

**СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ
СИНХРОНИЗАЦИИ ДАННЫХ И ПРОЦЕССОВ
В СИСТЕМАХ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ НА УРОВНЕ
УСТРОЙСТВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ**

В.Б. Поляков, Н.В. Аксёнов, М.В. Сергеев

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

polyakov@psu.ru,

nikita.aksyonow@yandex.ru,

serg4@psu.ru

В статье рассматриваются средства обеспечения временной синхронизации для устройств интернет вещей и предлагается их классификация в зависимости от используемого источника синхронизации и способа доступа к нему. Приводятся основные характеристики и условия применения средств обеспечения временной синхронизации в системах интернет вещей уровня устройства.

Ключевые слова: системы, синхронизация, интернет вещей, часы, шкала времени, сети, классификация.

**THE MEANS OF PROVIDING TIME SYNCHRONIZATION
OF DATA AND PROCESSES IN THE INTERNET
OF THINGS AT THE LEVEL OF DEVICES
AND THEIR CLASSIFICATION**

V.B. Polyakov, N.V. Aksyonow, M.V. Sergeev

Perm State University, Perm

polyakov@psu.ru,

nikita.aksyonow@yandex.ru,

serg4@psu.ru

The article discusses the means of providing time synchronization for devices of the Internet of things and proposes their classification depending on the source of synchronization and the method of access to it. The main characteristics and conditions of application of means of providing time synchronization in the systems of Internet of things of the device level are given.

Key words: systems, synchronization, Internet of things, clock, time scale, networks, classification.

В парадигме IoT (*Internet of Things*) [1] рассматриваются вещи, под которыми понимают объекты физического пространства (физические вещи) или информационного пространства (виртуальные вещи), которые могут быть идентифицированы и интегрированы в коммуникационные сети. Физические вещи существуют в физическом пространстве и могут ощущаться, при-

водиться в действие и соединяться. Примерами физических вещей являются окружающая среда, промышленные роботы, товары, электрооборудование. Виртуальные вещи существуют в информационном пространстве, а следовательно, могут быть доступны, обработаны, сохранены. К виртуальным вещам относят, например, мультимедийный контент и прикладное программное обеспечение. Физическая вещь может быть представлена в информационном пространстве через одну или несколько виртуальных вещей (выполняется отображение физического пространства в информационное пространство), в то время как виртуальная вещь может существовать без какой-либо связанной с ней физической вещи. Вещи имеют связанную с ними информацию, которая может быть статической или динамической. Под временной синхронизацией будем понимать привязку изменения информации, связанной с физическими и с виртуальными вещами, с заданной точностью к единой шкале времени на разных устройствах, входящих в единую систему интернет вещей. Актуальность организации временной синхронизации в такой системе обусловлена, например, необходимостью отслеживания причинно-следственных связей в технологических процессах, возможностью построения правильной последовательности событий в распределённой системе, для организации доступа к общим разделяемым ресурсам (датчики, исполнительные устройства, системы обработки и системы хранения данных, средства коммуникации) и т.д. В связи с этим при проектировании распределённой информационной системы требуется решить задачу выбора средств обеспечения синхронизации и, соответственно, провести их анализ, обобщение и систематизацию. Решение данной задачи предлагается на основе оригинальной классификации, базирующейся на концепции интернет вещей.

В концепции интернет вещей с физическими вещами связаны устройства IoT, которые обязательно обладают возможностями передачи информации и опционально имеют датчики, исполнительные механизмы и опционально выполняют функции сбора, хранения и обработки информации. Устройства собирают различные виды информации и передают её в информационно-коммуникационные сети для дальнейшего использования. Некоторые устройства также выполняют операции на основе данных, полученных из информационно-коммуникационных сетей.

Доктрина IoT рассматривает взаимодействие одних устройств с другими (рис. 1): они обмениваются данными с использованием сети связи через шлюз (сценарий *a*), с использованием сети связи без шлюза (сценарий *b*) или напрямую, то есть без использования сети связи (сценарий *c*). Кроме того, возможны сочетания сценариев *a* и *c* и сценариев *b* и *c*; например, устройства могут обмениваться данными с другими устройствами, используя прямую связь через локальную сеть (т.е. сеть, обеспечивающую локальное соединение между устройствами и между устройствами и шлюзом, такую как

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

специальная сеть) (сценарий *c*), и далее обмениваться данными с использованием сети связи через шлюз локальной сети (сценарий *a*).

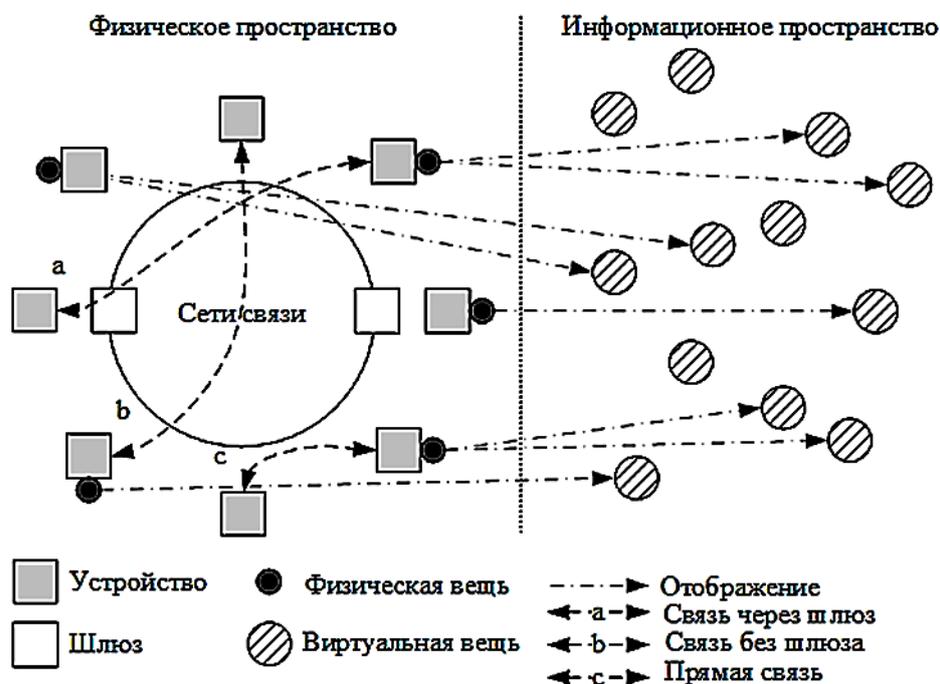


Рис. 1. Связи между объектами в IoT

Примечание: на рисунке показаны только взаимодействия, происходящие в физическом пространстве (связи между устройствами), взаимодействия также происходят в информационном пространстве (обмен между виртуальными вещами) и между физическим пространством и информационным пространством (обмен между физическими вещами и виртуальными вещами)

В структуре IoT важна синхронизация событий в виртуальном и физическом пространствах, поэтому изменение состояния вещи привязывается к шкале времени или к логическим часам. Шкалой времени будем считать упорядоченную последовательность значений времени, служащую исходной основой для измерений времени [2]. Наличие привязки к единой шкале времени позволяет соотнести время события в системе с другими событиями, которые наблюдаются в том числе и вне этой системы. Во многих случаях в распределённой системе для приложений IoT достаточно реализовать логические часы, т.е. часы, которые позволяют собрать правильную последовательность происходящих событий вне зависимости от времени, когда они произошли, — такой вариант системных часов далее не рассматривается.

В эталонной модели IoT выделяют четыре уровня абстракции (рис. 2): уровень устройства, уровень сети, уровень поддержки служб и приложений,

уровень приложений. В зависимости от решаемых задач механизмы синхронизации могут быть реализованы на каждом из этих уровней и обеспечиваются его возможностями. Средства синхронизации и их классификация, рассматриваемые в данной статье, относятся, прежде всего, к уровню устройства и обеспечиваются возможностями устройства или возможностями шлюза, а также возможностями организации сетей и возможностями транспортирования на уровне сети.

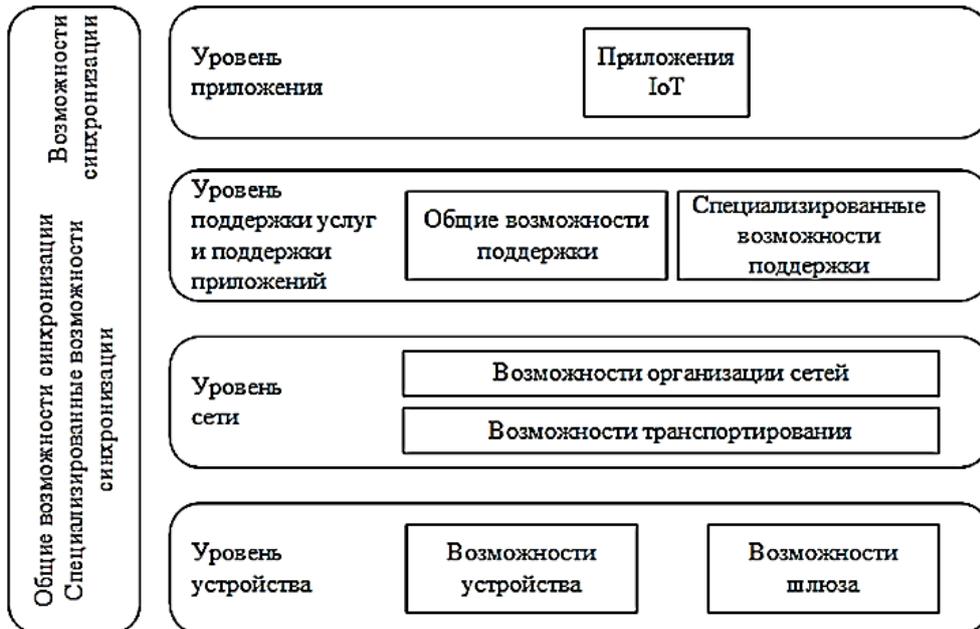


Рис. 2. Эталонная модель IoT и возможности синхронизации

Чтобы привязать информацию к единой шкале времени требуется все события в системе маркировать меткой времени. При организации временной синхронизации на уровне устройства данная функция может быть возложена на устройство IoT либо может быть перенесена на шлюз. Для поддержания временной синхронизации с заданной точностью на устройствах IoT необходима согласованность часов на всех устройствах системы, которая может выполняться: средствами самого устройства IoT, например, от системного тактового генератора, через специализированные приёмники хронометрического сигнала и т.д.; через сетевой интерфейс, например, Ethernet, Wi-Fi и т.д.; при организации прямой связи возможна синхронизация через интерфейс подключения, например, RS-232, USB, Bluetooth и т.д. Таким образом, можно классифицировать средства обеспечения синхронизации устройств IoT по месту расположения источника (генератора) синхросигнала и способу доступа к нему (рис. 3):

- внутренняя синхронизация — источник синхронизации внутри устройства IoT;
- внешняя синхронизация — источник синхронизации вне устройства IoT.
При внешней синхронизации доступ к источнику синхросигнала осуществляется через имеющиеся на устройстве интерфейсы, что позволяет выделить:
 - внешнюю сетевую синхронизацию — источник синхронизации находится в инфраструктуре сети связи, к которой подключается IoT устройство через сетевой интерфейс (рис. 1, сценарий *b*);
 - внешнюю шлюзовую синхронизацию — источник синхронизации находится на шлюзе (рис. 1, сценарий *a*);
 - внешнюю прямую синхронизацию — источник синхронизации доступен через интерфейс, с помощью которого выполнена прямая связь и обеспечивается не только привязка ко времени, но и выполняется обмен данными, которые используются в системе IoT (рис. 1, сценарий *c*);
 - внешнюю выделенную синхронизацию — источник синхронизации доступен через специальный интерфейс, который принимает только хронометрический сигнал, либо хронометрический сигнал является сопутствующим другого рода информации.

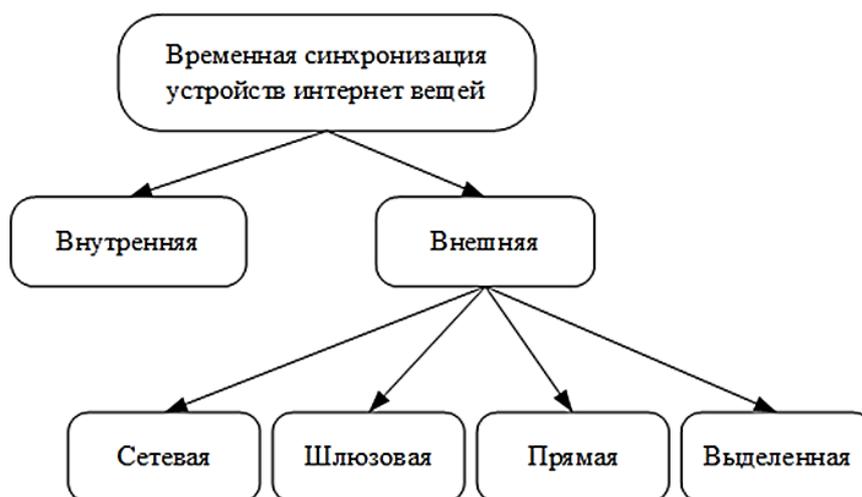


Рис. 3. Классификация способов синхронизации устройств интернет вещей

Устройства интернет вещей с *внутренней синхронизацией* могут выступать сами как источники синхросигналов для других элементов системы либо в автономном режиме (в моменты отсутствия взаимодействия с системой) могут сопоставить различные события с системным временем. Наиболее простой и дешёвый вариант часов устройства, синхронизированных с какой-либо шкалой времени, может быть реализован на его *тактовом генераторе*

программными средствами. Если частота такого генератора высокая, то требуется её предварительное деление, чтобы снизить нагрузку на процессор. Для этого могут использоваться, например, специализированные интегральные микросхемы (ИМС) — таймеры в режиме деления частоты. Достоинства таких часов — это возможность программного изменения алгоритма часов и оптимизация его под конкретную прикладную задачу. Синхронизация часов может выполняться, например, при инициализации системы или в моменты доступа к устройству IoT автоматически или в ручном режиме.

Альтернативой программным часам является использование специализированных интегральных микросхем (ИМС): *часы реального времени* (ЧРВ) или микроконтроллер с интегрированным блоком ЧРВ. В этом случае аппаратными средствами реализуются счётчики секунд (в некоторых ИМС доступно разрешение до долей секунды), минут, часов, дней, месяцев и лет, может учитываться високосный год или нет и выполняться переход на зимнее/летнее время. В ЧРВ часто используется тактовый генератор на кварцевом резонаторе, что позволяет достигать относительной точности таких часов 10^{-6} . Кроме того, ЧРВ часто используют резервный источник питания в виде аккумулятора, батареи или ионистора, позволяющий работать ЧРВ даже при отключении основного источника питания на продолжительное время. Ещё одно преимущество аппаратных ЧРВ — возможность освобождения ресурсов центрального процессора для выполнения критичных по времени задач. Как разновидность аппаратных ЧРВ может рассматриваться вариант, у которого частота питающей сети используется в качестве опорной [3, 4]. Точность таких часов определяется нормами качества электроэнергии электрической сети. В России в соответствии с [5] для сети 50 Гц отклонение частоты в синхронизированных (не синхронизированных) системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2$ (± 1) Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ (± 5) Гц в течение 100% времени интервала в одну неделю. Такой вариант может быть востребован, когда в системе требуются одновременно временная синхронизация и согласованность событий с напряжением питающей сети.

При организации *внешней сетевой синхронизации* используется сетевой интерфейс для подключения к инфраструктуре Интернет. Источником синхронизации в этом случае могут служить часы, доступные в сети связи. В сети Интернет для синхронизации часто используют протокол NTP (*Network Time Protocol*). NTP работает поверх UDP (*User Datagram Protocol*) и использует алгоритм Марзулло (*Marzullo*), который учитывает время передачи сообщения по сети. С 2015 года доступна версия 4 этого протокола — NTPv4 [6]. NTP-серверы (или тайм-серверы) в сети Интернет организованы в иерархическую структуру, в которой каждый из серверов принадлежит определённому слою. Серверы первого слоя (*Stratum 1*) имеют доступ к национальным службам точного времени, вторичные серверы синхрони-

зируются с первичными серверами и т.д. Доступ к NTP-серверам может быть реализован в разных вариантах: в симметричном виде; как клиент-сервер; в режиме приёма широковещательных пакетов. Протокол NTPv4 устойчиво работает на сетях с переменной задержкой передачи данных. NTP позволяет учесть время задержки передачи пакета по сети связи и на практике достигает точности синхронизации часов через Интернет до нескольких десятков миллисекунд и лучше, а внутри локальных сетей — до порядка 0,1 мс. Одно устройство может иметь доступ к нескольким серверам NTP, что позволяет повысить надёжность службы синхронизации системы в целом.

В сети Интернет доступны публичные тайм-серверы, с которыми можно синхронизировать систему IoT. Среди них имеются сертифицированные тайм-серверы первого уровня, которые синхронизируются от сигналов рабочих шкал Государственного первичного эталона времени, частоты и национальной шкалы времени Российской Федерации (ntp1.vniiftri.ru, ntp2.vniiftri.ru, ntp3.vniiftri.ru, ntp4.vniiftri.ru) и которые синхронизируются от сигналов вторичных эталонов (ntp1.vniiftri.irkutsk.ru, ntp2.vniiftri.irkutsk.ru, vniiftri1.khv.ru, vniiftri2.khv.ru).

В случаях, когда использование протокола NTPv4 в полном объёме нецелесообразно, можно применить упрощённую версию данного протокола — SNTPv4 (*Simple Network Time Protocol*) [7]. Реализация протокола SNTP оправдана в устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами или недостаточным объёмом памяти, например, в микроконтроллерах или во встраиваемых системах. Клиент SNTP совместим с NTP-сервером по протоколам обмена и форматам данных.

Ещё один протокол, который специально разрабатывался для синхронизации часов в узлах сети и может быть востребован в системах IoT — PTP (*Precision Time Protocol*). Существуют две версии этого протокола: PTPv1 (IEEE 1588-2002) и PTPv2 (IEEE 1588-2008). Данные версии протоколов напрямую несовместимы, так как имеют разный формат сообщений [8]. Поддержка протокола PTPv2 может быть реализована на программном, программно-аппаратном или аппаратном уровнях в сетях связи, использующих различные технологии пакетной передачи данных. Для устройств IoT большой интерес представляет PTP инкапсулированный в UDP/IPv4 или UDP/IPv6 поверх IEEE 802.3 (Ethernet). Для Ethernet сетей с аппаратной поддержкой PTP точность синхронизации может достигать значений порядка 1 нс [9]. В системе могут использоваться несколько серверов с эталонными часами, от которых происходит синхронизация по PTP, выбор ведущих часов, от которых происходит синхронизация в текущий момент, определяется специальным алгоритмом — *Best Master Clock Algorithm* (BMCA). При ухудшении точности ведущих часов или пропадании с ними связи происходит синхронизация с доступными часами, имеющими наименьшую погреш-

ность или следующими по приоритету в соответствии с настройками системы. Наличие в системе нескольких PTP-серверов повышает надёжность системы в целом. При назначении нового ведущего сервера время на восстановление синхронизации составляет менее 1 минуты. Многие производители ИМС (*Intel, Micrel, STMicroelectronics, Texas Instruments* и др.) предлагают аппаратную поддержку протокола IEEE 1588-2008. Данный протокол находит применение в сотовых сетях связи LTE (*Long-Term Evolution*) для синхронизации базовых станций (БС), на электрических подстанциях для синхронизации энергоустановок и в других приложениях.

Технология SyncE (*Synchronised Ethernet*) основана на принципах синхронизации, используемых в сетях SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) [10–12], и при использовании совместно, например, с PTP может быть востребована для высокоточной синхронизации шкалы времени в системах интернет вещей.

Кроме рассмотренных специализированных протоколов синхронизации времени, в сетях связи могут использоваться и другие протоколы, например, SNMP (*Simple Network Management Protocol*), HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*) и т.д., через которые можно получить доступ к сетевым ресурсам с источниками времени. Однако при этом надо учитывать, что эти протоколы не компенсируют задержки, возникающие при передаче пакетов в сети, имеют зависимость от скорости обработки запросов и т.п., что ограничивает область их возможного применения.

Для внешней сетевой синхронизации возможно использование беспроводных сетей доступа, таких как Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX и т.д., которые для многих приложений интернет вещей могут обеспечить необходимую точность временной синхронизации.

Внешняя шлюзовая синхронизация на уровне устройства интернет вещей предполагает в архитектуре системы наличие сетевого шлюза, возможности которого могут использоваться для синхронизации подключаемых к нему устройств. На шлюзе происходит конвертация одной физической среды передачи данных в другую и/или изменяются протоколы передачи данных. Доступная точность и возможности синхронизации при подключении через шлюз будут зависеть от такого преобразования и используемых средств организации взаимодействия между подключаемыми устройствами и шлюзом. Применение шлюзов с различными способами преобразования коммуникационной среды позволяет реализовать разнообразные технологии временной синхронизации, оптимизировав их под конкретные задачи и подключаемые устройства. При использовании, например, энергоэффективных беспроводных сетей дальнего радиуса действия *Low-power Wide-area Network* (LPWAN), может быть целесообразно функцию временной маркировки событий и данных реализовать на шлюзе, а не на подключаемых к нему устройствах, что позволит снизить стоимость устройств, подключаемых через шлюз.

При *внешней прямой синхронизации* организуется непосредственное подключение устройства интернет вещей с устройством, которое является для него источником хронометрической информации. При этом интерфейс подключения может использоваться не только для установления синхронизма, но и для обмена данными с системой интернет вещей. Данный тип подключения может быть реализован на различных интерфейсах: RS-232, RS-485, USB (*Universal Serial Bus*), Bluetooth и т.д. Ошибка синхронизации зависит от конкретной реализации и может достигать порядка нескольких секунд и выше.

К *внешней выделенной синхронизации* можно отнести случай, когда источник синхронизации подключается через специальный интерфейс, по которому устройство интернет вещей принимает хронометрическую информацию. Это может быть, например, сигнал от Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), широковещательного радио- или телепередатчика, специального устройства, имеющего в своём составе прецизионный источник времени. Кроме интерфейса для синхронизации, на устройстве должен быть предусмотрен другой интерфейс для обмена данными с системой интернет вещей. Данный способ синхронизации позволяет даже при потере связи с системой интернет вещей иметь синхронизированные устройства.

Во многих системах используют хронометрический сигнал, закодированный в формате IRIG (*Inter Range Instrumentation Group*) [13], он может быть модулированный или немодулированный, могут использоваться различные физические среды передачи данных: коаксиальный кабель 50 Ом, симметричная витая пара, оптоволоконный кабель, экранированный кабель. На приёмной стороне хронометрический сигнал декодируется и из него выделяется информация о времени, служебная информация (синхроимпульсы, управляющие битовые последовательности). Для приложений, например, в энергетике на подобных принципах был разработан стандарт IEEE 1344 [14], на основе которого в 2005 году был принят стандарт IEEE C37.118, а в 2011 — IEEE C37.118.1.

Синхронизация фазы (начала отсчёта) с помощью сигнала 1 PPS (*Pulse Per Second*), который представляет собой прямоугольный импульс частотой 1 Гц, нарастающий или спадающий фронт которого соответствует началу секунды, но не несёт информации о времени, может применяться для временной синхронизации устройств интернет вещей совместно с другими источниками абсолютного времени, но не обеспечивающими требуемой точности синхронизации. Точность синхронизации по такому импульсу, без учёта задержек в физическом канале, может достигать 1 нс. В качестве дополнительного канала, несущего информацию о времени, может использоваться как вариант последовательный интерфейс, передающий метку

времени в формате ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Совместное использование, например, интерфейсов 1 PPS и UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) часто применяется в приёмниках сигналов ГНСС при выделении хронометрической информации.

ГНСС — один из наиболее доступных и востребованных источников точного времени в настоящее время. На спутниках, входящих в группировку ГНСС, находятся атомные часы, которые синхронизированы со шкалой Всемирного координированного времени UTC (*Coordinated Universal Time*). Расхождение между шкалой системного времени ГЛОНАСС и UTC(SU) не превышает ± 1 мс. Погрешность привязки шкалы системного времени ГЛОНАСС к шкале UTC(SU) не превышает ± 1 мкс [15]. Декодировав сигнал со спутника, приёмник ГНСС может сформировать периодический сигнал, например 1 PPS, и соответствующую ему метку времени. Широко доступны приёмники сигналов ГНСС, которые соответствуют стандартам NMEA 0183, NMEA 2000 или NMEA OneNet и оптимизированы для работы с интерфейсами RS-232, CAN, Ethernet соответственно. Приёмники сигналов ГНСС, кроме сигналов синхронизации, позволяют формировать метаданные, например, о географических координатах местоположения, направлении и скорости движения объекта с приёмником, что бывает часто востребовано в приложениях IoT.

В качестве альтернативного источника для коррекции часов с автоматической подстройкой можно использовать *радиопередатчики точного времени и частоты*. Имеется ансамбль передатчиков эталонных сигналов частоты и времени (ЭСЧВ), охватывающих территорию Российской Федерации, которые используют национальную шкалу координированного времени UTC(SU) [16]. Допустимое расхождение среднесуточного значения временного положения меток шкалы времени ЭСЧВ, излучаемых антеннами радиостанций РВМ (RWM, месторасположение передатчика — Москва, несущие частоты передатчика — 4996, 9996 и 14996 кГц), РБУ (RBU, Москва, 66,(6) кГц), РТЗ (RTZ, Иркутск, 50 кГц), относительно UTC(SU) не превышает ± 10 мкс, радиостанций РАБ-99 (РАВ-99, Хабаровск, 25,0; 25,1; 25,5; 23,0; 20,5 кГц), РЙХ-63 (RJH-63, Краснодар, 25,0; 25,1; 25,5; 23,0; 20,5 кГц), РЙХ-69 (RJH-69, Молодечно, 25,0; 25,1; 25,5; 23,0; 20,5 кГц), РЙХ-77 (RJH-77, Архангельск, 25,0; 25,1; 25,5; 23,0; 20,5 кГц), РЙХ-86 (RJH-86, Бишкек, 25,0; 25,1; 25,5; 23,0; 20,5 кГц), РЙХ-90 (RJH-90, Нижний Новгород, 25,0; 25,1; 25,5; 23,0; 20,5 кГц), РНС-Е(А) (Брянск, 100 кГц), РНС-Е(Д) (Сызрань, 100 кГц), РНС-В(А) (Александровск-Сахалинский, 100 кГц) — ± 5 мкс. Подобные передатчики существуют во многих странах. Среди европейских радиопередатчиков известен, например,

DCF77 (аббревиатура обозначает: D — Deutschland (Германия); C — передатчик в длинноволновом диапазоне; F — местонахождение передатчика в окрестностях города Франкфурт-на-Майне (Майнфлинген); 77 — несущая частота передатчика 77,5 кГц), который обслуживает Национальный институт метрологии ФРГ — *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB). Часы DCF77 синхронизированы со шкалой времени UTC(PTB). Информация о времени в сигнале DCF77 передаётся с использованием как амплитудной модуляции (АМ), так и фазовой модуляции (ФМ) несущей. Привязка к часам UTC(PTB) приложений, использующих АМ, может достигать погрешности не хуже 1 мс, а при использовании ФМ — погрешности порядка 10 мкс [17]. В хронометрических сообщениях DCF77 передаются средневропейское время *Central European Time* (CET = UTC + 1) или средневропейское летнее время *Central European Summer Time* (CEST = UTC + 2) и дата. Кроме хронометрической информации, данный радиопередатчик транслирует метеорологические данные. Сервисы радиопередатчика DCF77 доступны для Западной Европы, а также в европейской части Российской Федерации, с учётом того, что зона уверенного приёма сигнала передатчика ограничивается максимальным расстоянием между передатчиком и потребителем от 1900 км (днём) до 2100 км (ночью).

Сигналы *цифрового телевидения*, соответствующие стандартам DVB (*Digital Video Broadcasting*) [18], также могут содержать метаданные, связанные с какой-либо шкалой времени, что позволяет использовать их в распределённых системах для синхронизации процессов и данных.

Для внешней синхронизации *проводные* или *беспроводные* способы доставки синхросигнала могут выступать как дополнительный критерий в предлагаемой выше классификации. Минимизация затрат на развёртывание и эксплуатацию системы, требование к мобильности устройств интернет вещей вызывают большой интерес к беспроводным технологиям. При очевидных достоинствах беспроводные способы доставки хронометрических сигналов имеют недостатки, к которым могут быть критичны приложения интернет вещей, в том числе и с точки зрения организации синхронизации: влияние погодных условий на надёжность доставки сигнала; подверженность влиянию электромагнитных помех; доступность среды распространения сигнала для дискредитации передаваемых данных, возможность обеспечить условия приёма и т.д.

В таблице 1 приведено сравнение способов временной синхронизации устройств интернет вещей и рекомендации по их применению в распределённых информационных системах.

Таблица 1

Сравнение способов временной синхронизации устройств интернет вещей и рекомендации по их применению

Тип временной синхронизации	Достоинства	Недостатки	Рекомендации по применению
Внутренняя	Простота реализации. Не зависит от внешних источников синхронизации. Оптимизация часов под приложение	Невысокая точность синхронизации	Энергоэффективные и недорогие устройства IoT. Мобильные устройства
Внешняя сетевая	Разнообразие протоколов и источников синхронизации. Возможно построение распределённых структур с высокой точностью синхронизации. Доступно несколько источников синхронизации в сетевой инфраструктуре	Для синхронизации необходима поддержка соответствующей сетевой инфраструктуры (серверы, транспортные сети, обеспечивающие требуемую точность)	Устройства IoT с высокой точностью синхронизации, большим объёмом трафика и возможностью резервирования источников синхронизации
Внешняя шлюзовая	Возможность объединения устройств IoT, использующих разные технологии синхронизации в одну распределённую систему через шлюзы	В системе должен быть шлюз. Необходимо синхронизировать шлюз	Энергоэффективные и недорогие устройства IoT. Мобильные устройства IoT
Внешняя прямая	Простота реализации	Невысокая точность синхронизации	Устройства IoT, не требующие временной синхронизации или с невысокой точностью синхронизации
Внешняя выделенная	Высокая точность синхронизации	Требуется специальный интерфейс для источника синхронизации	Устройства IoT с независимой от сетей связи синхронизацией. Основной или резервный источник синхронизации для системы IoT. Системы IoT с высокой точностью синхронизации

В реальных системах на устройствах IoT могут использоваться комбинированные источники синхронизации: внутренняя синхронизация от ЧРВ и внешняя сетевая синхронизация; внешняя сетевая синхронизация и внешняя выделенная синхронизация и т.д. Использование сочетаний источников синхронизации позволяет повысить безопасность системы, обеспечить её устойчивость к воздействию различных негативных факторов.

Рассматривая систему временной синхронизации для систем интернет вещей также необходимо учитывать, какие приложения будут реализованы в данной системе. В некоторых случаях будет полезно использовать источники синхронизации, которые позволяют получить дополнительную информацию. Например, приёмник сигналов ГНСС, кроме хронометрической информации, может определять местоположение объекта, сигнал DCF77 содержит дополнительно метеорологические данные и т.д.

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что в распределённых системах для устройств интернет вещей решение задачи временной синхронизации может быть сведено к выбору местонахождения источника синхронизации и средств доступа к нему. В представленном обзоре рассмотрены средства синхронизации, их основные характеристики, которые могут быть использованы в системах интернет вещей. Для обеспечения максимальной точности и надёжности временной синхронизации следует использовать внешнюю сетевую синхронизацию, основанную на принципах IEEE 1588-2008 и SyncE, и внешнюю выделенную синхронизацию, если инфраструктура сети не может обеспечить требования данных технологий. Для случаев, когда требуется минимизировать стоимость развёртывания системы интернет вещей и требования к точности временной синхронизации не столь высоки, можно ограничиться внутренней синхронизацией либо внешней шлюзовой синхронизацией.

Предлагаемая классификация способов временной синхронизации устройств ориентирована на архитектуру интернет вещей и может быть востребована при рассмотрении средств обеспечения синхронизации в распределённых структурах, разработке устройств интернет вещей и для других целей. Для системы интернет вещей предложенная классификация охватывает только уровень устройства эталонной модели IoT. Рассмотрение возможностей уровня сети, уровня поддержки служб и приложений, уровня приложений требует дополнительного изучения и должно быть согласовано с предложенной классификацией.

Литература

1. Recommendation ITU-T Y.2060 Overview of the Internet of things. Geneva: International Telecommunication Union, 2013. 32 p.
2. ГОСТ 8.567—2014 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения времени и частоты. Термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2014. 11 с.

3. DS1375 Power Line to 60Hz Clock. Sunnyvale. CA: Maxim Integrated Products, 2003. 2 p.
4. I2C Digital Input RTC with Alarm. Sunnyvale. CA: Maxim Integrated Products, 2008. 13 p.
5. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 18 с.
6. RFC 5905. Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification. IETF, 2010. 110 p.
7. RFC 4330. Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4 for IPv4, IPv6 and OSI. IETF, 2006. 27 p.
8. Weibel Hans Technology Update on IEEE 1588: The Second Edition of the High Precision Clock Synchronization Protocol. Zurich: Zurich University of Applied Sciences, 2009. 8 p.
9. AN-1728 IEEE 1588 Precision Time Protocol Time Synchronization Performance. Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated, 2013. 10 p.
10. Recommendation ITU-T G.8261/Y.1361 Timing and synchronization aspects in packet networks. Geneva: International Telecommunication Union, 2013. 116 p.
11. Recommendation ITU-T G.8262/Y.1362 Timing characteristics of synchronous equipment slave clock. Geneva: International Telecommunication Union, 2018. 44 p.
12. Recommendation ITU-T G.8264/Y.1364 Distribution of timing information through packet networks. Geneva: International Telecommunication Union, 2017. 42 p.
13. IRIG Standard 200-04 IRIG Serial Time Code Formats // Secretariat Range Commanders Council U.S. Army White Sands Missile Range. New Mexico: Secretariat Range Commanders Council U.S. Army White Sands Missile Range, 1998. 52 p.
14. IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2001. 36 p.
15. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. (редакция 5.1). М: Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, 2008. 74 с.
16. Эталонные сигналы частоты и времени. Москва: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. 32 с.
17. Piester D. et al. Time and frequency broadcast with DCF77 // Proc. 43rd Annual Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, 14–17 Nov 2011. Long Beach, California, USA, 2011. P. 185–196.
18. Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems Technical Report. 2014. 174 p.