

# Метод синхронизации в гетерогенных сетях связи с высокой плотностью устройств с ограниченными вычислительными ресурсами

Н.В. Чикалов, К.З. Билятдинов

**Аннотация** – представлено методологическое решение по совершенствованию технологии синхронизации времени в гетерогенных сетях связи с повышенной плотностью маломощных устройств с ограниченными вычислительными ресурсами.

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что современные сети связи все больше становятся гетерогенными и могут содержать большое количество маломощных устройств, которым также необходима синхронизация, как и классическим сетям связи. Не все маломощные устройства могут содержать Ethernet порты для получения временных меток через PTP, поэтому необходимо рассмотреть новые возможности распределения единого точного времени. Будущие гетерогенные сети связи с высокой плотностью маломощных устройств нуждаются в решениях, которые смогут обеспечить синхронную и согласованную работу при минимальных вычислительных затратах, что особенно важно для повышения эффективности функционирования будущих сетей связи в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Авторами предлагается метод распределения информации о едином точном времени в гетерогенных сетях связи с повышенной плотностью устройств при помощи интерфейса CAN.

**Основные положительные эффекты:**

- 1) Разработка нового решения для синхронизации в гетерогенных сетях связи с повышенной плотностью маломощных устройств;
- 2) Снижение затрат на реализацию функционала синхронизации в таких сетях за счет исключения оборудования, которое может излишне усложнить конечное устройство;
- 3) Повышение качества функционирования гетерогенных сетей связи с высокой плотностью маломощных устройств в реальном времени.

**Ключевые слова** — гетерогенные сети связи, единое точное время, PTP, CAN, GPS, высокая плотность устройств.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Технологии синхронизации времени обеспечивают общее представление о едином точном времени среди

всех узлов гетерогенных сетей связи с высокой плотностью маломощных устройств.

Известный метод синхронизации IEEE 1588 Precision Time Protocol (PTP) используется для синхронизации различных устройств [1,2,3]. Однако мы должны учитывать, что в гетерогенных сетях с высокой плотностью устройств не все узлы связи могут иметь Ethernet-канал для получения информации о едином точном времени по PTP, так как [4,5]:

- 1) современные сети состоят из подсетей с различными контроллерами, которые имеют свои протоколы связи;
- 2) Реализация Ethernet-канала на конечном узле связи не всегда целесообразна, поскольку требования к вычислительной мощности целевого контроллера становятся выше, чем те, которые требуются для выполнения конкретной задачи;
- 3) Ethernet-соединение дороже в построении, так как требует специального оборудования (коммутаторы, маршрутизаторы) для подключения большого числа конечных узлов связи;
- 4) Некоторые контроллеры просто не имеют возможности подключения по Ethernet.

Поэтому актуальность темы настоящего исследования будет в первую очередь находиться в предметной области совершенствования методов синхронизации в гетерогенных сетях связи с высокой плотностью устройств в условиях ограниченных вычислительных ресурсов в интересах повышения требуемой эффективности устойчивого функционирования большого числа устройств в гетерогенных сетях связи.

## II. ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Актуальность темы исследования предопределяет необходимость рассмотрения новых интерфейсов синхронизации для распределения знания о точном едином времени среди всех узлов гетерогенных сетей связи с высокой плотностью устройств.

Особенностью современных и будущих сетей связи является непрерывное увеличение количества конечных устройств. Следовательно, решение проблемы синхронизации времени становится одной из ключевых задач для обеспечения скоординированной работы множества маломощных устройств в реальном времени.

Один из широко распространенных методов, существующий в настоящее время – Precision Time Protocol (PTP), определенный стандартом IEEE 1588. Данный протокол применяется для распределения единого точного времени в сетях, которые поддерживают Ethernet. PTP является международным

Статья получена 30 октября 2024 г.

Н.В. Чикалов, старший инженер-программист АО «НИИ «Рубин» (n.v.chikalov@rubin-spb.ru)

К.З. Билятдинов, к.в.н., д.т.н. профессор кафедры системного анализа и управления Государственного университета «Дубна» (k.bilyatdinov@mashtab.org)

стандартом для точной синхронизации часов, используемых в различных приложениях, таких как телекоммуникации, локальные вычисления и распределенные системы. Благодаря этому стандарту пакеты, содержащие информацию о синхронизации времени, обеспечивается точная синхронизация времени (<1 мкс) для различных устройств, имеющих порт Ethernet. IEEE 1588 определяет несколько функций для синхронизации времени: они включают алгоритм выбора ведущих, который выбирает главные часы в структуре ведущий-ведомый, и метод, который вычисляет задержку и смещение для синхронизации ведомых узлов с часами ведущего. Стандарт также определяет ряд мер на случай отказа устройства, выбранного в качестве ведущего.

Развитие сетей связи неизбежно приводит к необходимости усложнения систем синхронизации, в том числе к созданию новых систем частотно-временного обеспечения (ЧВО).

Современные системы частотно-временного обеспечения должны не только обеспечивать частотную, фазовую и временную синхронизации, но и в значительной части повышать точность передачи частоты, иметь межпротокольное взаимодействие для функционирования в гетерогенных сетях [6,7].

Однако в будущих гетерогенных сетях связи с высокой плотностью маломощных устройств необходимо рассматривать новые методы синхронизации, так как реализация PTP на каждом конечном узле может быть не всегда целесообразна, о чем говорилось выше.

Технологических решений, которые представлены на рынке, уже не хватает для задач, поставленных перед перспективными сетями связи. Поэтому ведется активная работа как по разработке новых стандартов ITU-T для систем синхронизации и систем ЧВО, так и нового технологического оборудования, которое будет в состоянии удовлетворить растущие потребности будущих сетей связи. Все ведущие производители оборудования для синхронизации сетей связи вкладывают значительные средства и время в освоение устройств ЧВО нового поколения, создавая фундамент для перехода сетей связи на совершенно иной качественный (повышенная точность) и количественный (высокая плотность устройств) технологический уровень.

Отечественный рынок уже имеет некоторые успехи в создании отечественных систем «классической синхронизации» и данные разработки могут быть использованы для внедрения новых технологий при разработке систем ЧВО. Однако для этого требуется пересмотр и обновление, как нормативных документов, так и подходов к разработке устройств ЧВО.

Задача данного исследования заключается в разработке нового метода синхронизации времени для гетерогенных сетей связи с высокой плотностью устройств, где не все узлы могут иметь доступ к Ethernet-каналам. При этом синхронизация времени должна быть выполнена с минимальными затратами вычислительных ресурсов и без значительных финансовых и технических вложений.

### III. МЕТОДИКА СИНХРОНИЗАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ УСТРОЙСТВ

Принципы работы протокола PTP и его практическое применение в сетях связи уже многократно были рассмотрены в других работах, поэтому в дальнейшем мы не будем подробно останавливаться на данном вопросе, но повторим, что PTP является основным протоколом для построения современных высокоточных сетей связи и фундаментом для будущих работ в области совершенствования систем ЧВО. Информация о текущем времени хранится в PTP (рисунок 1) в двух частях: секунды (кол-во с начала эпохи) и наносекунды (дробная часть текущей секунды). Само поле метки времени занимает 10 байт: 6 байт для секунд и 4 байта для наносекунд.



Рисунок 1 – формат хранимого времени в PTP

48 битное поле секунд в кадре PTP позволяет хранить около 281 триллиона секунд. Это означает, что от момента начала эпохи Unix пройдет около 8.9 млн. лет, прежде чем ресурсы PTP будут исчерпаны.

Учитывая озвученную выше проблему синхронизации маломощных устройств, авторами предлагается использование протокола CAN для распределения знания о точном времени в подсетях гетерогенных сетей.

Возможны несколько подходов для синхронизации подсетей в гетерогенных сетях связи с повышенной плотностью устройств:

- 1) Разработка конвертера PTP-CAN;
- 2) Разработка мастер - устройства, имеющего в своем составе шину CAN.

Второй подход более продуманный, так как:

- 1) позволит иметь в своем составе резервные источники синхронизации (GNSS, GPS, входы для внешних источников синхронизации);
- 2) При использовании конвертера существует возможность возникновения асимметричных задержек, которые могут носить недетерминированный характер.

Предлагаемый формат кадра CAN для передачи единого точного времени представлен на рисунке 2:

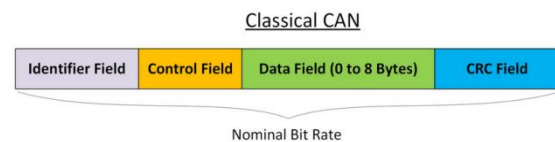


Рисунок 2 – формат кадра CAN.

При переводе в формат CAN – ресурсов хватит на 136 лет.

В настоящее время существует интерфейс CAN FD, отличающийся от CAN расширенным полем данных – до 64 байт, что позволяет существенно увеличить ресурсы протокола для передачи единого точного времени (6 байт). Также появляется возможность выделить для дробного поля не 4 байт, а 5 байт, что может способствовать повышению точности

перспективных систем ЧВО. На рисунке 3 представлен формат кадра CAN FD.

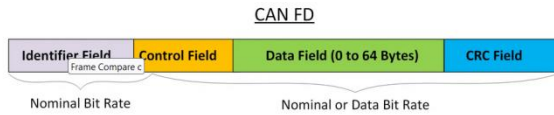


Рисунок 3 – формат кадра CAN FD

В отличие от Ethernet-канала, который использует соединение 1:1, интерфейсы CAN и CAN FD основаны на шинной топологии, что позволяет легко применять широкополосную передачу сигналов синхронизации. При коротких линиях связи можно не учитывать время распространения сигнала по линии связи (при низких требованиях к точности). Такая односторонняя синхронизация широкополосным способом упрощает распределение знания о едином точном времени, хотя ошибка синхронизации и увеличивается по мере увеличения длины шины. На рисунке 4 представлен метод синхронизации:

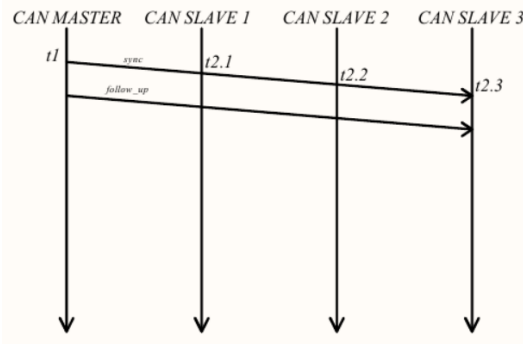


Рисунок 4 – метод синхронизации

Для повышения точности возможно модифицировать предлагаемый метод, при котором учитывается время задержки до первого ведомого. Для остальных ведомых время задержки аппроксимируется. Пример представлен на рисунке 4:

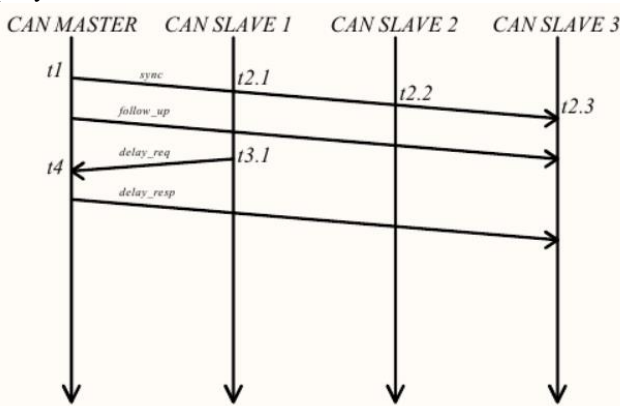


Рисунок 5 – первый модифицированный метод синхронизации

При повышенных требованиях к точности установки единого времени, возможно рассчитать конкретное время задержки до каждого ведущего. Чтобы избежать коллизий на линии, необходимо

назначить разные идентификаторы CAN для каждого устройства, но это приведет к увеличению времени синхронизации. На рисунке 5 представлен второй модифицированный метод расчета задержки для каждого ведомого:

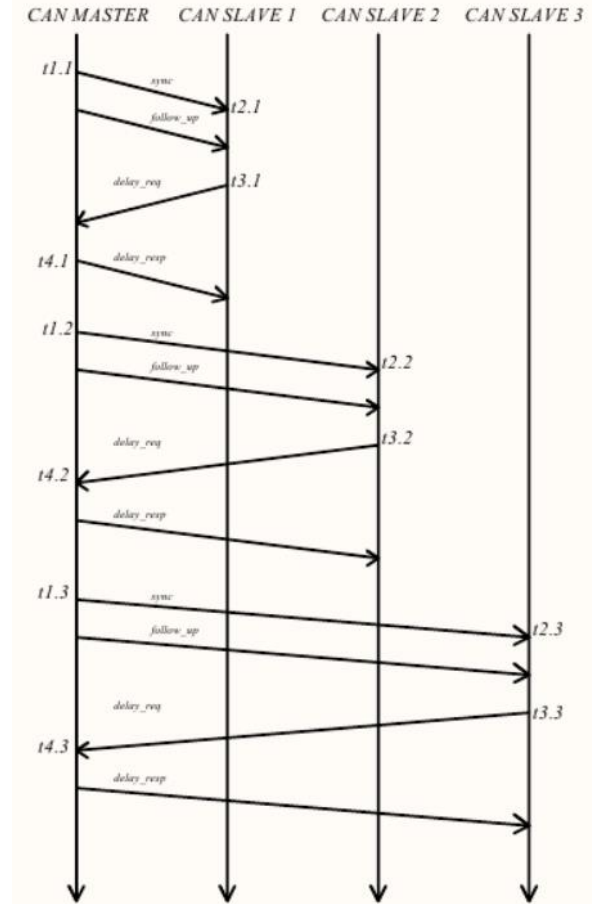


Рисунок 6 – второй модифицированный метод синхронизации

Выбор метода синхронизации и желаемой точности зависит от целевой задачи и необходимой достижимой точности.

Для расчета задержки воспользуемся формулами, аналогичными формулам при расчете РТР:

$$\text{Задержка} = \frac{(T4 - T3) + (T2 - T1)}{2} \quad (1)$$

Предварительная оценка предлагаемого метода показала достижение точности установки единого времени на ведомых устройствах от 5 мкс до 10 мкс.

Также стоит отметить, что в настоящее время ведутся работы по внедрению нового стандарта CAN XL, который имеет расширенное поле данных (что позволит более качественно совместить предлагаемый метод с Ethernet-сетями) и повышенную скорость передачи информации (10 Мбит/с и более).

#### IV. ОБЛАСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Метод синхронизации в гетерогенных сетях связи, предлагаемый авторами, может найти применение в:

- 1) **В автомобильных системах и сетях связи**, где CAN стал стандартом де-факто для передачи данных между различными электронными блоками управления;
- 2) **В промышленных системах управления** для связи между контроллерами и датчиками на производстве. Он обеспечивает надежную передачу данных в реальном времени, что необходимо для качественного контроля технологических процессов.
- 3) **В медицинских системах и сетях связи** для обмена данными о синхронизации между различными модулями;
- 4) **В энергетических системах**, таких как SCADA и smart grid;
- 5) **В киберфизических системах**, к которым относится в том числе и беспилотный транспорт..

#### V. КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ

В заключении необходимо отметить ряд ограничений применимости предлагаемого метода:

- 1) Максимум устройств для синхронизации на одной шине – 127 штук (но на практике разработчики стараются использовать не более 30-60 узлов на шину, чтобы избежать проблем с производительностью);
- 2) Низкая скорость интерфейсов CAN и CANFD (относительно Ethernet-каналов);
- 3) Необходимость доработки алгоритмов обработки сообщений синхронизации для повышения точности установки единого времени;
- 4) Возможность возникновения коллизий, что может увеличить время синхронизации между ведущим и ведомыми;
- 5) Возможность возникновения асимметричных задержек при использовании конвертера RTP - CAN (но данная проблема может быть решена разработкой мастер - устройства, имеющего в своем составе шину CAN, в статье авторы делают на этом акцент).

Выявленные ограничения создают почву для будущих научных исследований по данному направлению.

#### VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время существует актуальная задача распределения знания о едином точном времени в гетерогенных сетях с повышенной плотностью маломощных устройств.

Ethernet – одна из таких технологий связи, которая обеспечивает высокую пропускную способность, но как правило такая реализация стоит дороже, поскольку требует дополнительного оборудования в виде коммутаторов и маршрутизаторов, соединение выполняется по принципу 1:1. Также данная технология может не поддерживаться всеми конечными узлами в силу нецелесообразности увеличения вычислительной мощности конечного узла. Соответственно, необходимо использовать альтернативные пути распределения

знания о едином точном времени в гетерогенных сетях.

В заключение, отметим основные результаты.

Во-первых, в настоящем исследовании авторами предложен метод синхронизации в гетерогенных сетях с высокой плотностью маломощных устройств, базирующийся на интерфейсе CAN.

Во-вторых, предложены три вариации данного метода, которые можно использовать при разных поставленных задачах.

В-третьих, предложены форматы сообщений CAN и CAN FD для передачи сообщений синхронизации в гетерогенных сетях.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] IEEE 1588-2019. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. – New York: IEEE, 2019. – 365 стр.
- [2] Синхронизация точного времени: стандарт IEEE 1588 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://moxa.ru/tehnologii/power\\_systems/sinhronizaciya-tochnogo-vremeni-standart-ieee-1588/](https://moxa.ru/tehnologii/power_systems/sinhronizaciya-tochnogo-vremeni-standart-ieee-1588/) (дата обращения: 20.10.2024).
- [3] Синхронизация в сетях нового поколения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.cnews.ru/articles/sinhronizatsiya\\_v\\_setyah\\_novogo\\_pokoleniya](https://www.cnews.ru/articles/sinhronizatsiya_v_setyah_novogo_pokoleniya) (дата обращения: 29.09.2024).
- [4] Balakrishnan K., Dhanalakshmi R., Bam Bahadur Sinha., Gopalakrishnan R. Clock synchronization in industrial Internet of Things and potential works in precision time protocol: Review, challenges and future directions // International Journal of Cognitive Computing in Engineering. 2023. No. 4. Pp. 205-219. DOI: 10.1016/j.ijcce.2023.06.001.
- [5] Quentin Bailleul. Dimensioning TSN network synchronization in different embedded contexts. Networking and Internet Architecture [cs.NI]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2023. English.
- [6] Рыжков А.В., Шварц М.Л. Предпосылки создания когерентной сети связи общего пользования - основы сквозных цифровых технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №7. С. 14-22.
- [7] Шварц М.Л., Рыжков А.В. Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От плезнохронных до когерентных сетей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. -2021. -№4 -С. 27-38

# Synchronization method in heterogeneous communication networks with high density of devices with limited computing resources

Nikita Chikalov, Kamil Bilyatdinov

**Abstract – a methodological solution for improving the time synchronization technology in heterogeneous communication networks with an increased density of devices with limited computing resources is presented. The relevance of this study is due to the fact that modern communication networks are becoming increasingly heterogeneous and can contain a large number of devices with limited computing resources, which also require synchronization, like classical communication networks. Not all devices with limited computing resources can contain Ethernet ports for receiving time stamps via PTP, so it is necessary to consider new possibilities for distributing a single accurate time. Future heterogeneous communication networks with a high density of devices with limited computing resources require solutions that can ensure synchronous and consistent operation with minimal computational costs, which is especially important for improving the efficiency of future communication networks under conditions of limited computing resources. The authors propose a method for distributing information about a single accurate time in heterogeneous communication networks with an increased density of devices using the CAN interface. Main positive effects: 1) Development of a new solution for synchronization in heterogeneous communication networks with an increased density of devices with limited computing resources; 2) Reducing the cost of implementing synchronization functionality in such networks by eliminating equipment that can unnecessarily complicate the end device; 3) Improving the quality of operation of heterogeneous communication networks with a high density of devices with limited computing resources in real time.**

**Keywords - heterogeneous communication networks,**

**single exact time, PTP, CAN, GPS, high device density.**

## REFERENCES

- [1] IEEE 1588-2019. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. – New York: IEEE, 2019. – 365 pp.
- [2] Precision Time Synchronization: IEEE 1588 Standard [Electronic resource]. – Access mode: [https://moxa.ru/tehnologii/power\\_systems/sinhronizaciya-tochnogo-vremeni-standart-ieee-1588/](https://moxa.ru/tehnologii/power_systems/sinhronizaciya-tochnogo-vremeni-standart-ieee-1588/) (accessed: 20.10.2024).
- [3] Synchronization in Next-Generation Networks [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.cnews.ru/articles/sinhronizatsiya\\_v\\_setyah\\_novogo\\_pokoleniya](https://www.cnews.ru/articles/sinhronizatsiya_v_setyah_novogo_pokoleniya) (accessed: 29.09.2024).
- [4] Balakrishnan K., Dhanalakshmi R., Bam Bahadur Sinha., Gopalakrishnan R. Clock synchronization in industrial Internet of Things and potential works in precision time protocol: Review, challenges and future directions // International Journal of Cognitive Computing in Engineering. 2023. No. 4. Pp.205-219. DOI: 10.1016/j.ijcce.2023.06.001.
- [5] Quentin Bailleul. Dimensioning TSN network synchronization in different embedded contexts. Networking and Internet Architecture [cs.NI]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2023. English.
- [6] Ryzhkov A.V., Schwartz M.L. Prerequisites for creating a coherent public communication network - the foundations of end-to-end digital technologies // T-Comm: Telecommunications and transport. 2021. Vol.15. No. 7. P. 14-22.
- [7] Schwartz M.L., Ryzhkov A.V. Modern trends in the development of network synchronization systems in telecommunication networks. From plesiochronous to coherent networks // Systems for synchronization, generation and processing of signals. - 2021. - No. 4 - P. 27-38

Nikita Chikalov, Senior Software Engineer of "Scientific Research Institute "Rubin", St. Petersburg, Russia ([n.v.chikalov@rubin-spb.ru](mailto:n.v.chikalov@rubin-spb.ru))  
Kamil Bilyatdinov, PhD (Technical Science), Professor of Dubna State University, St. Petersburg, Russia ([k.bilyatdinov@mashtab.org](mailto:k.bilyatdinov@mashtab.org))