

Анализ методов уменьшения сетевой задержки в гибридных орбитально-наземных сетях связи

Х. Ф. До, М. А. Зуйков, А. А. Березкин, Р. В. Киричек

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

do.hf@sut.ru, maximz2004@yandex.ru, berezkin.aa@sut.ru, kirichek@sut.ru

Аннотация. Снижение задержек в гибридных спутниковых сетях связи требует многопланового подхода. В данном исследовании рассматриваются методы, включая использование новейших спутниковых технологий и интеграцию оптических связей между спутниками с целью минимизации времени передачи сигнала. Кроме того, рассматривается возможность интеграции периферийных вычислений на наземных станциях для ускорения обработки данных и сокращения времени передачи. Анализ стратегий динамического выделения полос пропускания имеет решающее значение для приоритизации ресурсов в приложениях реального времени и обеспечения эффективного использования сетевой пропускной способности. Исследование объединяет все эти стратегии для анализа и предложения эффективных подходов к снижению задержек в гибридных орбитально-наземных сетях связи.

Ключевые слова: гибридные орбитально-наземные сети связи, уменьшение задержки, спутниковый канал связи, передача данных

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы гибридные орбитально-наземные сети связи (ГОНСС) привлекают значительное внимание благодаря своей способности обеспечивать надежное и масштабируемое подключение. ГОНСС имеют важное значение для обеспечения бесперебойной связи в обширных географических областях. Эти сети объединяют в своей архитектуре спутниковые и наземные системы связи, используя соответствующие преимущества каждой из них. Спутниковая связь обеспечивает широкий охват, особенно в отдаленных или труднодоступных регионах, в то время как наземная связь предоставляет подключения с низкой задержкой и высокой пропускной способностью. Главная цель этого гибридного подхода – оптимизировать производительность сети, надежность и масштабируемость, эффективно удовлетворяя разнообразные потребности в области коммуникации.

В контексте преодоления цифрового разрыва гибридные орбитально-наземные сети связи (ГОНСС) [1] представляют инновационное решение, особенно сильно это касается отдаленных сельских районов, где традиционные средства подключения могут оказаться недостаточными. Архитектура бесшовно интегрирует спутниковые и наземные компоненты для обеспечения надежного подключения. При акценте на обслуживание пользователей в сельских и отдаленных районах, уменьшение задержек становится центральным

аспектом. Время задержки при передаче данных, напрямую влияет на пользовательский опыт, увеличивая важность исследования и внедрения методов для минимизации этих задержек. Понимание архитектуры и характеристик гибридных [12] сетей крайне важно для осознания значения снижения задержек.

Для достижения снижения задержек в ГОНСС, в данной статье рассматриваются несколько методов, каждый из которых вносит уникальный вклад в общую стратегию. Исследуется интеграция оптической связи [9] между спутниками с целью оптимизации дизайна констелляции и улучшения эффективности передачи данных. Кроме того, в рамках исследования изучаются потенциальные выгоды, от использования граничных вычислений (ПВ), продвинутых алгоритмов маршрутизации [3] и динамического выделения ресурсов [2].

Целью данной статьи является представление всестороннего анализа и предложение эффективных подходов к минимизации задержек, путём синтеза различных методов, что способствует разработке и внедрению эффективных решений. Статья стремится предоставить обзор этих методов, предлагая основу для последующих разработок в области гибридных спутниковых коммуникационных сетей.

II. ГИБРИДНЫЕ ОРБИТАЛЬНО-НАЗЕМНЫЕ СЕТИ

Архитектура ГОНСС [11] представляет собой перспективное решение как для сетей 5G, так и последующих поколений, предлагая глобальное покрытие и доступ в Интернет за счет объединения характеристик нескольких сетевых типов. Эта архитектура обеспечивает всестороннюю поддержку связи для интернета вещей (ИВ). ГОНСС включают в себя традиционные наземные сети, усиленные спутниковым взаимодействием для расширения зоны покрытия, как показано на рис. 1.

Наземная сеть использует сотовые сети и линии передачи данных для соединения базовых станций (БС) и ядра сети, предоставляя широкополосные услуги в развитых регионах. Спутниковые сети, благодаря своему широкому покрытию, обеспечивают подключение для физических лиц и устройств в сельских и отдаленных районах. Пользователи, нуждающиеся в доступе к наземным сетям [11], могут использовать свои терминалы для подключения к спутниковой сети, однако, в зависимости от характеристик пользователя и терминала, могут быть наложены ограничения по ёмкости. Кроме того, стратегическое размещение спутниковых базовых станций и точек доступа позволяет предоставлять услуги относительно высокой скорости,

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9 в ЕГИСУ НИОКТР.

обеспечивая подключение пользователей с использованием передовых технологий, таких как 6G или Wi-Fi. ГОНСС предоставляют множество преимуществ, включая следующие:

- Предоставление разнообразных услуг, включая многократные и широкоэмитательные передачи.
- Расширение охвата для обеспечения оптимальной связности и экономичности.
- Оптимизация ресурсов путем выбора наиболее подходящей сети, что приводит к улучшению общей эффективности.
- Предоставление услуг для критически важных и перспективных секторов связи, таких как Интернет вещей, морская, авиационная и железнодорожная отрасли.
- Повышение эффективности блокчейна путем решения проблем масштабируемости, возникающих из-за ограниченного увеличения размера блока и фиксированной пропускной способности на каждом узле.

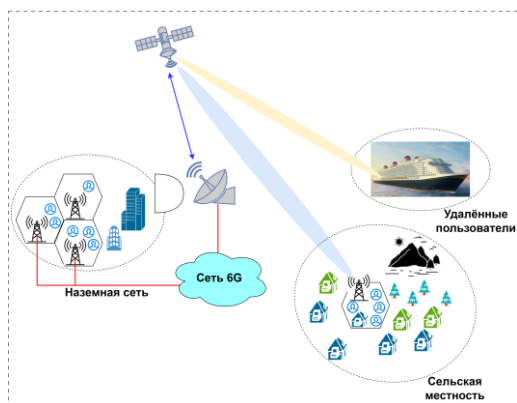


Рис. 1. Архитектура гибридной орбитально-наземной сети связи

Конфигурация ГОНСС включает в себя два основных компонента: спутниковый и наземный сегменты. Спутники, охватывающие различные орбиты, обеспечивают широкое покрытие, в том числе в отдаленных регионах с ограниченной наземной инфраструктурой. В дополнение к спутникам, наземные сети включают базовые станции и шлюзы, при том в сельских районах менее развитых регионов делается особый акцент на использования шлюзов. Эти шлюзы играют ключевую роль в оптимизации потока трафика, обеспечении эффективной связности и преодолении проблем, вызванных разреженной традиционной инфраструктурой.

Особенности, такие как использование спутников низкой околоземной орбиты и динамическое выделение ресурсов, характеризуют адаптивность гибридных сетей к различным условиям [3]. Тем не менее, остаются проблемы в отдаленных районах, где географические ограничения и ограниченная инфраструктура создают препятствия. Решение этих проблем включает в себя, стратегический переход к методам снижения задержек. В сельских районах зависимость от этих сетей для критически важных услуг, таких как телемедицина и образование, подчеркивает необходимость сосредоточить внимание на снижении задержек, тем самым улучшая пользовательский опыт и обеспечивая надежность неотложных услуг.

ГОНСС служат важным звеном для жителей отдаленных районов, обеспечивая доступ к критическим услугам, информации и возможностям [4]. Повышенные уровни задержек могут затруднить коммуникацию в реальном времени, снизить эффективность приложений и отпугнуть пользователей от полного использования цифровых ресурсов. Снижение задержек обеспечивает бесперебойную работу и связность, решая уникальные проблемы сельских территорий и пользователей, находящихся в удаленных регионах. В конечном итоге гибридные сети играют ключевую роль в преодолении цифрового разрыва, способствуя экономическому развитию и улучшению общего качества жизни в удаленных регионах.

III. МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ЗАДЕРЖКИ В ГИБРИДНЫХ – ОРБИТАЛЬНО НАЗЕМНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Снижение задержек в ГОНСС имеет первостепенное значение для улучшения передачи данных в реальном времени и общей эффективности сети. Один из эффективных методов включает в себя использование оптической связи [8] между спутниками с целью оптимизации связи. Задержка может быть значительно сокращена за счет внедрения оптических каналов, обеспечивающих более быструю передачу данных, по сравнению с традиционной радиочастотной связью.

Еще одной ключевой стратегией для минимизации задержек является внедрение граничных вычислений в сети спутниковой связи. Граничные вычисления [6–7] предполагают обработку данных ближе к источнику или конечной точке, тем самым уменьшая необходимость в двусторонней связи с централизованным центром обработки данных. Выполнение граничных вычислений в сети значительно снижает задержки, обеспечивая более быстрое реагирование для критически важных приложений и услуг.

Динамическое выделение ресурсов [2, 13] представляет собой еще один эффективный метод решения проблем задержек в гибридных спутниковых коммуникационных сетях. Системы спутниковой связи могут оптимизировать пропускную способность и сокращать задержки путем динамической настройки ресурсов в соответствии с текущими требованиями сети.

Более того, развертывание продвинутых алгоритмов маршрутизации играет ключевую роль в снижении задержек. Интеллектуальные алгоритмы маршрутизации [5] могут динамически выбирать наиболее оптимальный путь для передачи данных, учитывая загруженность, доступность пропускной способности и положение спутников. Постоянно адаптируясь к условиям сети, эти алгоритмы помогают оптимизировать пути общения, снижая задержки и обеспечивая эффективную передачу данных в гибридной сети связи.

IV. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЗАДЕРЖКИ В ГИБРИДНЫХ ОРБИТАЛЬНО-НАЗЕМНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Снижение сетевой задержки в ГОНСС требует тщательной оценки различных критериев для обеспечения оптимальной производительности. Измеряемая задержка [6] представляет собой ключевую метрику, требующую количественной оценки снижения, достигнутого предложенным по сравнению с существующими решениями, методом. Этот критерий предоставляет конкретную меру эффективности метода в увеличении скорости коммуникации в сети.

Еще одним важным фактором, влияющим на полную задержку, является сквозная задержка (СЗ) [11], подчеркивающая необходимость оценки способности метода решать проблему задержек на всем пути связи от источника к месту назначения. Комплексное понимание полной задержки обеспечивает последовательность и значимость улучшений по всей сети, повышая общий пользовательский опыт.

Эффективное использование пропускной способности [9] способствует минимизации задержек и предотвращению перегрузок. Оценка способности метода использовать доступную пропускную способность обеспечивает оптимальную передачу данных, улучшая производительность сети без ущерба для скорости или появления чрезмерных задержек. В то же время важными являются также соображения о влиянии на энергопотребление и энергоэффективность, особенно в спутниковых системах с ограниченными ресурсами энергии. Сохранение операционной эффективности требует сбалансированного подхода к снижению задержек и устойчивому энергопотреблению.

Кроме того, оценка должна распространяться на затраты на внедрение [4], включая оценку финансовых последствий принятия и поддержания предложенного метода. Этот критерий помогает заинтересованным сторонам принимать обоснованные решения, взвешивая затраты и конкретные выгоды, полученные от снижения задержек.

V. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В табл. 1 представлены исследования, фокусирующиеся на методах снижения задержек сети в ГОНСС, каждое из которых использует различные модели, алгоритмы и технологии для решения конкретных задач.

ТАБЛИЦА I. НЕКОТОРЫЕ РАСПРОСТРАНЕННЫЕ МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ЗАДЕРЖКИ В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Исследование	Модель/ИИ Алгоритм	Эффективность снижения задержки	Недостатки
[1]	Схема разгрузки трафика	СЗ	Возможности масштабирования
[2]	Алгоритм ассоциации пользователей и распределения каналов	ЭИПС	Затраты на внедрение
[3]	Глубокий детерминированный политический градиент	СЗ	Сложная модель
[4]	Метод аппроксимации модели смешанно-целочисленной линейной программы	Требования к задержке распространения	Затраты на внедрение
[5]	Алгоритм маршрутизации на основе Q-обучения	СЗ	Сложная модель
[6]	Федеративная разгрузка на основе DRL	СЗ & ЭИПС	Сложная модель

[7]	Спутниковые мобильные периферийные вычисления	ЭП & СЗ	Расчетное время
[8]	Графовая нейронная сеть	СЗ	Сложная модель & Расчетное время
[9]	Технология оптической спутниковой связи	СЗ	Комплексная реализация

Приведенная таблица предоставляет собой обзор различных стратегий снижения задержек в ГОНСС, каждая из которых использует уникальные модели, алгоритмы или технологии, способствуя более глубокому пониманию применяемых стратегий. Одним из выделяемых методов является использование схемы выгрузки трафика [1], тщательно разработанной для минимизации СЗ путем рационального перераспределения сетевого трафика. Несмотря на успешное снижение задержек, видны потенциальные недостатки, особенно в отношении масштабируемости, так как система может столкнуться с трудностями при управлении увеличенной нагрузкой.

Другой подход касается применения алгоритма ассоциации пользователей и выделения каналов, подробно рассмотренного в [2], с акцентом на оптимизацию использования пропускной способности для улучшения операционной эффективности. Тем не менее принятие этого алгоритма может повлечь за собой значительные затраты, представляя вызовы в плане практической реализации и распределения ресурсов.

Исследование глубокого детерминированного градиента политики для обучения маршрутизации в [3] направлено на минимизацию СЗ путем адаптивных решений по маршрутизации. Хотя эффективно, возникают опасения относительно сложности модели и легкости ее внедрения.

Исследование [4] представляет метод приближенного решения для смешанной целочисленной линейной программы, подчеркивая важность стоимостной оптимизации развертывания спутниковых шлюзов на основе требований к латентности распространения. В то время как эффективно решаются проблемы задержек, связанные затраты на внедрение могут затруднить широкое использование решения.

Применение алгоритма маршрутизации на основе Q-обучения [5] также направлено на снижение СЗ. Однако сложность модели может затруднить ее практическую реализацию и интеграцию в существующие системы.

Объединенное глубокое обучение с подкреплением для выгрузки [6] объединяет снижение СЗ с эффективным использованием пропускной способности. При этом сложность модели остается высокой, подчеркивая необходимость разумного баланса между повышением производительности и практичностью внедрения.

Спутниковые мобильные периферийные вычисления [7] занимается вопросами, связанными с энергопотреблением и СЗ, при этом вычислительное время является потенциальным недостатком. Это

требует внимательного рассмотрения в реальных приложениях.

Применение графовой нейронной сети [8, 14] также возможно для снижения СЗ в спутниковой связи. Сложность модели и связанное с этим время вычислений являются потенциальными проблемами, подчеркивая баланс между повышением производительности и осуществимостью внедрения.

В [9] исследуются оптические спутниковые сети и оптическая связь в свободном (общем) пространстве (ОССП) с использованием оптической беспроводной связи. Исследование подчеркивает важность оптической технологии спутниковой связи в уменьшении сквозной задержки, но признает сложные проблемы в реализации. Выбор между оптической связью в общем пространстве и радио технологиями играет решающую роль в снижении задержек в ГОНСС. ОССП использует оптические сигналы, передаваемые через общее пространство, предлагая преимущества, такие как высокая пропускная способность и низкая задержка благодаря скорости света.

Представленные в табл. 1 исследования являются примерами методов улучшения спутниковых сетей связи, решая проблемы, такие как задержка, использование пропускной способности и энергопотребление. Тем не менее совместные вызовы включают в себя сложность модели, затраты на внедрение и вычислительное время, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований и усовершенствования в этих областях.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, анализ методов снижения сетевой задержки в гибридных орбитально-наземных сетях связи дал понимание для улучшения эффективности этих сложных систем. Интеграция оптических коммуникаций между спутниками для оптимизации связи представляет собой многообещающий подход, использующий передовые технологии для минимизации задержек и улучшения общей производительности сети. Кроме того, внедрение граничных вычислений способствует снижению задержек, обеспечивая более быструю обработку данных и времена ответа ближе к источнику. Изучение стратегий маршрутизации и механизмов динамического распределения ресурсов подчеркивает их важность для достижения эффективной передачи данных и распределения, что дополнительно снижает задержки.

Будущие исследования и практические внедрения должны учитывать синергетические эффекты этих методов, чтобы дополнительно уточнить и оптимизировать структуру ГОНСС, обеспечивая их соответствие развивающимся требованиям современных систем связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Abderrahim W., Amin O., Alouini M.S., & Shihada B. Latency-aware offloading in integrated satellite terrestrial networks // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2020. Т. 1. С. 490-500.
- [2] Yin Y., Huang C., Xiong N.N., Wu D.F., & Huang S. Joint dynamic routing and resource allocation in satellite-terrestrial integrated networks // *Computer Networks*. 2023. Т. 231. С. 109823.
- [3] Xing Z., Qi H., Di X., Liu J., Xu R., Chen J., & Cong L. A multipath routing algorithm for satellite networks based on service demand and traffic awareness // *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*. 2023. Т. 24. №. 6. С. 844-858.
- [4] Torkzaban N., Gholami A., Baras J.S., & Papagianni C. Joint satellite gateway placement and routing for integrated satellite-terrestrial networks // *ICC 2020-2020 IEEE international conference on communications (ICC)*. IEEE, 2020. С. 1-6.
- [5] Yin Y., Huang C., Wu D.F., Huang S., Ashraf M.W. A., & Guo Q. Reinforcement learning-based routing algorithm in satellite-terrestrial integrated networks // *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2021. Т. 2021. С. 1-15.
- [6] Liu Y., Jiang L., Qi Q., & Xie S. Energy-Efficient Space-Air-Ground Integrated Edge Computing for Internet of Remote Things: A Federated DRL Approach // *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Т. 10. №. 6. С. 4845-4856.
- [7] Zhang Z., Zhang W., & Tseng F.H. Satellite mobile edge computing: Improving QoS of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques // *IEEE network*. 2019. Т. 33. №. 1. С. 70-76.
- [8] До Ф.Х., Ле Ч.Д., Берёзкин А.А., Киричек Р.В. Графовые нейронные сети для классификации трафика в каналах спутниковой связи: сравнительный анализ // *Труды учебных заведений связи*. 2023. Т. 9. №. 3. С. 14-27.
- [9] Liang J., Chaudhry A.U., Erdogan E., & Yanikomeroğlu H. Link Budget Analysis for Free-Space Optical Satellite Networks // *2022 IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. IEEE, 2022. С. 471-476.
- [10] Chaudhry A.U., & Yanikomeroğlu H. Free space optics for next-generation satellite networks // *IEEE Consumer Electronics Magazine*. 2020. Т. 10. №. 6. С. 21-31.
- [11] Tirmizi S.B.R., Chen Y., Lakshminarayana S., Feng W., & Khuwaja A.A. Hybrid satellite-terrestrial networks toward 6G: key technologies and open issues // *Sensors*. 2022. Т. 22. №. 21. С. 8544.
- [12] Березкин А.А., Слепнев А.В., Суходоева А.В. Гибридные сети и их основные виды с учетом областей применения // В сборнике: *Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей (ПКМ)*. 2023. С. 358-364.