МАРШРУТИЗАЦИЯ В НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ С ЛАЗЕРНЫМИ ТРАКТАМИ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Велигоша А. В.[1], Шалапанов Н. О.[2]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-45-52

Ключевые слова: *низкоорбитальные спутниковые системы, маршрутизации в LISL-сетях, бюджет линии связи, динамическая маршрутизация, адаптивная маршрутизация точность наведения, захват и сопровождение луча.*

Аннотация

Цель исследования: *обоснование выбора алгоритма маршрутизации в низкоорбитальных системах спутниковой связи с использованием лазерных трактов приема и передачи информации с целью минимизации затрат на наведение оптических терминалов и повышения устойчивости линии связи.*

Метод исследования: *комплексный анализ, обобщение эмпирических данных и результатов математического моделирования маршрутизации низкоорбитальных системах спутниковой связи, расположенных в разных плоскостях орбиты.*

Результаты исследования: *установлено, что физические ограничения лазерных межспутниковых каналов требуют введения штрафных коэффициентов за переключение терминалов в функцию стоимости маршрута, что отличает задачи маршрутизации в LISL-сетях от наземных сетей. Сравнительный анализ показал, что гибридные алгоритмы, разделяющие маршрутизацию внутри орбитальной плоскости и между плоскостями, обеспечивают наилучший баланс между вычислительной сложностью, задержкой и энергопотреблением. Обоснована перспективность применения централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки для минимизации потерь пакетов при неравномерном распределении трафика, а также необходимость перехода к гибридным адаптивным системам.*

Научная новизна *заключается в систематизации и количественной оценке влияния физических ограничений лазерных межспутниковых каналов (угловой расходимости луча, длительности процедур наведения и захвата, динамики взаимной геометрии спутников) на выбор алгоритма маршрутизации в низкоорбитальных системах.*

Введение

Низкоорбитальные спутниковые системы (LEO, Low Earth Orbit) обеспечивают глобальный широкополосный доступ с малой задержкой сигнала за счёт высот орбиты порядка 500…1200 км [1]. На таких высотах спутники образуют динамическую сеть, узлы которой непрерывно перемещаются друг относительно друга, а передача данных между космическими аппаратами осуществляется по лазерным межспутниковым каналам (LISL). По сравнению с радиочастотными межспутниковыми линиями лазерная связь обеспечивает более узкую диаграмму направленности, что при той же мощности передатчика даёт существенно более высокую спектральную плотность энергии в точке приёма и позволяет уменьшить массу и энергопотребление бортового терминала при кратном увеличении пропускной способности [1, 2]. Особенность задачи маршрутизации в LISL-сетях состоит в том, что она не может рассматриваться в отрыве от физического уровня: конечное число лазерных терминалов на борту, время, необходимое на переориентацию и повторный захват луча, а также зависимость характеристик канала от взаимной геометрии спутников накладывают ограничения, которых нет в наземных волоконных или радиочастотных сетях.

1. Физический принцип построения лазерных трактов приема и передачи информации

Спутники внутри одной орбитальной плоскости движутся с одинаковой угловой скоростью, поэтому расстояние между соседними аппаратами в плоскости остаётся практически постоянным, и соответствующий канал может быть установлен один раз и удерживаться непрерывно. Расстояние до спутника в соседней плоскости (непрерывно меняется из-за различия в аргументе широты и, вблизи полюсов, из-за геометрии пересечения орбитальных плоскостей; линия визирования разворачивается, и по достижении предельного угла отклонения терминала связь должна быть переустановлена

1 ***Велигоша Александр Васильевич***, кандидат технических наук, доцент кафедры №52 филиала военной академии РВСН им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: Aveligosha@mail.ru

2 ***Шалапанов Никита Олегович***, курсант филиала военной академии РВСН им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: nik.shalapanov@bk.ru

на новый узел. Наклонная дальность $d(t)$ между двумя космическими аппаратами вычисляется по формуле (1):

$$d(t) = \sqrt{(r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cos \gamma(t))}, \quad (1)$$

где r, r_2 – радиусы-векторы спутников относительно центра Земли, $\gamma(t)$ – угол между ними, изменяющийся со временем по законам орбитальной механики.

Производная $d(t)$ по времени определяет радиальную составляющую относительной скорости и, соответственно, доплеровский сдвиг частоты несущей, который приёмный терминал должен непрерывно компенсировать для удержания фазовой синхронизации. Геометрия построения лазерных каналов представлена на рисунке 1.

Лазерный терминал излучает узконаправленный луч с угловой расходимостью θ, значительно меньшей, чем ширина диаграммы направленности радиочастотной антенны сопоставимого размера. Мощность, принимаемая на дальности d, в первом приближении описывается уравнением энергетики линии связи в свободном пространстве, представленном в выражении (2):

$$P_{пр} = P_{пд} G_{пд} G_{пр} (\lambda / 4\pi d)^2 \eta_{пд} \eta_{пр}, \quad (2)$$

где $P_{пд}$ – мощность передатчика, $G_{пд}$ и $G_{пр}$ – коэффициенты усиления передающей и приёмной оптических антенн, λ – длина волны, $\eta_{пд}$, $\eta_{пр}$ – коэффициенты оптических потерь трактов.

Между низкоорбитальными аппаратами отсутствует атмосфера, поэтому, в отличие от линий «борт – Земля», здесь нет тропосферного и ионосферного ослабления, однако узость луча требует прецизионного взаимного наведения: угловая ошибка, сравнимая с θ, приводит к резкому падению принимаемой мощности из-за показателя $(1/d)^2$ и формы диаграммы направленности. Именно поэтому один лазерный терминал физически способен поддерживать соединение только с одним корреспондентом одновременно, а число одновременно поддерживаемых соседей ограничено числом установленных на борту терминалов – как правило, от двух до четырёх [3].

2. Процедура Pointing – Acquisition – Tracking в лазерных межспутниковых каналах связи

Одной из наиболее сложных задач при организации лазерной межспутниковой связи является установление устойчивого оптического соединения между космическими аппаратами. В отличие от радиочастотных систем, использующих антенны с относительно широкой диаграммой направленности, лазерные терминалы формируют узкий оптический луч с расходимостью порядка единиц-десятков микрородиан. Такая особенность обеспечивает высокую энергетическую эффективность и пропускную способность канала связи, однако предъявляет исключительно высокие требования к точности взаимного наведения космических аппаратов.

Для формирования устойчивого лазерного соединения применяется процедура Pointing – Acquisition – Tracking (PAT) [3], представляющая собой последовательность операций по взаимному обнаружению, наведению и сопровождению лазерного луча. Надежность функционирования всей сети во многом определяется эффективностью выполнения данной процедуры, поскольку любое нарушение сопровождения приводит к увеличению задержки передачи данных или

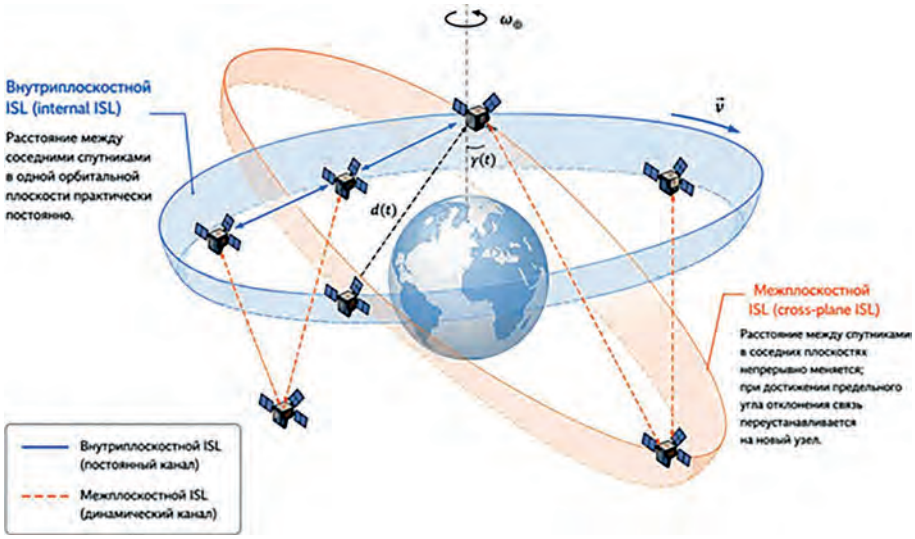

Рис. 1. Геометрия внутриплоскостных и межплоскостных лазерных каналов (ISL)

временному разрыву межспутникового соединения. Процедура PAT включает три взаимосвязанных этапа.

Этап Pointing (предварительное наведение). На этом этапе осуществляется вычисление взаимного положения спутников на основе орбитальных параметров, навигационной информации и данных системы ориентации. После определения расчетного направления оптический терминал выполняет предварительное наведение в область предполагаемого расположения соседнего космического аппарата. Точность данного этапа определяется качеством орбитальных моделей, характеристиками системы управления движением и точностью стабилизации платформы.

Этап Acquisition (обнаружение и захват). После предварительного наведения выполняется поиск встречного лазерного сигнала и его захват приемной аппаратурой. На данном этапе производится уточнение взаимного положения космических аппаратов, компенсируются остаточные ошибки наведения и формируется устойчивый оптический канал связи. Продолжительность этапа зависит от точности предварительного наведения, чувствительности приемной аппаратуры и характеристик системы управления лазерным терминалом.

Этап Tracking (сопровождение). После установления соединения система непрерывно отслеживает взаимное положение спутников и корректирует направление лазерного луча в режиме реального времени. Необходимость постоянной коррекции обусловлена высокой орбитальной скоростью космических аппаратов, изменением расстояния между ними и воздействием возмущающих факторов, влияющих на ориентацию спутников. Устойчивость сопровождения определяет продолжительность существования лазерного канала и вероятность сохранения соединения при передаче данных.

Общее время выполнения процедуры PAT оказывает непосредственное влияние на суммарную задержку передачи информации. При формировании маршрута, включающего несколько лазерных межспутниковых соединений, задержки, связанные с повторным выполнением PAT, накапливаются и могут существенно увеличить время доставки данных. Следовательно, минимизация времени установления соединения становится одним из факторов повышения эффективности маршрутизации в низкоорбитальных спутниковых сетях.

Дополнительное влияние на продолжительность процедуры PAT оказывают геометрические параметры межспутниковых соединений. Увеличение расстояния между космическими аппаратами, изменение углов визирования, высокая относительная скорость движения спутников и снижение точности системы ориентации усложняют процесс наведения и сопровождения лазерного луча. В результате возрастает вероятность повторного выполнения отдельных этапов процедуры, что приводит к увеличению общей задержки передачи данных. Допустимая величина задержки, вносимой процедурой PAT, определяется классом передаваемого трафика и требованиями к качеству обслуживания в низкоорбитальной сети. Для трафика реального времени – потокового видео, голосовой связи, а также сигналов управления и телеметрии – суммарная задержка установления лазерного соединения должна оставаться в пределах десятков-сотен миллисекунд, поскольку её превышение приводит к нарушению непрерывности сеанса связи и деградации качества обслуживания. Для трафика, нечувствительного к задержке, – пакетной передачи файлов, служебного обмена маршрутной информацией – время выполнения PAT оказывает меньшее влияние на конечный результат, что допускает использование более медленных, но энергетически или вычислительно экономичных схем наведения.

Следует отметить, что в большинстве существующих алгоритмов маршрутизации время выполнения процедуры Pointing – Acquisition – Tracking учитывается косвенно либо не учитывается вовсе. Основное внимание уделяется сетевым характеристикам маршрута, таким как количество переходов между узлами или длина пути передачи данных. Однако для спутниковых сетей с лазерными межспутниковыми каналами подобный подход не всегда обеспечивает выбор наиболее эффективного маршрута, поскольку не отражает реальные временные затраты, связанные с установлением и сопровождением оптических соединений.

На рисунке 2 представлены стадии процедуры захвата и сопровождения луча.

3. Анализ алгоритмов маршрутизации в низкоорбитальных спутниковых сетях с лазерными межспутниковыми каналами связи

Высокая динамичность низкоорбитальных спутниковых группировок существенно усложняет задачу маршрутизации данных. В отличие от наземных сетей, где топология изменяется относительно медленно, в LEO-системах взаимное расположение космических аппаратов непрерывно изменяется вследствие орбитального

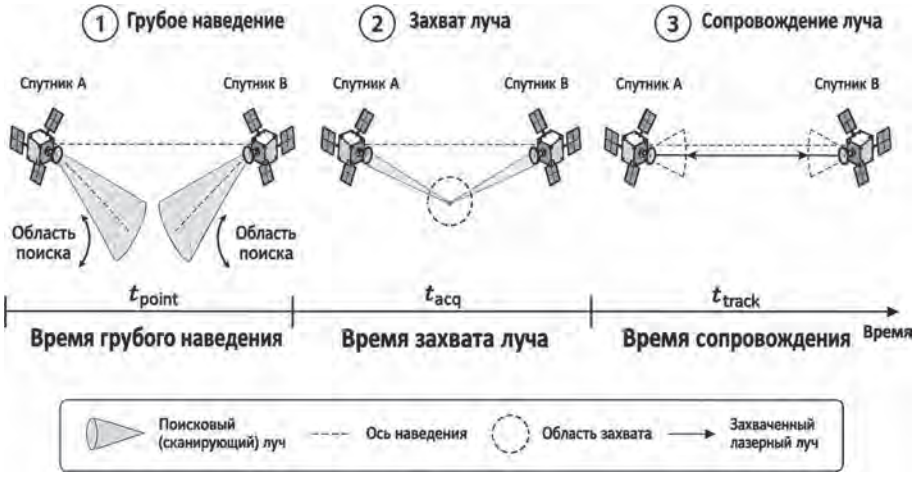

Рис. 2. Стадии процедуры захвата и сопровождения луча (PAT)

движения. Это приводит к периодическому возникновению и исчезновению межспутниковых соединений, изменению геометрии маршрутов и необходимости их оперативной перестройки.

Эффективность маршрутизации в спутниковых сетях определяется не только длиной маршрута или количеством промежуточных узлов, но и характеристиками лазерных межспутниковых каналов связи. Существенное влияние оказывают время выполнения процедуры Pointing – Acquisition – Tracking, текущая загрузка каналов, устойчивость сопровождения лазерного луча и вероятность сохранения соединения на протяжении передачи данных. Однако большинство существующих алгоритмов ориентировано преимущественно на оптимизацию сетевых параметров и лишь частично учитывает особенности физического уровня [4].

Статическая маршрутизация основана на предварительном расчете маршрутов передачи данных до начала эксплуатации сети. Все маршруты формируются заранее на основании известных параметров орбитальной группировки и изменяются только при плановой реконфигурации сети. Основными преимуществами данного подхода являются простота реализации, минимальная вычислительная сложность и отсутствие постоянного обмена служебной информацией между спутниками. Однако статические алгоритмы практически не учитывают текущую загрузку сети, изменения состояния межспутниковых каналов и возможные отказы оборудования. В условиях быстро изменяющейся топологии LEO-группировок это приводит к снижению эффективности передачи данных и увеличению вероятности использования неоптимальных маршрутов [9].

Динамические алгоритмы выполняют пересчет маршрутов в процессе функционирования сети с учетом актуального состояния межспутниковых соединений. Такой подход позволяет оперативно реагировать на изменение топологии и перераспределять трафик при возникновении перегрузок или отказов отдельных каналов связи. Высокая адаптивность является главным достоинством динамической маршрутизации. Вместе с тем постоянное обновление маршрутной информации увеличивает объем служебного трафика и вычислительную нагрузку на бортовые вычислительные средства спутников, что необходимо учитывать при проектировании крупных орбитальных группировок.

Географические алгоритмы используют информацию о текущем положении спутников и направлении передачи данных. Выбор следующего узла осуществляется на основании координат космических аппаратов без необходимости хранения полной информации о сетевой топологии. Преимуществом данного подхода является высокая масштабируемость и сравнительно небольшая вычислительная сложность. Однако эффективность географической маршрутизации существенно зависит от точности определения координат спутников и не гарантирует формирования глобально оптимального маршрута, особенно при неравномерной загрузке межспутниковых каналов [11].

Гибридные алгоритмы объединяют преимущества статических и динамических методов. Базовые маршруты рассчитываются заранее, а при изменении состояния сети выполняется их локальная корректировка с учетом текущих условий функционирования. Использование гибридного подхода позволяет снизить объем служебного обмена по сравнению с полностью динамическими алгоритмами при сохранении высокой адаптивности к изменениям топологии. Благодаря сбалансированному сочетанию

вычислительной эффективности и гибкости данный класс алгоритмов рассматривается как один из наиболее перспективных для крупных низкоорбитальных спутниковых группировок.

Алгоритм Contact Graph Routing (CGR) разработан для сетей с прогнозируемой изменяемостью структуры соединений. Его основой является граф контактов, отражающий интервалы времени существования возможных межспутниковых соединений [8]. Поскольку движение спутников описывается законами небесной механики и может прогнозироваться с высокой точностью, использование графа контактов позволяет заранее планировать маршруты передачи данных и снижать вероятность возникновения разрывов соединений. Вместе с тем эффективность CGR уменьшается при возникновении непредусмотренных изменений, таких как отказ оборудования, изменение режима функционирования спутников или перераспределение трафика.

Алгоритмы маршрутизации по требованию (On-demand Routing) формируют маршрут только после поступления запроса на передачу данных [3]. Это позволяет уменьшить объем хранимой маршрутной информации и снизить вычислительные затраты в периоды низкой сетевой активности. Недостатком подхода является дополнительная задержка, возникающая на этапе поиска маршрута. В условиях передачи данных реального времени или при высокой интенсивности трафика подобные задержки могут существенно снижать эффективность функционирования спутниковой сети.

На рисунке 3 представлена классификация алгоритмов и протоколов маршрутизации в LISL-сетях.

Показанные выше классы алгоритмов реализуются в конкретных протоколах маршрутизации, различающихся тем, как именно они формализуют компромисс между качеством маршрута и затратами на его установления. Протокол адаптивной маршрутизации по требованию для LEO-мегасозвездий с динамическими LISL опубликован в [3]. Его физический принцип состоит в том, что в функцию стоимости пути – интегральный показатель, по которому сравниваются альтернативные пути передачи данных в сети, наряду с задержкой распространения вводится штраф - это дополнительное слагаемое в функции стоимости пути, которое «удорожает» маршруты, требующие переключения лазерных терминалов, и тем самым отдаёт предпочтение путям с меньшим числом таких переключений, даже если они длиннее по числу промежуточных узлов, за установку каждого нового лазерного соединения, отражающий длительность процедуры PAT. В отличие от традиционного подхода, где топология формируется заранее и поддерживается активной постоянно, в [3] рассматривается сценарий, в котором маршруты вычисляются, а динамические LISL устанавливаются по требованию, по мере появления трафика.

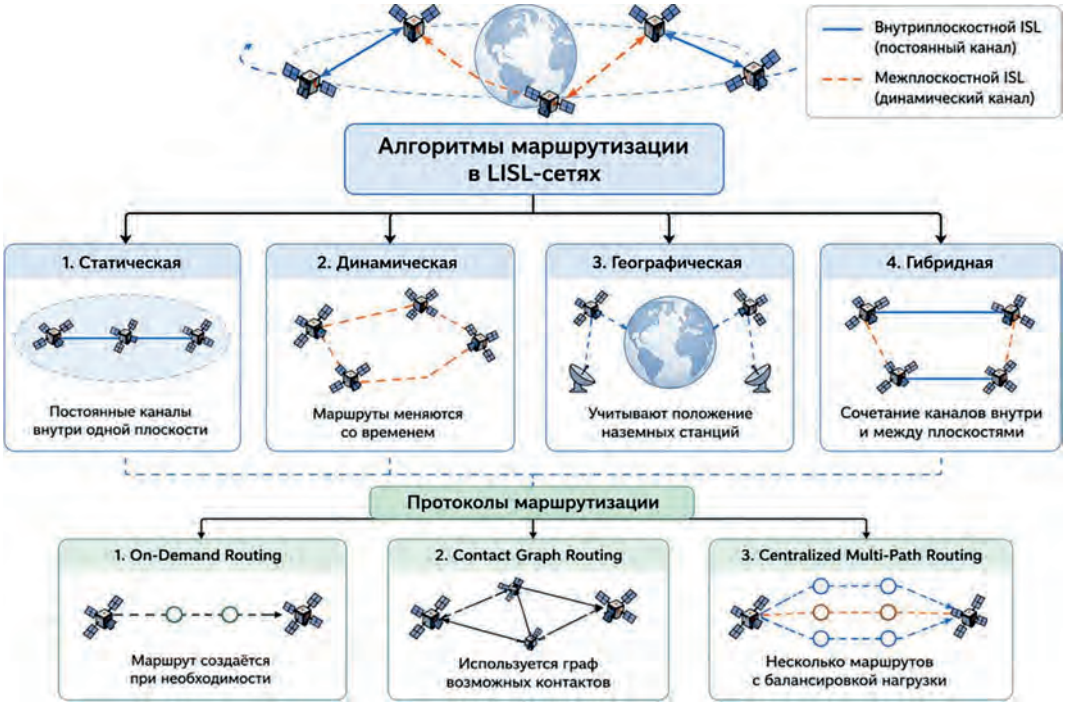

Рис. 3. Классификация алгоритмов и протоколов маршрутизации в LISL-сетях

DOI: 10.21681/3034-4050-2026-6-45-52

Задача формулируется как нелинейная модель оптимизации, для решения которой предложены три эвристических алгоритма с разными компромиссами между качеством маршрута и вычислительной сложностью. В имитационном моделировании на топологии, приближённой к Starlink Phase 1 Version 2, показано, что более сложные эвристики уменьшают среднюю сквозную задержку за счет увеличения времени вычислений, тогда как при менее жёстких требованиях к задержке целесообразны более простые и масштабируемые схемы; итоговое правило отдаёт предпочтение путям с меньшим числом переключений лазерных терминалов, даже если такие пути содержат большее число промежуточных переприёмов.[6]

Смежный класс решений образует маршрутизация по графу контактов (Contact Graph Routing, CGR), первоначально разработанная для сетей дальней космической связи, устойчивых к задержкам и разрывам соединения (Delay/Disruption-Tolerant Networking, DTN), и впоследствии перенесённая на низкоорбитальные группировки [4]. В этом подходе вся последовательность будущих сеансов связи между спутниками заранее известна из орбитальных расчётов и представляется в виде графа, вершинами которого служат временные интервалы доступности канала, а рёбрами – возможные переприёмы данных. Маршрут выбирается путём поиска по этому графу с учётом времени открытия и закрытия контактов, ожидаемой задержки и остаточной пропускной способности каждого интервала, что позволяет планировать передачу заранее и избегать обращения к каналам, которые к моменту прихода пакета уже будут закрыты по геометрическим причинам. Ограничением подхода в мегасозвездиях из сотен и тысяч аппаратов служит рост размера графа контактов, что требует дополнительных методов его укрупнения для сохранения вычислительной масштабируемости.

Постановка задачи централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки исходит из того, что пропускная способность межспутниковых линий негеостационарной спутниковой системы связи (НССС) – ограниченный ресурс: абонентские нагрузки распределены по поверхности Земли неравномерно, а интенсивность трафика существенно меняется в течение суток, что приводит к перегрузке отдельных линий и потере пакетов [5]. Физически это означает, что даже при технически исправных лазерных терминалах «узкое место» возникает не на уровне линии связи, а на уровне распределения потоков по графу сети. Спутниковая система представляется графом математическое описание котророго имеет следующий вид: $G = (S, L, C, V)$, где S – множество спутников, L – множество межспутниковых линий, C – их пропускная способность, V – множество абонентских терминалов. В основе алгоритма – построение наборов маршрутов между парами узлов с минимальным числом общих линий и оценка вероятности потери пакетов при переполнении выходных буферов. Централизованный характер протокола предполагает наличие управляющего центра, который в конце каждого периода балансировки собирает данные о загрузке выходных буферов со всех спутников, вычисляет распределение потоков по маршрутам, минимизирующее вероятность потерь, и рассылает обновлённые таблицы маршрутизации; такой подход обеспечивает глобальную оптимальность распределения трафика ценой зависимости от надёжности и задержки канала управления. По результатам имитационного моделирования алгоритм обеспечивает низкую вероятность потери пакетов, высокую пропускную способность НССС и низкую задержку очередей на межспутниковых линиях [5].

Заключение

Таким образом, выбор стратегии маршрутизации в низкоорбитальных сетях с лазерными межспутниковыми каналами определяется не только топологией и требованиями к качеству обслуживания, но и физикой самого канала: узкостью диаграммы направленности антенны и вытекающей из неё чувствительностью к угловой ошибке наведения, конечным числом одновременно поддерживаемых направлений связи, длительностью процедуры захвата и сопровождения луча и изменением взаимной геометрии спутников со временем.

Статические алгоритмы минимизируют вычислительную нагрузку, но требуют постоянного удержания луча; динамические протоколы, включающие задержку PAT в стоимость пути, и маршрутизация по графу контактов дают лучшую адаптивность за счет служебного трафика или предварительного планирования; географические алгоритмы хорошо масштабируются, но не различают готовность канала; гибридные подходы, разделяют задачу по признаку стабильности геометрии, а централизованный протокол многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки решает смежную задачу – распределение трафика по уже существующим каналам с минимизацией вероятности потери пакетов.

Литература

1. Карцан, И. Н. Концепция развития межспутниковой лазерной связи / И. Н. Карцан // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2023. – Т. 24, № 2. – С. 247–259. – DOI 10.31772/2712-8970-2023-24-2-247-259.
2. Пичугин, С. Б. Этапы структурно-параметрического синтеза низкоорбитальных систем связи с широкополосными межспутниковыми трактами / С. Б. Пичугин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – Т. 26, № 3. – С. 211–226. – DOI 10.22363/2312-8143-2025-26-3-211-226.
3. Bhattacharjee, D. On-Demand Routing in LEO Mega-Constellations With Dynamic Laser Inter-Satellite Links / D. Bhattacharjee, P. G. Madoery, A. U. Chaudhry [et al.] // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2024. – Vol. 60, No. 5. – Pp. 7089–7105. – DOI 10.1109/TAES.2024.3415571.
4. Иванов, В. И. Алгоритм централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в негеостационарной спутниковой системе связи с межспутниковыми линиями / В. И. Иванов // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 3. – С. 69–105. – URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/05-Ivanov.pdf. – Текст: электронный.
5. Chaudhry, A. U. Laser Intersatellite Links in a Starlink Constellation: A Classification and Analysis / A. U. Chaudhry, H. Yanikomeroglu // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2021. – Vol. 16, No. 2. – Pp. 48–56. – DOI 10.1109/MVT.2021.3063706.
6. Chaudhry, A. U. Temporary Laser Inter-Satellite Links in Free-Space Optical Satellite Networks / A. U. Chaudhry, H. Yanikomeroglu // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – Pp. 1413–1427. – DOI 10.1109/OJCOMS.2022.3198391.
7. Chen, Q. Analysis of Inter-Satellite Link Paths for LEO Mega-Constellation Networks / Q. Chen, G. Giambene, L. Yang [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Vol. 70, No. 3. – Pp. 2743–2755. – DOI 10.1109/TVT.2021.3058126.
8. Handley, M. Delay is Not an Option: Low Latency Routing in Space / M. Handley // Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets '18). – Redmond, 2018. – Pp. 85–91. – DOI 10.1145/3286062.3286075.
9. Stock, G. Distributed On-Demand Routing for LEO Mega-Constellations: A Starlink Case Study / G. Stock, J. A. Fraire, H. Hermanns // Proceedings of the 11th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 17th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). – Graz, 2022. – Pp. 1–8. – DOI 10.1109/ASMS/SPSC55670.2022.9914716.
10. Xu, G. Spatial Location Aided Fully-Distributed Dynamic Routing for Large-Scale LEO Satellite Networks / G. Xu, Y. Zhao, Y. Ran [et al.] // IEEE Communications Letters. – 2022. – Vol. 26, No. 12. – Pp. 3034–3038. – DOI 10.1109/LCOMM.2022.3205300.
11. Li, R. A Survey on Laser Space Network: Terminals, Links, and Architectures / R. Li, B. Lin, Y. Liu [et al.] // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 34815–34834. – DOI 10.1109/ACCESS.2022.3162917.
12. Wang, S. MLDR: An O(|V|/4) and Near-Optimal Routing Scheme for LEO Mega-Constellations / S. Wang, Z. Jiang, X. Li, J. Ma // IEEE Internet of Things Journal. – 2024. – Vol. 11, No. 10. – Pp. 18663–18675. – DOI 10.1109/JIOT.2024.3365908.
13. Gregory, M. TESAT Laser Communication Terminal Performance Results on 5.6 Gbit Coherent Inter-Satellite and Satellite-to-Ground Links / M. Gregory, F. Heine, H. Kämpfner [et al.] // Proceedings of SPIE: International Conference on Space Optics – ICSO 2010, Rhodes Island, Greece. – Bellingham: SPIE, 2017. – Vol. 10565. – Art. 105651F. – DOI 10.1117/12.2309152.

ROUTING IN LOW-ORBIT SATELLITE SYSTEMS WITH LASER PATHS FOR RECEIVING AND TRANSMITTING INFORMATION

Veligosha A. V.[3], Shalapanov N. O.[4]

Keywords: *low-orbit satellite systems, routing in LISL networks, link budget, dynamic routing, adaptive routing, guidance accuracy, beam acquisition and tracking.*

Abstract

The purpose of the study *is to substantiate the choice of a routing algorithm in low-orbit satellite communication systems using laser paths for receiving and transmitting information in order to minimize the cost of pointing optical terminals and increase the stability of the communication line.*

Research method: *comprehensive analysis, generalization of empirical data and results of mathematical modeling of routing of low-orbit satellite communication systems located in different orbital planes.*

Results: *it was established that the physical limitations of laser intersatellite channels require the introduction of penalty coefficients for switching terminals into the route cost function, which distinguishes routing tasks in LISL*

3 ***Aleksandr V. Veligosha***, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Department No. 52 of the Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great. Serpukhov, Russia. E-mail: Aveligosha@mail.ru

4 ***Nikita O. Shalapanov***, cadet of the branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great. Serpukhov, Russia. E-mail: nik.shalapanov@bk.ru

networks from terrestrial networks. Comparative analysis showed that hybrid algorithms separating routing within the orbital plane and between planes provide the best balance between computational complexity, latency and power consumption. The prospects of using centralized multipath routing with load balancing to minimize packet losses with uneven traffic distribution, as well as the need for a transition to hybrid adaptive systems, are substantiated.

The scientific novelty *lies in the systematization and quantitative assessment of the influence of the physical limitations of laser intersatellite channels (angular divergence of the beam, duration of pointing and acquisition procedures, dynamics of mutual geometry of satellites) on the choice of routing algorithm in low-orbit systems.*

References

1. Kartsan, I. N. «Kontseptsiya razvitiya mezhsputnikovoi lazernoi svyazi» [Concept of development of inter satellite laser communication]. Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal. – 2023. – Vol. 24. – No. 2. – Pp. 247–259. – DOI: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-247-259 (In Russ.).
2. Pichugin, S. B. «Etapy strukturno parametricheskogo sinteza nizkoorbital'nykh sistem svyazi s shirokopolosnymi mezhsputnikovymi traktami» [Stages of structural parametric synthesis of low orbit communication systems with broadband inter satellite links]. Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya. – 2025. – Vol. 26. – No. 3. – Pp. 211–226. – DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-3-211-226 (In Russ.).
3. Bhattacharjee, D., Madoery, P. G., Chaudhry, A. U., Yanikomeroglu, H., Kurt, G. K., Hu, P., Ahmed, K., Martel, S. «On Demand Routing in LEO Mega Constellations With Dynamic Laser Inter Satellite Links». IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2024. – Vol. 60. – No. 5– Pp. 7089–7105. – DOI: 10.1109/TAES.2024.3415571.
4. Ivanov, V. I. «Algoritm tsentralizovannoi mnogoputevoi marshrutizatsii s balansirovkoi nagruzki v negeostatsionarnoi sputnikovoi sisteme svyazi s mezhsputnikovymi liniyami» [Algorithm of centralized multipath routing with load balancing in a non geostationary satellite communication system with inter satellite links]. Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. – 2018. – No. 3. – Pp. 69–105. Available: – URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/05-Ivanov.pdf (In Russ.).
5. Chaudhry, A. U., Yanikomeroglu, H. «Laser Intersatellite Links in a Starlink Constellation: A Classification and Analysis». IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2021. – Vol. 16. – No. 2. – Pp. 48–56. – DOI: 10.1109/MVT.2021.3063706.
6. Chaudhry, A. U., Yanikomeroglu, H. «Temporary Laser Inter Satellite Links in Free Space Optical Satellite Networks». IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – Pp. 1413–1427. – DOI: 10.1109/OJCOMS.2022.3198391.
7. Chen, Q., Giambene, G., Yang, L., Fan, C., Chen, X. «Analysis of Inter Satellite Link Paths for LEO Mega Constellation Networks». IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Vol. 70. – No. 3. – Pp. 2743–2755. – DOI: 10.1109/TVT.2021.3058126.
8. Handley, M. «Delay Is Not an Option: Low Latency Routing in Space». Proc. 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets '18), Redmond. – 2018. – Pp. 85–91. – DOI: 10.1145/3286062.3286075.
9. Stock, G., Fraire, J. A., Hermanns, H. «Distributed On Demand Routing for LEO Mega Constellations: A Starlink Case Study». Proc. 11th Advanced Satellite Multimedia Systems Conf. and 17th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), Graz. – 2022. – Pp. 1–8. – DOI: 10.1109/ASMS/SPSC55670.2022.9914716.
10. Xu, G., Zhao, Y., Ran, Y., Zhao, R., Luo, J. «Spatial Location Aided Fully Distributed Dynamic Routing for Large Scale LEO Satellite Networks». IEEE Communications Letters. – 2022. – Vol. 26. – No. 12. – Pp. 3034–3038. – DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3205300.
11. Li, R., Lin, B., Liu, Y., Dong, M., Zhao, S. «A Survey on Laser Space Network: Terminals, Links, and Architectures». IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 34815–34834. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3162917.
12. Wang, S., Jiang, Z., Li, X., Ma, J. «MLDR: An O(|V|/4) and Near Optimal Routing Scheme for LEO Mega Constellations». IEEE Internet of Things Journal. – 2024. – Vol. 11. – No. 10. – Pp. 18663–18675. – DOI: 10.1109/JIOT.2024.3365908.
13. Gregory, M., Heine, F., Kämpfner, H., Meyer, R., Fields, R., Lunde, C. «TESAT Laser Communication Terminal Performance Results on 5.6 Gbit Coherent Inter Satellite and Satellite to Ground Links». Proc. SPIE Int. Conf. on Space Optics (ICSO 2010), Rhodes Island, Greece. – 2017. – Vol. 10565. – Art. 105651F. – DOI: 10.1117/12.2309152.