

# Протоколы сериализации данных в IoT: проблемы и решения на примере платформы ThingsBoard

Дмитрий И. Швайка<sup>1,2</sup>, Андрей И. Швайка<sup>1,2</sup> и Владимир О. Артемчук<sup>1,3,4,5</sup>

<sup>1</sup>Институт моделирования в энергетике имени Г.Е. Пухова Национальной академии наук Украины, Генерала Наумова, 15  
Улица, Киев, 03164, Украина

<sup>2</sup>ThingsBoard, Inc., 110 Duane Street, Suite 1C, Нью-Йорк, 10007, США

<sup>3</sup>Центр информационно-аналитической и технической поддержки мониторинга объектов атомной энергетики НАН Украины, 34а  
Проспект Палладина, Киев, 03142, Украина

<sup>4</sup>Киевский национальный экономический университет имени Вадима Гетьмана, проспект Победы, 54/1, Киев, 03057,  
Украина

<sup>5</sup>Национальный авиационный университет, проспект Любомиры Гузары, 1, Киев, 03058, Украина

## Аннотация

В этой статье рассматриваются проблемы и достижения в области протоколов сериализации данных в Интернете вещей (IoT), в первую очередь динамическая компиляция схем в ThingsBoard. Сравнительный анализ Protobuf с другими протоколами сериализации, такими как JSON, XML и PSN, подчеркивает эффективность Protobuf и указывает на необходимость гибких способов интеграции устройств, использующих буферы протоколов для передачи данных. Мы выявили ограничения статической компиляции схемы в Protobuf и предложили новый подход к компиляции схемы в реальном времени, управляемой пользователем, который повышает гибкость, масштабируемость и производительность IoT-платформ. Наше решение решает критические проблемы адаптивности, обеспечивая бесшовную связь и интеграцию устройств с помощью компактных форматов Protobuf. Мы подчеркиваем потенциальное влияние этого решения в области пограничных вычислений и предлагаем направления будущих исследований для расширения применимости динамической сериализации в различных решениях IoT. Данная работа способствует улучшению управления данными IoT и прокладывает путь к созданию более адаптируемых и эффективных экосистем IoT.

## Ключевые слова

IoT-платформа, сериализация данных, буферы протоколов, ThingsBoard

## 1. Введение

В современных условиях, когда Интернет вещей (IoT) становится все более популярным [1], эффективность обработки и передачи данных становится ключевым фактором, определяющим технологический успех. Протоколы сериализации данных играют решающую роль в этой области, облегчая обмен информацией между IoT-устройствами в компактном и эффективном формате. Широко используемые протоколы, такие как JSON, XML, Protocol Buffers и другие, предназначены для различных IoT-систем, удовлетворяя потребности в быстрой и надежной связи. Тем не менее, каждый протокол представляет собой уникальные проблемы и ограничения, связанные с интеграцией и масштабируемостью в сложных экосистемах IoT.

Интернет вещей (IoT) - это быстро развивающаяся область с множеством приложений. Дебнатх и Четтри [2] и Villamil et al. [3] рассказывают о разнообразных сферах применения IoT, в том числе в промышленности, бизнесе и для улучшения качества жизни. Укельман и другие [4] подчеркивают потенциал IoT для революционного изменения бизнес-процессов и обеспечения более удобного образа жизни. В работе Поркоди и Бхуванесвари [5] представлен подробный обзор стандартов коммуникационных технологий, используемых в IoT, таких как RFID-метки и датчики. В исследовании Кханга и др. [6] рассматриваются ограничения однопутевой связи в гидропонных системах, подчеркивается необходимость надежной многопутевой связи в системах мониторинга на основе IoT. Однако, когда речь заходит о конкретной теме протоколов сериализации данных в IoT, литература относительно скудна (Luis et al. [7], Friesel and Spinczyk [8], Domínguez-Bolaño et al. [9], Pustišek

doors-2024: 4th Edge Computing Workshop, 5 апреля 2024 года, Житомир, Украина

✉ shvaikad@gmail.com (Д. И. Швайка); andrew.shvayka@gmail.com (А. И. Швайка); ak24avo@gmail.com (В. О. Артемчук)

🌐 <https://www.researchgate.net/profile/Volodymyr-Artemchuk-2> (В. О. Артемчук)

🆔 0009-0001-3088-3997 (Д. И. Швайка); 0009-0006-8461-3550 (А. И. Швайка); 0000-0001-8819-4564 (В. О. Артемчук)

© 2024 Авторские права на эту статью принадлежат ее авторам. Использование разрешено в соответствии с лицензией Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).



и др [10], Дельгадо [11], Якоби и Усландр [12], Денизяк и др [13], Цзян и др [14], Хоу и др [15], Хасеманн и др [16], Кольбе и др [17], Харат и др [18], Хоадади и Синнотт [19]).

Платформа ThingsBoard завоевала значительную популярность среди исследователей, о чем свидетельствуют многочисленные публикации, посвященные ее использованию. В частности, следующие примеры подчеркивают ее популярность в академическом сообществе (Ильяс и другие [20], Хеншке и другие [21], Агента и Икбал [22], Де Паолис и другие [23], Касильо и другие [24], Оховат и Бауэр [25], Бестари и Вибово [26], Сабунку и Торнтон [27], Джанг и другие [28], Кадарина и Приамбодо [29]).

В этой статье мы сосредоточимся на анализе протоколов сериализации данных в контексте IoT, изучении их применения и проблем, которые они ставят перед разработчиками и инженерами. Платформа ThingsBoard, признанная одной из ведущих IoT-платформ с открытым исходным кодом, является практическим инструментом в этом исследовании, позволяющим детально проанализировать различные аспекты сериализации данных. Ее адаптивность и масштабируемость при решении задач управления IoT-устройствами и обработки данных делают ее идеальным кандидатом для изучения тонкостей протоколов сериализации в IoT-средах.

*Объект исследования* - протоколы сериализации данных в распределенных IoT-системах, с акцентом на использование методов и механизмов передачи данных между устройствами и системой. *Предмет исследования* - характеристики и производительность протоколов сериализации, включая размер данных, скорость обработки и использование ThingsBoard для практического анализа. *Цель исследования* - анализ и оценка протоколов сериализации данных в сфере IoT, определение их преимуществ и поиск путей улучшения, в частности, их влияния на производительность и гибкость в различных сценариях IoT.

## 2. Сравнительный анализ протоколов сериализации данных для IoT

Обычное устройство превращается в IoT-устройство после интеграции с IoT-платформой, функционируя посредством обмена данными с другими IoT-устройствами или облачными серверами. Это требует стандартизированного формата обмена данными на уровне приложений. Для решения этой проблемы существуют библиотеки, предлагающие стандартизированные форматы данных. Однако затраты, связанные с (де)сериализацией и передачей данных с помощью этих библиотек, в сфере IoT практически не задокументированы или задокументированы в ограниченном объеме для конкретных протоколов. В исследовании Friesel и Spinczyk [8] рассматривалась эффективность кодирования JSON JSON [30] в рамках IoT. В ходе исследования был проведен сравнительный анализ JSON с альтернативными форматами сериализации. Результаты подчеркнули эффективность буферов протоколов, или Protobuf, подчеркнув их пригодность для энергоэффективной сериализации данных в контексте современных IoT-устройств с высокой пропускной способностью. Исследование Луиса и др. [7] было посвящено оценке показателей производительности PSN, сравнивая его со спектром форматов, включая Protocol Buffers Google [31]. Этот комплексный анализ охватывал различные параметры, такие как скорость сериализации/десериализации, размеры двоичных файлов и размеры кодирования. Основываясь на результатах этих исследований, мы представляем сравнительный анализ, призванный прояснить сильные и слабые стороны этих протоколов в контексте приложений IoT. В таблице 1 приведены ключевые характеристики ведущих протоколов сериализации данных, подчеркивающие их соответствующие преимущества и ограничения.

**Таблица 1**

Сравнительный анализ протоколов сериализации данных для IoT (по материалам Luis et al. [7], Friesel and Spinczyk [8]).

Характеристика	Protobuf	JSON	XML	PSN
Тип формата	Бинарные	Текстовые	Текстовые	Бинарные
Эффективность (размер)	Высокий	Средний	Низкий	Высокий
Эффективность (скорость)	Высокий	Средний	Низкий	Высокий
Читаемый человеком	Нет	Да	Да	Нет
Языковая поддержка	Высокий	Высокий	Высокий	Средний
Расширяемость	Да	Да	Да	Да
Поддержка версий	Да (Прото2, Прото3)	Нет	Нет	Нет
Совместимость с устройствами IoT	Высокий	Высокий	Средний	Высокий

По результатам бенчмаркинга стало ясно, что Protobuf является лидером в области сериализации данных для IoT благодаря своей высокой эффективности как по размеру, так и по скорости, широкой языковой поддержке и расширяемости. Несмотря на быстрое развитие и потенциальные преимущества таких форматов, как JSON, присутствие Protobuf и его постоянное использование в различных IoT-приложениях подтверждает его важность.

### **3. Проблема интеграции устройств через буферы протоколов в платформах IoT**

Проблема интеграции устройств через буферы протоколов в IoT-платформах является универсальной и не ограничивается конкретной платформой. Поэтому для нашего анализа мы выбрали ThingsBoard в качестве инструмента исследования. Компания ThingsBoard, Inc. была основана в 2016 году командой программистов из Украины и специализируется на разработке программных продуктов для IoT. ThingsBoard [32], благодаря своему открытому исходному коду и широким возможностям, обеспечивает надежную основу для детального и практического изучения этих проблем и возможных решений.

IoT-разработчики ThingsBoard выбрали бессхемные форматы JSON для первичной сериализации во внешней коммуникации, что облегчает обмен данными с IoT-устройствами благодаря их удобству для пользователя. В системе ThingsBoard для межкомпонентного обмена данными используется протокол Protocol Buffers. Это решение обусловлено необходимостью оптимизировать обработку значительных объемов данных при сохранении высокой производительности системы. Компактность и быстрая сериализация/десериализация Protocol Buffers делают его оптимальным выбором для повышения эффективности внутренней сети.

В настоящее время растет интерес к использованию буферов протоколов непосредственно на уровне устройств. Некоторые IoT-устройства передают данные исключительно через буферы протоколов, в то время как другие пользователи ищут способы перехода на этот формат для повышения эффективности и снижения нагрузки на сеть.

Интеграция IoT-устройств, которые общаются исключительно с помощью буферов протоколов, в IoT-платформы является примером насущной проблемы, особенно для платформ с открытым исходным кодом, таких как ThingsBoard. Статическая природа Protobuf требует дополнительного вмешательства разработчиков для каждого нового типа устройств, что подрывает универсальность и масштабируемость платформы, особенно в облачных развертываниях. Чтобы интегрировать новое устройство, совместимое с Protobuf, разработчики должны вручную определить и скомпилировать схему устройства в кодовой базе платформы. Этот процесс отнимает много времени и чреват ошибками.

Ярким примером является интеграция устройств Efento в ThingsBoard с использованием CoAP и Protobuf для бесшовного подключения. В статье Efento [33] описывается взаимодействие между датчиками Efento NB-IoT и платформой ThingsBoard. Одновременно с этим, поскольку версии прошивок устройств постоянно эволюционируют, возникает сценарий, при котором платформа должна постоянно адаптироваться для поддержки новых или обновленных устройств. Такая взаимозависимость ставит вопрос об устойчивости платформы в среде IoT.

Такой сценарий подчеркивает необходимость разработки платформами IoT более динамичных и универсальных решений для сериализации данных. Механизм, позволяющий в реальном времени динамически компилировать и загружать схемы Protobuf, произвел бы революцию в интеграции устройств, обеспечив бесперебойную адаптацию к новым устройствам и форматам данных без вмешательства разработчиков или нарушения работы системы.

### **4. Динамическая компиляция схем в Protobuf от ThingsBoard**

Предпочтение буферов протоколов в приложениях IoT заключается в эффективности их двоичного формата и снижении нагрузки на передачу данных по сети. Однако его статическая природа представляет собой серьезную проблему. Как правило, файлы .proto должны быть предварительно скомпилированы с помощью компилятора Protobuf (protoc), который создает исходный код для нужных языков программирования. Любые изменения в схеме требуют утомительного цикла перекомпиляции и развертывания, что препятствует быстрой адаптации, необходимой в изменчивых экосистемах IoT.

Для решения этой проблемы мы предлагаем программный инструмент, позволяющий в режиме реального времени компилировать загружаемые пользователем схемы Protobuf. Этот подход отличается от традиционных методов тем, что позволяет динамически интерпретировать схему Protobuf, тем самым позволяя устройствам передавать свои данные в Protobuf без необходимости простоя системы или перекомпиляции всей кодовой базы. Решение инкапсулировано внутри

Платформа ThingsBoard использует концепцию профилей устройств [34], которые связывают устройства с соответствующими схемами передачи данных.

На практике каждая схема представляет собой план связи отдельного устройства. Когда устройство аутентифицировано, его связанный профиль помогает определить соответствующую схему для интерпретации сообщения. Этот динамический процесс значительно снижает сетевой трафик, поскольку данные передаются в компактной форме Protobuf и переводятся в более подробный формат JSON только при взаимодействии с пользователем или при необходимости выполнения определенных системных функций.

Такой подход гарантирует, что по мере развития IoT-устройств или появления новых устройств в сети система сможет оперативно адаптировать их без длительного ручного вмешательства или остановки работы. Он представляет собой скачок к адаптируемой платформе IoT, способной идти в ногу с быстрым ростом сектора и разнообразным набором устройств, которые он охватывает.

## 5. Выводы

В этой статье мы рассмотрели эволюционирующий ландшафт протоколов сериализации данных в IoT, уделив особое внимание функции динамической компиляции схем в ThingsBoard. Мы показали, как протокол Protobuf, несмотря на свою эффективность и снижение нагрузки на сеть, сталкивается с проблемами при статической компиляции схемы, что ограничивает адаптивность IoT-устройств. Наши выводы свидетельствуют о том, что инновационное решение, заключающееся в компиляции схемы в реальном времени под руководством пользователя, может значительно повысить гибкость, масштабируемость и общую производительность IoT-платформ. Позволяя устройствам обмениваться данными с помощью компактных форматов Protobuf и одновременно обеспечивая беспрепятственную интеграцию новых или обновленных устройств, этот подход решает ключевые проблемы масштабируемости и адаптивности.

В рамках будущих исследований и разработок было бы полезно глубже изучить, как такие механизмы динамической сериализации данных могут принести пользу сценариям пограничных вычислений. В частности, изучить влияние на снижение задержек, оптимизацию пропускной способности и общую отзывчивость системы при развертывании IoT-устройств в пограничных сетях. Кроме того, интеграция этих методов сериализации в модели пограничных вычислений может предложить новые подходы к управлению потоком и обработкой данных между пограничными устройствами и центральными системами, что в конечном итоге будет способствовать масштабируемости и надежности решений IoT.

## Ссылки

- [1] Y. B. Шаповалов, З. И. Билык, С. А. Усенко, В. Б. Шаповалов, К. Х. Постова, С. О. Жадан, П. Д. Антоненко, Harnessing personal smart tools for enhanced STEM education: exploring IoT integration, *Educational Technology Quarterly* 2023 (2023) 210-232. doi:10.55056/etq.604.
- [2] D. Debnath, S. K. Chettri, Internet of Things: Current Research, Challenges, Trends and Applications, in: X.-Z. Gao, R. Kumar, S. Srivastava, B. P. Soni (Eds.), *Applications of Artificial Intelligence in Engineering, Algorithms for Intelligent Systems*, Springer, Singapore, 2021, pp. 679-694. doi:978-981-33-4604-8\_52.
- [3] S. Villamil, C. Hernandez, G. Tarazona, An overview of internet of things, *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)* 18 (2020) 2320-2327. doi:10.12928/telkomnika.v18i5.15911.
- [4] D. Укельманн, М. Харрисон, Ф. Михельс (ред.), *Архитектура Интернета вещей*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. doi:10.1007/978-3-642-19157-2.
- [5] R. Поркоди, В. Бхуванесвари, Приложения Интернета вещей (IoT) и стандарты коммуникационных технологий: An Overview, in: *2014 International Conference on Intelligent Computing Applications*, Coimbatore, India, 2014, pp. 324-329. doi:10.1109/ICICA.2014.73.
- [6] A. W. Y. Khang, J. A. J. Alsayaydeh, J. A. B. M. Gani, J. B. Puspanathan, A. A. Teh, A. F. M. F. Ismail, T. K. Geok, Reliable Multi-Path Communication for IoT Based Solar Automated Monitoring as Motivation Towards Multi-Farming Hydroponic, *International Journal of Interactive Mobile Technologies* 17 (2023) 115-128. doi:10.3991/ijim.v17i21.43555.

- [7] Á. Luis, P. Casares, J. J. Cuadrado-Gallego, M. A. Patricio, PSON: A Serialization Format for IoT Sensor Networks, *Sensors* 21 (2021) 4559. doi:10.3390/s21134559.
- [8] D. Friesel, O. Spinczyk, Data Serialization Formats for the Internet of Things, in: Conference on Networked Systems 2021 (NetSys 2021), Electronic Communications of the EASST, Berlin, 2021. URL: <https://journal.ub.tu-berlin.de/eceasst/article/view/1134/1078>. doi:10.14279/tuj.eceasst.80.
- [9] T. Domínguez-Bolaño, O. Campos, V. Barral, C. J. Escudero, J. A. García-Naya, An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects, *Internet of Things* 20 (2022) 100626. doi:10.1016/j.iot.2022.100626.
- [10] М. Пустишек, А. Умек, А. Кос, Приближение к коммуникационным ограничениям децентрализованных приложений на базе ethereum, *Sensors* 19 (2019) 2647. doi:10.3390/s19112647.
- [11] J. K. М. Дельгадо, Механизм взаимодействия и распределенная платформа для приложений быстрых данных, в: Z. Mahmood (Ed.), *Data Science and Big Data Computing: Frameworks and Methodologies*, Springer International Publishing, Cham, 2016, pp. 3-39. doi:10.1007/978-3-319-31861-5\_1.
- [12] М. Якоби, Т. Усландэр, Цифровой двойник и интернет вещей - текущий ландшафт стандартов, *Прикладные науки* 10 (2020) 6519. doi:10.3390/AP10186519.
- [13] S. Deniziak, M. Płaza, Ł. Arcab, Подход к проектированию IoT-систем реального времени, *Электроника* 11 (2022) 4120. doi:10.3390/electronics11244120.
- [14] T. Jiang, X. Huang, S. Song, C. Wang, J. Wang, R. Li, J. Sun, Non-Blocking Raft for High Throughput IoT Data, in: *Proceedings - International Conference on Data Engineering*, volume 2023-April, 2023, pp. 1140-1152. doi:10.1109/ICDE55515.2023.00092.
- [15] C.-D. Hou, D. Li, J.-F. Qiu, L. Cui, EasiDEF: горизонтальный облегченный протокол обмена данными для интернета вещей, *Jisuanji Xuebao/Chinese Journal of Computers* 38 (2015) 602-613. doi:10.3724/SP.J.1016.2015.00602.
- [16] H. Hasemann, A. Kröller, M. Pagel, RDF provisioning for the Internet of Things, in: 2012 3rd IEEE International Conference on the Internet of Things, 2012, pp. 143-150. doi:10.1109/IOT.2012.6402316.
- [17] N. Kolbe, J. Robert, S. Kubler, Y. L. Traon, PROFICIENT: Productivity Tool for Semantic Interoperability in an Open IoT Ecosystem, in: *Proceedings of the 14th EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services, MobiQ-uitous 2017*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2017, p. 116-125. doi:10.1145/3144457.3144479.
- [18] P. Kharat, V. Chaudhari, H. Maurya, S. Junghare, Управление запасами с использованием облачных функций и протокольного буфера для повышения эффективности, *IET Conference Proceedings* 2023 (2023) 253-260. doi:10.1049/icp.2023.1499.
- [19] F. Khodadadi, R. O. Sinnott, A Semantic-aware Framework for Service Definition and Discovery in the Internet of Things Using CoAP, *Procedia Computer Science* 113 (2017) 146-153. doi:10.1016/j.procs.2017.08.334.
- [20] T. F. Ilyas, F. Arkan, R. Kurniawan, T. H. Budianto, G. B. Putra, Thingsboard-based prototype design for measuring depth and ph of kulong waters, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 926 (2021). doi:10.1088/1755-1315/926/1/012025.
- [21] M. Henschke, X. Wei, X. Zhang, Data Visualization for Wireless Sensor Networks Using ThingsBoard, in: 2020 29th Wireless and Optical Communications Conference, WOCC 2020, 2020, pp. 1-6. doi:10.1109/WOCC48579.2020.9114929.
- [22] L. O. Aghenta, M. T. Iqbal, Дизайн и реализация недорогой, открытой системы SCADA на базе IoT с использованием ESP32 с OLED, ThingsBoard и протокола MQTT, *AIMS Electronics and Electrical Engineering* 4 (2019) 57-86. doi:10.3934/ElectrEng.2020.1.57.
- [23] L. T. De Paolis, V. De Luca, R. Paiano, Сбор и аналитика сенсорных данных с помощью thingsboard и spark streaming, in: *EESMS 2018 - Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, Proceedings*, 2018, p. 1 - 6. doi:10.1109/EESMS.2018.8405822.
- [24] M. Casillo, F. Colace, M. De Santo, A. Lorusso, R. Mosca, D. Santaniello, VIOT\_Lab: Виртуальная удаленная лаборатория для Интернета вещей на базе платформы ThingsBoard, in: 2021 IEEE Frontiers



- Конференция по образованию (FIE), 2021, с. 1-6. doi:10.1109/FIE49875.2021.9637317.
- [25] Е. Оховат, М. Бауэр, Мониторинг данных датчиков умного города с помощью Thingsboard и Node-Red, in: 2021 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/IOP/SCI), 2021, pp. 425-432. doi:10.1109/SWC50871.2021.00064.
  - [26] Д. Н. Бестари, А. Вибово, IoT-система мониторинга погоды в реальном времени с использованием Telegram-бота и платформы Thingsboard, Международный журнал интерактивных мобильных технологий 17 (2023) 4-19. doi:10.3991/ijim.v17i06.34129.
  - [27] A. C. Sabuncu, K. A. Thornton, Leveraging ThingsBoard IoT Service for Remote Experimentation, in: ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, American Society for Engineering Education, 2022. URL: <https://peer.asee.org/leveraging-thingsboard-iot-service-for-remote-experimentation.pdf>.
  - [28] С. И. Джанг, Дж. Й. Ким, А. Исаков, М. Фатих Демирчи, К. С. Вонг, Й. Дж. Ким, М. Х. Ким, Метод аутентификации на основе блокчейна для ThingsBoard, in: J. J. Park, S. J. Fong, Y. Pan, Y. Sung (Eds.), Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing, Springer, Singapore, 2021, pp. 471-479. doi:10.1007/978-981-15-9343-7\_65.
  - [29] Т. М. Kadarina, R. Priambodo, Monitoring heart rate and SpO2 using Thingsboard IoT platform for mother and child preventive healthcare, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 453 (2018) 012028. doi:10.1088/1757-899X/453/1/012028.
  - [30] JSON, JSON.org. Introducing JSON, 2001. URL: <https://www.json.org/json-en.html>.
  - [31] Google, Буферы протоколов, 2023. URL: <https://developers.google.com/protocol-buffers>.
  - [32] ThingsBoard, ThingsBoard IoT Platform, 2016. URL: <https://thingsboard.io>.
  - [33] Efento, Efento NB-IoT sensors and ThingsBoard, 2024. URL: <https://getefento.com/library/efento-nb-iot-sensors-and-things-board/>.
  - [34] ThingsBoard, Профили устройств, 2023. URL: <https://thingsboard.io/docs/user-guide/device-profiles/>.