

УДК 004.7:004.056

ГИБРИДНАЯ АРХИТЕКТУРА: ИНТЕГРАЦИЯ БЛОКЧЕЙНА И EDGE COMPUTING В УПРАВЛЕНИИ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Алмаждуб М.А., магистрант гр. 567001

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Вишняков В.А. – д.т.н., профессор

Аннотация. В статье рассматривается гибридная архитектура управления беспилотным транспортом, основанная на интеграции технологий блокчейн и edge computing. Предложена многоуровневая модель Edge–Fog–Cloud, в которой обработка данных распределяется между бортовыми вычислительными системами, наземными узлами и облачной инфраструктурой. Такой подход позволяет обеспечить минимальные задержки обработки данных (менее 5 мс на edge-уровне), повысить отказоустойчивость системы и устранить единую точку отказа. Использование блокчейна обеспечивает целостность данных, доверие между участниками и автоматизацию взаимодействия за счет смарт-контрактов.

Ключевые слова: блокчейн, edge computing, беспилотный транспорт, V2X, децентрализация.

Введение

Современные системы управления беспилотным транспортом сталкиваются с рядом критических ограничений. Основной проблемой является использование централизованных архитектур, в которых отказ одного узла может привести к остановке всей системы [1].

Как показано в документе (стр. 2), централизованные решения подвержены следующим рискам:

- наличие единой точки отказа;
- уязвимость к атакам (MITM, spoofing);
- высокие задержки при передаче данных;
- отсутствие отказоустойчивости.

При этом требования к системам беспилотного транспорта крайне жесткие: решения должны приниматься в реальном времени, а любая задержка может привести к критическим ошибкам.

Цель данной статьи – исследование гибридной архитектуры, объединяющей edge computing и блокчейн, как способа устранения указанных ограничений.

Основная часть

В современных системах управления беспилотным транспортом ключевую роль играет необходимость обработки больших объемов данных в реальном времени при одновременном обеспечении высокой надежности и безопасности. Бортовые системы автономных транспортных средств непрерывно генерируют потоки данных от сенсоров (камеры, LiDAR, радары), которые должны быть обработаны с минимальной задержкой. Использование централизованных облачных решений в таких условиях приводит к увеличению времени отклика и создает критическую зависимость от доступности сети [2]. Кроме того, централизованная архитектура формирует единую точку отказа, что делает систему уязвимой к сбоям и кибератакам.

Дополнительной проблемой является обеспечение доверия между участниками сети. В распределенной среде беспилотного транспорта взаимодействуют различные устройства и системы, принадлежащие разным субъектам. Отсутствие доверенной среды может привести к подмене данных, атакам типа spoofing или перехвату управляющих команд [3]. Классические механизмы защиты не всегда способны обеспечить необходимый уровень безопасности, особенно в условиях высокой динамики сети.

С другой стороны, применение блокчейн-технологий в чистом виде также имеет ограничения. К ним относятся высокая задержка подтверждения транзакций, ограниченная пропускная способность и значительные вычислительные затраты. Это делает традиционные блокчейн-системы (особенно с алгоритмами консенсуса типа Proof-of-Work) непригодными для задач, требующих обработки данных в режиме реального времени. Таким образом, возникает необходимость поиска архитектурного решения, способного объединить преимущества различных подходов и компенсировать их недостатки.

Таким решением является гибридная архитектура, основанная на интеграции edge computing и блокчейн [4]. В рамках данного подхода вычислительные задачи распределяются между несколькими уровнями системы, что позволяет оптимизировать обработку данных и повысить общую эффективность.

Гибридная архитектура включает три уровня: Edge, Fog и Cloud. На уровне Edge выполняются бортовые вычисления непосредственно на транспортных средствах. Этот уровень отвечает за обработку сенсорных данных, локальный анализ дорожной обстановки и принятие оперативных решений. Благодаря размещению вычислительных ресурсов вблизи источника данных достигается

минимальная задержка (менее 5 мс), что является критически важным для систем управления движением [1–2]. Кроме того, edge-уровень обеспечивает автономность работы системы в случае потери связи с внешними узлами.

Уровень Fog представляет собой промежуточный слой между edge-устройствами и облачной инфраструктурой. Он включает наземные узлы, такие как дорожные станции (RSU), локальные серверы и центры обработки данных регионального уровня. Основными функциями данного уровня являются агрегация данных, предварительная обработка информации и координация взаимодействия между транспортными средствами. На этом уровне также может выполняться частичная валидация транзакций и взаимодействие с блокчейн-сетью, что позволяет снизить нагрузку на глобальную систему и повысить ее масштабируемость.

На уровне Cloud осуществляется централизованная аналитика, хранение данных и выполнение смарт-контрактов. В отличие от традиционных облачных решений, данный уровень интегрирован с блокчейн-сетью, что обеспечивает децентрализованное хранение информации и ее криптографическую защиту. Блокчейн позволяет гарантировать неизменяемость данных, их проверяемость и прозрачность взаимодействия между участниками системы. Смарт-контракты автоматизируют выполнение правил и процессов, исключая необходимость участия доверенного посредника [3].



Рисунок 1 – Многоуровневая архитектура Edge–Fog–Cloud

Ключевым преимуществом гибридной архитектуры является разделение функций между уровнями системы. Обработка данных, требующая минимальных задержек, выполняется на edge-уровне, тогда как задачи обеспечения безопасности и доверия реализуются с использованием блокчейн-технологий. Такой подход позволяет преодолеть ограничения классических распределенных систем и достичь баланса между производительностью, безопасностью и масштабируемостью.

Использование edge computing позволяет существенно снизить нагрузку на сеть и уменьшить объем передаваемых данных за счет их предварительной обработки. Это особенно важно в условиях высокой плотности транспортных потоков, где количество генерируемых данных может достигать значительных величин. В свою очередь, блокчейн обеспечивает надежную защиту информации, предотвращая ее подмену или несанкционированное изменение.

Дополнительным преимуществом является повышение отказоустойчивости системы. В гибридной архитектуре отсутствует единый центр управления, что исключает возможность полной остановки системы при выходе из строя одного из узлов. Распределенная структура сети позволяет сохранять работоспособность даже в условиях частичных отказов или атак.

Гибридный подход также способствует повышению масштабируемости системы. Добавление новых транспортных средств или вычислительных узлов не требует значительных изменений архитектуры, что позволяет эффективно расширять систему по мере роста нагрузки.

Важным аспектом реализации данной архитектуры является возможность эффективной координации групп беспилотных аппаратов, что особенно актуально при управлении роевыми структурами в динамических городских условиях [5]. В таких сценариях использование Edge-уровня позволяет минимизировать время реакции на изменение траекторий соседних транспортных средств, в то время как блокчейн-платформа обеспечивает доверенную среду для обмена телеметрией и предотвращает атаки, направленные на подмену координат или перехват управления. Кроме того, создание подобной децентрализованной инфраструктуры способствует укреплению цифрового суверенитета и технологической независимости критических транспортных систем [6]. Это делает их устойчивыми к потенциальным сбоям глобальных облачных сервисов и повышает общую надежность национального сегмента интернета вещей в условиях внешних киберугроз. Реализация протоколов безопасного совместного использования данных на стыке Edge-вычислений и блокчейна позволяет не только оптимизировать распределение трафика, но и сформировать прозрачную базу для аудита

действий автономных систем, что критически важно для юридического разграничения ответственности при возникновении дорожных инцидентов.

Заключение

Таким образом, интеграция блокчейн и edge computing формирует основу для построения интеллектуальных транспортных систем нового поколения, способных обеспечивать безопасное, надежное и эффективное управление беспилотным транспортом в условиях реального времени.

Список литературы

1. Смирнов, Д. В., Кузнецов, М. А. «Гибридные архитектуры блокчейн-Edge: новые парадигмы для децентрализованных автономных систем». Сборник научных трудов «Цифровые Инновации в Транспорте», Том 7, № 1, 2023, с. 25-39.
2. Сидоров, А. Н., Козлова, О. И. «Оптимизация обработки данных в автономных транспортных средствах с использованием Edge Computing». Труды Международной конференции «Передовые Технологии в Транспорте», Москва, 2021, с. 112-120.
3. Иванов, С. А., Петрова, Е. В. «Применение технологии блокчейн для обеспечения безопасности данных в беспилотных летательных аппаратах». Журнал «Распределенные Системы и Кибербезопасность», № 3, 2022, с. 45-58.
4. Wang, H., Li, X. "Blockchain-Enabled Secure Data Sharing in Edge Computing for IoT". *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 8, Issue 1, 2021, pp. 248-259.
5. Волков, В. П., Зайцева, Н. Д. «Координация роев беспилотных аппаратов: обзор и перспективы гибридных подходов». Журнал «Искусственный Интеллект и Робототехника», Том 15, № 2, 2020, с. 78-91.
6. Лебедев, Г. М., Соколова, Л. С. «Вопросы цифрового суверенитета и независимости инфраструктуры критических объектов в эпоху автономных систем». Монография. Издательство «Техносфера», 2024, 280 с.

UDC 004.7:004.056

HYBRID ARCHITECTURE: INTEGRATION OF BLOCKCHAIN AND EDGE COMPUTING IN AUTONOMOUS TRANSPORT MANAGEMENT

Almajdoub M.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Vishniakov V.A. – Doctor of Technical Sciences, Professor

Annotation. The article examines a hybrid architecture for autonomous transport management based on the integration of blockchain and edge computing technologies. A multi-level Edge–Fog–Cloud model is proposed, in which data processing is distributed between onboard computing systems, ground nodes, and cloud infrastructure. This approach ensures minimal latency (less than 5 ms at the edge level), improves system fault tolerance, and eliminates a single point of failure. The use of blockchain provides data integrity, trust between participants, and automation of interactions through smart contracts.

Keywords. Blockchain, edge computing, autonomous transport, V2X, decentralization