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 PhD thesis of B.B. Imankulova addresses an important scientific and technical problem related to data reliability, traceability, and integrity in smart city IoT systems. The research focuses on the design and implementation of a provenance-aware LoRaWAN IoT framework for air-quality monitoring, which corresponds to current trends in intelligent urban systems, the Internet of Things, and environmental monitoring platforms.

The relevance of the research topic arises from the rapid adoption of IoT solutions in environmental monitoring and urban infrastructure management. In distributed sensor networks, data origin transparency, integrity control, audit capability, and traceability of processing stages become critical requirements. The dissertation justifies the necessity of provenance-aware approaches for LoRaWAN systems and proposes a practical solution that considers LPWAN constraints, limited-resource devices, and long-term provenance metadata preservation.

The work includes a systematic analysis of modern approaches to data provenance traceability in IoT environments. The dissertation examines existing architectural solutions, methods for provenance information protection and storage, and their limitations in smart city systems. Based on this analysis, the author proposes a system architecture that provides provenance control, record integrity verification, and audit support. The proposed approach relies on per-device hash-linked chains with subsequent graph-view reconstruction for provenance history analysis and traceability queries.

The practical significance of the work lies in the development and implementation of a functional LoRaWAN air-quality monitoring framework that includes platform-side metadata collection, reception-level radio metadata storage, and chain integrity verification mechanisms. The author implements provenance tracking, graph reconstruction, and integrity verification mechanisms and conducts an experimental evaluation of framework performance under real deployment conditions. The obtained results confirm the functionality and practical applicability of the proposed approach without modification of the LoRaWAN protocol.

The dissertation demonstrates a high level of independent research, strong theoretical preparation, knowledge of modern IoT analysis and design methods, and the ability to conduct experimental studies and interpret obtained results.

The dissertation has a logical structure, consistent presentation of material, and proper formatting. The research results appear in scientific publications and international conference proceedings, which confirms the scientific significance of the completed work.

In my opinion, the dissertation work of Binara Bakytzhanovna Imankulova entitled "Design and implementation of a provenance-aware LoRaWAN IoT

framework for smart city air-quality data management" represents a completed scientific study, satisfies the requirements for PhD dissertations, and its author deserves the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the educational program 8D06102 - Computer and Software Engineering.

Scientific consultant,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Head of Cybersecurity School,
Astana IT University

S.T. Amanzholova

Кадрлар Бөлімі

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 Б.Б. посвящена актуальной научно-технической задаче обеспечения достоверности, прослеживаемости и целостности данных в IoT-системах умного города. Исследование ориентировано на разработку и реализацию системы IoT на основе LoRaWAN с учетом происхождения данных для мониторинга качества воздуха, что соответствует современным тенденциям развития интеллектуальных городских систем, Интернета вещей и платформ экологического мониторинга.

Актуальность темы исследования обусловлена активным внедрением IoT-решений в задачи экологического мониторинга и управления городской инфраструктурой. В условиях распределенных сенсорных сетей особое значение приобретают вопросы прозрачности происхождения данных, контроля их целостности, а также возможности аудита и отслеживания этапов обработки информации. В диссертации обоснована необходимость применения подходов, учитывающих происхождение данных, для LoRaWAN-систем и предложено практическое решение, учитывающее ограничения LPWAN-сетей, особенности работы ресурсно-ограниченных устройств и необходимость длительного хранения метаданных о происхождении данных.

В работе проведен систематический анализ современных подходов к обеспечению прослеживаемости происхождения данных в среде Интернета вещей, рассмотрены существующие архитектурные решения, методы защиты и хранения информации о происхождении данных, а также выявлены их ограничения применительно к системам умного города. На основе проведенного анализа автором предложена архитектура системы, обеспечивающей контроль происхождения данных, проверку целостности записей и поддержку механизмов аудита. Предложенный подход основан на хранении связанных хеш-цепочек для каждого устройства с последующим восстановлением графового представления для анализа истории обработки данных и выполнения запросов прослеживаемости.

Практическая значимость работы заключается в разработке и реализации функционирующего LoRaWAN-фреймворка мониторинга качества воздуха, включающего механизмы платформенного сбора метаданных, хранения радиометаданных уровня приема сообщений и проверки целостности цепочек записей. Автором реализованы механизмы отслеживания происхождения данных, реконструкции графовых связей и проверки целостности записей, а также проведена экспериментальная оценка производительности фреймворка в реальных условиях эксплуатации. Полученные результаты подтверждают работоспособность и практическую применимость предложенного подхода без необходимости изменения

протокола LoRaWAN. Следует отметить высокий уровень самостоятельности автора при выполнении исследования, хорошую теоретическую подготовку, владение современными методами анализа и проектирования IoT-систем, а также умение проводить экспериментальные исследования и интерпретировать полученные результаты.

Диссертационная работа отличается логичной структурой, последовательностью изложения материала и корректным оформлением. Результаты исследования опубликованы в научных изданиях и апробированы на международной конференции, что подтверждает научную значимость выполненной работы.

Считаю, что диссертационная работа Иманкуловой Бинары Бакытжановны на тему «Design and implementation of a provenance-aware LoRaWAN IoT framework for smart city air-quality data management» («Разработка и внедрение системы IoT на основе LoRaWAN с учетом происхождения данных для управления качеством воздуха в умном городе») является завершенным научным исследованием, соответствует требованиям, предъявляемым к PhD-диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D06102 – «Компьютерная и программная инженерия.

Научный консультант,
кандидат технических наук,
ассоцинированный профессор
Директор школы
«Кибербезопасность», Astana IT University **Аманжолова С.Т.**