



Автор:
Данилов Н.В.,
ООО НПП «ЭКРА»,
г. Чебоксары Россия.

СТАНДАРТ IEEE 1588 PRECISION TIME PROTOCOL: ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ

Аннотация: рассмотрены особенности программной реализации и существующие недостатки PTP-протокола. Проведен сравнительный анализ PTP-протокола относительно существующих методов синхронизации времени подстанционного оборудования.

Ключевые слова: IEEE 1588, Precision Time Protocol (PTP), Grand Master clock, timestamp, ВМС, синхронизация времени, цифровой фильтр.

Первая версия стандарта IEEE 1588 вышла в 2002 году [1], а вторая редакция – в 2008 году [2]. Протокол точного времени (PTP-протокол) достаточно сложен и насыщен множеством терминов. Поэтому в этой статье рассмотрим только ключевые особенности его реализации.

С момента появления PTP-протокола прошло 10 лет, но серьезной динамики в его развитии мы пока не видим. С чем это связано?

Для обеспечения поддержки PTP-протокола в работающем терминале необходимо приобрести готовый или разработать некий PTP-модуль, который бы обеспечивал эти функции в составе уже работающего терминала. Особенно важным условием такой интеграции является целостность алгоритмов защит терминала после добавления нового функционала. Однако вся проблема в том, что в составе терминала уже имеются собственные часы, которые являются частью внутреннего алгоритма защиты. Поскольку эти часы в данном случае не синхронизированы, то обращаться следует уже к часам PTP-модуля через скоростной интерфейс, что влечет за собой полную переработку программного кода. Другой вариант состоит в том, что можно попробовать синхронизировать терминальные часы с часами модуля. Такой вариант также не приемлем из-за того, что недостаточно использовать стабильную частоту, которую выдает модуль, необходимы выравнивание по началу секунды и контроль календарной даты на часах, которые имеют заведомо меньшее разрешение. Единственный вариант состоит в постепенном

переходе на новую аппаратную платформу, которая уже содержит поддержку протокола PTP, как и всех остальных аппаратных интерфейсов.

Сегодня на рынке есть недорогие микроконтроллеры с поддержкой PTP-функционала. Существует открытое ПО для линукса «linuxrtpp» и «PTPd», а также при желании можно найти платные версии для различных аппаратных платформ. В качестве эксперимента код «демонов» был перенесен на платформу BlackFin (Analog Device) и IPC@CHIP (Beck) совместно с KSZ8463 (Micrel). После компиляции исполняемый код занял примерно 100 кБ во флеш-памяти, и порядка 50 кБ резервируется под рабочие массивы в ОЗУ.

Первое, с чем может столкнуться разработчик – это использование цифровых фильтров в составе кода PTP. Если обратиться к стандарту IEEE 1588, то слово «фильтр» встречается только один раз в контексте использования совместно с «pop-PTP» устройствами. Таким образом, стандарт не дает комментариев по использованию цифровых фильтров. В чем же причина? Если открыть код PTPd, то можно обнаружить 3 цифровых фильтра с разными характеристиками. Первый используется для фильтрации переменной OneWayDelay (средняя время задержки линии), второй для фильтрации OffsetFromMaster (смещение собственных часов относительно часов мастера) и AddendValue (текущее значение коррекции часов). Результирующий процесс коррекции часов после включения питания устройства выглядит так, как показано на рис. 1, 2. Графики взяты из источника [3] и

Рис. 1. График переходного процесса коррекции ошибки часов относительно часов мастера, интервал времени 0-10 минут

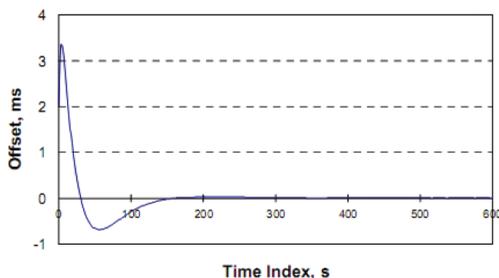
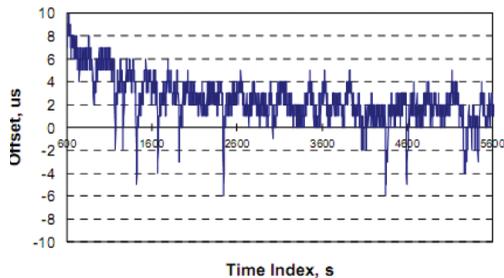


Рис. 2. Завершение переходного процесса, интервал времени 10-90 минут





подтверждаются экспериментальными данными, полученными в лабораторных условиях.

На рисунках видно, что при стандартных коэффициентах переходный процесс коррекции длится около 30 минут! В течение этого интервала время не достоверно. Оптимизируя параметры фильтров, можно выйти на значения 4-5 минут, но при этом появляются нежелательные пульсации смещения собственных часов относительно часов мастера, с которыми и должен бороться фильтр. Для уменьшения времени переходного процесса можно увеличить темп передачи синхро-пакетов. Если обратиться к тексту IEEE 1588 (см. п. 7.7.2.1 [2]), то интервал передачи сообщений должен быть степенью числа 2 и представлен значением в диапазоне от -127 до +127. Также имеется примечание, что значение интервала передачи должно быть компромиссом между тремя независимыми условиями: стабильностью, точностью и загрузкой РТР-сети. На практике в качестве значения `logMessageInterval` используется значение, по умолчанию равное нулю. Кроме того, существующий стандарт Power Profile IEEE C37.238-2011, созданный для интеграции IEEE 1588 в объекты энергетики, рекомендует использовать темп передачи сообщений 1 Гц.

Следующий интересный момент – это реальная точность протокола. Дело в том, что стандарт описывает близкую к идеальной систему, где производится измерение интервалов времени с неограниченной точностью. На деле механизм timestamp реализован на таймере с разрешением в лучшем случае 20 нс. При вычислении разности двух значений погрешность удваивается, соответственно эти значения сразу ограничивают максимально достижимую точность протокола. При передаче синхро-пакетов через РТР-свитчи (например, прозрачные часы) суммарная погрешность возрастает пропорционально количеству свитчей и, в соответствии с Power Profile IEEE C37.238-2011, после шестнадцати трансляций не должна превышать 1 мкс, т.е. она должна удовлетворять классу точности T5. Сама погрешность

представляет собой случайную величину и рассматривается в литературе как гистограмма распределения ошибок в виде колокола.

Для наглядности можно сравнить точность IEEE 1588 с распространенным методом синхронизации SNTP + PPS. Как известно, SNTP использует тот же самый Ethernet-канал связи для получения «грубой» временной метки, которая ежесекундно уточняется по фронту PPS-импульса. Учитывая тот факт, что терминалы содержат часы на основе кварца стандартной точности, то SNTP-запросы необходимо делать достаточно часто, т.е. как минимум 3 раза в минуту. Оба способа удовлетворяют классу точности T5 ($\pm 1 \mu\text{с}$), однако, разница состоит в том, что PPS-импульс, поступая по выделенной линии связи к терминалу, получает вполне конкретную задержку, обусловленную скоростью распространения электромагнитной волны в кабеле. Это значение может быть легко скомпенсировано предварительно заданной константой, в то время как в РТР-часах очередное значение коррекции можно предсказать с определенной вероятностью только статистически.

Коротко рассмотрим безопасность РТР-протокола с точки зрения несанкционированных воздействий. Как известно, в основе протокола лежат мультикаст-сообщения, адресованные группе абонентов. Однако данные пакеты, по своей сути, являются широковещательными, поскольку

проходят через все узлы сети (или узлы, объединенные одной VLAN), а фильтрация сообщений происходит на уровне сетевых драйверов устройств. Для того чтобы изменить время системы, достаточно подключиться в любой точке сети с помощью компьютера, на котором имеется программная реализация GrandMaster Clock с наивысшим приоритетом. В соответствии с BMC-алгоритмом IEEE 1588, ведущий мастер «увидит» Announce – сообщение неизвестного мастера с самым высоким приоритетом и сразу перейдет в режим Passive, после чего уже новый мастер будет определять время в системе. В случае с SNTP(v3) подобного результата можно добиться только путем перехвата сообщений сервера с заменой их содержания, что значительно сложнее в реализации. Для решения вопроса уязвимости от подобных атак стандарт вводит понятие «Experimental security extension», основанное на HMAC-SHA [4], суть которого состоит в том, что источник времени после прохождения процедуры авторизации может быть достоверным или недостоверным. Не углубляясь в детали алгоритма, следует отметить, что седьмой бит (Security) поля `flagField`, согласно стандарту IEEE 1588, пока остается резервным, а сам алгоритм групповой аутентификации объявляется не иначе как экспериментальным. Остается предполагать, что новая версия протокола или иной стандарт в будущем прояснит этот момент.

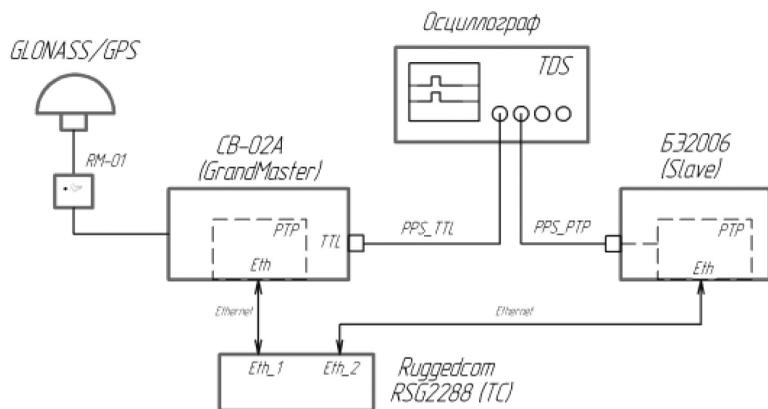


Рис. 3. Схема испытаний CB-02A и B32006 совместно с RuggedCom RSG2288



Данилов

Николай Владиславович

Дата рождения: 10.07.1969 г.
В 1995 г. окончил ЧГУ ЭТФ по специальности «Промышленная электроника». Работал инженером-конструктором в ОАО «ВНИИР», ЗАО «Волмаг», гл. конструктором ООО «Протект». С 2008 г. и по настоящее время — заведующий сектором отдела системных задач ООО НПП «ЭКРА».



Сервер точного времени СВ-02А
ООО НПП «ЭКРА»

Протоколы:

- GPS/GLONASS.
- SNTP v.3.
- IRIGB-00x.
- NMEA-0183.
- PPS, PPM.
- PTP v.2 GrandMaster (IEE1588).

Интерфейсы:

- 2Ethernet 10/100Mbit.
- RS485/422.
- 2TTL.
- 2Fх.

Использование свитчей без поддержки PTP (non-PTP) также интересно разработчикам, учитывая высокую стоимость PTP-коммутаторов. Однако стандарт IEEE 1588 также не дает пояснений относительно применения non-PTP-свитчей. При появлении обычного свитча на пути пакета синхронизации пакет получает задержку в среднем от 7 до 50 мкс в зависимости от загруженности сети (данные получены экспериментально при использовании промышленного свитча MOXA EDS-408A-MM-ST). Тем не менее существуют отчеты лабораторных исследований [3] таких ситуаций, в соответствии с которыми реально достижимая точность составляет 5 мкс на один обычный свитч при средней нагрузке сети, что существенно превышает возможности SNTP-протокола.

Необходимо упомянуть о стоимости коммуникационного оборудования. В России, как известно, подобное сетевое оборудование не производится. Его основные разработчики – это зарубежные компании RuggedCom, Hirschmann, Мoха, GarrettCom и другие. Сегодня стоимость PTP-свитча зачастую превышает стоимость современного терминала РЗА, что явно не способствует быстрому внедрению подобного оборудования на объектах энергетики.

На данный момент протокол IEEE 1588 входит в состав программного обеспечения сервера точного времени СВ-02А и контроллера присоединения БЭ2006 производства ООО НПП «ЭКРА». СВ-02А и БЭ2006 успешно прошли тестирование совместно с сетевым оборудованием RuggedCom RSG2288. Точность синхронизации СВ-02А и БЭ2006 составила ±50 нс. Схема испытаний точности синхронизации приведена на рис. 3.

Заключение

1. PTP-протокол имеет очевидное преимущество, которое позволяет использовать один и тот же Ethernet-кабель связи для передачи как данных, так и телеграмм синхронизации.
2. PTP-протокол обеспечивает точность синхронизации по классу Т5 МЭК 61850-90-5 (так же, как и традиционный способ синхронизации SNTP + PPS), но из-за нарастающей погрешности имеет ограничение по максимальному количеству PTP-свитчей.
3. Разработчикам и проектантам следует учитывать наличие времени переходного процесса при включении PTP-оборудования, которое может достигать десятков минут.
4. Стандарт IEEE 1588 при подробном изучении вызывает ряд вопросов, которые требуют решения, например, вопросы безопасности протокола, возможности применения готовых или стандартных цифровых фильтров в составе алгоритма, а также вопросы совместного использования PTP и non-PTP-оборудования в одной сети.
5. Темпы внедрения PTP-протокола на объектах энергетики будут напрямую зависеть от стоимости коммуникационного оборудования.

Литература

1. IEEE Std.1588-2002: IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
2. IEEE Std.1588-2008: «Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems».
3. «Design Considerations for Software Only Implementations of the IEEE 1588 Precision Time Protocol», Kendall Correll, Nick Barendt.
4. US Secure Hash Algorithms (SHA and HMAC-SHA) Network Working Group D. Eastlake.