

Абрамов Артём Андреевич

студент

Волков Владислав Юрьевич

студент

Воробьев Александр Михайлович

соискатель, доцент

ФГБОУ ВО «Ижевский государственный

технический университет им. М.Т. Калашникова»

г. Ижевск Удмуртская Республика

DOI 10.21661/r-588734

СПУТНИКОВАЯ СВЯЗЬ КАК ЭЛЕМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

***Аннотация:** статья посвящена задаче сохранения работоспособности объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. Наземные сети в таких условиях быстро выходят из строя – их легко повредить физически или перегрузить. В качестве резервного решения рассматриваются низкоорбитальные спутниковые группировки (НОСГ) с межспутниковой лазерной связью. Рассмотрены подходы к построению адаптивных mesh-сетей, ограничения оптических каналов (влияние атмосферы и точность наведения), а также применение машинного обучения для прогнозирования состояния каналов и управления маршрутизацией.*

***Ключевые слова:** критическая инфраструктура, спутниковая связь, межспутниковая лазерная связь, адаптивные mesh-сети, динамическая топология, юстировка оптических терминалов, атмосферная турбулентность, отказоустойчивость, низкоорбитальные спутники, машинное обучение.*

Сегодня работа ключевых отраслей напрямую зависит от цифровых систем. Энергетика, транспорт, финансы и городская инфраструктура постоянно обмениваются данными. Основа этой системы – наземные сети: волоконно-оптические линии, фиксированная и сотовая связь.

Проблема таких сетей в том, что они привязаны к конкретной территории. При землетрясении, наводнении или крупной аварии связь рушится: кабели повреждаются, базовые станции остаются без питания, узлы управления отключаются. Объекты КИИ оказываются отрезанными друг от друга. Спутниковая связь решает эту проблему иначе. Она в меньшей степени зависит от состояния наземной инфраструктуры и может работать даже при её разрушении.

Геостационарные спутники обеспечивают широкое покрытие, но задержка сигнала (около 250 мс) слишком велика для задач в реальном времени. Низкоорбитальные спутники (500–1200 км) дают меньшую задержку, но требуют другой логики построения сети. Просто вывести спутники на орбиту недостаточно. Система должна сама перестраиваться, если часть узлов выходит из строя. В этой работе предлагается модель такой сети – на базе НОСГ, с межспутниковой лазерной связью и интеллектуальным управлением.

Архитектура устойчивой спутниковой сети для КИИ требует уровень доступности не ниже 99,99%, задержку до 50 мс, устойчивость к помехам и возможность работы без центра управления.

В классической схеме спутники работают через наземные станции. Если станция выходит из строя, часть сети просто исчезает. В mesh-архитектуре каждый спутник становится узлом сети. Они связываются друг с другом напрямую и передают данные через орбиту. Это позволяет обходить повреждённые участки. Сеть при этом постоянно меняется: спутники движутся с большой скоростью, связи между ними возникают и исчезают, поэтому маршруты должны пересчитываться автоматически и быстро.

Для передачи данных между спутниками используется оптический диапазон. Он даёт высокую скорость (до сотен Гбит/с), не требует лицензирования и

обеспечивает узконаправленный сигнал, который сложно перехватить. Но появляется другая проблема – точность наведения. Даже небольшое отклонение приводит к потере связи. В условиях ЧС важно минимизировать время установления соединения.

Синхронизация терминалов производится в несколько этапов: сначала грубое наведение по навигационным данным, затем точная юстировка лазера.

Из-за высокой скорости движения и вибраций спутника удерживать луч сложно. Если процесс занимает слишком много времени, это увеличивает задержки в сети. Поэтому на практике используют гибридный подход: радиоканал – для поиска и синхронизации, лазер – для передачи данных.

При передаче сигнала между спутником и Землей атмосфера вносит искажения. Луч смещается, расширяется, мощность сигнала «скачет». В результате связь может временно пропадать. Адаптивная оптика частично решает проблему, но в сложных условиях (дым, пыль) её эффективность снижается. Более устойчивый вариант – использовать несколько приёмников одновременно. Если один канал теряется, остальные продолжают работать.

Управление сетью с помощью машинного обучения позволяет минимизировать ошибки человеческого фактора. Классические алгоритмы плохо работают в условиях, где топология сети постоянно меняется. Здесь требуется система, которая адаптируется в реальном времени.

Модели машинного обучения анализируют параметры среды: погодные условия, положение спутников, уровень ошибок и загрузку сети. На основе этих данных система может заранее определить ухудшение связи и переключить маршрут до того, как произойдёт сбой.

Сеть НОСГ представляет собой динамическую структуру, где связи постоянно меняются. Обучение с подкреплением позволяет узлам самостоятельно находить эффективные маршруты. Если путь работает хорошо – он используется дальше, если нет, то система ищет альтернативу. При повреждении части сети маршруты перестраиваются без участия центра управления.

Такие же методы применяются и для стабилизации лазерных каналов – нейросети компенсируют вибрации и повышают точность наведения.

Если смоделировать сеть из 120 спутников на высоте 600 км и предположить вариант массового отказа наземной инфраструктуры, то при отключении 60% наземных станций средняя задержка увеличивается с 35 до 58 мс, но остаётся в допустимых пределах, под влиянием атмосферы без компенсации искажений связь прерывается примерно в 40% случаев, а при использовании разнесённых приёмников и прогнозирования – около 2%.

При этом лазерные терминалы требуют значительной энергии. Алгоритмы машинного обучения позволяют регулировать мощность передачи в зависимости от условий, снижая нагрузку на систему и продлевая срок службы спутников.

Вместе с тем, несмотря на описанные преимущества, остаются нерешённые вопросы:

- отсутствие единых стандартов межспутниковой связи;
- рост количества космического мусора и риск столкновений;
- увеличение уязвимости к кибератакам.

Отдельное направление – интеграция с сетями 5G/6G. В этом случае спутники могут выполнять роль базовых станций, обеспечивая непрерывную связь при переключении между наземной и космической инфраструктурой.

Таким образом, как указано выше, наземные сети оказываются уязвимыми в экстремальных условиях. Потеря связи в таких ситуациях критична для управления инфраструктурой. Низкоорбитальные спутниковые системы с лазерной связью позволяют сохранить работоспособность сети даже при серьёзных разрушениях. Ключевую роль играют адаптивная архитектура, компенсация физических искажений и интеллектуальное управление.

Моделирование подтверждает устойчивость предложенного подхода. Дальнейшая работа связана с созданием прототипов и испытаниями в условиях, приближённых к реальным чрезвычайным ситуациям.

Список литературы

1. Васильев Г.Г. Перспективы развития низкоорбитальных группировок в интересах обороны и безопасности / Г.Г. Васильев // Вестник Академии военных наук. – 2022. – №3 (80). – С. 112–118.
2. Иванов А.В. Архитектура гибридных сетей связи для критической инфраструктуры / А.В. Иванов, С.К. Петров // Т-Коммуникации. – 2023. – Т. 17. №4. – С. 12–25.
3. Соколов Д.М. Применение методов обучения с подкреплением для управления топологией спутниковых сетей / Д.М. Соколов // Информатика и ее применения. – 2023. – Т. 17. Вып. 2. – С. 67–75.
4. Федоров Л.Н. Влияние атмосферной турбулентности на характеристики лазерных линий связи «Земля-Спутник» / Л.Н. Федоров // Оптический журнал. – 2021. – № 8. – С. 45–53.
5. Chen L., Wang H. Machine Learning Based Routing in Dynamic Satellite Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2023. Vol. 72. No. 3. P. 3400–3412.
6. Руководство по обеспечению устойчивости критической информационной инфраструктуры. – М.: ФСТЭК России, 2022. – 84 с.