СЕТИ 5G: распределение сигналов синхронизации на сетевом оптическом транспортном уровне

Часть 3. Сетевая синхронизация по фазе/времени

С.Коган, к.т.н., советник генерального директора компании "Т8" по формированию технической стратегии / kogan@t8.ru

DOI: 10.22184/2070-8963.2022.106.6.42.53

В цикле статей анализируются общие требования к синхронизации сетей мобильной связи 5G (часть 1), рассматривается порядок распределения сигналов синхронизации по тактовой частоте (часть 2) и по фазе/времени (часть 3) поверх оптического транспортного уровня OTN/DWDM-сети мобильной связи 5G.

Введение в протокол точного времени PTP 1588v2

Распределение по сети меток точного времени и фазы необходимо для поддержки телекоммуникационных услуг, предоставляемых поверх инфраструктуры сети мобильной связи 5G (МСЭ-Т G.8275).

Традиционная сетевая синхронизация опиралась на точное распределение тактовой частоты (для тактовой синхронизации используется физический уровень сети SDH/SyncE), но развивающиеся сети мобильной связи требуют также, как отмечалось в первой части этой статьи, точного распределения параметров фаза/время.

По мере эволюции от сетевой инфраструктуры, ориентированной в основном на технологии ВРК/TDM, к пакетно-ориентированной (преимущественно Ethernet) меняются возможности и способы распределения сигналов синхронизации.

Как показано во второй части этой статьи, для синхронного Ethernet разработаны рекомендации МСЭ-Т G.8261, G.8262 и G.8264, в соответствии с которыми можно использовать физический уровень Ethernet в качестве механизма распределения тактовой частоты, аналогичного методам, применяемым для тактовой сетевой синхронизации (ТСС) на сетях, построенных на принципах синхронной цифровой иерархии (SDH).

Распределение по сети меток фаза/время связано с использованием относительно нового протокола точного времени PTP (Precision Time Protocol). Пакеты PTP с метками времени инкапсулируются в циклы (кадры) Ethernet или дейтаграммы IP, поэтому сообщения PTP могут подвергаться влиянию со стороны сетевого трафика. Плохое качество синхронизации по параметрам фаза/время сказывается на качестве работы систем мобильной связи LTE-TDD, LTE-A и 5G NR. Внедрение протокола PTP на современных сетях мобильной связи нацелено на освоение более сложных приложений завтрашнего дня, для реализации каждого шага которых потребуются высокоточные метки времени [10].

Документ IEEE1588 PTP существует в двух версиях: IEEE1588v1 и IEEE1588v2. Спецификации стандарта

IEEE 1588v1 были впервые опубликованы в 2002 году, спецификации стандарта IEEE 1588v2 – в 2008-м.

Две версии IEEE1588 не заменяют одна другую: у них разные функции [12].

Версия v1, разработанная для систем измерения и управления промышленной автоматикой, ориентирована на корпоративные местные сети.

Отличие версии v2, основанной на версии v1, в том, что она доработана специально для телекоммуникационных сетей. Более того, стандарт IEEE 1588-2008 изначально был предназначен для пакетных сетей.

Требования к протоколу точного времени PTP для синхронизации по фазе/времени на пакетно-ориентированной сети (packet-based networked systems) предусмотрены стандартами IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, а именно IEEE 1588-2008 и IEEE 1588-2019. В этих стандартах указаны пределы абсолютной ошибки по времени TE (Time Error) между центральным задающим генератором PRTC и базовой станцией мобильной связи, а также относительной ошибки по времени между соседними базовыми станциями. Стандартизация 1588v2 рассматривается в сочетании с существующими механизмами синхронизации по тактовой частоте для функциональности SyncE/eEEC, изложенными во второй части этой статьи.

Распределение сигналов сетевой синхронизации фаза/время поверх оптоволоконного транспортного сетевого уровня OTN/DWDM связано с необходимостью соблюдения дополнительных требований как к транспортному оборудованию, так и к оптоволоконной среде передачи.

Сетевое распределение сигналов синхронизации по фазе/времени

Для того чтобы обеспечить развертывание синхронизации фаза/время в телекоммуникационных сетях, согласно 1588v2, МСЭ-Т установлен ряд технических требований, гарантирующих, что механизм, определенный в IEEE1588v2, позволит выполнить требования мобильных сетей 5G, в которых используется технология TDD. В документах МСЭ-Т описываются, например, доступный бюджет временной ошибки, или максимально допустимая фазовая ошибка, представленная в единицах мкс или нс, а также распределение этого бюджета по сетевым элементам и технические характеристики конкретных устройств.

Рекомендации, относящиеся к сетевой синхронизации по фазе/времени, представлены в следующих документах МСЭ-Т G.827x [7, 11]:

- МСЭ-Т G.8271 Time and phase synchronization aspects of packet networks:
  - в G.8271 определяются аспекты синхронизации фаза/время, которые необходимо учитывать в сетях с коммутацией пакетов;
  - в G.8271.1 Network limits for time synchronization in packet networks with full timing support from the network определяются требования к временным и фазовым ошибкам для сетей с коммутацией пакетов, включая требования к этим параметрам, распределенные по сети с полной поддержкой синхронизации FTS (full timing support, то есть с включением T-BC в каждом узле сети);
  - в G.8271.2 Network limits for time synchronization in packet networks with partial timing support from the network определяются требования к временным и фазовым ошибкам для сетей с коммутацией пакетов, включая требования к этим параметрам, распределенные по сети с частичной поддержкой синхронизации PTS (partial timing support, то есть с включением T-BC не во всех узлах сети).
- МСЭ-Т G.8272 Timing characteristics of Primary reference time clock:
  - в G.8272 уточняются временные характеристики первичного эталонного генератора (primary reference time clock, PRTC); рекомендация также включает требования к оборудованию, которое интегрирует PRTC и T-GM. В рекомендации определена временная ошибка, а также низкочастотные (вандер) и высокочастотные (джиттер) дрожания в режиме захвата частоты (locked mode). Определены интерфейсы, которые могут использоваться в оборудовании этого типа.
- МСЭ-Т G.8273 Framework of phase and time clocks:
  - в G.8273 представлены требования к задающим генераторам меток времени/фазы. Определены методы тестирования и измерения времени/фазы для различных типов генераторов.
- МСЭ-Т G.8273.2 Timing characteristics of telecom boundary clocks and telecom time slave clocks:
  - в G.8273.2 определены требования к пограничным задающим генераторам (telecom boundary clocks, T-BC) и прозрачным ведомым генераторам (T-TSC), в том числе требования к характеристикам T-BC и T-TSC при полной поддержке синхронизации FTS (Full Timing Support) и при наличии синхронного Ethernet.

- МСЭ-Т G.8273.3 / Y.1368.3 (10/20) Timing characteristics of telecom transparent clocks for use with Full Timing Support (FTS) from the network:
  - в G.8273.3/Y.1368.3 определены минимальные требования к устройствам временной и фазовой синхронизации, используемым для синхронизации в сетевой архитектуре с полной поддержкой распределения временной и/или фазовой синхронизации FTS.
- МСЭ-Т G.8273.4/Y.1368.4 (03/20) Timing characteristics of telecom boundary clocks and telecom time slave clocks for use with Partial Timing Support (PTS) support from the network:
  - в G.8273.4/Y.1368.4 определены минимальные требования к устройствам временной и фазовой синхронизации, используемым для синхронизации в сетевой архитектуре с частичной поддержкой распределения временной и/или фазовой синхронизации PTS.
- МСЭ-Т G.8275 Architecture and requirements for packet-based time and phase distribution:
  - в G.8275 представлена архитектура распределения сигналов синхронизации фаза/время для пакетных сетей.
- МСЭ-Т G.8275.1 PTP profile for time/phase sync (FTS):
  - в G.8275.1 представлен профиль электросвязи на основе протокола точного времени для фазовой/временной синхронизации с полной поддержкой синхронизации от сети FTS.
- МСЭ-Т G.8275.2 PTP profile for time/phase sync (PTS):
  - в G.8275.2 представлен профиль электросвязи на основе протокола точного времени для фазовой/временной синхронизации с частичной поддержкой по синхронизации от сети PTS.

G.8275.2 отличается от G.8275.1 тем, что относится к случаям, когда не требуется, чтобы каждое устройство (узел) в сети участвовало в интерактивных обменах по протоколу PTP.

Ниже представлены стандартные определения из документов IEEE и МСЭ-Т для описания классов устройств с различными возможностями и характеристиками, которые используются для сетевой синхронизации фаза/время:

- Grandmaster (GM), названный в документах МСЭ-Т телекоммуникационными основными часами (задающим генератором) (T-GM, Telecom Grandmaster). Основные часы (задающий генератор) GM обычно располагаются в ядре (Core) сети мобильной связи. В сетях синхронизации, состоящих из разных доменов, T-GM – главный тактовый генератор в каждом домене PTP. Функцию T-GM в ядре сети мобильной связи выполняет PRTC.
- Boundary clock (BC) – граничные часы (BC), названные в документах МСЭ-Т телекоммуникационными граничными часами (T-BC). Устройство включает встроенные часы PTP клиента (built-in PTP clock client), соединенные с ведущим часами PTP (PTP master). Такая конфигурация позволяет сетевому узлу, в частности, IP-маршрутизатору, или Ethernet-коммутатору, либо пакетному транспондеру/мукспондеру с L2-функциональностью системы OTN/DWDM, или блокам, обслуживающим отдельный оптический канал синхронизации, например, OTC (Optical Timing Channel системы OTN/DWDM), синхронизировать местные часы (например, T-BC в данном узле) от сигнала, приходящего от вышестоящих источников сигнала, например T-GM/T-BC, и выступать в качестве основных (ведущих) часов по отношению к любым клиентским часам типа T-BC, находящимся ниже по сети.
- Transparent clock (TC) – прозрачные часы, названные в спецификациях МСЭ-Т телекоммуникационными прозрачными часами (T-TC). Функциональность TC позволяет измерять любую задержку сигнала внутри устройства коммутации или маршрутизации пакетов, либо в пакетном транспондере/мукспондере с L2-функциональностью системы OTN/DWDM, или в блоках, обслуживающих отдельный оптический канал синхронизации, например OTC, и корректировать метки времени в исходящем из этого устройства сигнале PTP, чтобы компенсировать внутреннюю задержку. Такое решение снижает влияние данного узла на поток меток PTP при меньших затратах, чем в T-BC. Однако характеристики T-TC хуже, чем у устройств T-BC. Уровень компенсации более низкий, возникают проблемы при наличии длинных цепочек узлов. В общем случае этот функционал подходит для более ограниченного диапазона сетевых архитектур, чем это возможно для T-BC.
- Time slave clock (TSC) – ведомые часы времени, названные в спецификациях МСЭ-Т телекоммуникационными ведомыми часами (T-TSC). Это оконечное устройство, именуемое иногда клиентом часов, получает метки времени, переданные по всей сети. Обычно оно

расположено в блоках электронной обработки BBU базовых станций 4G LTE, или в блоках DU (Distributed Unit), либо RU (Radio Unit) на сети 5G.

Допустимые погрешности по параметрам сетевой синхронизации фаза/время по рекомендации МСЭ-Т G.8271.1

Основная причина, по которой управление асимметрией так важно, заключается в том, что IEEE 1588-2008 предполагает, что сеть является симметричной, с одинаковой задержкой в обоих направлениях передачи сигнала по сети.

В соответствии с МСЭ-Т G.8271.1 необходимо учитывать как задержку в узлах сети, так и асимметрию в задержках на оптоволоконных участках между узлами сети. Если задержка асимметрична, алгоритм PTP все еще работает, но асимметрия вносит ошибку, составляющую половину разницы задержек (то есть асимметрии). Один из прямых источников асимметрии – разница в длине волокна между направлениями передачи (TX) и приема (RX). Если даже предположить, что длины оптических волокон в кабеле в обоих направлениях в основном одинаковы, на телекоммуникационных узлах волокна кабеля могут быть соединены со станционными волокнами разной длины. Учитывая, что свет распространяется по волокну со скоростью около 20 см/нс, разница в длине в 10 м приведет к ошибке 50 нс/2 = 25 нс, которой нельзя пренебречь.

Для транспортной сети мобильной связи 5G основным требованием при проектировании сети, удовлетворяющей правилам синхронизации, является управление статическими (cTE, constant Time Error) и динамическим, то есть переменными (dTE, dynamic Time Error) временными ошибками во всех компонентах сетевой инфраструктуры. Статическая составляющая ошибки cTE может быть компенсирована граничными часами (T-BC). Скомпенсировать переменную составляющую dTE ошибки значительно сложнее [17].

В оптоволоконной транспортной телекоммуникационной сети существуют источники асимметрии, меняющиеся во времени, и в некоторых случаях довольно быстро. Источники асимметрии при прозрачной передаче пакетов по транспортной сети OTN/DWDM представлены ниже:

- на электрическом уровне сети характеристики синхронизации фаза/время ухудшаются из-за переменной асимметрии, вносимой буферизацией First-In First-Out (FIFO) в ЦСП/DSP, используемых при когерентном приеме, а также при размещении сигнала в структуре OTN (в полезной нагрузке блоков данных OPUk/ODUk и при реализации OTN кросс-коммутации);
- на оптическом уровне сети характеристики синхронизации фаза/время ухудшаются из-за переменной асимметрии, возникающей при защитном переключении (protection switching) оптических каналов и восстановлении (restoration) оптических каналов по алгоритму GMPLS/ASON. Эти события могут привести к изменению протяженности оптоволоконных соединений и вызывать внезапные колебания величины задержек (асимметрии) в оптических каналах.

Для сетевых компонентов с динамичным характером функционирования, как, например, IP-маршрутизатор, коммутатор Ethernet, оптический канал системы OTN/DWDM с когерентным

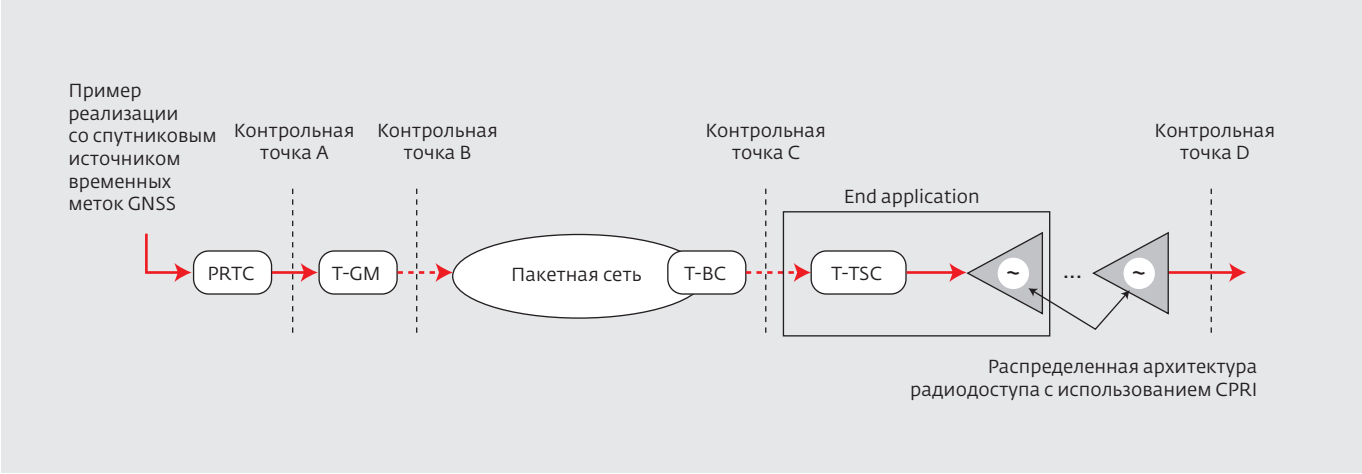

Рис.5. Контрольные точки сети для нормирования требований к максимальной погрешности по времени (МСЭ-Т G.8271.1)

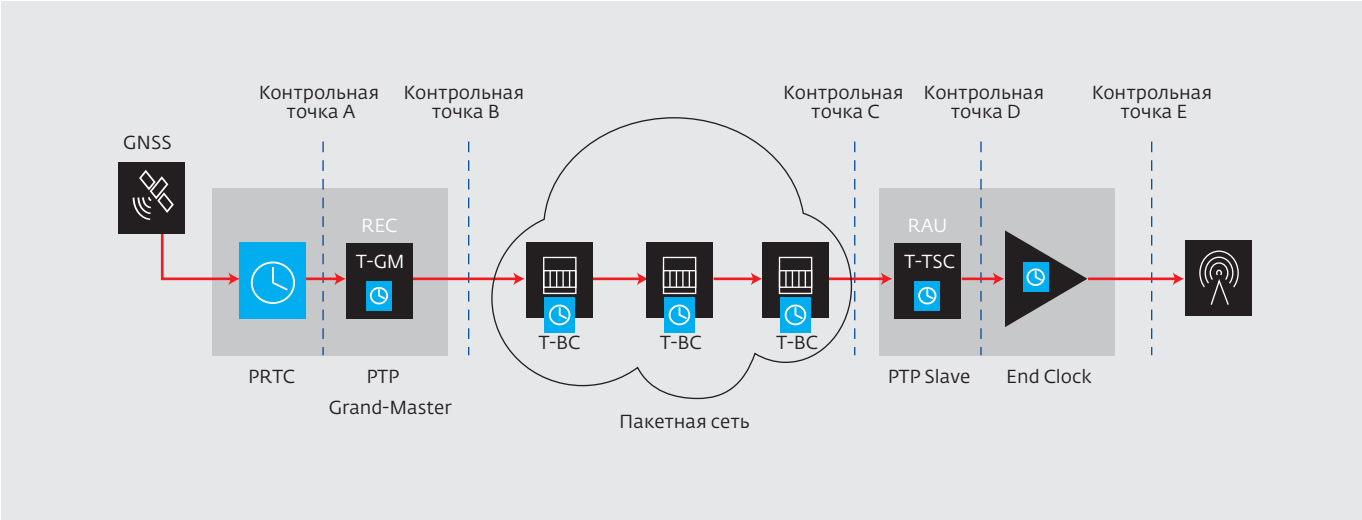

Рис.6. Модель распределения сигналов PTP по сети при полной поддержке синхронизации фаза/время (FTS) в соответствии с ITU-T G.8271

приемом и т. п., cTE рассчитывается с использованием среднего измерения временной ошибки за 1000-секундный период. Фиксированная асимметрия нежелательна, но если она неизбежна, то в большинстве случаев протокол IEEE 1588v2 PTP по-прежнему подходит, если фиксированную асимметрию скомпенсировать с использованием предусмотренной в этом протоколе статической коррекции.

Поскольку параметр cTE на действующих сетях в основном определяется оптоволоконным транспортным уровнем DWDM, то может оказаться, что для поддержания требуемых характеристик синхронизации функционал T-BC следует размещать в промежуточных узлах транспортного уровня DWDM.

Контрольные точки сети, упомянутые в рекомендации МСЭ-Т G.8271.1 для нормирования требований к максимальной погрешности по времени, отражены на рис.5.

Во всех узлах сети с функциональностью FTS предусматриваются измерение и компенсация задержки при распространении меток фаза/время по сети от T-GM до этого узла. Абсолютное значение ошибки по времени TE (Time Error) на уровне соты сети мобильной связи 5G NR TDD (между точками A и D) не должно превышать +/– 1,5 мкс [13], абсолютное значение TE между точками A и C – 1,1 мкс [14]. Запас в 400 нс оставлен для выполнения нормы ±1,5 мкс на радиоинтерфейсе (уровень точности 4 в табл.7).

Шесть уровней классов точности целевых показателей ошибки по времени для систем мобильной связи LTE & LTE Advaced & 5G NR согласно рекомендации МСЭ-Т G.8271 представлены в табл.7.

Телеком-профили PTP 1588

Для использования PTP в телекоммуникациях были определены два профиля G.8275.1 (PTP с полной поддержкой синхронизации из сети / PTP with full timing support from the network) и G.8275.2 (PTP с частичной поддержкой синхронизации из сети / PTP with partial timing support from the network).

Цель профиля МСЭ-Т G.8275.1 Time/Phase Profile IEEE 1588 with Full Support from Network – достижение наивысшей точности работы приложения PTP. В каждом узле сети с IP-маршрутизаторами, или Ethernet-коммутаторами, либо узлами оптоволоконной сети OTN/DWDM необходимо расположить граничный задающий генератор (граничные часы) T-BC. Модель распределения сигналов PTP по сети при полной поддержке синхронизации фаза/время (FTS) в соответствии с ITU-T G.8271 показана на рис.6.

В документах МСЭ-Т представлена полностью стандартизованная, детерминированная и управляемая архитектура синхронизации, отличия которой заключаются в следующем:

- определен тракт между PRTC (Primary Reference Time Clock), T-GM (PTP Telecom Grand-Master Clock), T-BC (PTP Telecom Boundary Clock), T-TSC (PTP Telecom Time Slave clock) и оконечным генератором / оконечными часами для данного приложения (End Application Clock);
- каждый элемент на маршруте между узлами T-GM и T-TSC должен включать функциональность обработки сигнала PTP (PTP aware);
- должна обеспечиваться комбинация функциональности SyncE и PTP, где SyncE выполняет

Таблица 7. Шесть уровней классов точности целевых показателей ошибки по времени

Уровень точности	Требования к величине допустимой ошибки по времени	Типичные приложения (для информации)
1	500 мс	Биллинг – комплекс процессов и решений на предприятиях связи, ответственных за сбор информации об использовании телекоммуникационных услуг, их тарификацию, выставление счетов абонентам, обработку платежей (Billing). Аварийная сигнализация (Alarms)
2	100 мкс	Мониторинг задержки IP-пакетов (IP/Packet Delay monitoring). Задержка пакета – это интервал времени, необходимый для прохождения пакета по сети из конца в конец
3	5 мкс	LTE TDD (для больших сот), двойное подключение по синхронизации (Sync Dual Connectivity, SDC). SDC позволяет устройству пользователя (User Equipment, UE) одновременно передавать и принимать данные на нескольких компонентных несущих от двух обслуживающих узлов / сот или групп сот – различают главный узел (Main Node, MN) и вторичный узел (Secondary Node, SN). Требования по SDC при разнице распространения между eNB/gNB до 7 км согласно FR1 38.101-1. Rel 17, март 2021 года, 5G NR CA FR1 (sqimway.com)
4	1,5 мкс	ULTRA-TDD, LTE-TDD (для малых сот), NR TDD, Wimax-TDD (для некоторых конфигураций), двойное подключение по синхронизации (Sync Dual Connectivity, SDC). Требования по SDC при разнице распространения между eNB/gNB до 9 км согласно R1 38.101-1. Rel 17, март 2021 года, 5G NR CA FR1 (sqimway.com). NR intra-band non-contiguous and inter-band CA: – если компонентные несущие являются смежными в одной и той же полосе частот, то это внутридиапазонная агрегация (объединение) смежных несущих (intra-band non-contiguous carrier aggregation, CA); – если компонентные несущие находятся в одной и той же полосе частот, но разделены промежутком, то это междиапазонная агрегация (объединение) несущих (inter-band CA)
5	1 мкс	Wimax-TDD (некоторые конфигурации)
6A	260 нс	LTE intra-band non-contiguous and inter-band CA, NR (RF1) Intra-band contiguous CA. 3GPP 38.104, sect. 9.6.3.2
6B	130 нс	LTE intra-band contiguous CA. NR (RF2) Intra-band contiguous CA. 3GPP 38.104, sect. 9.6.3.2
6C	65 нс	LTE и NR MIMO или TX diversity transmission. Разнесение при передаче (TX diversity transmission) – это радиосвязь с использованием сигналов, исходящих от двух или более независимых источников, которые были модулированы идентичными информационными сигналами и в любой момент времени могут отличаться характеристиками передачи. При использовании разнесенной передачи и приема степень улучшения принимаемого сигнала тем выше, чем больше независимость между характеристиками затухания этих сигналов. 3GPP 38.104, sect. 9.6.3.2

функцию синхронизации по частоте (syntonization), а PTP – синхронизации по параметрам фаза/время.

Но не все обновления сети предполагают ее полную модернизацию. Некоторые операторы не могут на существующей сетевой инфраструктуре реализовать рекомендации МСЭ-Т G.8275.1, требующие более высоких характеристик устройств, поэтому им приходится обеспечивать частичную поддержку функциональности PTP (при этом T-BC размещаются не во всех узлах сети) согласно рекомендации МСЭ-Т G.8275.2. В общем случае характеристики, представленные в G.8275.2, не рекомендуется использовать для распространения синхронизации на сетях 5G из-за присущих им существенных ограничений.

Классы граничных часов T-BC/T-TSC

Граничные часы T-BC/T-TSC (в соответствии с G.8273.2), получая метки времени от предыдущих часов, действуют как фильтр нижних частот для шума во входном сигнале и отправляют далее "отфильтрованную"

версию меток времени. При определении измерительным устройством параметра MTIE (Maximum Time Interval Error) – максимальной ошибки временного интервала, то есть допускаемой при его измерении за заданный период времени, выделенная ошибка в этом устройстве обычно подвергается низкочастотной фильтрации (усреднению за указанный период времени) с использованием той же полосы пропускания, которая, как ожидается, будет применена следующим тактовым генератором в цепочке T-BC, то есть в диапазоне от 0,05 до 0,1 Гц. Для часов класса C и класса D предлагается применять параметр max |TEL| (Maximum absolute time error local) – максимальное абсолютное значение временной ошибки в измеряемой точке при использовании фильтра нижних частот. Для класса D допустимый диапазон значений постоянной составляющей ошибки по времени cTE при использовании фильтра нижних частот составит предположительно +/– 5 нс (все еще в стадии обсуждения). В табл.8 представлены классы T-BC согласно рекомендации G.8273.2.

Рекомендация МСЭ-Т G.8271.1 определяет несколько гипотетических референтных моделей HRM (Hypothetical Reference Model) для профиля фазы/времени. В соответствии с этими моделями можно использовать короткую (рис. 7) либо длинную (рис. 8) цепь последовательно включенных устройств T-BC [15].

Предпочтительно использовать в узлах оптической транспортной сети 5G функциональность T-BC с характеристиками класса B или C, обеспечивающими, согласно МСЭ-Т G.8271.1, более низкие значения cTE. Тогда допускается большая величина асимметрии задержек в оптических волокнах и в сетевых элементах сети OTN/DWDM.

Таблица 8. Классы T-BC/T-TSC по обеспечению точности синхронизации фаза/время

Классы T-BC/T-TSC	Допустимые диапазоны значений для постоянной составляющей ошибки по времени cTE (нс)
A	+/- 50
B	+/- 20
C	+/- 10
D	Для дальнейшего изучения

Требования к синхронизации на уровне радиодоступа сети мобильной связи

Сети 4G LTE / LTE Advanced и 5G TDD работают с архитектурой распределенного радиодоступа RAN (DRAN), включающей блоки электронной обработки BBU 4G или DU 5G, расположенные у базовых станций, рядом с радиоблоком RU/RRH, либо с архитектурой централизованного радиодоступа RAN (CRAN) с блоками электронной обработки BBU/DU, размещенными на небольшом расстоянии (максимум 15–20 км) от центра соты (от радиоблоков). Большинство операторов мобильной связи приступили к развертыванию 5G в соответствии со своими архитектурами 4G LTE DRAN/CRAN.

По мере развития архитектуры 5G с продвинутыми услугами все больше операторов будут переходить на C-RAN с добавлением сети Fronthaul, на которой используются протоколы eCPRI. В 2018 году для разработки единых интерфейсов между системами и ускоренного развития мультивендорных (то есть построенных на оборудовании разных производителей) сетей радиодоступа был создан Альянс O-RAN (Open RAN – открытые системы радиодоступа). Одна из ключевых для него тем – функциональное разделение между узлами Open Distributed Unit (O-DU) и Open Radio Unit (O-RU), которые раньше были проприетарными (их исполнение полностью определял производитель оборудования) и содержались в одном аппаратном блоке. Спецификация функционального разделения, в соответствии с которым оптоволоконный участок сети Fronthaul соединяет O-DU и O-RU, называется Split Option 7.2x. Кроме того, в O-RAN были разработаны документы, определяющие для уровня Fronthaul плоскости [16]:

- контроля и управления (Management Plane, MP);
- пользователей (User Plane, UP);
- передачи управляющей информации/команд (Control Plane, CP);
- синхронизации (Synchronization Plane, SP).

Обеспечение точной синхронизации O-RU на сети Fronthaul – критически важная задача, от выполнения которой зависит способность O-RU передавать радиосигналы с надлежащей точностью. Техническая спецификация O-RAN Fronthaul Control, User and Synchronization Plane Specification (ORAN-WG4-CUS.0) содержит требования к плоскости синхронизации для сети Fronthaul в составе O-RAN. Основные требования к синхронизации O-RAN Fronthaul заключаются в следующем:

- синхронизация выполняется с использованием протокола Precision Time Protocol (PTP) и технологии Synchronous Ethernet (SyncE);

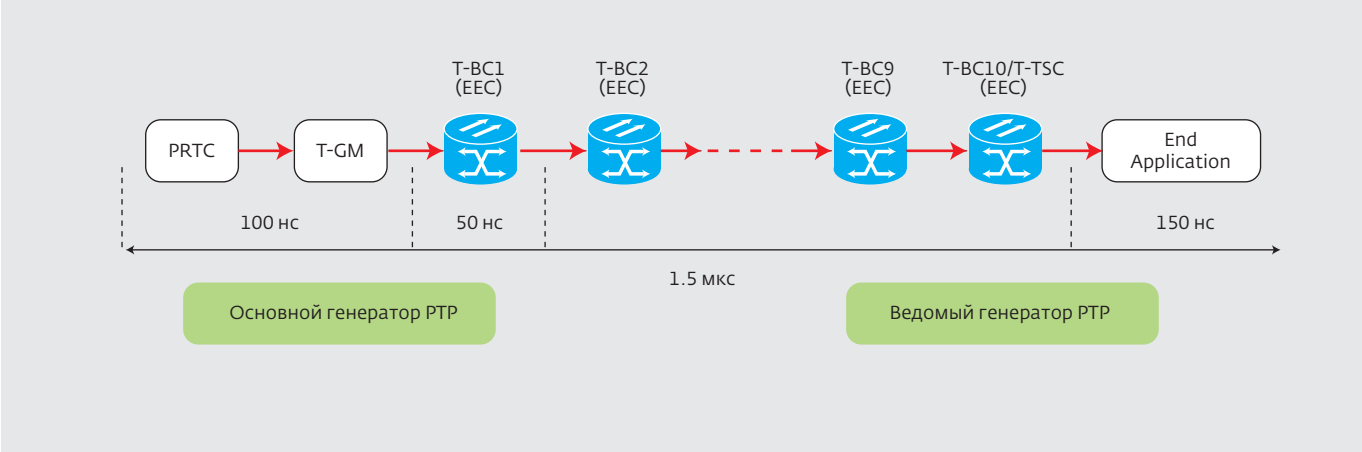

Рис.7. T-BC/T-TSC класса A с максимальной постоянной временной погрешностью 50 нс в узлах сети для использования в коротких цепочках до 10 узлов

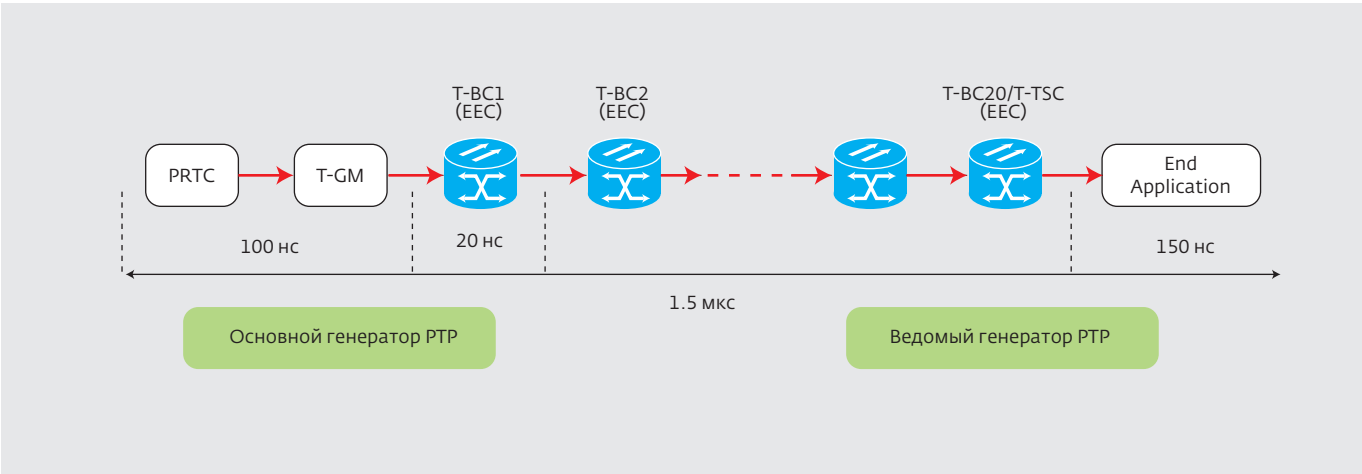

Рис.8. T-BC/T-TSC класса B с максимальной постоянной временной погрешностью 20 нс в узлах сети для использования в длинных цепочках до 20 узлов

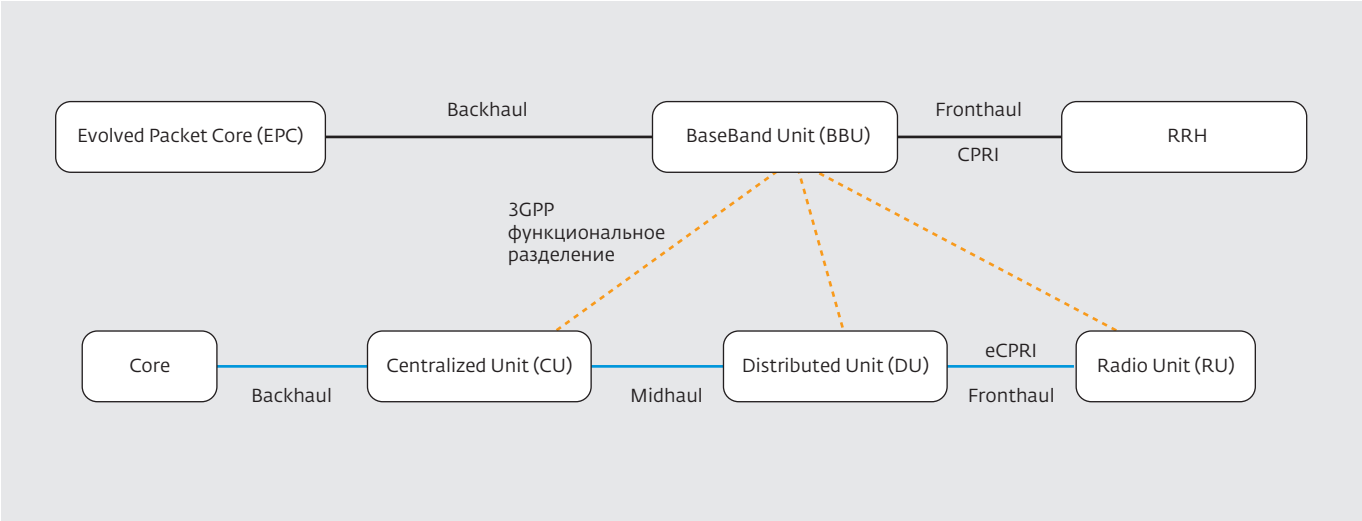

Рис.9. Эволюция к C-RAN согласно 3GPP TR38.801

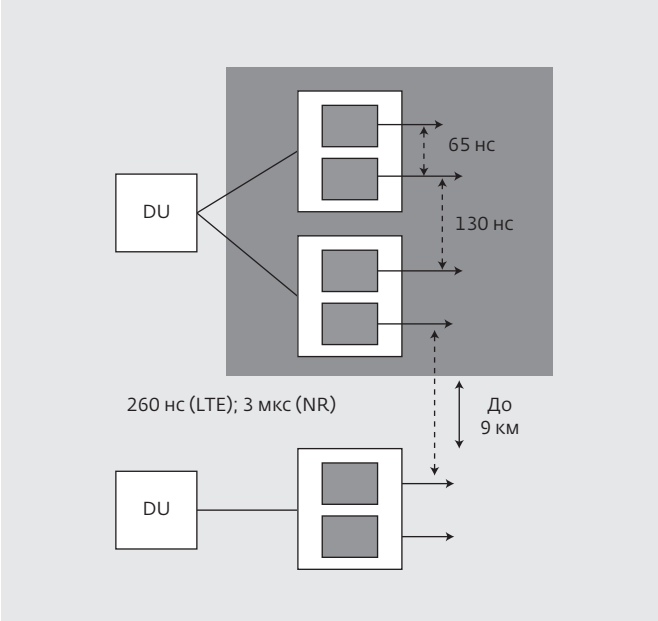

Рис.10. Требования к точности сетевой синхронизации фаза/время между радиоблоками (RU) уровня радиодоступа, подключенными к DU одного кластера

- во всех конфигурациях сетевое оборудование должно использовать PTP-профиль, предназначенный для синхронизации фазы и времени при полной поддержке синхронизации согласно рекомендации МСЭ-Т G.8275.1 (FTS);
- узел O-DU может синхронизироваться от местного или удаленного первичного сервера времени (PRTC).

Требования взаимной точности сетевой синхронизации между радиоблоками (0-RU) уровня радиодоступа, относящимися к одному кластеру, то есть подключенными к O-DU данного кластера, представлены в рекомендациях МСЭ-Т Q13/15 (G.8275, G.8275.1 (FTS) и т. п.) и отражены на рис.10.

Ошибка в согласовании по времени TAE (Time Alignment Error) между двумя координированными (централизованными) радиоинтерфейсами должна соответствовать уровню точности 6:

- соответствует 6A (260 нс), если составляющие несущие находятся в одной и той же полосе частот, но разделены промежутком (intra-band non-contiguous carrier aggregation);
- соответствует 6B (130 нс), если составляющие несущие являются смежными в одной и той же полосе частот (intra-band contiguous carrier aggregation);
- соответствует 6C (65 нс) для MIMO с разнесением направлений передачи.

Для выполнения требований 3GPP к повышению скорости передачи данных при сохранении методов формирования сигналов и кодирования, примененных в сетях LTE, в каналах DL (вниз) / UL (вверх) радиоинтерфейса сети LTE Advanced с пропускной способностью до 1 Гбит/с, реализуются принципы агрегации (группирования) частотных каналов: объединение спектров N частотных каналов сети LTE для разных сценариев использования частотного ресурса и диапазонов частот, определенных Техническими спецификациями 3GPP.

Со стандартизацией требований к уровню Fronthaul сети радиодоступа связана активность таких международных организаций, как 3GPP RAN3 WG, IEEE 802.1 TSN TG (Task Group), IEEE 1914 WG (Worker Group), CPRI Cooperation, O-RAN Alliance, MEF Digital Services Committee. Документ IEEE Std 802.1CM-2018 определяет стандартные профили IEEE Std 802.1Q для передачи сигналов CPRI и eCPRI на уровне Fronthaul с использованием технологии TSN (Time-Sensitive Networking) Ethernet. По определению IEEE, технология TSN представляет собой форму управления сетевым трафиком, которая обеспечивает строго определенное время задержек при передаче данных по сети Ethernet, то есть гарантированную и своевременную доставку чувствительного к задержкам трафика (https://moxa.pro/blogs/articles/tsn-budushchee-promyshlennyh-setey).

Сетевая синхронизация по фазе/времени поверх оптоволоконной транспортной сети OTN/DWDM

Основные факторы, влияющие на величину погрешности (ошибки) при синхронизации по фазе/времени поверх оптоволоконной транспортной сети OTN/DWDM, состоят в следующем:

- асимметрия задержек в оптических волокнах. На сети OTN/DWDM каждое оптическое волокно (ОВ) чаще всего используется для передачи только в одном направлении, а пара ОВ – для организации двунаправленного канала передачи. Различия в длине ОВ на маршрутах туда и обратно (например, из-за наличия сварок ОВ в связи с ремонтом на участках сети и т. п.) будут создавать постоянную временную ошибку. Различия могут возникать и во внешних волокнах на узлах сети в результате использования в них оптических патчкордов разной длины. Каждый метр асимметрии длины оптоволокна создает 5 нс дополнительной статической задержки, что соответствует при расчете задержки величине 2,5 нс для постоянной составляющей ошибки временного положения cTE (constant

Time Error). Эта асимметрия – изначально статическая – может изменяться при ремонте ОВ в случае его обрыва, а также при замене оптических патчкордов в процессе технического обслуживания или реконфигурации сети;

- компенсация дисперсии для некогерентных каналов в системе DWDM. На многих сетях вообще не используются когерентные оптические каналы либо применяется смесь оптических когерентных каналов пропускной способностью 100G и выше (B100G) и некогерентных каналов с манипуляцией уровнем оптической мощности (on/off-keyed) и пропускной способностью 10 или 25 Гбит/с. В этом случае в узлах сети устанавливаются модули компенсации хроматической дисперсии. Компенсация дисперсии на основе компенсирующего волокна (DCF) предусматривает, как наиболее распространенный вариант, использование отрезка специального оптоволокна определенной длины, выбираемой в зависимости от величины компенсируемой дисперсии. Переменная длина ОВ в устройствах компенсации хроматической дисперсии создает проблемы с определением параметра постоянной составляющей cTE в сетях синхронизации. Модули компенсации дисперсии (DCM) на базе оптоволоконных брэгговских решеток (а не оптоволокна) решают эту проблему, поскольку вносят минимальную задержку при передаче сигналов, но они менее распространены на действующих сетях из-за более высокой их стоимости;
- устройства буферизации типа First-In First-Out (FIFO, первым вошел – первым вышел) в когерентных оптических каналах. В оптических каналах системы DWDM, работающих с пропускной способностью 100 Гбит/с и выше (B100G), в процессоре цифровых сигналов (ЦСП/DSP) на приемной стороне канала используются устройства буферизации типа FIFO. Для такого устройства характерна переменная (случайная) задержка, зависящая от его начальной установки, то есть в каждом направлении передачи задержка может изменяться, создавая асимметрию. Это приводит к появлению случайной ошибки временного положения, которая постоянна (cTE) при измерениях на коротких временных интервалах, но может быть динамической (dTE) на более длинных временных интервалах. Так происходит, в частности, в случае перезапуска канала при плановой процедуре обслуживания сети или при возникновении на сети незапланированных событий, например, отказов, связанных с обрывом волокна или отключением электропитания. Эти события нетипичны для отдельного канала в работающей сети, но разброс значений составляющей cTE, который может возникнуть при первоначальном запуске сети и при ее перезапусках, может быть значительным;
- транспондеры и мукспондеры DWDM, в которых реализована процедура размещения сигналов в структуре OTN. В этих OTN СБИС также используют буферные схемы FIFO, которые отличаются тем, что задержка может изменяться при первоначальном запуске и перезапусках системы. Буферные схемы FIFO используются при размещении сигналов в структуре с OTN (например, в полезной нагрузке OPUk блоков данных ODUk), с тем чтобы обеспечить возможность работы с различными типами клиентских сигналов. Они могут стать причиной задержки, причем даже большей по величине, чем задержка в ЦСП/DSP когерентных оптических каналов. Как и в случае с устройствами буферизации FIFO, используемыми в ЦСП/DSP когерентных каналов, величина задержки в них не меняется с момента запуска сети. Но девиация задержки в ходе эксплуатации – случайная величина с широким диапазоном значений. Более того, задержка на этапе запуска сети меняется при каждом перезапуске оборудования и может различаться в каждом направлении передачи;
- ошибка по времени (асимметрия) в устройствах T-BC, расположенных в IP-маршрутизаторах, в Ethernet-коммутаторах или в пакетных транспондерах/мукспондерах с L2-функциональностью системы OTN/DWDM, либо блоках, обслуживающих отдельный оптический канал синхронизации, например, OTC / Optical Timing Channel системы OTN/DWDM. Асимметрия может быть вызвана неточной установкой временных меток. Требования к величине ошибки по времени сформулированы в МСЭ-Т G.8273.2.

Передача сигнала PTP поверх оптической транспортной сети OTN/DWDM в оптических каналах совместно с полезным сигналом проблематична из-за нескомпенсированной асимметрии задержки:

- в устройствах размещения клиентских сигналов в структуре OTN (отмечено в ITU-T Q13/15 Network synchronization and time distribution performance);
- при однонаправленном защитном переключении;

- в случаях, когда T-TSC не встроен в RRH/RU, и эта функциональность необходима в последнем транспортном узле. Требования к уровню фазового шума и параметрам долговременной стабильности частоты для RU предполагают использование особых решений для генератора тактовой частоты в принципе и функциональности DPLL (Digital Phase Lock Loop) в частности.

Асинхронная технология OTN (МСЭ-T G.709) в общем случае не сможет в полной мере гарантировать, что передаваемые пакеты PTP 1588 будут обеспечивать высокоточное распределение по сети сигналов синхронизации фаза/время.

Для обеспечения целостности канала синхронизации и исключения динамической (флуктуационной) асимметрии в задержках сигнала синхронизации на сети OTN/DWDM было предложено передавать на оптических транспортных сетях сигналы синхронизации по отдельному оптическому каналу (например, OTC, Optical Timing Channel [11, 18]). Канал OTC организуется на отдельной длине волны за пределами группового спектра оптических каналов DWDM согласно принципам двунаправленной передачи по одному из двух используемых в системе оптических волокон, что устраняет разницу в задержках, которая может возникнуть при передаче сигналов синхронизации по разным волокнам в каждом направлении. Кроме того, OTC обычно включается в обход OTN-устройств, находящихся в узлах сети, что позволяет избежать динамических (флуктуационных) колебаний задержек, возникающих при асинхронной обработке цифрового потока в связи с размещением (mapping) клиентских сервисных потоков в структуре OTN, их мультиплексированием/демультиплексированием, а также появляющихся в узлах с функциональностью централизованной OTN кросс-коммутации и с ЦСП/DSP в цепях когерентного приема оптических каналов пропускной способностью 100G и выше (B100G).

Заключение

Обеспечение качественной синхронизации – обязательное условие для сетей 5G, а не только необходимость соблюдения минимально возможного стандарта. В рекомендациях МСЭ-T представлены требования к точности доставки сигналов синхронизации по частоте, фазе и времени поверх транспортной сети, чтобы удовлетворить требованиям по синхронизации мобильных сетей 4G LTE и 5G TDD:

- по тактовой частоте – точность не менее 16 ppb для сетевых интерфейсов (МСЭ-T G.8271.1) и не менее 50 ppb – для радиоинтерфейсов (3GPP 38.104, sect. 6.5.1);
- по фазе/времени – точность не ниже +/–1,5 мкс на участке сети между референтными точками A и D и не хуже +/–1,1 мкс – на участке сети между референтными точками A и C (МСЭ-T G.8271.1).

Внедрение таких функций и передовых сетевых методов – Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO), Carrier Aggregation (CA), License Assisted Access (LAA) и Coordinated Multi-Point (CoMP) – обусловило необходимость улучшения параметра временной ошибки до значений 65, 130 или 260 нс между двумя централизованными радиоинтерфейсами (3GPP 38.104, sect. 9.6.3.2).

Высокие параметры синхронизации на уровне оптоволоконной транспортной сети позволят достигнуть показателей распределения сигналов синхронизации, соответствующих или превышающих уровень требований для сетей 5G NR.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стандарты и поколения сотовой связи. https://odbs.ru/blog/sotovaya-svyaz/standarty-i-pokoleniya-sotovoy-svyazi/
2. Программа "Цифровая экономика Российской Федерации", утвержденная Распоряжением Правительства РФ от 28 июля 2017 года № 1632-р. https://base.garant.ru/71734878/
3. Timing and Synchronization Handbook for TDD Deployment. AN. VIAVI. 2021. https://telecoms.com/intelligence/5g-timing-and-synchronization-handbook/
4. Synchronization Distribution in 5G Transport Networks. E-book. Infinera. 2021. https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Synchronization-Distribution-in-5G-Transport-Networks-0282-EB-RevA-0321.pdf
5. **Нетес В.** Второе поколение операторского класса ETHERNET 2.0 // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2012. № 3. С. 44–47.
6. Приказ Минцифры России "Об утверждении рекомендаций по построению сети связи общего пользования в части системы обеспечения тактовой сетевой синхронизации" от 15 декабря 2021 года № 1339. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_409534/
7. ITU-T profiles for IEEE 1588. Integrated Device Technology (IDT) WP. Silvana Rodrigues, Director Systems Design. 2015. https://www.renesas.com/eu/en/document/whp/itu-t-profiles-ieee-1588
8. **Бирюков Н.Л.** Основные тенденции синхронизации и распределения времени в NGN //

Региональный форум по развитию МСЭ-D для региона Европы и СНГ "Сети последующего поколения (NGN) и широкополосная связь". Молдова, Кишинев. 4–6 мая 2010 года. https://www.itu.int/ITUD/tech/events/2010/RDF_EUR/Presentations/Session7/RDF10_EUR_Presentation_NBiryukov_2.pdf

9. Ciena poster The Optical Transport Network Up to 100G. https://www.renesas.com/eu/en/document/whp/itu-t-profiles-ieee-1588
10. Системы точного времени. Представительство Atop в России и СНГ. Atop-PTP-Precision-Timing-RUS.pdf (atoponline.com)
11. NOKIA Synchronization as a service. How to provide phase and time of day information using Precision Time Protocol (PTP) over a transport network: challenges and solutions. WP. 2016. https://onestore.nokia.com/asset/200644?_ga=2.42728614.2078724370.1660467669-508847703.1646743562
12. **Geoffrey M. Garner,** Consultant. IEEE 1588 Version 2. September 24, 2008. Microsoft PowerPoint – 1588v2-2008-gmg-r3.ppt [Compatibility Mode] (ieee802.org)
13. **Stefano Ruffini,** Q13 Rapporteur Geneva, 27 January 2018. ITU-T Q13/15, Network synchronization and time distribution performance Supporting 5G mobile transport and fronthaul. https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/20180127/Documents/2.%20Stefano%20Ruffini.pdf
14. VIAVI Timing and Synchronization in TDD Networks, Application Notes. 2021. https://www.viavisolutions.com/en-us/solutions/timing-and-synchronization
15. **Silvana Rodrigues**, Director Systems Design. Profiles for IEEE 1588. Integrated Device Technology (IDT) WP. 2015. https://www.renesas.com/eu/en/document/whp/itu-t-profiles-ieee-1588)
16. **Joe Mocerino**, Global Solution Architect Communications 5G Backhaul/Fronthaul Opportunities and Challenges. Fujitsu Network. Technical Paper. 2019. https://www.nctatechnicalpapers.com/Paper/2019/2019-5g-backhaul-fronthaul-opportunities-and-challenges
17. EXFO. Timing and synchronization: why it's critical for 5G networks. https://www.exfo.com/en/resources/blog/timing-synchronization-5g-networks/Michael Ritter.
18. ADVA Optical Networking. Delivering Precise Synchronization over Optical Transport Networks. 2017. https://www.lightwaveonline.com/5g-mobile/article/16673583/delivering-precise-synchronization-over-optical-transport-networks