

OPC UA TSN КАК ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗИ НА ВСЕХ УРОВНЯХ АВТОМАТИЗАЦИИ

Д. Брукнер, Ш. Бина, А.С. Васина (Компания В&R)

Проанализировано современное состояние развития промышленных протоколов передачи данных. Показано, что стандарт OPC UA TSN способен обеспечить коммуникации на всех уровнях АСУТП. Кратко рассмотрено семейство стандартов для чувствительных ко времени сетей (TSN), входящих в группу IEEE 802. Изложена концепция развития единой производственной сети на базе протоколов OPC UA TSN. Приведены результаты испытания предложенного подхода. Сформулированы перспективы развития промышленных сетевых технологий.

Ключевые слова: протокол передачи данных, стандарт, АСУТП, чувствительные ко времени сети, минимальное время цикла передачи данных, мультисервисная сеть.

Современное состояние развития систем промышленных коммуникаций

Разные протоколы для разных применений

На рынке систем промышленных коммуникаций доминируют полевые шины на базе Ethernet. Эти протоколы передачи данных занимают один и тот же сегмент рынка, поэтому к ним предъявляются одинаковые общие требования. Протоколы разрабатываются различными организациями, зависимыми от крупных игроков рынка. Производители определяют общее направление развития каждой отдельной системы. В результате технологии сильно отличаются друг от друга, и невозможно обеспечить их совместимость. Не существует единой экосистемы промышленной связи, единого стандарта.

Используемые сегодня протоколы не являются универсальными. С одной стороны, протоколы, по которым осуществляется связь на верхнем уровне АСУТП (TCP/IP) и межмашинная связь (PROFINET, EtherNet/IP, CC-Link IE), не могут обеспечить строго детерминированную по времени доставку данных, поэтому на полевом уровне преобладают Ethernet-протоколы реального времени (EtherCAT, PROFINET IRT, POWERLINK и Sercos III). Кроме

того, в рамках одного уровня автоматизации разные приложения предъявляют разные требования к параметрам связи, например, к максимальному поддерживаемому числу узлов, ширине канала, джиттеру, минимальному времени цикла. Топология сети также может зависеть от конкретных условий. Сравнить протоколы сложно, для этого приходится опираться на ряд критериев, и в конечном итоге эффективность системы зависит от области применения.

Описание работы ведущих и ведомых устройств в исходных кодах доступно не для всех промышленных Ethernet-протоколов, и для реализации их работы часто требуются специализированные микросхемы. Отсутствие унификации приводит к тому, что конечным потребителям и производителям оборудования приходится иметь дело с целым рядом программно-аппаратных решений. Несмотря на удовлетворительный уровень доступности продуктов и услуг, совмещение нескольких решений приводит к росту затрат и ограничивает возможности внедрения промышленного Internet вещей.

Разный трафик из разных источников

На предприятии присутствуют различные источники трафика. В связи с этим трафик можно разделить

Таблица 1. Типы промышленного трафика [2]

ID	Рабочее название	Гарантия доставки	Синхронизация по сети	Согласование по фазе	Периодический характер	Выделение полосы пропускания	Объем данных	Необходимый тип резервирования	Принцип планирования трафика
I	Изохронный	В строго заданные сроки	Да	Да	Да	Да	Ограничен	Бесшовное	Qbv
II	Управление сетью	По приоритету	Да	-	Нет/Да	-	Малый	Не имеет значения	sp
III	Синхронный	С задержкой в заданных пределах	Возможно		Да	Да	Ограничен	Бесшовное	Qbv
IV	Аудио/видео		Неизвестно		Нет/да	Да	Ограничен	Стандартное	Qbv + qav + sp
V	События / аварийные сообщения	Доставка гарантирована, если возможно выделить запрошенную полосу пропускания	-	-	Нет/да	Да	Неизв.	Стандартное	Qbv + sp
VI	Управление / диагностика		-	-	Нет	Да	Неизв.	Стандартное	Qbv + sp
VII	Зарезервированный/пользовательский	Определяется пользователем							
VIII	Низкоприоритетный	Нет	-	-	Нет/да	-	Неизвестен	Стандартное	Нет

Таблица 2. Семейство стандартов TSN

Название	Описание	Утвержден
IEEE 802.1Qav	Пересылка и создание очередей пакетов, чувствительных к задержке	Да
IEEE 802.1AS-Rev	Протокол синхронизации точного времени	Нет
IEEE 802.1Qbv	Планирование расписания доставки пакетов	Да
IEEE 802.1Qch	Циклическое создание и пересылка очередей пакетов	Да
IEEE 802.1Qcr	Асинхронное планирование трафика	Нет
IEEE 802.1Qbu	Прерывание передачи кадров (для коммутаторов)	Да
IEEE 802.3br	Прерывание передачи кадров (для конечных устройств)	Да
IEEE 802.1Qci	Правила обработки входящего трафика	Да
IEEE 802.1Qcc	Резервирование потоков	Нет
IEEE 802.1CB	Репликация кадров и удаление дубликатов	Да
IEEE 802.1CS	Расширение для протокола резервирования	Нет
IEEE 802.1Qca	Управление маршрутами и резервирование	Да

на типы [1], отталкиваясь от следующих его характеристик: цикличность; необходимость синхронной передачи (в том числе синхронизации по фазе цикла); объем данных, передаваемых в одном пакете; необходимость резервирования ресурсов (резервирования полосы пропускания); требования к доставке (доставка строго детерминирована по времени/возможна задержка в заданных пределах/доставка гарантирована, если возможно выделить запрошенную отправителем полосу пропускания/без гарантии доставки) (табл. 1).

Некоторые из существующих технологий реального времени (EtherNet/IP, Profinet) гарантируют своевременную передачу чувствительных к задержкам по времени данных в условиях смешанного трафика за счет планирования трафика и QoS¹. Однако, как правило, они не могут обеспечить строго детерминированную по времени доставку изохронного трафика.

Факторы, влияющие на минимальное время цикла

Имеются проблемы, характерные для всех существующих сегодня технологий. К ним относятся в первую очередь задержка, вносимая инфраструктурными устройствами (то есть коммутаторами сети), и пропускная способность используемой среды передачи данных. На эти факторы нельзя повлиять программно, можно только свести их влияние к минимуму (например, создав такую инфраструктуру, в которой пакет проходит через минимум коммутирующих устройств).

Наиболее распространенные сегодня физические среды имеют пропускную способность 100 Мбит/с. С одной стороны, технологии промышленного Ethernet уже достаточно хорошо развиты, чтобы использовать всю полосу пропускания максимально эффективно. С другой стороны, сегодня для достиже-

¹ QoS (quality of service) — способность сети обеспечить необходимый сервис заданному трафику в определенных технологических рамках.

ния времени цикла < 250 мкс (время, необходимое для передачи полноразмерного стандартного Ethernet-кадра) требуется модифицировать стандартный протокол Ethernet [3]. Использование нестандартных подходов всегда влияет на возможность межсистемного взаимодействия. Кроме того, это не приветствуется ассоциацией IEEE, а значит, будущие решения на базе таких протоколов могут оказаться несовместимыми с протоколами поверх модифицированного Ethernet.

Связь между информационными и эксплуатационными технологиями

Создание единой сети для всего предприятия подразумевает объединение информационных (ИТ) и эксплуатационных (ОТ) технологий. ИТ-специалисты беспокоятся за обеспечение безопасности в такой сети. Традиционно полевые шины использовались для организации локальных сетей, в которых не требуется высокий уровень защиты. Самый простой способ решить эту проблему — установить между полевой шиной и информационной инфраструктурой брандмауэр или шлюз. Кроме этого, стандарт IEC 62443 в области безопасности сетей и систем промышленной коммуникации сейчас уже широко признан, а значит, необходимо учитывать его требования при разработке новых и модернизации существующих систем.

Концепция развития единой производственной сети

Для создания единой сети необходимо решить обозначенные выше проблемы. Для этого нужно предпринять следующие шаги.

Разработка и внедрение мультисервисных сетей. Сети, обеспечивающие связь от датчика до облака, избавят пользователей от необходимости использовать множество протоколов. Мультисервисная сеть должна обеспечивать передачу всех существующих типов промышленного трафика (раньше за это отвечали отдельные протоколы). В этом случае переход к использованию такой сети будет максимально плавным, что будет способствовать широкому распространению технологии на рынке.

Стандартизация технологий. В промышленных системах связи необходимо обеспечить взаимодействие систем на каждом уровне сетевой модели ISO/OSI. Уровень, на котором обеспечивается совместимость всей системы с другими системами, определяется самым нижним уровнем модели, на котором невозможно межсистемное взаимодействие. Существующие промышленные сети Ethernet совместимы только на физическом, то есть первом уровне (кабели, разъемы). Этот факт разочаровал многих пользователей: первоначальное маркетинговое послание состояло в том, что все использующие Ethernet системы смогут взаимодействовать между собой. Для устранения подобных проблем необходимо исполь-

зовать стандартизированные решения на всех уровнях модели OSI.

Освоение новых сред передачи данных. Гигабитные каналы передачи данных (как витая пара, так и оптоволокно) уже получили достаточное распространение на рынке, но технологии еще не адаптировались к этим новым средам. Пропускная способность в таких средах вырастает в 10 раз. Однако инфраструктура сети может быть не менее важным фактором, влияющим на скорость передачи данных. Поэтому при использовании гигабитного канала производительность технологии, сильно зависимой от инфраструктуры сети (например, EtherCAT, Sercos III, POWERLINK), вырастет в 4...6 раз. В свою очередь, производительность технологий на основе коммутируемых Ethernet-сетей (EtherNet/IP, Profinet IRT) при передаче достаточных объемов полезных данных может вырасти в 7...10 раз.

Отметим, что развитие идет не только в сторону увеличения пропускной способности. В IEEE образована рабочая группа по созданию однопарного 10-мегабитного Ethernet-кабеля (10SPE). Появление такого кабеля сделает целесообразным подключение к Ethernet-сетям еще более дешевых и малогабаритных датчиков и исполнительных механизмов, а также позволит прокладывать Ethernet-сети во взрывоопасных зонах класса 1.

Коммуникационные стандарты, чувствительные ко времени

Определением стандартов для чувствительных ко времени сетей занимается исследовательская группа по TSN, входящая в рабочую группу IEEE 802. Группа 802.1 описывает коммутаторы, а группа 802.3 — конечные узлы Ethernet-сети. Некоторые

из стандартов еще находятся в стадии разработки, но многие уже утверждены. В табл. 2 перечислены стандарты, имеющие отношение к TSN.

IEEE 802.1Qav описывает механизмы передачи чувствительных к задержке данных в традиционных Ethernet-сетях. Он определяет действия коммутаторов, которые позволяют обеспечить гарантию доставки чувствительных к задержке данных и передачу аудио/видеопотока без потерь. В основном применяется для передачи аудио/видеосигналов. Стандарт описывает обработку потоков данных по протоколу SRP² и использование планировщика CBS. Он разделяет пакеты в очереди на две группы (для одной группы требуется срочная доставка, для второй — нет). Очереди получают доступ к каналу передачи согласно приоритету, определяемому планировщиком. Если канал передачи в данный момент занят, у непустой очереди по определенному алгоритму повышается приоритет. Когда все пакеты из очереди отправлены, приоритет очереди обнуляется.

IEEE 802.1AS-Rev. Первая версия протокола синхронизации точного времени была описана в стандарте IEEE 1588-2008. Созданный на его основе стандарт IEEE 802.1AS (несовместимый с первой версией) был адаптирован к работе с более крупными сетями. IEEE 802.1AS-Rev — это готовящееся расширение стандарта IEEE 802.1AS. В нем определяются механизмы резервирования задающих генераторов и поддержки нескольких тактовых доменов (например, одновременное распределение по сети тактовых сигналов для синхронизации чувствительных к задержке (изохронных) процессов и для синхронизации системных часов и проставления меток времени). Также описывается измерение задержки, вносимой линией передачи при обмене данными между двумя конечными узлами, и расчет задержки, вносимой коммутатором.

Расширение будет совместимо со стандартом IEEE 802.1AS. Поэтому сегодня при разработке систем рекомендуется опираться на стандарт IEEE 802.1AS, а не IEEE 1588-2008.

IEEE 802.1Qbv. Планировщик трафика TAS (учитывающий требования ко времени доставки данных) гарантирует своевременную доставку данных, относящихся к разным типам трафика. В цикле выделяются периоды, в течение которых только один тип трафика имеет эксклюзивный доступ к каналу передачи.

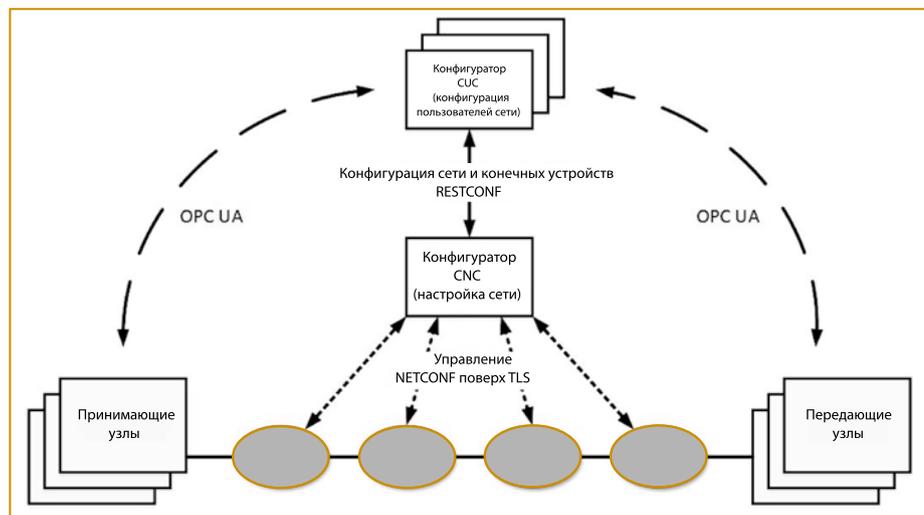


Рис. 1. Полностью централизованная модель по стандарту Qcc (с использованием OPC UA) [4]

² Secure Remote Password Protocol (SRPP) — протокол парольной аутентификации, устойчивый к прослушиванию и MITM-атаке и не требующий третьей доверенной стороны. SRP содержит некоторые элементы из других протоколов обмена ключами и идентификации, при этом вносит небольшие усовершенствования и уточнения.

IEEE 802.1Qch. Механизм планирования трафика, описываемый в этом стандарте, позволяет добиться строго заданной (но не минимально возможной) задержки передачи данных. Планировщик синхронизирует создание и отправку очередей пакетов. Получаемый коммутатором кадр с высоким приоритетом должен быть передан в следующий узел в следующем кадре. При этом задержка не зависит от топологии сети и от присутствия в сети другого трафика.

IEEE 802.1Qcr. Асинхронный планировщик трафика позволяет эффективнее использовать канал передачи в условиях большой нагрузки на сеть и сочетания разных типов трафика. Он работает в первую очередь с низкоприоритетным трафиком, для передачи которого не нужна синхронизация между узлами. Задержка передачи потока анализируется после каждой пересылки пакетов (в следующее инфраструктурное устройство), и ориентировочное время доставки данных рассчитывается на основе топологии сети. Также этот механизм предотвращает потерю пакетов при перегрузке сети.

IEEE 802.1Qbu и *IEEE 802.3br.* Передача объемных пакетов может привести к временной блокировке конкретного порта. Предотвратить блокировку можно с помощью прерывания передачи кадров. Этот механизм подходит только для передачи низкоприоритетного трафика, поскольку исключены любые гарантии по времени доставки пакетов. Если при передаче пакета в сети появился трафик с более высоким приоритетом, он получает доступ к каналу, а передача низкоприоритетного пакета приостанавливается. После передачи приоритетного сообщения она возобновляется с того же места, где была прервана. Это позволяет ускорить передачу низкоприоритетных пакетов большого размера.

IEEE 802.1Qci определяет правила обработки и фильтрации потоков данных. Они помогают защитить сеть от перегрузки трафиком (например, в результате DoS-атак). После успешной идентификации возможна обработка потоков данных. В частности, она включает в себя определение требуемой потоку полосы пропускания. Вместе с тем оценивается нагрузка канала передачи. Очереди формируются так, чтобы обеспечить равномерное заполнение полосы пропускания и предотвратить перегрузку канала.

IEEE 802.1Qcc описывает управление потоками данных (расширение для протокола SRP) и конфигурацией сети. Управление сетью разделяется на управление «пользователями» (конечными узлами) и коммутаторами. Стандарт предлагает несколько моделей конфигурации, но для промышленных сетей подходит только полностью централизованная модель, потому что только она обеспечивает передачу изолированного трафика (рис. 1). В этой модели функцию управления конечными узлами выполняет Central

User Configuration (CUC), а функцию управления коммутаторами — Central Network Configuration (CNC). CUC собирает со всех конечных узлов запросы на передачу данных. Задача CNC — на основе этих запросов составить расписание трафика и конфигурацию сети таким образом, чтобы обеспечить гарантию доставки всех пакетов.

Для обмена данными между CNC и коммутаторами предлагается использовать открытый протокол на базе стандартных моделей YANG³ (например, NETCONF⁴). Связь между конфигурациями может осуществляться по открытому протоколу RESTCONF⁵ (если функции обоих конфигурационных устройств выполняет одно устройство, для связи между ними протокол не нужен).

IEEE 802.1CB описывает механизм бесшовного резервирования сетей кольцевой или ячеистой топологии. Передающий узел выборочно дублирует отправляемые пакеты. Дубликаты отправляются по разным маршрутам. Лишние пакеты удаляются принимающим узлом. При этом полоса пропускания используется гораздо эффективнее, чем при традиционном резервировании.

IEEE 802.1CS. Определяемый в стандарте протокол LRP должен прийти на смену протоколу MRP (стандартизированное резервируемое кольцо), используемому для регистрации специальных атрибутов в инфраструктурных сетевых устройствах. Стандарт опишет так называемую «модель полностью распределенной конфигурации», в которой резервирование и отслеживание изменений осуществляются для отдельных сегментов сети. Новый протокол LRP ускорит работу с большими базами данных (порядка 1 Мб).

IEEE 802.1Qca описывает передачу данных по явно заданным маршрутам. Маршрут (или маршруты, если необходимо обеспечить резервирование) задается отдельно для каждого потока данных. Пакет может быть отправлен как по кратчайшему пути, так и по маршруту, рассчитанному с помощью других алгоритмов. Возможно одновременное сосуществование нескольких активных топологий (например, с равномерным распределением сетевой нагрузки или различные древовидные топологии).

Реализация концепции развития единой производственной сети

Независимость TSN от пропускной способности канала

Появление гигабитных физических сред — это логичный и предсказуемый шаг в эволюции технологий передачи данных. При этом нет необходимости использовать их повсеместно. Выбор канала передачи зависит от потребностей приложения или его части. Одно из важных преимуществ технологий TSN — то, что она разрабатывается вне контекста

³ <https://tools.ietf.org/html/rfc6020>

⁴ <https://tools.ietf.org/html/rfc6241>

⁵ <https://tools.ietf.org/html/rfc8040>

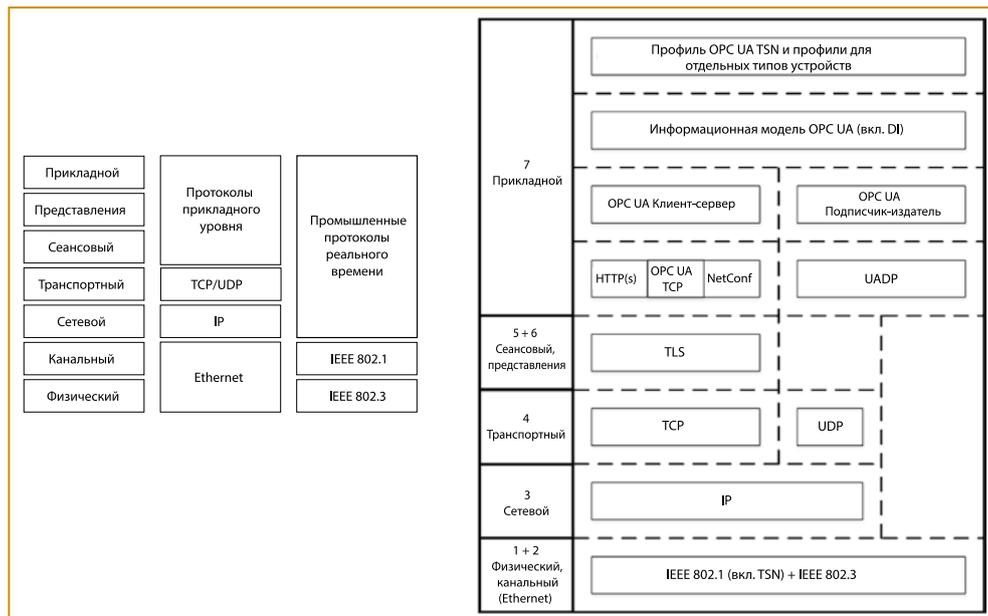


Рис. 2. Модель OSI для: распространенных моделей стеков традиционных протоколов (слева); протоколов OPC UA TSN (справа)

ста определенной пропускной способности канала. Поэтому технологию можно будет использовать как с существующими и разрабатываемыми средами (10/100 Мбит/с/1 Гбит/с), так и со средами, которые появятся в перспективе (например, 10 Гбит/с).

Сквозная коммутация

Коммутаторы, работающие в режиме сквозной коммутации, начинают передачу пакета до того, как он полностью получен. Это позволяет существенно сократить время цикла, особенно в больших сетях кольцевой или линейной топологии. Преимущество такого способа передачи очевидно, однако у него есть и недостатки. В таком режиме не осуществляется проверка кадров на ошибки (так как перед передачей не считывается поле FCS в конце кадра). Также сквозная коммутация несовместима с некоторыми функциями TSN, описываемыми в стандартах IEEE, например, с частью правил обработки входящего трафика. Тем

не менее, выигрыш от роста производительности перевешивает эти недостатки. Сквозная коммутация — это один из основных механизмов для уменьшения максимальной задержки передачи — наряду с планированием трафика согласно стандарту Qbv и прерыванием передачи кадров.

Объединение двух моделей OSI

На рис. 2 (слева) показаны модели стека протоколов для связи на разных уровнях АСУТП (на верхнем — TCP/IP, на нижних — с использованием промышленных протоколов реального времени). Технология OPC UA поддерживает одновременно две модели связи: клиент/сервер и издатель/подписчик (Pub/Sub). Благодаря этому возможно сосуществование двух стеков протоколов внутри одной сетевой модели (рис. 2 (справа)). Связь между клиентом и сервером OPC UA может осуществляться по протоколам TCP/IP с возможностью шифрования по протоколу TLS⁶. Связь по модели издатель/подписчик возможна либо по протоколу UADP поверх UDP/IP либо Ethernet_802. Безопасность обеспечивается на уровне UADP.

Реализация связи по модели издатель/подписчик — важный шаг в развитии технологии OPC UA. Использование этой модели в сочетании с TSN на канальном уровне обеспечит возможность обмена данными в реальном времени [5].

Декомпозиция процесса управления сетью на функции

Как правило, в современных системах за управление сетью отвечает одно устройство — сетевой контроллер. Предлагается разбить процесс управления сетью на отдельные функции и закрепить их за устройствами (по аналогии с пользователями в сети — администратор/пользователь/специалист по обслуживанию и т. д.). Такой подход позволит назначать функции, выполняемые устройством. При необходимости функции могут быть перераспределены между устройствами.

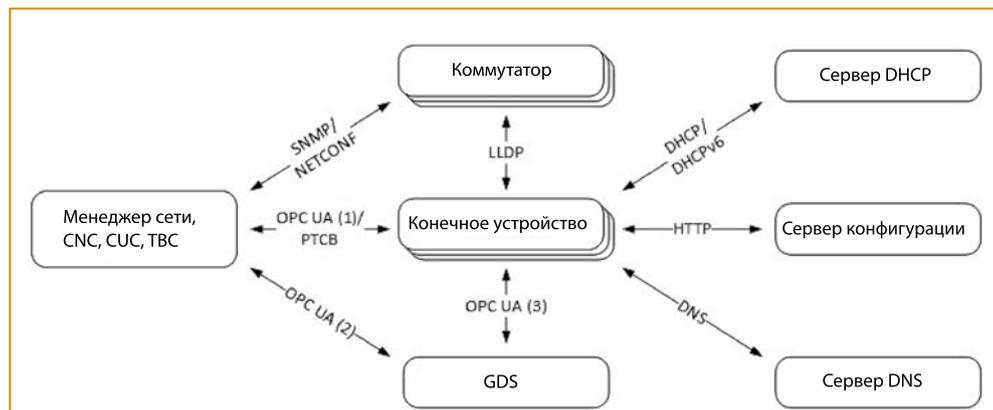


Рис. 3. Взаимодействие между сетевыми объектами при загрузке устройства

⁶ <https://tools.ietf.org/html/rfc5246>

Таблица 3. Обозначения параметров для вычисления времени цикла

Величина	Условное обозначение	Единица измерения
Минимальное время цикла	Γ	с
Задержка передачи	τ	с
Задержка в сетевом устройстве	l	с
Задержка при прохождении сигнала в среде передачи	δ	с
Пропускная способность канала	C	бит/с
Полезная нагрузка	x	байт
Число сетевых устройств	n	ед.

В то же время, поведение каждого устройства в сети должно соответствовать модели поведения конечного автомата. В процессе загрузки и работы устройство проходит через определенную последовательность состояний. Для перехода из одного состояния в другое необходимо выполнение устройством определенных действий (рис. 3).

Некоторые функции уже предусмотрены в ИТ-и ОТ-системах. Например, это функции сервера DHCP⁷, сервера DNS⁸, задающего тактового генератора, коммутатора TSN. В стандарте Qcc определены функции конфигураторов CUC и CNC. Для обеспечения передачи данных по модели издатель/подписчик необходим агент конфигурации RTCB (фактически выполняет функции конфигуратора CUC). За администрирование серверов OPC UA в масштабах предприятия отвечает сервер OPC UA GDS.

Также предлагается выделить ряд новых функций для сетей OPC UA TSN. Ожидается, что это позволит уменьшить число действий со стороны пользователя, необходимых для загрузки и работы сети. Например:

— *управляющее приложение и подчиненное приложение устройства* идентичны с точки зрения сетевой инфраструктуры, но могут предъявлять разные требования к вычислительной мощности, передаче данных, настройке параметров приложения;

— *менеджер сети* отвечает за взаимодействие с инструментом разработки и обладает полной информацией о распределении приложения по устройствам;

— *сервер конфигураций* представляет собой базу данных с системой управления версиями и содержит подписанные файлы с данными любого типа, относящимися к прошивке и настройке устройств (от потока битов для модулей FPGA до видео с инструкциями по техническому обслуживанию).

Создание профилей устройств

Необходимо по возможности обеспечить совместимость новых технологий с теми технологиями и устройствами, которые уже существуют и появятся в будущем. Профили OPC UA могут описать стандартные устройства или типы устройств. Также рассматривается вопрос о разработке стандартов для профилей связи между контроллерами, а также связи

с системами функциональной безопасности, приводами, системами ввода/вывода.

Обеспечение безопасности и обмен сертификатами

Безопасность UA обеспечивается с помощью аутентификации и авторизации, шифрования и контроля целостности данных. Для аутентификации используются сертификаты. Стандарт OPC UA допускает использование только сертификатов X.509. Если для менеджера сети создан новый сертификат, каждое устройство, которое хочет настраивать устройства в сети и управлять ими, должно получить сертификат для своего экземпляра менеджера. Кроме того, каждое устройство имеет свой сертификат экземпляра, который создается на основе сертификата для типа устройства (а он создается на основе сертификата производителя). Таким образом формируются цепочки сертификатов, а любой производитель может определить собственную структуру типов устройств. В верификации цепочек сертификатов может участвовать любое устройство.

Выдаются следующие типы сертификатов: менеджер сети, экземпляр менеджера сети, тип устройств, экземпляр устройства данного типа, экземпляр приложения, конфигурация (оборудования).

Шифрование по модели клиент/сервер обеспечивается протоколом TLS. Можно реализовать подтверждение достоверности данных с помощью цифровой подписи. При модели издатель/подписчик шифрование и подпись данных выполняются на уровне сообщений.

Теоретический анализ и практические испытания технологии

Сравнение минимального времени цикла в сетях разных типов

Минимальное время цикла — это время, которое требуется сетевому контроллеру для отправки данных всем подчиненным устройствам и получения ответа с данными от каждого из них. Это важный показатель производительности технологии в условиях конкретного приложения. Сократить минимальное время цикла — одна из наиболее трудных задач.

Излагаемый далее метод оценки минимального времени цикла подробно описан в [6].

Первым фактором, влияющим на время цикла, является задержка, вносимая каналом передачи (расшифровка обозначений приведена в табл. 3). Это время, необходимое для передачи всех кадров по одному кабелю с определенной пропускной способностью. Рассчитать его для суммарного кадра (в протоколах с агрегацией кадров) можно по следующей общей формуле:

$$\tau = \frac{(\text{заголовок} + \max(\text{остаток}, n \times (x + \text{подзаголовок})))}{C}$$

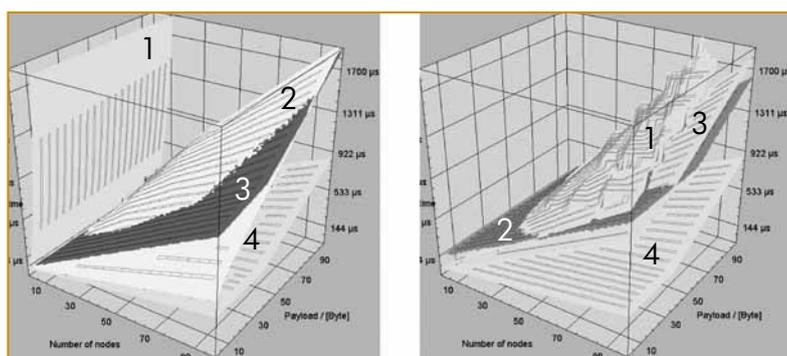
Остаток — это число байт, необходимых для обеспечения минимальной длины поля данных, если

⁷ <https://tools.ietf.org/html/rfc2131>

⁸ <https://tools.ietf.org/html/rfc1034>, <https://tools.ietf.org/html/rfc1035>

Таблица 4. Пример расчетов для технологии с агрегацией кадров

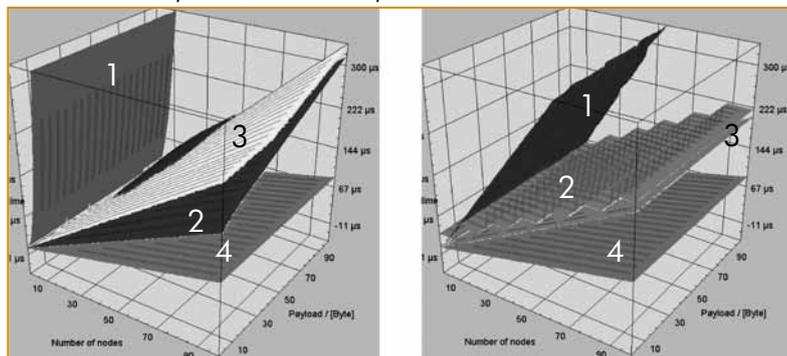
Технология	Задержка передачи	Минимальное время цикла
EtherCAT	$\tau = \frac{8(40 + \max(44, n * (x + 12)))}{C}$	$\Gamma = (2n - 1)l + 2n\delta + \tau$
Profinet IRT	$\tau = \frac{8(38 + \max(46, n * (x + 6)))}{C}$	$\Gamma = \delta + l + n \times \tau$
OPC UA TSN	$\tau = \frac{8(51 + \max(33, n * (x + 3)))}{C}$	$\Gamma = \delta + l + \tau$



а)

б)

Минимальное время цикла на скорости до 100 Мбит/с



с)

д)

Минимальное время цикла на скорости до 1 Гбит/с

Рис. 4. Сравнение значений минимального времени цикла в зависимости от числа узлов и размера полезной нагрузки, где справа налево:

а) 1 – Modbus/TCP, б) 1 – EtherCAT, с) 1 – Modbus/TCP, д) 1 – EtherCAT,
 2 – SERCOS III, 2 – Profinet IRT, 2 – SERCOS III, 2 – Profinet IRT,
 3 – POWERLINK, 3 – EtherNet/IP, 3 – POWERLINK, 3 – EtherNet/IP,
 4 – OPC UA TSN; 4 – OPC UA TSN; 4 – OPC UA TSN; 4 – OPC UA TSN

объем полезной нагрузки от одного узла слишком мал.

Второй фактор, от которого зависит время цикла, — задержка, вносимая инфраструктурой сети.

Рассмотрим конкретные значения для трех технологий (табл. 4):

1) EtherCAT как пример технологии с агрегацией кадров. Суммарный кадр проходит по всей сети и обратно;

2) Profinet IRT как пример технологии коммутируемого Ethernet. Каждому узлу отправляется индивидуальный кадр;

3) OPC UA TSN (технология с агрегацией кадров, формат кадров оптимизирован).

Все приведенные формулы описывают упрощенные сценарии, предполагающие линейную топологию сети и равный объем отправляемых и принимаемых данных. Также стоит отметить, что формула задержки передачи для EtherCAT не описывает ситуацию, когда максимальной длины поля недостаточно для передачи полезных данных от одного узла. В этом случае оставшиеся данные будут переданы в дополнительном поле. Кроме того, на длину кадра влияет тот факт, что данные для каждого устройства должны быть отправлены в отдельном поле независимо от их длины.

Теоретический расчет минимального времени цикла в зависимости от числа узлов и объема полезной нагрузки

В реальных условиях на результат повлияет множество дополнительных факторов:

- соотношение объема принимаемых и отправляемых данных;
- процент устройств в сети, осуществляющих перекрестный обмен данными;
- использование циклов разной продолжительности;
- топология сети (линия, звезда, кольцо) и число промежуточных соединений между конечными устройствами;
- наличие модулей ввода/вывода с собственной внутренней шиной.

Диаграммы на рис. 4 построены с помощью компьютерного моделирования и позволяют сравнить производительность современных полевых шин и OPC UA TSN [2].

Для расчетов были использованы следующие параметры:

— до 100 узлов и до 100 байт полезной нагрузки;

— линейная топология, объем отправляемых данных = 40% от объема принимаемых данных, перекрестный трафик для 20% устройств;

— задержка перенаправления кадров (табл. 5);

— 25% устройств представляют собой модульные системы ввода/вывода из 20 модулей каждая (существенно только для EtherCAT)

Расчет значений для OPC UA TSN проводился на основе модели связи издатель/подписчик поверх Ethernet_802.3 с агре-

Таблица 5. Задержка перенаправления кадров для расчетного примера

Протокол	на скорости	
	100 Мбит/с	1 Гбит/с
TSN	3 мкс	0,78 мкс
Ethernet-серей	10 мкс	2 мкс
POWERLINK	0,76 мкс	0,76 мкс
EtherCAT	1,35 мкс	0,85 мкс
SERCOS III	0,63 мкс	0,63 мкс

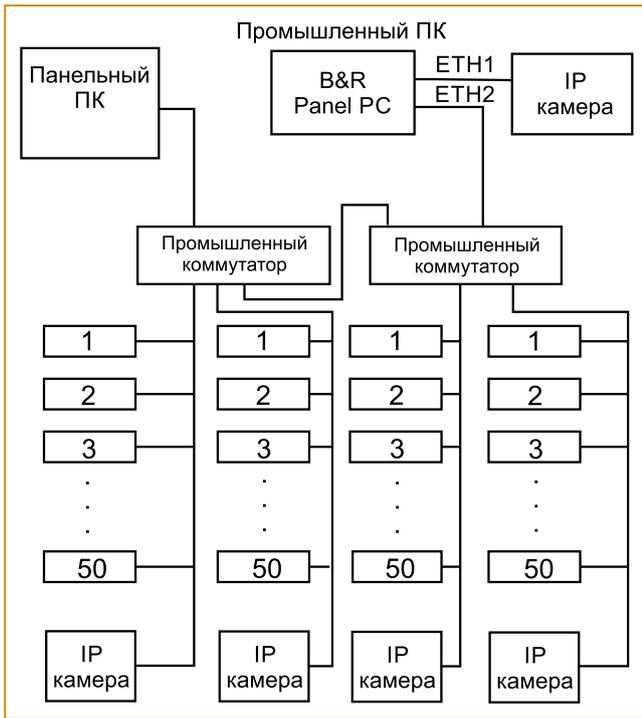


Рис. 5. Схема демонстрационного стенда OPC UA TSN

гацией кадров. При использовании UDP/IP вместо Ethernet_802.3 результаты практически не изменятся. При отправлении индивидуальных кадров каждому узлу время цикла возрастет для пакетов с полезной нагрузкой > 50 байт.

Из рис. 4 (а) и (б) видно, что OPC UA TSN превосходит существующие технологии, использующие 100-мегабитный канал передачи. На рис. 4 (с) и (д) OPC UA TSN сравнивается с гипотетическими гигабитными технологиями, механизмы которых не отличаются от используемых в современных полевых шинах. Они оказываются почти в два раза менее эффективными, чем OPC UA TSN.

Результаты испытаний прототипов

Представители разных компаний объединяют усилия и создают тестовые установки и демонстрационные стенды, на которых испытываются новые тех-

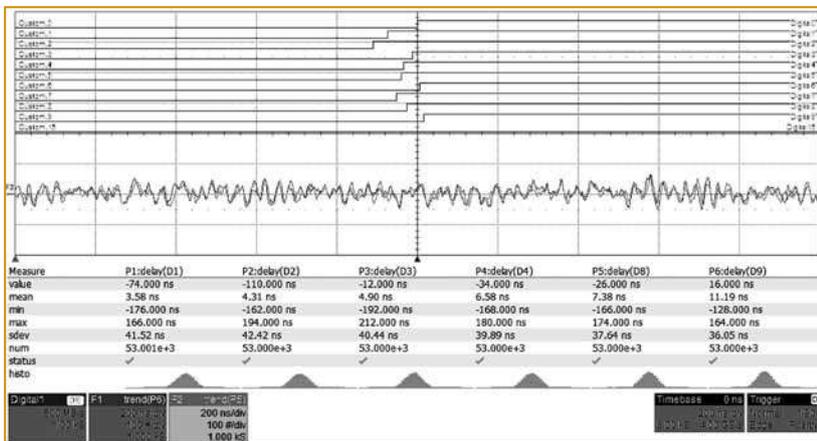


Рис. 6. Результаты синхронизации по времени по стандарту IEEE 802.1AS для шины из 50 устройств

нологии. Наиболее важные установки были созданы производителем Huawei, консорциумом ИС и ассоциацией LNI.

Рассмотрим данные, полученные на демонстрационном стенде с оборудованием компаний В&R, TTTech и Mobotix (рис. 5).

На стенде установлены два прототипа устройств: на базе промышленного и панельного ПК, оба под управлением ОС Linux. Сеть состоит из четырех линий по 50 узлов (модули В&R) и промышленных коммутаторов TTTech с поддержкой TSN. Каждая линия передает потоковое видео с одной из четырех IP-камер. Пятая камера подключена напрямую к панельному ПК.

Синхронизация в сети осуществляется согласно стандарту 802.1AS. Для каждой из линий формируется суммарный кадр, планирование потоков видеоданных происходит по стандарту 802.1Qav. Время цикла составляет 100 мкс. При этих условиях удастся обеспечить стабильную передачу видео в формате Full HD.

На рис. 6 показаны результаты измерений точности синхронизации на одной из линий этого стенда. Точность по стандарту 802.1AS определяется на основе абсолютной разницы значений двух генераторов в сети. В данном случае сигналы генераторов на устройствах сравнивались с сигналом задающего генератора. Измерения проводились на каждом десятом устройстве. Стандартное отклонение (sdev) составило < 50 нс.

Данные передаются в 18 раз быстрее, чем по любой существующей сегодня Ethernet-сети.

О перспективах

Эволюция устройств

С увеличением пропускной способности канала станет более ощутима задержка, вносимая инфраструктурными устройствами. Для доступных сегодня гигабитных коммутаторов характерны значения задержки порядка 2 мкс. В контексте отдельного устройства минимальное время цикла зависит только от программного и аппаратного обеспечения. Сегодняшние прототипы контроллеров шины от В&R могут обеспечить время цикла до 50 мкс как на внутриприборной

шине, так и во внешней сети. Достаточно мощный контроллер сможет обеспечить время цикла 50 мкс для шины из 200 таких устройств. Если к каждому из устройств подключить по 50 модулей ввода/вывода, вся система будет состоять из 10 тыс. узлов.

Ожидается, что в ближайшем будущем появятся устройства, поддерживающие минимальное время цикла, равное 10 мкс.

Развитие экосистемы

Технологии OPC UA и TSN не связаны с конкретным производителем. В настоящее время крупные производители микросхем уже разрабаты-

вают аппаратные решения в области коммуникаций с поддержкой новой технологии, которые в ближайшей перспективе должны по стоимости сравняться с решениями, предлагаемыми сегодня. В однопортовых устройствах можно использовать стандартные Ethernet-контроллеры, поэтому их стоимость должна остаться прежней. Ожидается, что и для двухпортовых устройств дополнительные производственные издержки также будут нулевыми, поскольку в ближайшем будущем поддержка TSN станет обязательным условием для обеспечения конкурентоспособности любой промышленной системы на кристалле (SoC).

Все это говорит о том, что экосистема технологии OPC UA TSN будет включать на порядок больше решений и устройств, чем существующие сегодня экосистемы традиционных полевых шин.

Интеграция существующих систем

Специалисты, занимающиеся разработкой технологии OPC UA TSN, прогнозируют, что в будущем она заменит все сегодняшние решения в области промышленных коммуникаций. Впрочем, в маломасштабных приложениях или в специфических областях применение традиционных систем связи на основе Ethernet может оказаться более целесообразным. В любом случае, переход на новую технологию — это длительный и постепенный процесс.

Поэтому многие производители задумываются о том, как обеспечить совместимость своих технологий с OPC UA TSN. Для этого можно использовать аппаратные решения: шлюз (SERCOS) или специальный коммутатор (EtherCAT). Можно обеспечить совместимость на уровне протокола: поддержку TSN обещают реализовать для технологий Profinet и EtherNet/IP. Группа EPSG⁹ заявляет о том, что протокол POWERLINK также будет полностью совместим с OPC UA.

Те системы, которые не будут напрямую работать поверх TSN, могут трансформироваться в профили или семейства профилей OPC UA.

Взаимовлияние информационных и эксплуатационных технологий

Раньше сферы IT и OT развивались независимо друг от друга. В условиях единой системы связи, объединяющей все системы предприятия, ситуация должна измениться. Решения, традиционные для одной сферы, можно будет адаптировать к использованию в другой сфере. Например, возможно внедрение в систему эксплуатационных технологий служб каталогов. Такие службы в IT используются для управления активами предприятия, пользователями, правами доступа к файлам, сертификатами и т. д. Реа-

лизация этой концепции в сфере OT приведет к более эффективной организации процессов управления.

Заключение

Объемы передаваемых данных на производстве постоянно растут. Поэтому на смену каналу передачи в 100 Мбит приходит гигабитный канал. Современные протоколы передачи данных не обеспечивают эффективного использования полосы пропускания при работе с новой средой передачи. Поэтому их должна сменить новая, более производительная технология.

У OPC UA TSN есть целый ряд преимуществ:

- независимость от производителя,
- универсальность (возможно внедрение в других областях),
- реализация концепции мультисервисной сети,
- поддержка масштабных динамических топологий,
- встроенная безопасность.

Стандарты, описывающие применение OPC UA и TSN в промышленности, находятся на финальной стадии разработки. Производители уже готовят к выходу на рынок устройства с поддержкой TSN. Ожидается, что в перспективе TSN получит такое же широкое распространение, как CAN в свое время.

Список литературы

1. Time Sensitive Networks for Flexible Manufacturing Testbed - Description of Converged Traffic Types: An Industrial Internet Consortium Results. White Paper. IIC:WHT:IS3:V1.0:PB:20180417.
2. D. Bruckner, R. Blair, M-P. Stanica, A. Ademaj, W. Skeffington, D. Kutscher, S. Schriegel, R. Wilmes, K. Wachswender, L. Leurs, M. Seewald, R. Hummen, E-C. Liu, S. Ravikumar. OPC UA TSN. A new Solution for Industrial Communication.
3. Li LU, Dong-qin FENG, Jian CHU. Improving the real-time performance of Ethernet for plant automation (EPA) based industrial networks // Journal of Zhejiang University-SCIENCE C (Computers & Electronics), ISSN 1869-1951 (Print); ISSN 1869-196X (Online).
4. E. Gardiner. Theory of Operation for TSN-enabled Systems, AVnu Alliance, Tech. Rep., 02 2017.
5. Julius Pfrommer, Andreas Ebner, Siddharth Ravikumar and Bhagath Karunakaran. Open Source OPC UA PubSub over TSN for Realtime Industrial Communication, Author Manuscript of the publication in Proceedings of the 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation
6. J. Robert, J.-P. Georges, Éric Rondeau, and T. Divoux. Minimum cycle time analysis of ethernet-based real-time protocols // International Journal of Computers, Communications and Control, vol. 7, no. 4, 2012.

Дитмар Брукнер — начальник отдела системного программного обеспечения,
Штефан Бина — разработчик решений в области IoT В&R (Австрия),
Васина Анастасия Сергеевна — технический корректор В&R (Россия).
 Контактный телефон +7 (495) 657-95-01.
 E-mail: office.ru@br-automation.com
 Http://www.br-automation.com

⁹ <https://www.ethernet-powerlink.org/>