REVIEW

on the PhD thesis by Imankulova Binara Bakytzhanovna entitled "Design and implementation of a provenance-aware LoRaWAN IoT framework for smart city air-quality data management", submitted for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the educational program 8D06102 - Computer and Software Engineering

The dissertation submitted by Imankulova Binara Bakytzhanovna addresses a relevant scientific and technical problem related to the provision of data integrity, traceability, and trust in smart city Internet of Things systems. The study focuses on urban air-quality monitoring based on LoRaWAN technology, where data pass through several technological layers, including end devices, gateways, network services, a local platform, storage subsystems, and application-level services. Under such conditions, particular importance belongs not only to the acquisition of measurement data, but also to the determination of their origin, the reconstruction of their processing history, and the verification of possible distortion, loss, duplication, or unauthorized modification. The relevance of the dissertation topic is determined by the rapid growth in the number of IoT devices, the expansion of LPWAN technologies, and the increasing practical need for reliable and verifiable data in urban management and environmental monitoring.

The purpose of the dissertation is to develop, implement, and experimentally validate a data provenance framework for LoRaWAN IoT systems capable of providing a traceable and protected history of air-quality monitoring data under LPWAN constraints. In order to achieve this purpose, the author carried out a systematic analysis of existing approaches to data provenance in IoT, designed a lightweight provenance and integrity control model for LoRaWAN monitoring, developed a functional prototype with provenance storage in the form of immutable hash-linked chains for each device, ensured traceability through graph reconstruction, and conducted an experimental evaluation of the proposed solution in a real LoRaWAN deployment with respect to performance, scalability, integrity verification cost, and tracing efficiency.

The scientific novelty of the dissertation lies in the development of a lightweight framework for LoRaWAN monitoring intended for practical application in smart city systems. The doctoral candidate proposed a provenance storage mechanism based on per-device hash-linked chains, which makes it possible to detect modification, deletion, or reordering of records. In addition, the dissertation introduces a dual representation of data provenance that combines chain-based storage for integrity control with graph reconstruction for traceability queries. A significant advantage of the proposed approach lies in the fact that it does not require modification of the LoRaWAN protocol and imposes only a low computational burden on end devices.

The practical significance of the dissertation lies in the fact that the developed prototype confirms the feasibility of building verifiable data collection systems based on LoRaWAN and a local platform. The proposed solution makes it possible to record the history of data reception and processing, detect missing data,

duplicates, and decoding errors, verify integrity, and trace the origin of data. The results obtained may be used in the development of reliable environmental monitoring systems and other smart city IoT systems.

The dissertation has a logical structure and includes an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references, and appendices. The work consistently covers the analysis of the subject area, the design and implementation of the proposed framework, and its experimental evaluation. The main results of the study are reflected in six publications, including papers published in recommended journals, an article in IEEE Access, and a presentation delivered at an international conference.

The dissertation of Imankulova Binara Bakytzhanovna is completed at a good scientific and methodological level and possesses scientific novelty as well as practical significance. In my opinion, the dissertation meets the established requirements for PhD dissertations, and its author deserves to be awarded the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the educational program 8D06102 - Computer and Software Engineering.

Scientific consultant,
Doctor of Technical Sciences,
Professor, Department of
Software Engineering, Satbayev University **R.K. Uskenbayeva**

HR Қызметі

ОТЗЫВ

на диссертационную работу Иманкуловой Бинары Бакытжановны «Design and implementation of a provenance-aware LoRaWAN IoT framework for smart city air-quality data management», представленную на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по ОП: 8D06102 – «Компьютерная и программная инженерия»

Диссертационная работа Иманкуловой Бинары Бакытжановны посвящена актуальной научно-технической задаче, связанной с обеспечением целостности, прослеживаемости и доверия к данным в IoT-системах умного города. В центре исследования находится мониторинг качества воздуха в городской среде на базе LoRaWAN, где данные проходят через несколько технологических уровней: оконечные устройства, шлюзы, сетевые сервисы, локальную платформу, хранилища и прикладные сервисы. В таких условиях особенно важным становится не только получение самих измерений, но и возможность установить их происхождение, историю обработки, а также проверить, не подвергались ли они искажениям, потере, дублированию или несанкционированным изменениям. Актуальность данной темы подтверждается ростом числа IoT-устройств, расширением применения LPWAN-технологий и практической потребностью в надежных и проверяемых данных для задач городского управления и экологического мониторинга.

Целью диссертационной работы является разработка, реализация и экспериментальная валидация фреймворка, ориентированного на учет происхождения данных, для LoRaWAN IoT-систем, предназначенного для формирования прослеживаемой и защищенной истории происхождения данных мониторинга качества воздуха в условиях ограничений LPWAN. Для достижения поставленной цели автором решены задачи систематического анализа существующих подходов к происхождению данных в IoT, проектирования облегченной модели происхождения данных и контроля целостности для LoRaWAN-мониторинга, разработки функционального прототипа с хранением сведений о происхождении данных в виде неизменяемых хеш-связанных цепочек для каждого устройства и обеспечения прослеживаемости посредством восстановления графового представления, а также экспериментальной оценки разработанного решения в реальном LoRaWAN-развертывании с точки зрения производительности, масштабируемости, затрат на проверку целостности и эффективности трассировки.

Научная новизна исследования состоит в разработке облегчённого фреймворка для LoRaWAN-мониторинга, предназначенного для практического применения в системах умного города. Докторантом предложен механизм хранения сведений о происхождении данных на основе хеш-связанных цепочек для каждого устройства, что обеспечивает выявление изменения, удаления или перестановки записей. Также предложено двойственное представление происхождения данных, сочетающее цепочное

хранение для контроля целостности и восстановление графового представления для выполнения запросов на прослеживаемость. Важным достоинством подхода является отсутствие необходимости модификации протокола LoRaWAN и низкая вычислительная нагрузка на конечные устройства.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что разработанный прототип подтверждает возможность построения проверяемых систем сбора данных на базе LoRaWAN с локальной платформой. Решение позволяет фиксировать историю приёма и обработки данных, выявлять пропуски, дубликаты и ошибки декодирования, выполнять проверку целостности и обеспечивать трассировку происхождения данных. Результаты работы могут быть использованы при создании надёжных систем экологического мониторинга и других IoT-систем умного города.

Диссертация имеет логичную структуру и включает введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. В работе последовательно рассмотрены вопросы анализа предметной области, проектирования, реализации и экспериментальной оценки предложенного решения. Основные результаты исследования отражены в 6 публикациях, включая статьи в рекомендованных изданиях, публикацию в IEEE Access и доклад на международной конференции.

Диссертация Иманкуловой Бинары Бакытжановны выполнена на хорошем научном и методическом уровне, обладает научной новизной и практической значимостью. Считаю, что диссертационная работа соответствует предъявляемым требованиям, а её автор заслуживает присуждения степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D06102 – «Компьютерная и программная инженерия.

Научный консультант,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Программная инженерия», Satbayev University **Ускенбаева Р.К.**