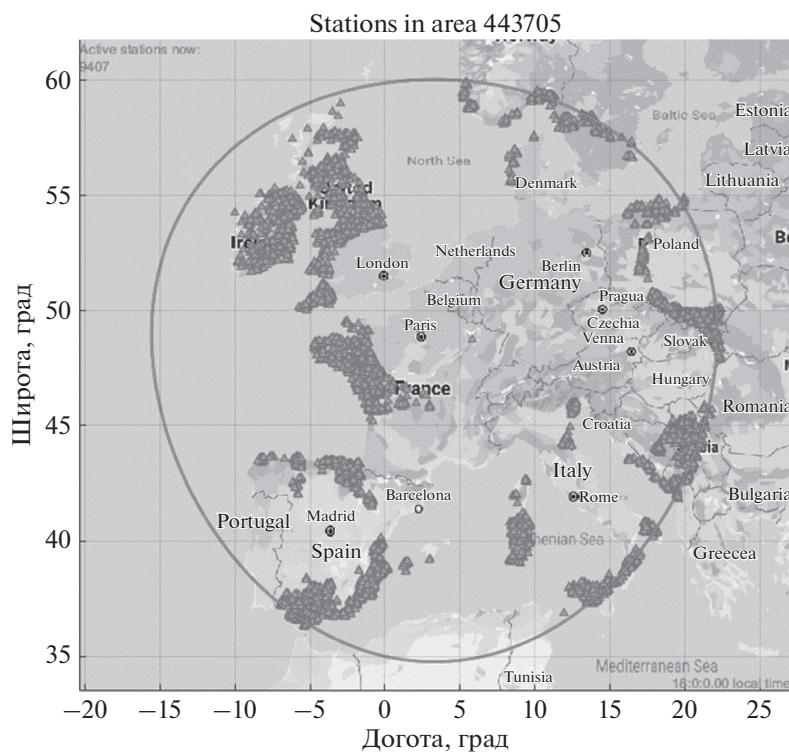


Рис. 3. Активные базовые станции при общем числе станций более 440 тыс.

дывается в развитие оптических сетей по всему миру. При этом общая цена развертывания 5G-инфраструктуры может достигать \$ 1 млн за 1 кв. км [3]. Эти данные позволяют говорить о наличии возможности финансирования спутниковых проектов при переходе от оптических к спутниковым backhaul-каналам.

Оценку бизнес-моделей и долей рынка для разных вариантов спутниковых сервисов, интегрированных в сети 5G, можно провести, имея представление о стоимости космической инфраструктуры. При любом сценарии абонентского обслуживания, для использования в составе космического сегмента необходимо сложное энергоемкое антенное оборудование, значительно повышающее стоимость орбитальной группировки. Проведем ниже оценку этой стоимости на основании уже существующего и частично реализованного проекта спутниковой сети для оказания услуг связи, сравнимых, с точки зрения конечного потребителя, с 5G-связью.

В основе методики оценки лежит принцип “reverse engineering”, предполагающий анализ существующих данных о разрабатываемых изделиях и выработку гипотез о полном облике системы для оценки тех или иных ее параметров.

Несколько лет назад компания SpaceX заявила о создании группировки из 12 тыс. спутников для обеспечения всей Земли широкополосным интернетом. В рамках настоящего исследования для основы оценки была выбрана именно эта сеть, поскольку многие ее параметры известны, пропускная способность сети примерно соответствует требованиям 5G, а также заявлена ориентировочная цена проекта.

Подробное описание исследования, в ходе которого была произведена данная оценка, приведено в [9]. Требования к гипотетической сети взяты из отчетов компании SpaceX и заявлений ее представителей (Elon Musk just revealed new details about Starlink – Business Insider <https://www.businessinsider.com/spacex-starlink-satellite-internet-how-it-works-2019-5>), а также частотной заявки, поданной компанией SpaceX в надзорный орган США по вопросам радиочастот (SpaceX Non-Geostationary Satellite System – FCC Application, SpaceX). Эта информация касается состава и построения группировки, порядка обслуживания абонентов и базовых характеристик аппарата.

В ходе исследования применялся принцип модельно-ориентированного системного проектирования (MBSE). В результате была разработана комплексная модель системы, содержащая множество параметров ее основных частей.

Космический сегмент группировки включает 4425 спутников, работающих в диапазонах Ka/Ku, и 7518 спутников, использующих V-диапазон.

Для оценки энергетических возможностей отдельного спутника требуется знать, какое количество трафика пользователь потребляет, имея широкополосное Интернет-соединение. В работе [9] были проанализированы сценарии потребления от 30 до 80 ГБ в месяц. При расчете применяется методика оценки стоимости системы используемая Европейским космическим агентством для оценки проектов на ранней стадии [6, 7].

По результатам исследования была составлена смета по системам аппарата с оценкой погрешности. Стоимость первого экземпляра модельного космического аппарата, соответствующего по основным параметрам и составу систем аппарату группировки SpaceX, составила порядка \$ 45.9 млн, а средняя погрешность – около 30% [9].

При большом количестве спутников в составе орбитальной группировки стоимость одного аппарата может быть значительно уменьшена при массовом производстве. Основное уравнение для оценки стоимости при массовом производстве:

$$C = T_1 \cdot N^{1 + \frac{\ln S}{\ln 2}}, \quad (2)$$

где C – общая стоимость, T_1 – стоимость первого экземпляра, N – число экземпляров, S – параметр кривой обучения.

При значении параметра кривой обучения, равном 85% (по рекомендациям из [7]), можно оценить общую стоимость группировки. Она составляет, согласно расчетам, около \$ 60.8 млрд, а средняя цена за спутник при массовом производстве – \$ 5.1 млн.

Таким образом, общая цена проекта превысила 60 млрд долларов, что намного больше озвученной разработчиком оценки в 10 млрд. При этом отследить структуру заявленной стоимости в \$ 10 млрд не представляется возможным: эта цифра была приведена главой компании Илоном Маском в соцсетях и не подкреплена никакими официальными документами. Вероятно, такая оценка не учитывает некоторых значимых факторов, таких как затраты на изначальную проработку проекта или запуски аппаратов, поскольку даже полученная оценка в \$ 60 млрд является в целом оптимистичной в силу причин, обозначенных в [9].

При анализе возможности применения космического сегмента в системах мобильной связи нового поколения будем пользоваться аналогичной методикой.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АРХИТЕКТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА

Основным отличием спутников связи нового поколения от спутников связи старого образца будет повышенная энерговооруженность. Это требование вытекает из необходимости обслужи-

вать одновременно несколько тысяч абонентов с помощью мощной антенной решетки, а также передавать трафик по межспутниковому каналу. Так, в работах [9, 10] говорится о спутниках с мощностью, потребляемой полезной нагрузкой, до 4 кВт.

Сами же высоты орбит получаются исходя из выбора частотных диапазонов. Чем выше частота сигнала, тем сильнее он затухает с расстоянием, и поэтому такие спутники требуется размещать как можно ближе к абонентам, иначе их мощности просто не хватит для обслуживания требуемого числа абонентов.

Для оценки экономических моделей группировки связи рассматриваются конфигурации, обеспечивающие полное непрерывное покрытие Земли. Это возможно, например, при выполнении следующих условий: спутники расположены на круговых околополярных орбитах; большие полуоси и наклонения орбит одинаковы для всех спутников; группировка состоит из P орбитальных плоскостей, в каждой из которых S спутников равномерно распределены по орбите.

Для построения группировки с полным покрытием рассматривается метод, предложенный в [6], который используется для построения низкоорбитальных группировок связи SpaceX (Starlink Mission – SpaceX <https://www.spacex.com/news/2019/05/24/starlink-mission>) и Iridium [8]. Согласно [6] конфигурация группировки может быть задана тремя параметрами $T/P/F$, где T – общее количество спутников, P – число орбитальных плоскостей (рис.), F – целочисленный параметр, смысл которого поясняется ниже. Рассмотрим, например, одну из конфигураций группировки, в которой каждый спутник движется по круговой орбите высотой 1200 км и наклонением 90° . Каждый спутник оборудован антенным устройством с диаграммой направленности в виде конуса с углом раствора 100° . Антенны всех спутников направлены в надир. Всего группировка насчитывает 112 аппаратов ($T = 112$), расположенных в семи орбитальных плоскостях ($P = 7$), как изображено на рис. 2. Плоскости распределены равномерно по долготе восходящего узла. Угловые расстояния между соседними плоскостями определяются как $\Delta\Omega = \pi/P$. Каждая плоскость насчитывает $S = T/P$ космических аппаратов равномерно распределенных по орбите с шагом в $\Delta\nu = 2\pi/S$. При этом, во избежание столкновений между аппаратами разных плоскостей вблизи полюсов предусматривается сдвиг по истинной аномалии между спутниками на соседних орбитах, который в свою очередь определяется как $\Delta f = 2\pi F/T$. Таким образом, параметр F , который в данной конфигурации принимается равным двум отвечает за разницу во времени про-

хождения восходящего узла (или полюса) спутниками, находящимися в соседних плоскостях.

МОДЕЛИ СПУТНИКОВЫХ СЕРВИСОВ ДЛЯ 5G

Исходя из данных предыдущих разделов, существует принципиальная возможность применять спутники для дополнения сетей 5G по следующим основным сценариям:

1) Обслуживание индивидуальных абонентов по сценарию eMBB в районах, где развертывание и эксплуатация полноценной базовой сети и станций обслуживания инфраструктуры не будут рентабельными: это районы с низкой плотностью населения и отдаленные от больших городов и 5G-хабов.

2) Backhaul-канал между базовыми станциями и основной сетью. Этот сценарий гипотетически может быть введен в районах со средней плотностью населения, где развертывание оптических backhaul-каналов становится менее рентабельным.

3) IP-транзит. Услуги спутниковых провайдеров IP-транзита могут оказаться востребованными на этапе, когда пропускной способности существующих каналов будет не хватать для предоставления услуг.

4) Пиринговые услуги, т.е. передача трафика между конкретными провайдерами на равноправной основе, без взимания ими платы друг с друга. Этот сценарий может стать реальностью в регионах, где провайдеры не очень активно переходят на пиринговые соглашения ввиду необходимости введения физического соединения своих сетей в обход IP-транзитных операторов.

Для случая индивидуального обслуживания задача моделирования предоставления услуг сводится к аналогичной той, что была проделана при оценке стоимости инфраструктуры, однако пропускная способность отдельно взятого спутника окажется намного ниже ввиду того, что обслуживать в данном случае нужно обычные мобильные устройства с ненаправленными антенными системами, а не специальные терминалы. Следует учесть, что в зонах, где есть доступ к оптической инфраструктуре сетей предыдущих поколений, возможно развертывание LTE или 5G, и спутниковый канал спросом пользоваться не будет.

Согласно результатам моделирования по методике, описанной в [10], число абонентов в пике для одного спутника может составлять 200–2000 ед. (широкополосный канал), а также дополнительно до 20 тыс. голосовых соединений. Всего же в мире абонентов данной категории к 2027 г. может быть до 50 миллионов. Кроме того, в эту же категорию могут попасть до 100 млн IoT-устройств, используемых на удаленных объектах и в труднодоступных районах.

Таблица 3. Число станций, одновременно обслуживаемых единичным спутником в зависимости от высоты орбиты, скорости подключения для конечного пользователя, а также половинного угла конуса, в котором распространяется сигнал от антенной системы КА (полуширина луча по половинной мощности)

Сектор, град	Скорость	Высота, км				
		600	750	900	1050	1200
40°	1 Гбит/с	1491	681	472	355	262
	2 Гбит/с	735	343	238	179	126
45°	1 Гбит/с	885	553	404	254	176
	2 Гбит/с	436	276	200	125	89
50°	1 Гбит/с	639	448	232	179	126
	2 Гбит/с	318	221	119	90	61

Согласно расчетам, при цене трафика до \$1 за 1 ГБ (IP Transit Forecast Service – Tele Geography <https://www2.telegeography.com/ip-transit-forecast-service>) такие абоненты будут генерировать доход до \$80 млрд в год мобильным операторам, а общее потребление трафика будет составлять до 21 Тбит/с.

Обеспечить обслуживание такого числа абонентов без специальных абонентских устройств проблематично: даже для сети образца Starlink (SpaceX Non-Geostationary Satellite System – FCC Application, SpaceX) с ее абонентскими устройствами, обеспечивающими на уровне абонента значительное усиление сигнала, потребуется полная загрузка более чем 1200 аппаратов. Если же обслуживать требуется обычные мобильные устройства, то даже при уменьшении требований к пропускной способности потребное число аппаратов будет исчисляться десятками тысяч. Поэтому для спутникового проекта, реализующего такой сценарий, нет жизнеспособной бизнес-модели.

Модель backhaul-сервиса, с другой стороны, заслуживает детального рассмотрения. Она предполагает развертывание в районах с невысокой плотностью населения и без существующей наземной инфраструктуры сети базовых станций, которые будут обеспечивать подключение к 5G по сценарию eMBB, однако для соединения с базовой сетью будут вместо оптического наземного использовать спутниковый канал.

Для моделирования такого сценария рассмотрим всех возможных абонентов, удовлетворяющих следующим критериям:

- Плотность населения от 100 до 800 чел./кв. км. В таких регионах капитальные затраты на сетевую инфраструктуру в пересчете на одного абонента примерно в 10 раз выше, чем в крупных городах [3];

- Отдаленность от крупных 5G или LTE-хабов, к которым нужно будет тянуть оптические линии в случае наземного backhaul-канала.

Согласно подсчетам (методика описана в разделе выше), этим критериям в Европе и США удовлетворяет около 5% населения. Для центральной и западной Европы, например, согласно прогнозу 2027 г. это примерно 25 млн абонентов и 42 млн IoT-устройств. Эти абоненты генерируют в пиковое время суток около 13.5 Тбит трафика в секунду.

Чтобы вычислить необходимое количество базовых станций, определим площади ячеек, содержащих абонентов, удовлетворяющих приведенным выше критериям, и присвоим каждой ячейке некоторое количество базовых станций, так, чтобы эти станции, зоны обслуживания которых являются кругами с радиусом 300 м, покрывали всю площадь ячейки. Так, если, например, некоторые из операторов в Европе подключат всех своих абонентов в описанных зонах к 5G, то для ситуации, изображенной на рис. 3, потребуется более 440 тыс. наземных станций на общей площади около 125000 кв. км.

Допустим, что часть из этих станций оснащена антенной системой для работы со спутниковой сетью, предоставляющей backhaul-канал. Частоты для такой системы могут не совпадать с частотами, выделенными под 5G. Для примера рассмотрим систему, работающую в Ku-диапазоне на частотах около 12 ГГц. Пусть базовые станции позволяют в среднем выделять абонентам канал со скоростью до 1 (2) Гбит/с. Тогда, просчитав бюджет радиолинии, можно вычислить, сколько наземных станций может быть обслужено одним спутником такой сети одновременно, если параметры аппаратов будут такими же, как в [9]. Основные параметры для расчета бюджета радиолинии приведены в табл. 2. Результаты расчетов приведены в табл. 3 в зависимости от высоты аппарата, сектора сканирования его антенной системы, а также скорости для конечного потребителя.

Видно, что при увеличении высоты орбиты возможности спутника уменьшаются в силу потерь на распространение радиосигнала. Увеличение сектора сканирования также влияет на общую емкость негативно, поскольку расход мощности на обслуживание абонентов на краю зоны становится ощутимее. Однако оба этих фактора позволяют снизить число аппаратов в группировке, что может позволить запустить сервис при меньших инвестиционных вложениях в инфраструктуру.

Величина сектора сканирования и высота орбиты позволяют судить о приблизительном количестве аппаратов в группировке. Модель орбитального построения, использованная для этой

Таблица 4. Количество базовых станций, которые может обслужить спутниковый сервис различной конфигурации, количество средств, высвобождаемых при замене станций в таком количестве, подключенных по оптической линии, на спутниковые станции, для разных случаев, количество спутников, необходимых для такого сервиса, и общая стоимость группировки. В таблице выделены конфигурации, для которых создание группировки окупается

Конфигурация	1 Гбит/с		2 Гбит/с		Число КА	Стоимость группировки, \$ млрд
	число станций	доступные средства, \$ млрд	число станций	доступные средства, \$ млрд		
600 км – 40°	7000	41.6	6088	36.2	1375	12.6
600 км – 45°	4533	26.9	2233	13.3	900	9.1
600 км – 50°	2423	14.4	1206	7.2	612	6.8
750 км – 40°	3225	19.1	1624	9.6	840	8.7
750 км – 45°	1993	11.8	995	5.9	560	6.3
750 км – 50°	1385	8.2	683	4.1	364	4.6
900 км – 40°	1742	10.3	879	5.2	576	6.5
900 км – 45°	1275	7.6	631	3.7	377	4.7
900 км – 50°	488	2.9	250	1.5	240	3.3
1050 км – 40°	1105	6.6	557	3.3	392	4.8
1050 км – 45°	587	3.5	289	1.7	264	3.6
1050 км – 50°	311	1.8	156	0.9	168	2.5
1200 км – 40°	676	4	325	1.9	288	3.8
1200 км – 45°	306	1.8	155	0.9	189	2.8
1200 км – 50°	163	1	79	0.5	112	1.9

оценки, приведена выше, а полученное количество аппаратов – в табл. 4.

Следует отметить, что общее число обслуженных таким образом базовых станций может составлять от 1.5% общей потребности выделенного в данном анализе класса абонентов, в случае высоких орбит и широких секторов сканирования, до почти 100% при низких орбитах и узких секторах сканирования.

При этом, ввиду особенностей орбитального построения космических систем, более высокие широты будут часть времени или все время неизбежно покрыты более, чем одним спутником. С учетом этого фактора, подсчитаем общую долю станций, которые можно обслужить, среди всех гипотетических станций в мире, которые соответствовали бы всем абонентам рассматриваемого класса (это число по приблизительным подсчетам составляет 7 млн штук). Общее число станций в мире, которые могут пользоваться таким сервисом, в зависимости от параметров группировки и обеспечиваемой скорости для конечного потребителя, приведено в табл. 4.

Для оценки стоимости наземной станции будем использовать данные, приведенные в [3]. Пусть объем средств, высвобождаемый компанией-владельцем базовых станций при установке спутниковых терминалов за счет отсутствия необходимости в оптической сети, составляет 30% от общей стоимости инфраструктуры, что при-

близительно соответствует данным из [3] для типов местности, для которых проводится расчет в настоящей работе. Стоимость группировки рассчитаем для каждого случая по модели, описанной выше. Результаты приведены в табл. 4.

Видно, что при размещении достаточно большого числа спутников на невысоких орбитах переход к спутниковому обслуживанию действительно может быть более экономически эффективен для мобильных операторов или владельцев сетевой инфраструктуры. При этом, если охватить больше абонентов, предоставляя скорость до 1 Гбит/с каждому из них, можно также получить ощутимую прибыль.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В то время, как новые требования по пропускной способности и энергоемкости сетей приводят к необходимости развертывания базовых станций 5G на расстоянии в сотни метров друг от друга для обеспечения требуемого качества связи, спутники с расстояния в сотни километров вряд ли смогут заменить базовые станции и обслуживать абонентов напрямую. Однако показано, что при некоторых условиях спутники могут стать жизнеспособным решением – в ситуациях, когда нужно обслужить отдаленные от больших городов районы с небольшой плотностью населения, стоимость прокладки оптического backhaul-канала может оказаться

слишком высокой, что открывает возможности для альтернативных решений.

Основной выявленной особенностью можно считать то, что такая модель возможна лишь при обслуживании большого числа абонентов по этому принципу: с одной стороны, нельзя развернуть только часть группировки и начать обслуживание, поскольку мобильный интернет, работающий, например, 50% времени в сутки, не будет пользоваться спросом; с другой стороны, развертывание более дешевой группировки для обслуживания небольшой доли рынка не принесет операторам ощутимой прибыли, и, в случае высокой стоимости подключения рассматриваемых регионов к 5G-сетям, операторы скорее откажутся от этого сегмента рынка, чем прибегнут к неэффективным спутниковым сервисам. Таким образом, спутниковые группировки могут занять нишу на рынке обслуживания описанного в данной работе класса абонентов, и при этом даже стать основным каналом для такого обслуживания, однако стоимость входа на данный рынок будет для оператора спутниковой сети очень высокой — миллиарды долларов прямых инвестиций в инфраструктуру на самом начальном этапе проекта.

Модель развития такого проекта будет предполагать быстрое внедрение 5G в зонах обслуживания большинства мобильных операторов и развертывание спутникового сервиса с большой пропускной способностью. Решению такой задачи будет способствовать ситуация, при которой оператор спутниковой сети будет также являться разработчиком базовых станций, чтобы иметь возможность предлагать мобильным операторам уже готовое решение, а не интегрировать инфраструктуру для спутникового сервиса в наземные сети каждого отдельно взятого оператора. В этом случае пройти путь повсеместного развертывания сети можно значительно быстрее. При этом капитальные затраты на инфраструктуру для такого гипотетического спутникового оператора могут

возрасти еще сильнее. С другой стороны, космические проекты с требуемыми инвестициями в десятки миллиардов долларов уже сегодня становятся реальностью (“New Services & Applications With 5G Ultra-reliable Low Latency Communications” (PDF). 5G Americas).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Giambene G. et al.* Satellite-5G Integration: A Network Perspective // IEEE Network. 2018. V. 32. P. 25–31.
2. *Yongtao Su et al.* Broadband LEO Satellite Communications: Architectures and Key Technologies // IEEE Wireless Communications. 2019. V. 26. № 2.
3. *Oughton J., Frias Z., Gaast S. et al.* Assessing the capacity, coverage and cost of 5G infrastructure strategies: Analysis of the Netherlands // Telematics and Informatics. 2019. V. 37. P. 50–69.
4. *Portillo I., Cameron B., Crawley E.* A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband // Acta Astronautica. 2019. V. 159. P. 123–135.
5. *Rappaport T., Sun S., Mayzus R. et al.* Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! // IEEE Access. 2013. № 1. P. 335–349.
6. *Wertz J.* Space mission engineering: The New SMAD. Springer Microcosm Press, 2010.
7. *Fox B.* Guidelines and Metrics for Assessing Space System Cost Estimates. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2008.
8. *Fossa Carl et al.* An overview of the IRIDIUM (R) low Earth orbit (LEO) satellite system // Proceedings of the IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference. NAECON, 1998.
9. *Kharlan A., Veliev N., Biktimirov S. et al.* A University-Based Facility for Evaluation and Assessment of Space Projects // Proceedings of the 69th International Astronautical Congress (IAC), October 2018, Bremen, Germany.
10. *Kharlan A., Teplyakov V.* Software Development for Global Telecom Satellite Network Complex Simulations // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, October 2016, Guadalajara, Mexico.