

УДК 004.896 + 004.428

СЕМАНТИЧЕСКИЙ ШЛЮЗ КАК УСЛУГА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ БЕЗ ЦЕНТРОВ КООРДИНАЦИИ

Т. А. РАДИШЕВСКАЯ, аспирант

С. И. ПОЛОВЕНЯ, зав. кафедрой телекоммуникационных систем
Белорусская государственная академия связи

Представлен семантический шлюз для систем промышленного «интернета вещей» (Industrial Internet of Things, IIoT), предназначенный для соединения физических объектов традиционных отраслей промышленности с приложениями и службами IIoT. В настоящее время IIoT сталкивается с вертикальными проприетарными системами, практически не обеспечивающими взаимодействие между собой. Для обеспечения цифровизации традиционных отраслей промышленности требуется предоставление интеллектуальных и масштабируемых услуг IIoT для обеспечения связи между физическими объектами и их цифровыми тенями без центров координации, в первую очередь для модернизируемых к уровню Индустрии 4.0 традиционных и новых объектов промышленности. Такие услуги должны позволять обслуживать физические датчики и интерпретировать сообщения между вещами IIoT.

В статье приводятся исследования по решению проблемы взаимодействия вещей IIoT на уровне приложений при помощи семантического шлюза как услуги (SGS), что позволяет обойти проблему взаимодействия различных сетевых протоколов, которые предлагаются различными организациями в качестве стандарта де-факто для обеспечения функциональной совместимости связи. Семантический шлюз реализован в виде библиотеки управляющих программ для гетерогенных шлюзов Edge/Sensing Gateway.

Ключевые слова: цифровая тень, универсальный уникальный идентификатор ресурса, идентификатор клиента.

Источник финансирования: статья написана в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Беспроводная система передачи данных для обеспечения безопасной связи устройств «интернета вещей» на основе технологии Li-Fi» задания «Современные беспроводные системы передачи данных» в составе ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства 1.5.6» подпрограммы 5.1 «Цифровые технологии и космическая информатика» на 2021–2025 годы.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые двойники (ЦД) и цифровые тени (ЦТ) – важнейший тренд цифровизации современного мира, в том числе в промышленном производстве. ЦД обеспечивают связь между физическим и виртуальным объектом промышленного «интернета вещей» в обоих направлениях, что позволяет осуществлять мониторинг состояния физических объектов и, при соблюдении требований безопасности, осуществлять управление этими физическими объектами. Поскольку для традиционных отраслей промышленности дистанционное управление без участия лиц, принимающих решения (ЛПР) является потенциально опасной задачей, то на этапе перехода этих отраслей промышленности к уровню Индустрии 4.0 целесообразно разворачивать распределенные телеметрические системы на основе технологии цифровых теней.

Среди основных преимуществ ЦТ для промышленности отметим, что они:

- позволяют реализовать дистанционный мониторинг физических объектов в реальном времени (РВ) там, где это невозможно другими средствами;
- создают условия для предиктивного обслуживания и планирования ремонтов оборудования за счет обработки и интеллектуального анализа в РВ больших объемов данных о работе промышленных активов;
- делают возможным анализ производственных сценариев без ущерба для реального производства.

Киберфизическая интеграция стала важной предпосылкой интеллектуального производства, а также его ядром. В качестве предпочтительных средств

такой интеграции киберфизические системы (КФС) и ЦД/ЦТ привлекли пристальное внимание к умному производству, которое стало специализацией для технологий КФС и ЦД/ЦТ.

КФС обеспечивает зондирование в реальном времени, информационную обратную связь, динамическое управление и другие услуги, а благодаря петлям обратной связи физические и вычислительные процессы сильно взаимозависимы. Таким образом, достигается киберфизическая интеграция и взаимодействие в реальном времени для мониторинга и контроля физических объектов надежным, безопасным, совместным и эффективным способом. Датчики и исполнительные механизмы можно рассматривать как основные элементы КФС, а модели и данные – основные элементы ЦД/ЦТ.

Типовая архитектура распределенных телеметрических систем хорошо сопрягается с архитектурной [1] моделью распределенных телекоммуникационных систем уровня Индустрии 4.0 (РТКС 4.0), определяющей гетерогенные шлюзы Edge/Sensing Gateway и концентраторы данных Edge Hub как основные устройства слоя зондирования промышленного «интернета вещей». Гетерогенный шлюз Edge/Sensing Gateway является чисто коммуникационным шлюзом и выполняет функции концентратора данных MODBUS и/или маршрутизатора интерфейсов MODBUS. Гетерогенный шлюз выполнен на основе вычислительного ядра, в качестве которого выбран микроконтроллер семейства STM32F7, основанный на процессорном ядре ARM Cortex-M7 с производительностью 2,14 DMIPS/МГц, работающем на частотах до 216 МГц (пиковая производительность до 462 DMIPS) и увеличенным объемом ОЗУ до 320 кбайт.

Рекомендация ITU-T Q.3055 [2] описывает протокол сигнализации для гетерогенных шлюзов, в котором определяется семантический шлюз IoT (Semantic Gateway, SG) как программа и часть гетерогенного шлюза IIoT, которая используется для сопоставления различных протоколов, приложений и служб IIoT друг с другом. Использование сценариев сопоставления IIoT-решений между собой без использования специального протокола сигнализации для SG возможно только в том случае, если для каждого решения используется стандартная конфигурация (например, для сопоставления протоколов: стандартный номер сетевого порта для используемого протокола; нет шифрования данных, встроенных в сообщение, и т. д.). Сравнение гетерогенных и семантических шлюзов приведено в работе [3]. Фактически семантический шлюз является услугой для распределенных телеметрических систем, позволяющей описывать физические объекты IIoT на основе онтологий предметной области IIoT «Датчик, наблюдение, образец и исполнительный механизм» (Sensor, Observation,

Sample, and Actuator, SOSA) и семантической сенсорной сети (Semantic Sensor Network, SSN) [4]. Таким образом, семантический шлюз предоставляет возможность создания распределенных телеметрических систем типа SSN без центров координации с использованием в качестве клиентов физических ресурсов микропроцессорных устройств с возможностями реализации способов генерации универсального идентификатора ресурса и генерации уникального идентификатора клиента программно-аппаратными методами.

СЕМАНТИЧЕСКИЙ ШЛЮЗ КАК УСЛУГА

Семантический шлюз как услуга (Semantic Gateway-as-a-Service, SGS) является основным элементом системы управления информационными потоками в распределенной телеметрической системе, предназначенной для организации потоков телеметрии от устройств сбора данных (семантических шлюзов – СШ) к серверам данных (СД) и далее к рабочим местам (РМ) заинтересованных пользователей с целью обеспечения достоверного функционирования в мягком реальном времени систем промышленного «интернета вещей». Распределенная телеметрическая система представляет собой сеть типа SSN, в которой для одного или нескольких физических ресурсов имеется СШ, который может уникально идентифицировать физические ресурсы и уникально идентифицировать себя, публиковать эти данные на нескольких СД, тем самым создавая виртуальную копию физического ресурса (цифровую тень физического ресурса) для доступа к этой копии всем заинтересованным пользователям. Основой программного обеспечения СШ является метод обработки данных, обеспечивающий сбор данных и их регистрацию для ввода в компьютер. Сущность метода обработки данных заключается в способе генерации универсального идентификатора ресурса и генерации уникального идентификатора клиента в распределенной телеметрической системе без привлечения центров координации.

На рис. 1 показана распределенная телеметрическая система без центров координации с использованием в качестве клиентов физических ресурсов СШ на основе микропроцессоров с возможностями реализации способов генерации универсального идентификатора ресурса и генерации уникального идентификатора клиента программно-аппаратными методами. Телеметрическая система может содержать произвольное количество СШ (Semantic Gateway + Edge/Sensing Gateway), произвольное количество СД (MQTT Server) и произвольное количество РМ (Digital Shadow), однако обязательным условием является то, что СШ должен публиковать данные как минимум на двух СД, а РМ должно подписаться

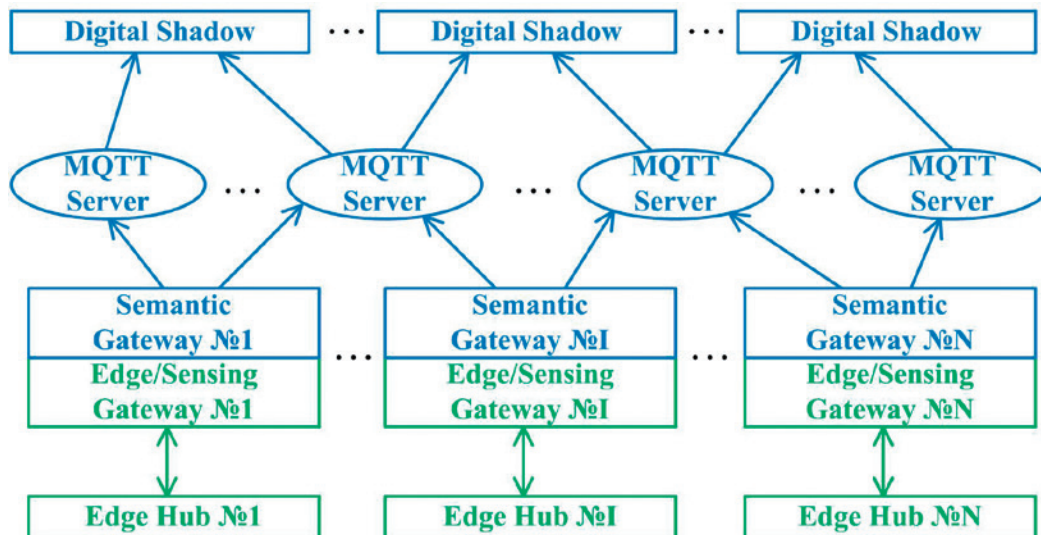


Рис. 1. Распределенная телеметрическая система без центров координации

на считывание данных как минимум с двух СД. Таким образом в семантической сети СШ публикует данные о физических ресурсах на нескольких СД, реализуя метод регистрации данных «один ко многим» с целью обеспечения надежности регистрации этих данных.

На рис. 1 устройства Edge/Sensing Gateway и Edge Hub (обозначены зеленым цветом) осуществляют локальное управление физическими объектами на уровне предприятия, причем на устройстве Edge Hub работает нейро-нечеткий классификатор, детектирующий аномалии в потоках телеметрии, и в случае детектирования аварии или предаварийного состояния рассылающий сообщения электронной почты сотрудникам соответствующих служб [5]. Семантический шлюз публикует данные о параметрах физических объектов на серверах данных MQTT Server, с которых эти данные считывают РМ, на которых данные анализирует программное обеспечение Digital Shadow. Реализация семантического шлюза предполагает наличие у микропроцессора интерфейсов для считывания уникального идентификатора разрядностью не менее 48 бит (UUID1) и уникального идентификатора разрядностью не менее 115 бит (UUID2), а также встроенных аппаратных таймеров различной разрядности, способных работать на частотах не менее 10 МГц.

Программное обеспечение цифровых теней Digital Shadow должно быть разработано с учетом следующих требований:

- ЦТ должны использовать данные реального времени и исторические данные для представления прошлого и настоящего и моделирования прогнозируемого будущего;
- ЦТ должны быть основаны на интеграции и реальных данных и должны руководствоваться знаниями о предметной области;

- сохраненные представления, составляющие ЦТ, должны синхронизироваться с заданной частотой и с заданной точностью;
- у ЦТ должен быть соответствующий физический объект;
- ЦТ должна является частью КФС.

Кроме того, ЦТ должна иметь вычислительное представление (Computational Representation) – это исполняемое цифровое представление, состоящее из вычислительных алгоритмов и вспомогательных данных, представляющих некоторый процесс или набор сущностей со свойствами, которые являются функцией времени в интересующем временном интервале. При исполнении вычислительные представления часто принимают сохраненные представления в качестве входных данных, а их вычислительные алгоритмы создают новые сохраненные представления в качестве выходных данных. Вычислительные представления также могут использовать справочные данные, что является еще одним примером сохраненного представления.

Семантический шлюз состоит из следующих элементов:

- плата-носитель на вычислительном ядре ARM Cortex-M3 (CPU1), на которой установлены часы реального времени DS3231, которые управляются платой-мезонином по интерфейсу I2C и генерируют прерывания для платы-мезонина с частотой 1 Гц. Плата-мезонин считывает с платы-носителя уникальный идентификатор процессора через интерфейс USART;
- плата-мезонин на вычислительном ядре ARM Cortex-M7 (CPU2), из аппаратных средств которого используются два генератора – Gen1 на частоту 10MHz и Gen2 на частоту 200MHz, используемые для генерации временных меток.

Микропроцессоры CPU1 и CPU2 имеют 96-битные уникальные идентификаторы процессора, которые используются для формирования UUID1 и UUID2, Плата-носитель предоставляет плате-мезонину интерфейса прецизионных часов реального времени RTC с независимым питанием и точностью не менее нескольких секунд за год, предоставляющих для генерации идентификатора ресурса данные о всемирном координированном времени (Coordinated Universal Time, принято обозначать как UTC).

Из встроенных в CPU2 периферийных устройств используются два таймера и сигнал прерывания от RTC с частотой 1 Гц для сброса таймера 1:

- таймер 1, способный отсчитывать количество 100-наносекундных интервалов в одной секунде, то есть способный работать с тактовой частотой не менее 10 МГц;
- таймер 2 разрядностью не менее 14 бит, способный отсчитывать изменения текущего времени.

Способ генерации универсального идентификатора ресурса основан на реализации универсального уникального идентификатора UUID (Universally Unique Identifier) согласно RFC 4122 [6], где UUID – это 128-битное число, которое в разработке ПО используется в качестве уникального идентификатора элементов. Его текстовое представление является серией из 32 шестнадцатеричных символов, разделенных дефисами на пять групп по схеме 8-4-4-4-12. В семантическом шлюзе использован способ генерации универсального уникального идентификатора ресурса версии 1 (время + уникальный или случайный идентификатор хоста). В этом случае для генерации UUID к текущему времени добавляется идентифицирующее свойство устройства, 48-битный UUID1.

Уникальный идентификатор ресурса получают с помощью конкатенации UUID1, 60-битной временной метки, 14-битной уникальной тактовой последовательности, а также 6 битов, зарезервированных под версию и вариант UUID, что в результате дает 128-битное число. 60-битная временная метка представляет собой количество 100-наносекундных интервалов с 15 октября 1582 года – даты возникновения григорианского календаря, и временная метка вычисляется от текущего времени UTC с добавлением константы 12 219 292 800 (количество секунд между 15 октября 1582 года и 1 января 1970 года), перевода секунд в 100-наносекундные интервалы и добавление текущего состояния таймера 1. Тактовая последовательность – это значение, инкрементируемое при каждом изменении часов, и для получения тактовой последовательности используется таймер 2.

Способ генерации уникального идентификатора клиента основан на утверждении, что в сетевой инфраструктуре «интернета вещей» одним из основных

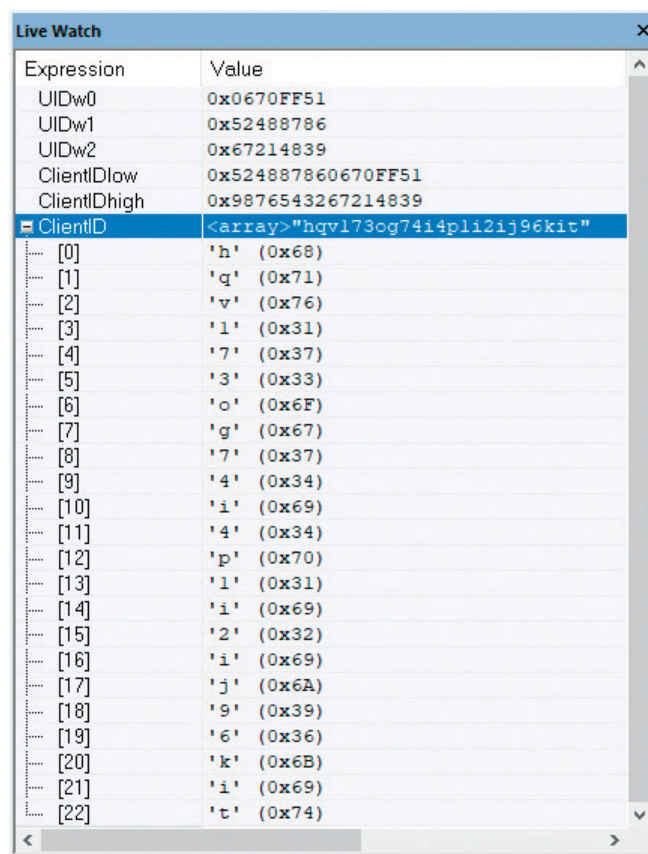
протоколов передачи данных является протокол MQTT [7], стандарт которого в пункте 3.1.3.1 определяет идентификатор клиента (ClientID), который идентифицирует клиента для сервера. Каждый клиент, подключающийся к серверу, должен иметь уникальный ClientID, который является первым полем в полезной нагрузке пакета CONNECT.

ClientID должен быть строкой длиной от 1 до 23 байтов в кодировке UTF-8 [8] и содержать только символы «0123456789abcdefghijklmnopqrstuvwxyzABCDEFGHIJKLMNPOQRSTUVWXYZ».

Способ генерации уникального идентификатора клиента основан на стандарте MQTT [7] с использованием 115-битного UUID2 и состоит из следующих шагов:

1. В переменную ClientID загружается 115-битный UUID2. Переменная ClientID состоит из двух переменных ClientIDlow и ClientIDhigh формата uint64_t, причем переменная ClientIDlow образуется из двух 32-разрядных слов UIDw1, UIDw0 уникального идентификатора процессора CPU2, а переменная ClientIDhigh образуется из одного слова UID процессора CPU1 и слова UIDw2 процессора CPU2;

2. Преобразуем переменную ClientID в 23-символьную последовательность при помощи стандарта кодирования двоичных данных при помощи 32 символов UTF-8 с использованием шаблона



Expression	Value
UIDw0	0x0670FF51
UIDw1	0x52488786
UIDw2	0x67214839
ClientIDlow	0x524887860670FF51
ClientIDhigh	0x9876543267214839
ClientID	<array>"hqv173og74i4pli2ij96kit"
[0]	'h' (0x68)
[1]	'q' (0x71)
[2]	'v' (0x76)
[3]	'l' (0x31)
[4]	'7' (0x37)
[5]	'3' (0x33)
[6]	'o' (0x6F)
[7]	'g' (0x67)
[8]	'7' (0x37)
[9]	'4' (0x34)
[10]	'i' (0x69)
[11]	'4' (0x34)
[12]	'p' (0x70)
[13]	'l' (0x31)
[14]	'i' (0x69)
[15]	'2' (0x32)
[16]	'i' (0x69)
[17]	'j' (0x6A)
[18]	'9' (0x39)
[19]	'6' (0x36)
[20]	'k' (0x6B)
[21]	'i' (0x69)
[22]	't' (0x74)

Рис. 2. Результат генерации ClientID из UIDw0, UIDw1, UIDw2

«0123456789abcdefghijklmnopqrstuv». Каждые 5 исходных бит кодируются 1-м символом. Из переменной ClientIDlow берется 60-бит для генерации первых 12 символов, а из переменной ClientIDhigh берется 55-бит для генерации оставшихся 11 символов;

3. Эта символьная последовательность используется для идентификации клиента при передаче по протоколу MQTT.

На рис. 2 показан результат выполнения программы процессором CPU2 при генерации символьной строки ClientID из уникальных идентификаторов процессоров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация в аппаратно-программном семантическом шлюзе UUID версии 1 по сравнению с применяемым в большинстве современных языков программирования UUID версии 4, основанном на 128-битном генераторе псевдослучайных чисел, имеет то преимущество, что в версии 1 часы обнуляются только в 2106 году.

Программное обеспечение аппаратно-программного семантического шлюза при обмене с устройствами MQTT server поддерживает версии протокола MQTT v3.1 (версия 3) и MQTT v3.1.1 (обозначается как версия 4). При развитии и внедрении аппаратно-программных семантических шлюзов необходимо обеспечить поддержку протокола MQTT v5.0, которая не поддерживает обратную совместимость версий (как v3.1.1 по отношению к v3.1). Одной из основных функциональных целей MQTT v5.0 являлось введение улучшений для крупномасштабных систем в отношении установления связи с тысячами и миллионами устройств.

Программное обеспечение семантического шлюза входит в состав разработанного программного пакета «Библиотека управляющих программ для устройств Semantic Gateway».

ЛИТЕРАТУРА

1. Радишевская, Т. А., Радишевский, В. А. Архитектурная модель слоя зондирования Промышленного Интернета Вещей / Т. А. Радишевская, В. А. Радишевский // Проблемы инфокоммуникаций. – 2021. – № 1 (13). – С. 69–75.
2. Q.3055: Signalling protocol for heterogeneous Internet of things gateways [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Q.3055-201912-I/en>. – Date of access: 29.01.2024.
3. Власенко, Л. А. Обзор гетерогенных и семантических шлюзов Интернета Вещей / Л. А. Власенко, В. А. Кулик, Р. В. Киричек // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Том 5. – № 3. – С. 30–37.
4. On the usage of the SSN ontology [Electronic resource]. – Mode of access: <http://w3c.github.io/sdw/ssn/>. – Date of access: 29.01.2024.
5. Половения, С. И., Радишевская, Т. А. Нейро-нечеткая модель детектирования аномалий в потоках телеметрии распределенных телекоммуникационных систем / С. И. Половения, Т. А. Радишевская // Веснік сувязі. – 2022. – № 2. – С. 50–55.
6. A Universally Unique Identifier (UUID) URN Namespace [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4122>. – Date of access: 15.01.2024.
7. MQTT Version 5.0. OASIS Standard [Electronic resource]. – Mode of access: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.pdf>. – Date of access: 15.01.2024.
8. UTF-8, a transformation format of ISO 10646 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3629>. – Date of access: 15.01.2024.

A semantic gateway for Industrial Internet of Things (IIoT) systems is presented, designed to connect the physical objects of traditional industries with IIoT applications and services. Currently, IIoT is faced with vertical proprietary systems that provide virtually no interoperability with each other. Ensuring the digitalization of traditional industries requires the provision of intelligent and scalable IIoT services to ensure communication between physical objects and their digital shadows without coordination centers, primarily for traditional and new industrial facilities being upgraded to the level of Industry 4.0. Such services should be able to serve physical sensors and interpret messages between IIoT things. The paper reports research on solving the IIoT application-layer interoperability problem using Semantic Gateway-as-a-Service (SGS), which circumvents the interoperability problem between different network protocols that are proposed by various organizations as a de facto standard for communication interoperability. The semantic gateway is implemented as a library of control programs for heterogeneous Edge/Sensing Gateways.

Keywords: digital shadow, universal unique resource identifier, client identifier