



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2021. Т. 21, вып. 4. С. 532–543

*Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 532–543

<https://mmi.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9791-2021-21-4-532-543>

Научная статья

УДК 004.95

## Концепция информационного пакетного взаимодействия в многоуровневой системе цифровых двойников

А. В. Воробьев

<sup>1</sup>Геофизический центр РАН, Россия, 119296, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3

<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный университет, Россия, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12

**Воробьев Андрей Владимирович**, кандидат технических наук, <sup>1</sup>старший научный сотрудник, <sup>2</sup>доцент кафедры геоинформационных систем, [geomagnet@list.ru](mailto:geomagnet@list.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9680-5609>

**Аннотация.** Рассматривается подход к организации информационного взаимодействия в многоуровневой системе цифровых двойников. Единицей межуровневого информационного обмена выступает программная структура особого типа — пакет, построенная по принципу организации сообщений в HTTP(s)-протоколах. Непосредственно метаданные источника данных размещаются в заголовке пакета и позволяют выполнять идентификацию / аутентификацию соответствующих ресурсов по мере поступления данных. Регистрируемые / вычисляемые данные цифрового двойника или его физического прототипа размещаются в теле пакета. Одной из значимых проблем такой организации данных является формат используемого в заголовке пакета блока метаданных, который должен быть компактным и доступным для анализа программными средствами обработки данных. В рамках проведенного исследования, описанного в статье, предложен подход к кодированию заголовка с метаданными на основе комбинирования форматов DTDL, предназначенного для семантического описания промышленных цифровых двойников, и JWT, обеспечивающего процедуру поддержания сеанса связи между клиентом и сервером в веб-ориентированной архитектуре приложений. Непосредственно метаданные задаются в формате DTDL, а их размещение в заголовке пакета представляет собой программную «свертку» данных в формате токена JWT, заменяющего громоздкое JSON-описание источника данных легковесным текстовым кодом. Исследования, проведенные на примере многоуровневой системы цифровых двойников магнитных обсерваторий и вариационных станций, показали целесообразность предложенного решения в контексте сокращения физического объема формируемого в процессе передачи данных пакета данных (заголовка с метаданными) по сравнению с известным подходом на основе текстового или DTDL-описания метаданных.

**Ключевые слова:** цифровые двойники, обработка данных, пакетная передача данных, токенизация, DTDL, JWT

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 21-77-30010).

**Для цитирования:** Воробьев А. В. Концепция информационного пакетного взаимодействия в многоуровневой системе цифровых двойников // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2021. Т. 21, вып. 4. С. 532–543. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2021-21-4-532-543>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)



Article

## The concept of information packet interaction in a multilevel system of digital twins

A. V. Vorobev

<sup>1</sup>Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 3 Molodezhnaya St., Moscow 119296, Russia

<sup>2</sup>Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa 450008, Russia

Andrei V. Vorobev, geomagnet@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9680-5609>

**Abstract.** An approach to organizing information interaction in a multilevel system of digital twins is considered. The unit of inter-level information exchange is a software structure of a special type — a package, built on the principle of organizing messages in HTTP(s)-protocols. Directly, the metadata of the data source is placed in the header of the package and allows identification / authentication of the corresponding resources as data arrives. The registered / calculated data of the digital twin or its physical prototype is placed in the body of the packet. One of the significant problems of such data organization is the format of the metadata block used in the packet header, which should be compact and accessible for analysis by data processing software. As a part of the research described in the article, an approach to encoding a header with metadata is proposed based on a combination of DTDL formats, intended for the semantic description of industrial digital twins, and JWT, which provides a procedure for maintaining a communication session between a client and a server in a web-oriented application architecture. The metadata is directly specified in the DTDL format and their placement in the package header is a software “fold” of data in the JWT token format replacing the cumbersome JSON description of the data source with lightweight text code. Studies carried out on the example of a multilevel system of digital twins of magnetic observatories and variation stations have shown the feasibility of the proposed solution in the context of reducing the physical volume of a data packet (header with metadata) formed during data transmission in comparison with the well-known approach based on a text or DTDL— description of metadata.

**Keywords:** digital twins, data processing, batch data, tokenization, DTDL, JWT

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-77-30010).

**For citation:** Vorobev A. V. The concept of information packet interaction in a multilevel system of digital twins. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 532–543 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2021-21-4-532-543>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

### Введение

Магистральным направлением развития информационных технологий в настоящее время является конструирование и внедрение в системы управления цифровых двойников (digital twins) как виртуальных моделей сложных технических и природных объектов. Подтверждением тому являются, в частности, положения «Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» (Указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203), а также передовые разработки в контексте внедрения цифровых двойников в различные области — от металлургии и машиностроения до нефтегазового сектора [1,2]. Применение цифровых двойников в



территориально недоступных географических областях, использование их в решении задач резервирования и многие другие варианты внедрения цифровых двойников в прикладные области науки и техники позволяют повысить эффективность сбора, обработки и анализа данных о пространственно распределенных объектах, явлениях и процессах, в значительной степени являясь решением задач пространственной и временной интерполяции многомерных наборов данных.

Ранее в работах [3, 4] была предложена концепция интеграции цифровых двойников и их физических прототипов в единую многоуровневую систему. Суть предложенной идеи заключается в том, что на основании одного или нескольких признаков описаний источники данных (физические прототипы и их цифровые двойники) объединяются в пространственные кластеры (например, в соответствии с принадлежностью к определенному диапазону географических широт/долгот). Исходный уровень системы представлен непосредственно атомарными источниками данных, которые при переходе на следующий иерархический уровень объединяются в атомарные (состоящие только из источников данных) и комплексные (включающие в себя вложенные кластеры) пространственные кластеры. На каждом уровне системы цифровых двойников действует собственное информационное хранилище, агрегирующее потоки данных, поступающих из соответствующих конечных точек (источников данных, пространственных кластеров и пр.). При этом на базовом уровне, представленном непосредственно цифровыми двойниками и их физическими прототипами, присутствует модуль интеллектуального анализа данных. Задачей последнего является верификация данных, синхронно поступающих от связанной пары «физический прототип — цифровой двойник» в контексте определения наиболее вероятных значений потока, поступающих от источника данных в соответствии с принятой отраслевой моделью (в частности, например, на основе геофизических стандартов и спецификаций). В дальнейшем на уровне пространственных кластеров и их групп формируются специализированные хранилища данных, являющиеся информационным базисом для соответствующей информационной системы (например, в составе единого информационного пространства).

Примером является многоуровневая система цифровых двойников магнитных обсерваторий и вариационных станций, обеспечивающая пространственно-временное реконструирование рядов геомагнитных данных, характеризующих распределение значений параметров магнитного поля Земли и его вариаций [5, 6]. Проведенные исследования показали целесообразность внедрения указанного подхода для повышения полноты временных рядов геомагнитных данных и, соответственно, расширения функциональных возможностей программных и инструментальных средств их обработки, анализа и визуализации в автоматизированном режиме. Взаимодействие между информационными компонентами в многоуровневой системе цифровых двойников осуществляется посредством дуплексного обмена пакетированными сообщениями, содержащими как непосредственно передаваемые данные, так и специализированный иерархический токен — уникальную метку соответствующего источника данных. Каждая составляющая токена источника данных указывает в том числе и на его принадлежность к определенному пространственному кластеру (или группе кластеров). При этом межуровневая передача данных осуществляется посредством специализированных пакетов, формируемых программными модулями автоматически по тому же принципу, как организовано взаимодействие клиента и сервера в соответствии с протоколом HTTP(s). В каждом из пакетов присутствует заголовок, содержащий идентификационные параметры источника данных (в частности, уникальный иерархический токен) и сеанса передачи информации. Кроме того, в



состав передаваемого в ходе информационного взаимодействия цифрового пакета (в тело пакета) включены непосредственно передаваемые данные, к которым для повышения эффективности всего процесса применены соответствующие алгоритмы сжатия (в частности, в рассматриваемых примерах [3, 4] используется алгоритм сжатия gzip [7]).

Задача организации информационного взаимодействия между уровнями системы цифровых двойников уже успешно решается комплексом соответствующих программных технологий и средств [3, 4]. Вместе с тем остается нерешенной задача идентификации источников данных уникальными токенами, а также их внедрения в систему пакетных сообщений соответствующих информационных потоков.

## **1. Семантическое описание цифровых двойников и их физических прототипов**

Практикуемый в настоящее время подход к описанию цифровых двойников базируется на их семантическом определении посредством языка DTDL (Digital Twin Definition Language — Язык описания цифровых двойников) [8–10]. Формат основан на открытых стандартах и спецификациях, таких как JSON-LD и RDF, которые упрощают его внедрение в различных программных сервисах, инструментах и платформах. В целом, применение формата DTDL для моделирования и описания цифровых двойников направлено на обеспечение возможности эффективного интегрального применения цифровых двойников различного типа в составе одного программно-инструментального решения в соответствующей прикладной области. По сути, основная задача данного формата представления данных заключается в том, чтобы обеспечить простую и гибкую интеграцию моделей в отраслевых областях деятельности, сохраняя сложную систему их взаимосвязей, отражающую реальные объекты, процессы и явления в окружающем физическом мире.

Согласно концепции DTDL, в основе модели цифрового двойника лежит структура, называемая интерфейсом [11–13]. Фактически интерфейс инкапсулирует всю модель, представляя собой специализированную схему (словарь) данных для цифрового двойника [11].

Представляется целесообразным применение указанного формата DTDL для описания не только цифровых двойников, но и их физических прототипов в контексте предложенной концепции их информационного взаимодействия в составе многоуровневой системы. В этом случае необходимо несколько модифицировать семантику отдельных свойств, предусмотренных официальной спецификацией формата DTDL, таким образом, чтобы возможно было применять их к любым объектам и системам независимо от специфики соответствующей прикладной предметной области.

Для демонстрации предлагаемого формата описания элементов системы цифровых двойников предлагается рассмотреть данную задачу на примере магнитных обсерваторий и вариационных станций, которые в режиме реального времени выполняют мониторинг и регистрацию параметров магнитного поля Земли и его вариаций в соответствующих пространственных точках.

Прежде всего, следует отметить, что отдельный интерфейс создается для каждого источника данных независимо от того, относится ли он к цифровым двойникам или к соответствующим физическим прототипам. Таким образом, например, каждая магнитная обсерватория или вариационная станция будет описываться собственным семантическим интерфейсом в формате DTDL. У всех магнитных обсерваторий / вариационных станций есть уникальный идентификатор, который может быть запи-



сан в соответствующее свойство интерфейса (@id). Свойство «тип» (@type) остается неизменным и по-прежнему обозначается как «интерфейс» («interface»). Аналогичным образом сохраняется и свойство «контекст» (@context), значение которого фиксировано текущей версией спецификации DTDL и определяется как «dtmi: dtld: context; 2».

Схема данных, предоставляемых при регистрации физическим прототипом или цифровым двойником, должна быть задана в свойстве «контент» (@content). Каждый элемент данных описывается свойством типа «телеметрия» (@telemetry). Вариирование элементов данных задается тройкой параметров: наименование (@name), тип (@type, всегда задается как telemetry), схема / домен (@schema). В частности, применительно к геомагнитным данным, регистрируемым магнитными обсерваториями или вариационными станциями либо вычисляемым их цифровыми двойниками, могут быть представлены связками параметров, которые характеризуют компоненты и полный вектор магнитного поля Земли.

При этом отличительной особенностью цифровых двойников является наличие в структуре их описания свойства отношения (Relationship), атрибут которого (@id) указывает на уникальный идентификатор соответствующего физического прототипа (например, магнитной обсерватории и вариационной станции). Сторонние программные модули отвечают за проверку ссылочной целостности, иными словами, отсутствие двойников, не привязанных к физическим прототипам. При этом непосредственно у физических прототипов в семантическом DTDL-описании свойство отношения отсутствует.

Таким образом, каждый источник данных в формате DTDL описывается как совокупность нескольких составляющих вида

$$D = \{id, type, displayName, context, contents, [relationship]\},$$

где  $D$  — источник данных с заданными характеристиками.

При этом имеет место соотношение вида

$$\begin{aligned} D_1 &= \{ 'd1', 'interface', displayName, context, contents \}; \\ D_2 &= \{ 'd2', 'interface', displayName, context, contents, relationship \}; \\ &\quad relationship = 'd1'; \quad relationship \in D_2, \end{aligned}$$

где  $D_1$ ,  $D_2$  — источники данных с заданными характеристиками с уникальными идентификаторами 'd1' и 'd2' соответственно; при этом источник с идентификатором 'd2' включает в свое описание компонент вида «relationship», значение которого — 'd1' — соответствует ранее определенному источнику с соответствующим идентификатором. В данном случае такой способ описания источника данных позволяет отнести его к категории «цифровой двойник», в отличие от другого источника, не содержащего компонент вида «relationship» и относящегося к категории «физический прототип». Элемент «contents» DTDL-описания источников данных, в отличие от других атомарных его элементов, является сложным (композиционным):

$$contents = \{ type, name, schema \}, \quad type = 'telemetry', \quad contents \in D,$$

где  $D$  — источник данных с заданными характеристиками.

В составе одного элемента «contents» допустимо не ограниченное верхним пределом количество дочерних связей, что позволяет описать, таким образом, любое





количество параметров, регистрируемых физическим прототипом или вычисляемых его цифровым двойником. В общем виде множество таких экземпляров можно описать посредством следующего соотношения:

$$contents = \{type, name, schema\}, \quad type = 'telemetry', \quad contents \in D,$$

где  $D$  — произвольный источник данных с заданными характеристиками,  $N$  — общее количество параметров, регистрируемых физическим прототипом или вычисляемых его цифровым двойником. Кроме того, ряд атомарных элементов имеет фиксированные значения, определяемые требованиями официальной спецификации DTDL:

$$\forall context, type \in D, \quad context = 'dtmi : dtld : context', \quad type = 'interface',$$

где  $D$  — произвольный источник данных с заданными характеристиками. Кроме того, ввиду значимости пространственного положения источника данных (например, географическая точка с заданными координатами широты и долготы) представляется целесообразным введение дополнительного свойства типа «телеметрия», использующего схему вида «geospatial» (в частности, «dtmi:standard:schema:geospatial:point;2»). В этом случае будет иметь место соотношение вида

$$contents = \{type, name, schema\}, \quad schema \in location = \{type, coordinates\}; \\ type = 'telemetry', \quad schema = 'geospatial', \quad contents \in D,$$

где  $type$  — тип пространственного объекта (например, значение 'point'),  $coordinates$  — соответствующий массив географических координат (широта и долгота в градусах).

Таким образом, для описываемого источника данных в DTDL-структуре обязательным является как минимум один элемент-свойство типа «telemetry», содержащий информацию о пространственной локализации. Остальные элементы-свойства типа «telemetry» являются опциональными.

При этом важно отметить, что наличие элемента-свойства типа «telemetry» схемы «geospatial» нецелесообразно для цифрового двойника, поскольку его пространственная привязка может быть определена на основании свойства «телеметрия» соответствующего ему физического прототипа. Во избежание возможных коллизий данный элемент-свойство рекомендуется исключить из DTDL-описания цифрового двойника, ограничившись только описанием параметров. Вместе с тем указанная структура DTDL-описания не исключает необходимости дополнительной проверки целостности данных. Одна из таких проверок, в частности, направлена на оценку соответствия параметров, указанных в описании физического прототипа и его цифрового двойника. Проверку можно выразить соотношением вида

$$\forall contents1 \in D1, \quad contents1 = \bigcup_{i=1}^N \{type, name, schema\}_i, \\ \forall contents2 \in D2, \quad contents2 = \bigcup_{i=1}^M \{type, name, schema\}_i, \quad contents2 \supseteq contents1,$$

где  $D1$  — DTDL-описание физического прототипа,  $D2$  — DTDL-описание соответствующего ему цифрового двойника,  $contents1$ ,  $contents2$  — соответствующие элементы-свойства вида «телеметрия» описаний физического прототипа и его цифрового двойника.



## 2. Процедура токенизации

Основным назначением процедуры токенизации в многоуровневой системе цифровых двойников является свертка метаданных источника информации в заголовок пакета передаваемых между уровнями данных. Подобная свертка носит название токена соответствующего физического прототипа или цифрового двойника. Применение токена в системе информационного взаимодействия обеспечивает самоидентифицируемость источников данных. Иными словами, анализ пакета данных позволяет получить всю необходимую информацию об их источнике.

Основным требованием, предъявляемым к структуре токена источника данных, является его компактность и возможность адаптации под веб-ориентированные форматы передачи данных (например, XML, JSON и пр.).

В 2011 г. инициативной группой JOSE (JSON Object Signing and Encryption group) был разработан формат Json Web Token (JWT). Согласно открытому стандарту RFC7519, JWT представляет собой безопасный способ передачи данных между парой участников информационного взаимодействия [14–16].

В контексте JWT имеет место токен простого текстового формата `header.payload.signature` [14]. При этом в каждом заголовке токена должны быть указаны как минимум два обязательных параметра: поле «тип» («type») с фиксированным значением 'JWT' (указание программным парсерам на принадлежность объекта формату JWT) и поле «алгоритм» («alg»), которое определяет используемый в токене алгоритм хэширования.

Специфицированная структура JWT должна быть с незначительными изменениями адаптирована под потребности токенизации в предложенной многоуровневой системе цифровых двойников. Основные параметры токена должны быть составлены из DTDL-описания соответствующего источника данных, независимо от того, является он цифровым двойником или его физическим прототипом.

Так, в частности, ассоциированный с каждым источником данных уникальный идентификатор должен быть указан в разделе полезных данных («payload») – атрибут-свойство `userId`. Такой код может быть сгенерирован автоматически непосредственно при создании токена-описания источника данных либо выбран из доступного по умолчанию идентификатора. Так, к примеру, в случае использования в качестве источников провайдеров геомагнитных данных таковыми могут выступать как автоматически сгенерированные значения, так и уникальные коды IAGA, которые присваиваются магнитным обсерваториям / вариационным станциям.

В случае если в свойстве `userId` указан автоматически сгенерированный идентификатор источника данных (суррогатный идентификатор), то дополнительно формируется свойство вида «sub», в качестве значения которого указывается код источника данных, ассоциированный с аналогичным свойством соответствующего объекта реального мира. Так, в случае геомагнитных данных, если в свойстве `userId` указан суррогатный автоматически сгенерированный идентификатор, то непосредственно в свойство «sub» записывается соответствующий уникальный четырехсимвольный IAGA-код магнитной обсерватории или вариационной станции. Еще одно специфицированное свойство JWT — «role» — предлагается использовать для указания на тип источника данных, в качестве которого могут выступать как физические прототипы, так и их цифровые двойники. Значение «DT» должно быть представлено в указанном свойстве в случае, если токен является описанием цифрового двойника. В противном случае (если источник данных определен как физический прототип) указанное значение должно быть задано как «Proto».



Непосредственно метаданные источника данных (содержимое DTDL-свойства типа «contents») представляется целесообразным определить в JWT-свойстве «iat», поскольку его применение по исходному назначению (указание времени жизни созданного JWT-токена) не предполагается в рамках решаемой задачи. Остальные специфицированные в JWT-параметры представляется целесообразным оставить без изменений, а опциональные — не использовать во избежание трудоемкости программной обработки соответствующих метаданных источников данных (любого типа / роли).

Так, в частности, в блоке свойств заголовка «header» значение «type» по умолчанию задается как «JWT» и сохраняется таковым для последующей работы. Вообще говоря, значение свойства «type», как правило, игнорируется программными интерпретаторами. Вместе с тем стандарт RFC7519 не рекомендует отказываться от него во избежание коллизий, связанных с проблемами обратной совместимости [17]. В результате возникновения проблем с обратной совместимостью возможна жесткая зависимость токена в системе цифровых двойников от версии соответствующей спецификации, что может стать серьезным препятствием на пути их обработки и анализа в автоматизированном режиме соответствующими программными модулями, например, процессами-демонами, предусмотренными в архитектуре системы и функционирующими по известному принципу Grep.

Другое значение в этом же блоке — «alg» — используемый в JWT-токене алгоритм хэширования. Представляется целесообразным также использовать наиболее распространенное его значение «HS256», поскольку, по сути, любой алгоритм хэширования позволяет сжимать большие фрагменты данных в сообщения фиксированной размерности, которые можно просто верифицировать (хэш).

Другой группой свойств JWT-токена в системе цифровых двойников является обязательный, согласно спецификации стандарта, компонент подписи («signature»). Данный раздел генерируется автоматически следующим образом: заголовки («header») и полезная нагрузка («payload») кодируются посредством алгоритма base64url, а затем они объединяются в строку, в которой в качестве разделителя используется символ «.».

Программный модуль, который принимает JWT-токен в качестве входного (внешнего) параметра, самостоятельно вычисляет значение подписи в соответствии с указанным в токене алгоритмом и сравнивает его с тем значением, которое было передано непосредственно в самом токене в поле подписи («signature»). Если эти значения различны, то данная процедура аутентификации не пройдена и программный модуль не будет обрабатывать те данные, которые переданы в разделе полезной нагрузки («payload») токена, и заданное количество раз повторит запрос к соответствующему источнику данных (или хранилищу данных / программному модулю предшествующего в иерархии уровня системы цифровых двойников).

### 3. Пример

Представляется целесообразным обобщить сказанное ранее на примере произвольной магнитной обсерватории / вариационной станции, в режиме реального времени осуществляющей мониторинг параметров магнитного поля Земли и его вариаций.

На начальном этапе проектирования для каждой магнитной обсерватории / вариационной станции составляется описание в формате DTDL (рисунок). Здесь в качестве основных параметров указываются идентификатор магнитной обсерватории / вариационной станции (поле «displayName»), а также несколько вложенных информационных блоков типа «телеметрия» (type = "telemetry").



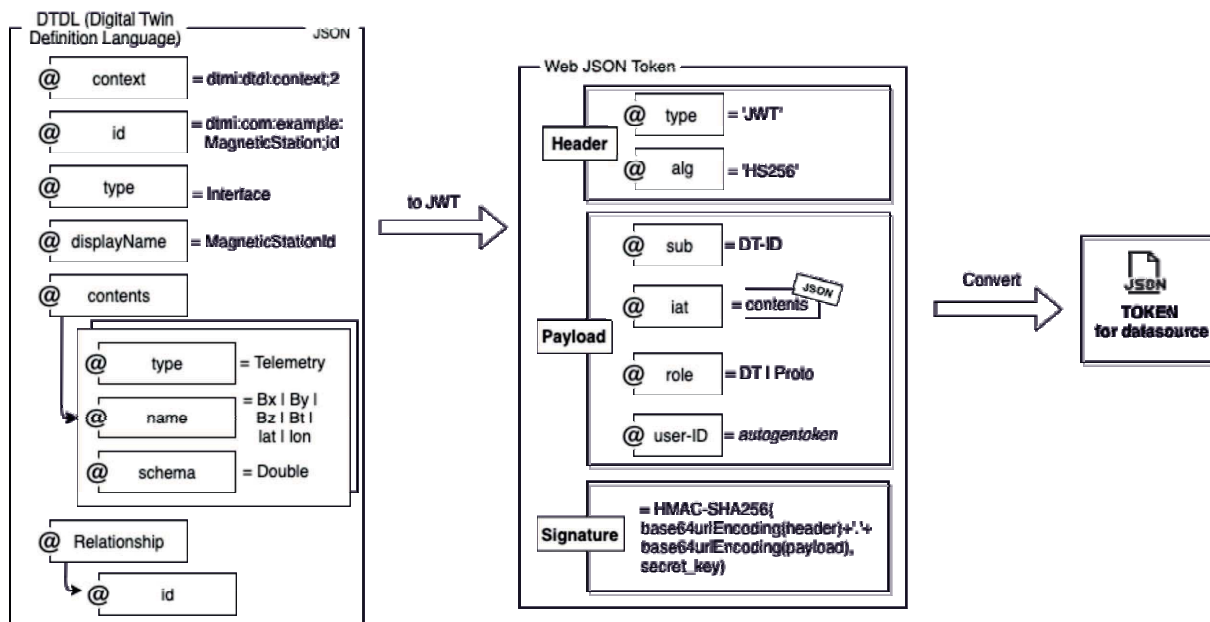


Рис. Схема формирования токена магнитной обсерватории  
Fig. Magnetic observatory token development scheme

Один из блоков «телеметрия» используется для описания пространственной привязки источника данных — связки из географической широты и долготы, которые для определенных прикладных задач могут быть дополнены магнитными координатами. Оставшиеся блоки отведены для описания параметров геомагнитного поля, в частности компонентов вектора поля — северная, вертикальная, горизонтальная составляющие и полный вектор, а также магнитное склонение и магнитное наклонение. Для каждого из перечисленных параметров, помимо заданного по умолчанию свойства «type» (со значением «telemetry»), указываются наименование, используемый тип данных (свойство «schema») — число с плавающей запятой двойной точности («double»).

Для неявного указания на принадлежность источника данных типу «цифровой двойник» вводится группа свойств вида «Relationship», в которой свойство-атрибут «id» содержит ссылку на соответствующий физический прототип. Проверка ссылочной целостности, а также непротиворечивости метаданных цифрового двойника (название, регистрируемые / вычисляемые параметры и пр.) осуществляется посредством локального программного модуля, реализующего процедуры формирования пакетов данных с интеграцией в них соответствующего токена, который, в свою очередь, представляет собой описанную выше свертку DTDL-описания в формат DTDL.

Для оценки эффективности предложенного подхода был проведен ряд вычислительных экспериментов для порядка 300 магнитных обсерваторий и вариационных станций для различных периодов наблюдений (от 10 минут до 1 суток) и частоты обмена данными (от 10 минут до 1 суток). Результаты проведенных экспериментов показали, что объем передаваемых в заголовке пакета метаданных магнитной обсерватории / вариационной станции или ее цифрового двойника сократится в среднем на 54.2%. Ожидается, что в контексте общего объема и частоты информации, передаваемой между уровнями в системе цифровых двойников магнитных обсерваторий и вариационных станций, данный подход обеспечит повышение скорости передачи, обработки и анализа соответствующих информационных пакетов.



## Заключение

Одним из перспективных направлений развития информационных технологий в настоящее время является разработка и применение цифровых двойников в технических системах. Многочисленные разработки в данной области направлены преимущественно на повышение эффективности технических систем в различных отраслях промышленности. Вместе с тем данный подход не менее эффективно может быть применен для моделирования технических систем, обеспечивающих мониторинг различных процессов / явлений с выраженной геопространственной анизотропией. Такой подход позволит решать задачи, связанные с пространственной и временной анизотропией соответствующих источников данных.

Один из подходов к решению поставленных задач основан на создании многоуровневой системы цифровых двойников, где одной из значимых проблем является процедура обработки и анализа данных, передаваемых в информационных потоках от одного уровня системы к другому. Система многоуровневых цифровых двойников предполагает, что обмен данными между уровнями выполняется на базе специализированных информационных пакетов, где в заголовке указываются метаданные источника, а в теле — непосредственно передаваемая информация. Проблема заключается в формате метаданных заголовка пакета.

В работе предложен подход к кодированию заголовка с метаданными на основе комбинирования форматов DTDL, предназначенного для семантического описания промышленных цифровых двойников, и JWT, обеспечивающего процедуру поддержания сеанса связи между клиентом и сервером в веб-ориентированной архитектуре приложений. Описание источника должно быть представлено в формате DTDL, который позволяет задать его основные характеристики: наименование, идентификатор, роль в системе (прототип или цифровой двойник), пространственные и регистрируемые / вычисляемые параметры. Поскольку описание в DTDL-формате достаточно громоздко ввиду значительного количества описываемых метаданных, целесообразно для передачи его в заголовке пакета обеспечить так называемую свертку данных. Для этого DTDL-описание преобразуется в токен JWT, заменяющий громоздкое JSON-описание источника данных легковесным текстовым кодом.

Исследования, проведенные на примере многоуровневой системы цифровых двойников магнитных обсерваторий и вариационных станций, показали, что физический объем формируемого в процессе передачи данных пакета (а именно его заголовка) с применением указанного подхода сократится в среднем на 54.2% по сравнению с известным подходом на основе текстового или DTDL-описания метаданных. Принимая во внимание совокупный объем передаваемых между источниками данных и частоту формирования соответствующих информационных пакетов, данный показатель повышения эффективности позволит существенно повысить скорость обмена сообщениями между уровнями.

## Список литературы

1. *Mittal H.* Digital twin: An overview // *CSI Communications*. 2020. Vol. 44, iss. 6. P. 18.
2. *Raman Y.* Digital twin and its application // *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. 2020. Vol. 02, iss. 06. P. 1253–1254.
3. *Vorobeva G. R.* Approach to the recovery of geomagnetic data by comparing daily fragments of a time series with equal geomagnetic activity // *Computer Optics*. 2019. Vol. 43, iss. 6. P. 1053–1063. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-6-1053-1063>



4. Воробьев А. В., Воробьева Г. Р., Юсупова Н. И. Концепция единого пространства геомагнитных данных // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18, № 2. С. 390–415. <https://doi.org/10.15622/sp.18.2.390-415>
5. Love J. Intermagnet and the global community of magnetic observatories // American Geophysical Union, Fall Meeting. 2006, abstract id. U41B-0815.
6. Kim J., Chang H. Geomagnetic field variations observed by INTERMAGNET during 4 total solar eclipses // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. Vol. 172. P. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.023>
7. Syed Z., Soomro T. Compression Algorithms: Brotli, Gzip and Zopfli Perspective // Indian Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 11, iss. 45. P. 1–4. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i45/117921>
8. Ohnemus T. The digital twin — a critical enabler of industry 4.0: digital twin definition and need for digital transformation // ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 2020. Vol. 115, iss. s1. P. 23–25. <https://doi.org/10.3139/104.112308>
9. Barricelli B., Casiraghi E., Fogli D. A survey on digital twin: definitions, characteristics, applications, and design implications // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 167653–167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
10. Digital Twins Definition Language (DTDl). Version 2.0. URL: <https://github.com/Azure/opensdigitaltwins-dtdl/blob/master/DTDl/v2/dtdlv2.md#references> (дата обращения: 18.03.2021).
11. Digital Twin Computing White Paper ver.2.0.0. URL: <https://www.ntt.co.jp/svlab/e/DTC/whitepaper.html> (дата обращения: 18.03.2021).
12. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems / eds. F. J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. Cham : Springer, 2017. P. 85–113. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
13. Cassimon T., de Hoog J., Anwar A., Mercelis S., Hellinckx P. Intelligent data sharing in digital twins: Positioning paper // Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing. 3PGCIC 2020 / eds. L. Barolli, M. Takizawa, T. Yoshihisa, F. Amato, M. Ikeda. Cham : Springer, 2021. P. 282–290. (Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 158). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61105-7\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61105-7_28)
14. Janoky L., Levendovszky J., Ekler P. An analysis on the revoking mechanisms for JSON Web Tokens // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2018. Vol. 14, iss. 9. P. 1–10. <https://doi.org/10.1177/2F1550147718801535>
15. Aldya A. P., Rahmatullo A., Arifin M. N. Stateless Authentication with JSON Web Tokens using RSA-512 Algorithm // Jurnal INFOTEL. 2019. Vol. 11, № 2. P. 36–42. <https://doi.org/10.20895/infotel.v11i2.427>
16. Rahmatulloh A., Gunawan R., Nursuwars F. Performance comparison of signed algorithms on JSON Web Token // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 550. P. 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/550/1/012023>
17. Royani M., Wibowo A. Web Service Implementation in Logistics Company uses JSON Web Token and RC4 Cryptography Algorithm // Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi). 2020. Vol. 4, № 3. P. 591–600. <https://doi.org/10.29207/resti.v4i3.1952>

### References

1. Mittal H. Digital twin: An overview. *CSI Communications*, 2020, vol. 44, iss. 6, pp. 18.
2. Raman Y. Digital twin and its application. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 2020, vol. 02, iss. 06, pp. 1253–1254.
3. Vorobeva G. R. Approach to the recovery of geomagnetic data by comparing daily fragments of a time series with equal geomagnetic activity. *Computer Optics*, 2019, vol. 43, iss. 6, pp. 1053–1063. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-6-1053-1063>



4. Vorobev A. V., Vorobeva G. R., Yusupova N. I. Conception of geomagnetic data integrated space. *SPIIRAS Proceedings*, 2019, vol. 18, iss. 2, pp. 390–415. <https://doi.org/10.15622/sp.18.2.390-415>
5. Love J. Intermagnet and the global community of magnetic observatories. *American Geophysical Union, Fall Meeting*, 2006, abstract id. U41B-0815.
6. Kim J., Chang H. Geomagnetic field variations observed by INTERMAGNET during 4 total solar eclipses. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, vol. 172, pp. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.023>
7. Syed Z., Soomro T. Compression Algorithms: Brotli, Gzip and Zopfli Perspective. *Indian Journal of Science and Technology*, 2018, vol. 11, iss. 45, pp. 1–4. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i45/117921>
8. Ohnemus T. The digital twin — a critical enabler of industry 4.0: digital twin definition and need for digital transformation. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2020, vol. 115, iss. s1, pp. 23–25. <https://doi.org/10.3139/104.112308>
9. Barricelli B., Casiraghi E., Fogli D. A survey on digital twin: definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 167653–167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
10. *Digital Twins Definition Language (DTDl)*. Version 2.0. Available at: <https://github.com/Azure/opendigitaltwins-dtdl/blob/master/DTDl/v2/dtdlv2.md#references> (accessed 18 March 2021).
11. *Digital Twin Computing White Paper ver.2.0.0*. Available at: <https://www.ntt.co.jp/svlab/e/DTC/whitepaper.html> (accessed 18 March 2021).
12. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: F. J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves, eds. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, Cham, 2017, pp. 85–113. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
13. Cassimon T., de Hoog J., Anwar A., Mercelis S., Hellinckx P. Intelligent data sharing in digital twins: Positioning paper. In: L. Barolli, M. Takizawa, T. Yoshihisa, F. Amato, M. Ikeda, eds. *Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing. 3PGCIC 2020* (Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 158). Springer, Cham, 2021, pp. 282–290. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61105-7\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61105-7_28)
14. Janoky L., Levendovszky J., Ekler P. An analysis on the revoking mechanisms for JSON Web Tokens. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2018, vol. 14, iss. 9, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1177/2F1550147718801535>
15. Aldya A. P., Rahmatullo A., Arifin M. N. Stateless Authentication with JSON Web Tokens using RSA-512 Algorithm. *Jurnal INFOTEL*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 36–42. <https://doi.org/10.20895/infotel.v11i2.427>
16. Rahmatulloh A., Gunawan R., Nursuwars F. Performance comparison of signed algorithms on JSON Web Token. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 550, pp. 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/550/1/012023>
17. Royani M., Wibowo A. Web Service Implementation in Logistics Company uses JSON Web Token and RC4 Cryptography Algorithm. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 591–600. <https://doi.org/10.29207/resti.v4i3.1952>

Поступила в редакцию / Received 31.03.21

Принята к публикации / Accepted 16.06.21

Опубликована / Published 30.11.2021