

Вероятностная модель распространения маршрутной информации в низкоорбитальной системе спутниковой связи с геостационарным ретранслятором

Д.В. Смирнов, С.Х. Зиннуров, П.Д. Штепан

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.
E-mail: vka@mil.ru

В работе решается задача количественной оценки времени распространения маршрутной информации в низкоорбитальной системе спутниковой связи с использованием геостационарного ретранслятора. Предложена вероятностная модель на основе непрерывной цепи Маркова, описывающая процесс обновления таблиц маршрутизации для произвольного числа космических аппаратов. Получены аналитические выражения для вероятности полного обновления группировки и среднего времени сходимости. Показано, что время сходимости растет логарифмически с увеличением числа аппаратов. Для типовых параметров канала время обновления 95 % группировки из 24 космических аппаратов составляет 9,2 с, что укладывается во временные окна межспутниковых линий связи. Результаты могут быть использованы при проектировании перспективных низкоорбитальных систем связи. Ключевые слова: низкоорбитальные спутниковые системы, динамическая маршрутизация, геостационарный ретранслятор, непрерывные цепи Маркова, время сходимости, масштабируемость.

Probabilistic Model of Routing Information Dissemination in a Low Earth Orbit Satellite System with a Geostationary Relay

D.V. Smirnov, S.H. Zinnurov, P.D. Shtepan

Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky

The paper addresses the problem of quantitatively estimating the routing information dissemination time in low Earth orbit satellite communication systems using a geostationary relay. A probabilistic model based on a continuous-time Markov chain is proposed to describe the routing table update process for an arbitrary number of spacecraft. Analytical expressions are derived for the probability of full constellation update and the mean convergence time. It is shown that the convergence time grows logarithmically with the number of satellites. For typical channel parameters, the 95% update time for a 24-satellite constellation is 9.2 seconds, which fits within the communication windows of inter-satellite links. The results can be used in the design of advanced low Earth orbit communication systems.

Keywords: low Earth orbit satellite systems, dynamic routing, geostationary relay, continuous-time Markov chains, convergence time, scalability.

Введение

Низкоорбитальные системы спутниковой связи (НССС) в настоящее время переживают этап активного развития, обусловленный внедрением технологии межспутниковых линий связи (МЛС) [1]. Развитие данных технологий способствует переносу функций маршрутизации и коммуникации с наземной инфраструктуры в космический сегмент, что позволяет организовать информационный обмен между абонентами исключительно в космической составляющей. Такой подход приобретает особую актуальность благодаря способности НССС обеспечивать глобальное покрытие

земной поверхности, включая Арктику, акватории морей и труднодоступные горные районы. Дополнительным преимуществом является минимальная задержка распространения сигнала при нахождении абонента в зоне радиовидимости космического аппарата (КА). Однако практическая реализация подобных систем сопряжена с рядом нерешенных технических задач, главной из которых является динамическое изменение топологии сети вследствие орбитального движения КА.

В низкоорбитальных системах каждый КА выполняет функцию сетевого маршрутизатора. Изменение взаимного положения аппаратов требует постоянного обновления маршрутной информации для обеспечения надежности каналов связи. В связи с этим предлагается подход к распространению маршрутной информации в НССС с использованием КА, размещенного на геостационарной орбите (ГСО), в качестве ретранслятора. Для обоснования эффективности данного подхода необходима количественная оценка времени распространения маршрутной информации в условиях ограниченной наземной инфраструктуры.

Анализ современных исследований показывает, что существующие работы в области маршрутизации для НССС фокусируются преимущественно на детерминированных алгоритмах, основанных на предсказуемом характере орбитального движения [2, 3], либо на децентрализованных протоколах, требующих интенсивного служебного обмена [4]. В то же время, задачи вероятностной оценки времени доставки маршрутной информации при использовании геостационарного ретранслятора для фиксированного числа низкоорбитальных аппаратов в научной литературе уделяется недостаточного внимания.

Целью настоящей работы является разработка вероятностной модели распространения маршрутной информации в низкоорбитальной системе спутниковой связи с геостационарным ретранслятором для фиксированного числа космических аппаратов. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ существующих подходов к маршрутизации в НССС и выявление их ограничений;
2. Разработка математической модели процесса распространения информации на основе аппарата непрерывных цепей Маркова;
3. Получение аналитических выражений для вероятности полного обновления группировки и среднего времени сходимости;

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена модель распространения маршрутной информации через геостационарный ретранслятор для произвольного числа низкоорбитальных аппаратов;
2. Впервые получены аналитические соотношения, устанавливающие логарифмическую зависимость времени сходимости от размера группировки, что подтверждает масштабируемость подхода;
3. Получены инженерные формулы для оценки времени обновления маршрутных таблиц, пригодные для проектирования перспективных низкоорбитальных систем связи.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов при проектировании систем управления низкоорбитальных спутников, включая аппараты дистанционного зондирования Земли, для которых оперативная доставка командной информации является критически важной.

Анализ существующих решений задачи маршрутизации в низкоорбитальных системах спутниковой связи

Несмотря на технические сложности, в настоящее время реализован ряд НССС с глобальным покрытием, к которым относятся такие системы как Iridium и Starlink [5].

Система Starlink представляет собой низкоорбитальную систему связи, в которой каждый КА выполняет функции сетевого узла, связанного с наземными ШС через фидерные линии Ка-диапазона. В более поздних версиях спутников (v1.5 и v2 Mini) по заявленным требованиям имеют межспутниковые линии связи, которые с 2022 года работают в тестовых режимах.

Важной особенностью архитектуры Starlink является централизованное управление маршрутизацией. Формирование таблиц маршрутизации выполняется в наземном Центре управления сетью на основе точных моделей орбитального движения и данных о текущем состоянии каналов связи [5]. Готовые таблицы загружаются на КА через сеть шлюзовых станций, расположенных в пределах прямой видимости. Такой подход обеспечивает информационный обмен между абонентами расположенных в пределах радиовидимости КА при относительно невысоком объеме служебного трафика не загружая наземную инфраструктуру.

Локально на борту КА могут приниматься оперативные решения о выборе конкретного пути из числа предварительно рассчитанных вариантов, однако базовая маршрутная информация распространяется именно через наземную инфраструктуру ШС. Актуальная информация о текущей системе Starlink представлена в таблице 1.

Таблица 1. Система Starlink, текущая загруженность и версии КА [6-7]

Версия КА Starlink	Дата запуска	Количество КА
Tintin (Test)	2018 г.	2 КА
v.0.9/1.0	2019 -2021 г.	1725 КА
v.1.5	2021 – 2023 г.	2987 КА
v.2 Mini	2023 – 2025 г.	5862
Общая группировка	2025 г.	10558 КА

Система Iridium является примером НССС с устойчивой инфраструктурой с опорой наземных ШС и развитой сетью радиочастотных межспутниковых связей. В данной системе не применяется централизованное распространение глобальных таблиц маршрутизации в реальном времени. Обновление маршрутной информации происходит периодически при пролете КА над ШС, а в промежутках между сеансами связи каждый КА принимает решения о передаче трафика автономно, на основе локальной информации о соседних узлах, доступных межспутниковых каналах и предсказуемой орбитальной структуре группировки. Передача данных осуществляется по маршрутам через межспутниковую mesh-сеть до КА назначения или ближайшей доступной шлюзовой станции. Такой подход обеспечивает высокую отказоустойчивость и предсказуемость работы сети, однако ориентирован преимущественно на доставку трафика к наземному сегменту и в меньшей степени приспособлен к минимизации задержек и нагрузок в полностью орбитальном режиме [8]. Стоит отметить, что не смотря на реализацию технологии межспутниковых линий связи, информационный обмен между КА остается только для мобильной связи на различных скоростях, поэтому организовать видеосвязи, и выход в интернет не получится [5].

Анализ существующих решений позволяет выделить несколько основных подходов к организации маршрутизации в НССС.

Предсказуемая маршрутизация опирается на детерминированный характер орбитального движения КА. Предварительно рассчитываются окна взаимной видимости КА и доступность наземных станций, после чего маршруты загружаются на борт. Основным преимуществом данного подхода является низкая вычислительная сложность и отсутствие необходимости в сложных алгоритмах онлайн-маршрутизации.

Недостатком является ограниченная реактивность при нештатных ситуациях и деградации каналов связи.

Таблица 2. Типы данных передаваемых системой Iridium-Next

Тип трафика	Скорость передачи данных, кбит/с	Тип трафика
Телефония	2,4	Телефония
Низкоскоростная передача данных	9,5-64	Низкоскоростная передача данных
Передача данных морским и воздушным объектам	128-512	Передача данных морским и воздушным объектам
Широковещательная передача данных	64	Широковещательная передача данных
Высокоскоростная передача данных	88, 176, 352, 704, 1408	Высокоскоростная передача данных

Протокол D-HSPF (Dynamic Hierarchical Shortest Path First) [9] – является протоколом маршрутизации, специально разработанным для низкоорбитальных систем связи. Протокол D-HSPF является развитием базового протокола HSPF (Hierarchical Shortest Path First) который использует иерархичную структуру сети. Иерархический протокол первого кратчайшего пути (HSPF) обеспечивает основу для создания сети, которая, по меньшей мере теоретически, не имеет ограничений на количество уровней иерархии или количество сетевых назначений. Каждый маршрутизатор может существовать в одной или нескольких областях сетевой иерархии. Соединения между областями осуществляются не через пограничные маршрутизаторы, а посредством линков с отслеживанием состояния канала. Внешние области представляются как отдельные виртуальные узлы, что позволяет направлять трафик без детального знания внутренней структуры смежных доменов. Такой подход снижает вычислительную сложность маршрутизации и объём служебного трафика, однако усложняет управление кластерами в условиях постоянного орбитального движения и пока не получил практической реализации в коммерческих НССС.

Для снижения энергопотребления и оптимизации маршрутизации в НССС в работе [2] предлагается гибридный подход, сочетающий Segment Routing over IPv6 (SRv6) и программно-конфигурируемые сети (SDN). В данной архитектуре SRv6 обеспечивает маршрутизацию без сохранения состояния. Это означает, что каждый сетевой пакет содержит в своём заголовке всю необходимую информацию о маршруте следования в виде последовательности идентификаторов сегментов (SID). Маршрутизаторы на борту КА просто читают эти идентификаторы и перенаправляют пакеты в соответствии с указаниями, не храня информацию о состоянии соединений и не обмениваясь служебными сообщениями для синхронизации таблиц маршрутизации. Такой подход минимизирует служебный трафик и исключает необходимость использования сложных протоколов распределённого состояния, таких как OSPF/MPLS.

В работе [10] предложен подход к минимизации диаметра сети через оптимизацию межплоскостных межспутниковых связей (ISL) в конфигурации Walker-Δ, учитывающий аппаратные ограничения и долгосрочную стабильность топологии. Другие авторы, например Bhatt и Kumar [11], исследуют адаптивную маршрутизацию в квантовых LEO-сетях с учётом атмосферной турбулентности и орбитальной динамики, используя многофакторные метрики, включающие точность, доверие и скорость генерации ключа. Несмотря на прогресс в этих направлениях, большинство существующих решений либо опираются на централизованное предварительное

планирование маршрутов, либо требуют частой перенастройки ISL, что усложняет развёртывание в реальных условиях. Таким образом, сохраняется потребность в гибридных подходах, сочетающих преимущества централизованного планирования с оперативным доведением маршрутной информации через глобальный канал связи, например, с использованием геостационарного ретранслятора. Ключевой анализ существующих подходов маршрутизации в НССС представлен в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение подходов маршрутизации в НССС

Подход	Скорость реакции	Отказоустойчивость
Предсказуемая маршрутизация	низкая	низкая
D-HSPF	Средняя	Средняя
SRv6 + SDN	Высокая	Высокая
Оптимизация конфигурации ISL	Средняя	Средняя

Таким образом, все рассмотренные подходы в той или иной степени сталкиваются с фундаментальным несоответствием между скоростью изменения топологии НССС и скоростью реакции механизмов маршрутизации. Централизованные решения страдают от задержек распространения управляющей информации, тогда как полностью децентрализованные подходы ограничены по возможностям глобальной оптимизации и резервирования.

Формируется следующее противоречие, с одной стороны, возникает задача централизованного прогнозирования и планирования маршрутов с учётом глобального состояния сети, с другой – необходимость обеспечения высокой отказоустойчивости и оперативного реагирования на локальные изменения топологии и состояния межспутниковых каналов.

В связи с этим представляется целесообразным разработка метода организации информационного обмена в НССС, основанного на использовании космического аппарата на геостационарной орбите в качестве элемента распространения маршрутной информации, при сохранении автономных механизмов принятия решений на борту низкоорбитальных КА. Такой подход позволяет прогнозировать вероятные состояния сети, предвычислять оптимальные маршруты и сокращать задержки при переключении маршрутов, повышая общую отказоустойчивость и устойчивость функционирования НССС.

Математическая модель распространения маршрутной информации на основе непрерывных цепей Маркова

Рассматриваемая система включает:

1. Низкоорбитальный сегмент: n КА на круговой орбите высотой $h=500$ км;
2. Геостационарный сегмент: 1-3 КА – ретранслятор на орбите 35786 км;
3. Наземный сегмент: центр управления и шлюзовые станции

Задача: Количественная оценка времени, за которое все n КА получают актуальные таблицы маршрутизации от центра через ГСО КА.

Для количественной оценки эффективности предложенного подхода решается задача распространения маршрутной информации в НССС с использованием модели

непрерывной цепи Маркова (Continuous-Time Markov Chain, СТМС) [12]. Процесс доставки информации от геостационарного КА к каждому из КА, находящихся на НСС, представляет собой случайный поток событий с экспоненциально распределенными интервалами времени. Время, за которое все КА получают маршрутную информацию, определяется максимумом независимых времен получения информации отдельными КА, что естественным образом описывается в рамках теории марковских процессов. Данный процесс обладает ключевыми свойствами марковских процессов: отсутствием памяти и непрерывностью во времени.

Для упрощения анализа и получения практических оценок можно перейти от общей сети к частному случаю. Это оправдано тем, что КА, размещенные в НССС, имеют одинаковые характеристики оборудования и находятся на идентичных орбитах, а геостационарный ретранслятор осуществляет передачу одновременно для всех КА. В таком случае допустимо рассматривать примеры для неполного состава КА (например, для трех аппаратов), это допущение позволяет получить замкнутые аналитические выражения, которые затем могут быть обобщены на группировку произвольного размера.

Рассмотрим систему, состоящую из трёх низкоорбитальных КА и одного геостационарного КА, который является единственным источником новых маршрутных таблиц и может передавать их напрямую всем КА. Важное допущение: КА в НССС не обмениваются маршрутной информацией между собой, а только передают полезные данные абонентам. В такой системе момент получения таблицы каждым КА является случайным событием. Будем считать, что время до успешного получения информации каждым КА имеет экспоненциальное распределение (свойство отсутствия памяти), а процессы для разных КА независимы.

Состояние системы описывается числом k КА, получивших маршрутную информацию:

Состояние системы в произвольный момент времени можно описать вектором

Общее число состояний: $|S| = n+1$. Где $S_j = 1$, если КА в НССС получил маршрутную информацию либо $S_j = 0$ если не получил.

Общее количество всех возможных состояний определяется как 2^N , где N – число получаемые информацию КА.

Для каждого КА определим интенсивность λ_j , с которой он успешно получает маршрутную информацию от ГСО. Эта интенсивность зависит от частоты попыток передачи M (число попыток в секунду) и вероятности успешной передачи одной попытки:

$$\lambda_j = MP_{усп.k} \quad (1)$$

Вероятность успешной передачи λ_j зависит от орбитально-баллистических параметров:

$$P_{усп.k} = P_{вид} P_{КА}, \quad (2)$$

где $P_{вид}$ – вероятность нахождения КА в зоне радиовидимости КА ГСО;

$P_{КА}$ – вероятность успешного приема КА.

В состоянии S_k осталось $(n-k)$ КА, не получивших информацию. Каждый из них получает информацию с интенсивностью λ , независимость от других.

Матрица генераторов переходов Q размерности $(n+1)(n+1)$:

$$q_{k,k+1} = (n-k)\lambda \quad (3)$$

$$q_{k,k+1} = -(n-k)\lambda \quad (4)$$

Система дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний $q_k(t)$ записывается как

$$\frac{dP_k}{dt} = -(n-k)\lambda P_k(t) + (n-k+1)\lambda P_{k-1}(t), \text{ где } k \geq 1 \quad (5)$$

Для непрерывного цепи Маркова матрица интенсивностей переходов определяется как : $Q = [q_{ij}]$ имеет вид:

$q_{ij} = \begin{cases} \lambda_i, \\ 0, \\ \sum_{i \neq j} q_{ij}, \end{cases}$	если переход из S_i в S_j соответствует получению информации k -м КА,	(6)
	если переход невозможен,	
	для диагональных элементов.	

Результаты

Решение системы (5) позволяет получить аналитическое выражение для вероятности того, что к моменту t все n КА получили обновление. В силу независимости процессов для каждого аппарата эта вероятность равна произведению вероятностей успеха для каждого из них: $P_n(t) = (1 - e^{-\lambda t})^n$.

Среднее время полного обновления (математическое ожидание максимума n для независимых экспоненциальных величин) равно:

$$T_{cx} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \quad (7)$$

При больших n справедлива формула:

$$T_{cx} = \frac{1}{\lambda} (\ln n + \varphi) \quad (8)$$

где $\varphi = 0,557$.

Это подтверждает логарифмический рост времени сходимости с увеличением числа КА.

Для примера из $n=3$ КА получаем 8 состояний ($S_0 - S_7$), описание которой представлен в таблице 4, а граф представлен на рисунке 1.

Таблица 4. Описание состояния эргодического графа цепи Маркова для НССС

Состояния	Описание
S_0	Информацию никто не получил
S_1	Информацию получил только 1-й КА
S_2	Информацию получил только 2-й КА
S_3	Информацию получил только 3-й КА
S_4	Информацию получили только 1-й и 2-й КА
S_5	Информацию получили только 1-й и 3-й КА
S_6	Информацию получили только 2-й и 3-й КА
S_7	Информацию получили все КА

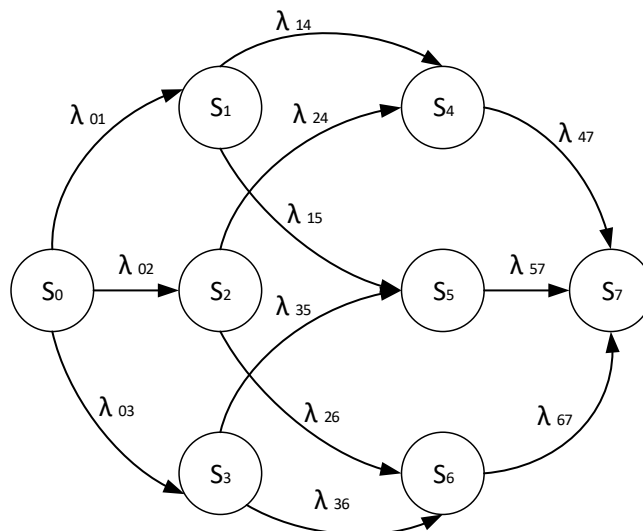
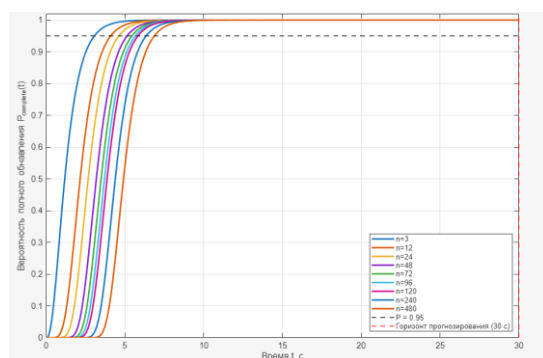


Рис. 1. Граф возможных переходов для трех КА

Для вычислений использовались следующие параметры канала и их расчет в таблице 5.

Таблица 4. Описание состояния эргодического графа цепи Маркова для НССС

Параметр	Значение	Обоснование
М (частота попыток)	2.0 с^{-1}	2 передачи в секунду
$P_{\text{вид}}$	0.7	Для НССС – 550 км
$T_{\text{сх}}$	2.8 с	Время сходимости для 3 КА в НССС для вероятности 0.99



а)



б)

Рис. 2. а) график зависимости вероятности полного обновления от числа КА;

б) зависимость среднего времени сходимости от числа КА .

Анализ полученных результатов

На рисунке 2 а, представлены графики зависимости вероятности полного обновления от времени для различного числа космических аппаратов $n = 3, 6, 12, 24$ при интенсивности $\lambda = 0,5$ (среднее время успешной передачи 2 секунды). Видно, что с ростом кривые сдвигаются вправо, что соответствует увеличению времени, необходимого для обновления всей группировки. При $n = 24$, вероятность достижения составляет 95%, примерно 9.2 с, что согласуется с данными, приведёнными в

аннотации, и подтверждает приемлемость предложенного подхода для реальных систем с межспутниковыми линиями связи. На рисунке 26 показана зависимость среднего времени сходимости T_{cx} от числа КА n . Точками отмечены точные значения, вычисленные по формуле (7), сплошной линией – аппроксимация логарифмической функцией $(\ln n + \gamma)$. Видно хорошее совпадение, начиная с $n \geq 5$, что подтверждает справедливость асимптотической формулы (8) и доказывает логарифмический рост времени сходимости.

Полученные результаты демонстрируют масштабируемость предложенного метода: при увеличении числа аппаратов в 16 раз (с 3 до 48) среднее время сходимости возрастает менее чем в 3 раза, что хорошо описывается логарифмическим законом.

В работе разработана вероятностная модель распространения маршрутной информации в низкоорбитальной системе спутниковой связи с использованием геостационарного ретранслятора. На основе аппарата непрерывных цепей Маркова получены аналитические выражения, позволяющие оценить вероятность полного обновления группировки и среднее время сходимости процесса. Установлено, что время сходимости растет логарифмически с увеличением числа космических аппаратов, что подтверждает масштабируемость предложенного подхода.

Проведённый анализ существующих решений показал перспективность гибридной архитектуры, сочетающей централизованное планирование маршрутов и оперативную доставку обновлений через геостационарный ретранслятор. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем управления низкоорбитальных спутников, включая аппараты дистанционного зондирования Земли.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на учёт орбитальной динамики, переход к симуляции при помощи программы MATLAB и включение механизмов межспутникового обмена информацией.

Выводы

Ограничения исследования связаны с принятыми допущениями:

1. Экспоненциальное распределение времени успеха может не соответствовать реальной динамике, особенно при наличии детерминированных окон видимости;
2. Независимость каналов между GEO и разными LEO-аппаратами может нарушаться из-за коррелированных помех или атмосферных явлений;
3. Модель не учитывает возможность обмена информацией между самими LEO-спутниками, что могло бы ускорить распространение.

Несмотря на указанные ограничения, предложенные аналитические выражения дают верхнюю оценку времени сходимости и могут служить основой для более детального имитационного моделирования. Дальнейшие исследования могут быть направлены на учёт орбитальной динамики, переход к полумарковским процессам и включение механизмов межспутникового обмена.

Литература

1. Мальцев Г.Н., Измуков А.П. Межспутниковые лазерные линии связи в существующих и перспективных космических системах // Сборник трудов Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти выдающихся отечественных учёных и конструкторов, космонавтов, создателей и испытателей космической техники. Москва, 2024. С. 199–204.
2. Green Satellite Networks Using Segment Routing and Software-Defined Networking [Электронный ресурс]. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/391279595_Green_Satellite_Networks_Using_Segment_Routing_and_Software-Defined_Networking (дата обращения: 19.02.2026).

3. Иванов В.И. Алгоритм централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в негеостационарной спутниковой системе связи с межспутниковыми линиями // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 69–105.
4. Абазина Е.С., Зиннуров С.Х., Смирнов Д.В. Методика установления многоинтервального соединения в многоспутниковой орбитальной группировке // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2025. № 1–2. С. 31–39.
5. Макаренко С.И. Системы спутниковой связи общего пользования и специального назначения. Санкт-Петербург, 2025. 222 с.
6. Prem Y.P., Mol B.S.F., Sheena K.M. Starlink: Satellite Constellation [Электронный ресурс] // TechRxiv. April 10, 2025. DOI: 10.36227/techrxiv.174431804.42339700/v1. URL: <https://www.techrxiv.org/users/759732/articles/1082750-starlink-satellite-constellation>.
7. Starlink: Global Coverage Milestones 2025 [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://spacelaunchindex.com/blog/starlink-global-coverage-milestones-2025>.
8. Iridium NEXT: Technical Overview [Электронный ресурс] // arXiv. 2014. URL: <https://arxiv.org/abs/1411.0372>.
9. Performance Evaluation of D-HSPF Routing Protocol Based on Real Giant LEO Satellite Constellations [Электронный ресурс] // SSRN Electronic Journal. 14 January 2025. DOI: 10.2139/ssrn.5096623. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5096623.
10. Optimization of Inter-Plane ISL Links in Walker- Δ Constellations [Электронный ресурс] // arXiv. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2511.15861> (дата обращения: 19.02.2026).
11. Bhatt, Kumar. Adaptive Routing in Quantum LEO Networks [Электронный ресурс] // arXiv. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2511.05228>.
12. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 868 с.