

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ КОГЕРЕНТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ – ОСНОВЫ СКВОЗНЫХ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рыжков Анатолий Васильевич,
Московский технический университет связи
и информатики, Москва Россия,
ryjkov.anatoly@yandex.ru

Шварц Михаил Львович,
Московский технический университет связи
и информатики, Москва Россия,
mschwartz@smsync.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-7-14-22

Manuscript received 12 April 2021;
Accepted 14 May 2021

Ключевые слова: шкала времени, сетевая синхронизация, частотно-временное обеспечение, сетевые протоколы времени NTP, PTP, методы сличения и распределения шкал времени, магистральная сеть связи и сети связи стандартов 4G, 5G и 6G, когерентная сеть

Данная статья является логическим продолжением и конкретизацией работы авторов [1]. Посвящена рассмотрению предпосылок и возможностей создания когерентной сети связи общего пользования в интересах сквозных цифровых технологий. Обоснованию и использованию ядра частотно-временного обеспечения (ЧВО) сети фиксированной связи в качестве основного ядра ЧВО сетей связи стандартов 5G и 6G. На основе Рекомендаций МСЭ-Т проведен анализ по современному состоянию первичных эталонных источников частоты и времени (ПЭВЧ – Primary Reference Timing and Clock – PRTC), основных требований к ним по точностям сигналов частоты и времени, возможности реализации перспективных ПЭВЧ и улучшенных ПЭВЧ (уПЭВЧ – enhanced PRTC – ePRTC) на отечественном оборудовании. Рассмотрены точностные характеристики сигналов частоты и времени на участках сети от источников Государственной службы времени и частоты до уПЭВЧ, между уПЭВЧ ядра магистральной сети и ЧВО сети беспроводной связи. Приведены нормы на допустимые погрешности основных узлов элементов сети, показана их реализуемость.

Информация об авторах:

Рыжков Анатолий Васильевич, г.н.с., д.т.н., профессор, МТУСИ, Москва, Россия

Шварц Михаил Львович, начальник отдела, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия

Для цитирования:

Рыжков А.В., Шварц М.Л. Предпосылки создания когерентной сети связи общего пользования - основы сквозных цифровых технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №7. С. 14-22.

For citation:

Ryzhkov A.V., Schwartz M.L. (2021) Prerequisites for the creation of a co-herent public communication network - the basis of end-to-end digital technologies. T-Comm, vol. 15, no.7, pp. 14-22. (in Russian)

Введение

Цель статьи обоснование целесообразности использования ядра частотно-временного обеспечения (ЧВО) сети магистральной связи в качестве основного ядра ЧВО сетей связи стандартов 5G и 6G.

Под когерентностью будем понимать согласованность протекания процессов в различных точках сети связи общего пользования (ССОП), совпадающих по фазе (частоте) или сохраняющих разность фаз (частот) постоянной во времени с заданной точностью.

Под «сквозными» цифровыми технологиями будем понимать распределенную базу данных (блокчейн), искусственный интеллект, квантовые технологии, робототехнику, беспроводную связь (5G, 6G), промышленный интернет, виртуальную и дополненную реальности, новые производственные технологии согласно Программе «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1632-р от 28.06.2017 г.

В частности, блокчейн (цепочка блоков) – это распределенная база данных, у которой устройства хранения данных не подключены к общему серверу. База данных хранит постоянно растущий список упорядоченных записей в различных блоках. Каждый блок, в свою очередь, содержит метку времени и ссылку на предыдущий блок. Безопасность в технологии блокчейн обеспечивается через децентрализованный сервер, проставляющий метки времени, и одноранговые сетевые соединения через сеть связи. В результате формируется база данных, управляемая автономно, без единого центра. Это делает цепочки блоков удобными для регистрации событий и операций с данными, управления идентификацией и подтверждения подлинности источника.

Важность меток времени. Если серверы сети работают без привязки к общей шкале времени, то сеть подвержена ряду угроз. Среди них можно выделить следующие виды:

- сбой в диагностике функциональных отказов - из-за неточных меток времени нарушается последовательность выполнения программ в пространственно разнесенных сетевых элементах. Упорядочить события в процессе восстановления работоспособности сети с помощью системы управления становится невозможно;

- пропадание архивных данных, возникающее из-за неправильно принятых или отсутствующих меток времени. В этом случае программное обеспечение обслуживания каталогов будет сохранять данные в виде последних версий – устаревшие файлы, требующие замены;

- нарушение безопасности доступа к ресурсам сети – при отсутствии собственной корпоративной шкалы времени вследствие использования серверов NTP (протокол сетевого времени) в Интернете или PTP (протокол прецизионного времени) открываются «дыры» в аппаратно-программных средствах межсетевой защиты, причем неправильные метки не позволяют администратору отследить действия хакеров;

- проблемы с биллингом – без правильных меток времени не работают технические средства защиты информации о прибылях компании, например карт и жетонов, предназначенных для тарификации услуг, невозможно доказать аутентичность электронной подписи на контрактах или своевременность переводов);

- проблемы с переходными процессами в сетях радиосвязи – без единого ЧВО в ССОП в случаях перехода из одной зоны (соты) синхронизации, а также от одного оператора связи к другому, возникают переходные процессы по поиску несущей частоты, ограничивающие достижение максимального объема передаваемой информации и надёжности соединения с абонентом.

Точное время требуется для систем криптографии, способствующее, в случае сбоев, быстрейшему восстановлению паролей, ключей. Применение шифрования, например в блокчейн, гарантирует пользователям синхронизацию копий распределенной цепочки блоков у всех пользователей, а изменения только в тех частях цепочки блоков, по принадлежности, с помощью имеющихся у них закрытых ключей, без которых запись в файлы невозможна.

Сформулированное в названии статьи предложение не является в чистом виде пионерским, но исходя из потребностей практики, разнообразия востребованных услуг, возможностей современных технологий и динамики развития сетей связи требует дальнейшего совершенствования решений по уменьшению погрешности воспроизведения и хранения единиц частоты и времени у потребителя в любой точке сети [1]. Сценарии использования сетей связи в интересах сквозных цифровых технологий на примере 5G представлены на рисунке 1.

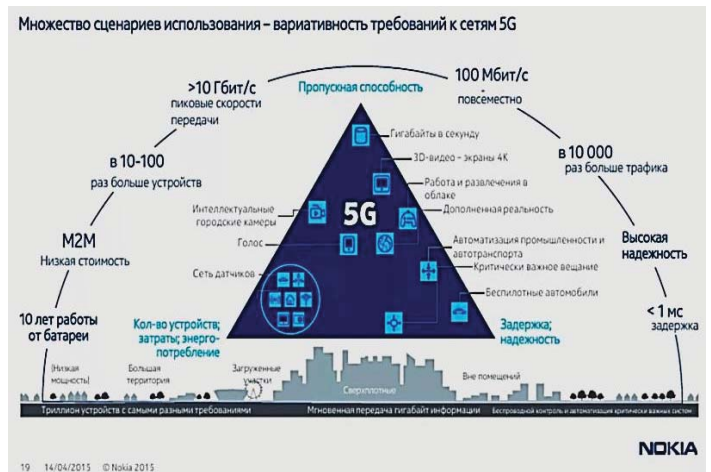


Рис. 1. Сценарии использования сетей 5G

Имеют место различные точки зрения на использование 5G <https://www.tsonline.ru/news/kakie-trudnosti-zhdut-seti-5g-na-predpriyatyah/> (в перспективе 6G [2], обеспечивающей пропускную способность в десятки раз выше по сравнению с 5G), представленные на рисунке 2.

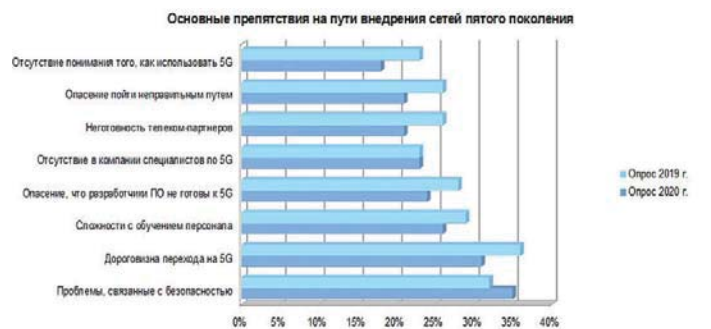


Рис. 2. Препятствия на пути внедрения революционных сетей связи

Из содержания рисунков 1 и 2 следует, что перспектива все же остается за развитием и широким внедрением и использованием систем 5G и (в будущем) систем 6G [2]. Сети 5G можно и нужно считать одной из важных и необходимых составных частей цифровой трансформации и цифровой экономики, особенно беспилотного транспорта (автомобили, роботы, поезда для метро и пригородных железных дорог, дроны и т.п.).

По оценке экспертов Аналитического кредитного рейтингового агентства (АКРА) совокупные инвестиции на развитие сетей 5G в России с 2021 по 2027 год могут составить 1–1,1 триллионов рублей (https://www.rbc.ru/technology_and_media/20/01/2021/6006d49b9a794726acf2482c?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop&nw=1611155437000). Ранее, в ноябре 2020 года, Президиум правительственной комиссии утвердил «дорожную карту» развития 5G в России (РБК: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/5fb614e09a794775a22d9f87>).

Требования к точности единиц времени и частоты в существующей системе частотно временного обеспечения.

В настоящее время промышленность, транспорт, оборона, наука, телекоммуникации, наземная и космическая навигация ориентированы преимущественно на использование сигналов единого точного времени (ЕТВ), передаваемых спутниковыми радионавигационными системами (СРНС), связующимися по существу, если не учитывать задержки сигнала между элементами ввода/вывода информации в сети, когерентными системами (рис. 3).



Рис. 3. СРНС в действии

Сегмент пользователей (применительно к сети связи – сетевых элементов) потенциально может состоять из неограниченного количества спутниковых навигационных приемников, которые принимают сигналы навигационных спутников и производят расчеты текущего местоположения, скорости и времени с погрешностями, определяемыми спутниковой СРНС и аппаратурой потребителя. Требуемая точность установки частоты для стационарных источников не хуже $1 \cdot 10^{-12}$ по отношению к номиналу, а по времени не более ± 30 нс по отношению к шкале всемирного координированного времени (UTC). Для мобильных пользователей характерны два понятия – холодный старт и теплый старт. Первый описывает ситуацию, когда приемнику нужно полу-

чение всей информации для определения места положения. Это может занять до 12 минут. Второй описывает ситуацию, когда у приемника есть почти вся необходимая информация в памяти. В этом случае приемник определит место положения в течение минуты.

Кроме того, отсутствие альтернативных решений по доставке сигналов ЕТВ потребителю может привести и к нежелательным последствиям в части функционирования рассматриваемых технологий из-за неустойчивой работы сетей связи, вызванной:

- возможными преднамеренными (spoofing, jamming) или непреднамеренными воздействиями (физические или электромагнитные, включая чрезмерную активность Солнца) на СРНС;

- некоторыми затруднениями приема сигналов СРНС в условиях города и в закрытых помещениях.

Поэтому в современных сетях электросвязи, базирующихся на высокостабильных первичных эталонных источниках [3,4], соответствующих последним рекомендациям МСЭ-Т и способных хранить шкалу времени определенное время, необходимо использовать сигналы СРНС лишь в качестве резервных (для начальной установки и периодической коррекции ШВ) при невозможности получения ее по наземным линиям связи. Для России это национальная ШВ, корректируемая с UTC – UTC (SU).

Сети 5/6G, предназначенные для передачи больших объемов информации и обеспечения минимально возможной задержки сигналов в сети, основываются на получении высокоточных сигналов синхронизации по частоте, фазе и времени. Одним из перспективных применений сетей 5/6G является возможность централизованного управления технологическими процессами на производстве на основе технологий обработки данных с необходимостью передавать огромные объемы информации в очень короткие сроки. Сети 5/6G позволяют реализовать массовое применение беспилотного транспорта и интернет вещей (IoT), а также могут применяться в военной и космической сферах.

Поскольку время для принятия решений ограничено, то единственная возможность – полагаться на автоматические системы, связанные между собой через сети 5G с высокоточной сетевой синхронизацией по частоте, фазе и времени. Локальные сети 5G уже работают во многих странах – США, Швейцарии, Китае и Южной Корее. По прогнозам аналитиков через пять лет до 20% мобильного трафика будет передаваться через сети 5G <https://www.rbc.ru/trends/industry/5db9815a9a79475ea95ea9d0>.

Согласно ИМТ-2020, существует три базовых сценария использования мобильной связи 5G:

1. BB – Enhanced Mobile Broadband / Улучшенная Мобильная Широкополосная связь. Привычный, но более быстрый и качественный пользовательский интернет со скоростью внутри помещений до 1 Гбит/с, а на улице до 300 Мбит/с.

2. URLLC – Ultra Reliable and Low Latency Communications / Сверхнадёжные коммуникации с низкой задержкой, в которых важна не столько скорость, сколько низкая задержка. Это актуально для автономного транспорта, которому в критической ситуации для принятия решения может отводиться менее миллисекунды. В настоящее время идёт дискуссия о замене подобными технологиями спутниковой навигации.

3. mMTC – massive Machine Type Communication / Массовые межмашинные коммуникации. Межмашинные коммуникации или M2M, а также IoT – отдельный сегмент потребителей связи 5G. Он характеризуется подключением большого числа устройств, чаще всего промышленных, с низким энергопотреблением, для которых основным требованием является стабильность и надёжность подключения. Это, в частности, измерительные устройства, датчики, сенсоры, объекты инфраструктуры умного города.

В последние два десятилетия в мировой практике большое внимание уделяется распределению сигналов ЕТВ от государственных (национальных) эталонов частоты и времени по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), не исключая использование сигналов СРНС. Например, на 42-й международной встрече по системам и приложениям точного времени (Precise time and time interval (PTTI)), прошедшей в США, штат Вирджиния 15 – 18 ноября 2010 г., сформулирована задача достижения к 2030 г. в глобальных сетях связи точности времени на уровне десятков наносекунд.

Различные (основные) сценарии построения когерентных сетей, обеспечивающих реальность достижения таких точностей в гармонии с рекомендациями МСЭ-Т в любом регионе страны, рассмотрены в работе [1]. Когерентная сеть связи общего пользования может исключать ошибку в шкале времени с точностью до единиц-десятков наносекунд как при переходе из одной зоны синхронизации сети в другую зону, так и при переходе из сети одного оператора связи в сеть другого оператора.

Первичный эталонный генератор.

Первичный эталонный генератор (ПЭГ) является основным элементом в системе синхронизации сетей электросвязи и претерпел несколько модификаций: ПЭГ (Primary reference clock – PRC) (Рек. G.811, 09/1999), улучшенный ПЭГ (уПЭГ – ePRC) (Рек. G.811.1, 08/2017), ПЭВЧ и уПЭВЧ (Рек. G.8272, 10/2012 и G.8272.1, 2016) и когерентный первичный эталон времени и частоты (кгПЭВЧ) (Рек. G.8275, редакция 2019, приложение VI).

ПЭГ и уПЭГ по G.811, G.811.1 (рис. 4,а) представляют собой комбинацию трех первичных эталонных источников (ПЭИ) – 2 цезиевых или водородных стандарта и приемник СРНС + вторичный задающий генератор (ВЗГ), формирующий на выходах сигналы частоты 2,048 МГц/Мбит, 10 МГц.

Главное отличие требований Рек. МСЭ-Т G.811 и G.811.1 заключается в ужесточении параметров относительной точности и стабильности синхросигналов на выходах ПЭГ и уПЭГ. По G.811 эти величины должны быть в пределах $\pm 1 \cdot 10^{-11}$, а по G.811.1 – не более $\pm 1 \cdot 10^{-12}$ по отношению к номинальной частоте, а также ее производной - естественному ужесточению требований к величине фазовых шумов, выраженных через характеристики максимальной ошибки временного интервала (МОВИ) и девиации временного интервала (ДВИ). На рис. 5 представлены ограничительные маски для рассматриваемых вариантов ПЭГ (ПЭВЧ) по стабильности частоты и МОВИ.

ПЭВЧ по G.8272 (рис. 4,б) – это, по существу, первичный эталонный генератор, доукомплектованный главными ведущими часами (гроссмейстерские часы (Telecom Grandmaster – G)) на основе протокола прецизионного времени (PTP). Они являются основным источником данных о синхрониза-

ции времени, способны получать информацию о точном времени не только от системы СРНС, но из сети магистральной связи. На выходах ПЭВЧ уже имеют место сигналы не только частоты, но и фазы (времени).

В улучшенном варианте ПЭВЧ - уПЭВЧ (G.8272.1) (рис. 4,в) для повышения точности сигналов частоты и времени предусмотрено применение источников синхронизации уПЭГ, а также частотно-временного комбайнера, который на основе сигналов приёмника СРНС и эталона частоты формирует выходные сигналы времени и частоты.

Другими словами, ПЭВЧ и уПЭВЧ отличаются от ПЭГ тем, что в них реализовано формирование и хранение ШВ на основе сигналов СРНС.

Когерентная сеть с кгПЭВЧ (cn-PRTC) реализуется на основе прецизионных трактов передачи ШВ на базе протокола PTP. Например, «белый кролик» – IEEE 1588v2.1, 2019 г. или аппаратуры передачи сигналов времени и частоты (АПСВЧ) с оптическим модемом (ООО «АЛТО») по выделенным оптическим соединениям с подключением к источнику UTC(k) Государственной службы времени и частоты (ГСВЧ) и к ближайшему на ССОП кгПЭВЧ.

Функциональная схема кгПЭВЧ представлена на рис. 5.

Для сравнения требований к точности формирования частоты и ШВ для ПЭГ, уПЭГ, ПЭВЧ, уПЭВЧ на рис. 6 приведены графики предельно-допустимых характеристик МОВИ для этих устройств. При этом видно, что наиболее жесткие требования к точности формирования частоты и ШВ сформулированы в Рек. G. 8272.1 для уПЭВЧ – не хуже ± 30 нс. Это связано с тем, что уПЭВЧ предназначен для работы в сетях 5/6G, где и нужны повышенные точности формирования и передачи ШВ.

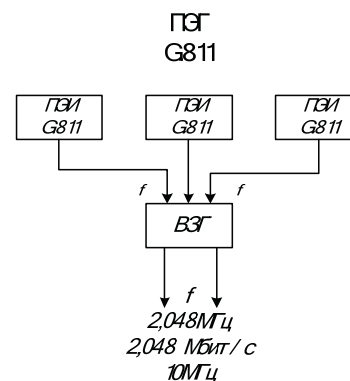


Рис. 4а. Конфигурация первичного эталонного генератора по рек. G.811

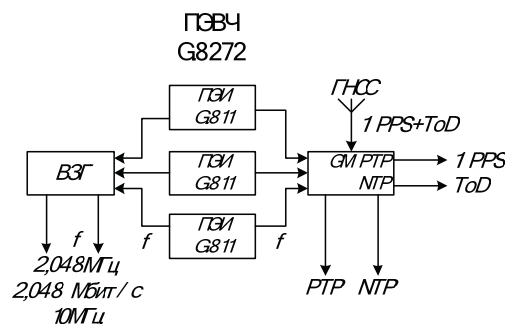


Рис. 4б. Конфигурация первичного эталонного времени и частоты по рек. G.8272

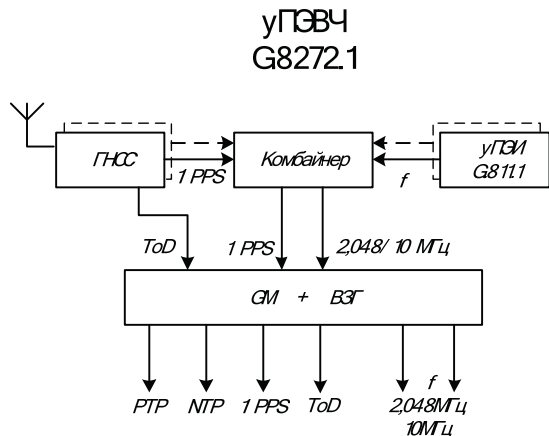


Рис. 4в. Конфигурация первичного эталонного времени и частоты по рек. G.8272.1

сбоев значений частоты и фазы сигналов частоты и времени по результатам обработки сигналов от группы хранителей частоты и времени.

Ч7-317 производится ЗАО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия. Прибор работает с синхронизирующей группой источников сигналов (до 4 шт.) одновременно. Формирование выходного сигнала частоты и времени, параметры которого определяются средним значением в синхронизирующей группе и, при необходимости, введением корректирующих значений частоты, фазы и компенсации дрейфа. Сохраняет формируемые на выходе сигналы частоты и времени при пропадании сигналов на входах. Осуществляет автоматическое исключение из синхронизирующей группы источника сигнала при значительном отклонении значения его частоты от номинального значения. Управление производится с клавиатуры на лицевой панели или с помощью персонального компьютера. Интерфейсы RS-232C и USB.

В последней версии устройства сохранены все достоинства базовой модели и значительно расширены его функциональные возможности:

- введены различные весовые коэффициенты для сигналов, участвующих в формировании групповой частоты. Вносимая прибором погрешность синхронизации относительно групповой частоты не более ± 20 нс;
- реализована отбраковка быстрых скачков частоты входных сигналов;
- реализован новый режим работы «горячее резервирование», при котором выходной сигнал привязан только одному опорному сигналу ведущего стандарта, остальные опорные сигналы используются для резервирования.

В комплект поставки входит специальное программное обеспечение для работы в среде Microsoft Windows™. По существу в Ч7-317 реализованы алгоритм согласования, алгоритм временной шкалы и функция координации [3], предусмотренные в Рек. G.8275 от 2019 г. (приложение V1). Внешний вид Ч7-317 представлен на рисунке 7.

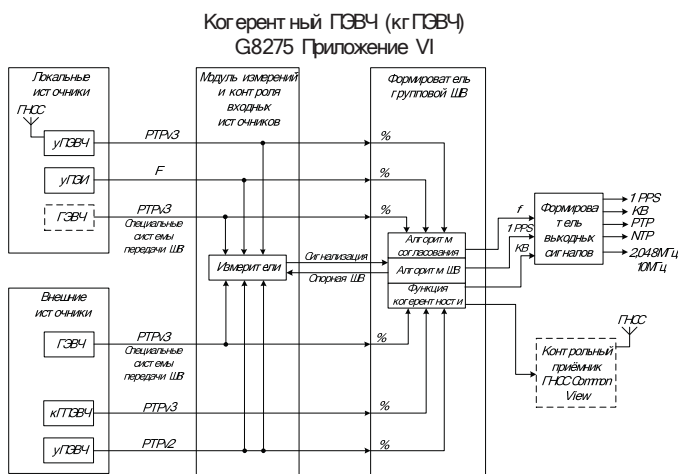


Рис. 5. Функциональная схема кгПЭВЧ

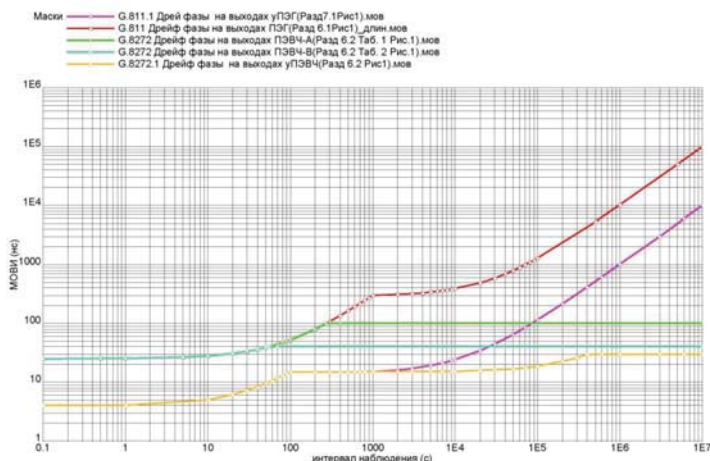


Рис 6. Ограничительные маски по стабильности частоты и МОВИ по Рек. МСЭ-Т



Рис. 7. Внешний вид Ч7-317

Модуль измерений и контроля входных сигналов и формирователь групповой шкалы времени (ШВ) освоены в отечественной практике. Примером может быть формирователь эталонных частот (резервируемый) Ч7-317, предназначенный для формирования и воспроизведения защищенных от

Возвращаясь к рисунку 6, отметим, что сигналы от удаленных источников ГСВЧ или/и других кгПЭВЧ доставляются к рассматриваемому кгПЭВЧ с помощью высокоточной передачи шкалы синхросигналов по ВОЛС от соседних узлов с наличием в них шкалы времени UTC(k). В качестве местного источника частоты может быть водородный стандарт частоты VCN-1008C [4], удовлетворяющий требованиям к уПЭГ Рек. МСЭ-Т G.811.1 от 08/2017 и способный обеспечить хранение ШВ продолжительное время в случае пропадания других сигналов (табл. 1).

Формирование выходных сигналов кгПЭВЧ выполняется по аналогии выходных плат вторичного задающего генератора с необходимым числом выходных портов. Контроль

ный приемник СРНС Common View предназначен для постоянного контроля качества формируемых выходных сигналов.

Таблица 1

Хранение ШВ (по данным фирмы «Осциллокарц»)

Генератор	Фаза с точностью					Частота
	400 нс	1,1 мкс	1,5 мкс	5 мкс	10 мкс	
Кварц	2 часа	4 часа	5 часов	8 часов	14 часов	Сутки
Кварц HQ+	8 часов	13 часов	15 часов	1,2 дня	1,7 дня	0,5 года
Кварц HQ++	15 часов	1,3 дня	2 дня	4 дня	6 дней	1,5 года
Рубидий	15 часов	1,3 дня	2 дня	4 дня	6 дней	≥ 5 лет
Цезий/ Водород	4.6 дня/ 40 дней	12.7 дней	17.3 дней	1.9 месяца	3.8 месяца	∞

В целом изменения, внесенные в ПЭГ и ПЭВЧ, касаются повышения точности и стабильности формируемых ими сигналов частоты и сигналов 1PPS. Потребовалось применение:

- более высокостабильных атомных эталонов частоты;
- относительно сложных двух системных и даже четырех системных (GPS, ГЛОНАСС, БЕЙДОУ и ГАЛИЛЕО) приёмников СРНС, работающих в двух диапазонах (L1 и L2);
- реализации комбинированной системы формирования выходных сигналов 1PPS (так называемое частотно - временных комбайнеров, формирующих на основе эталонной частоты и сигналов приёмников СРНС выходные сигналы частоты и времени – сигнал 1PPS).

Таким образом, по сравнению с традиционными системами ТСС для целей реализации временной синхронизации рекомендациями вводятся новые интерфейсы для передачи сигналов ШВ, а также стандартизован интерфейс сигнала 10МГц, который может использоваться для подключения оборудования пакетной коммутации или радиопередатчиков. По существу кгПЭВЧ является опорным узлом формирования шкалы времени (ОУФШВ).

Когерентная сеть магистральной связи

Условная когерентная сеть (верхний уровень), объединяющая ОУФШВ различных зон синхронизации или/и отдельных операторов связи, представлена на рисунке 8.

Верхний уровень когерентной сети – ГЭВЧ и кгГЭВЧ G8275, Приложение VI

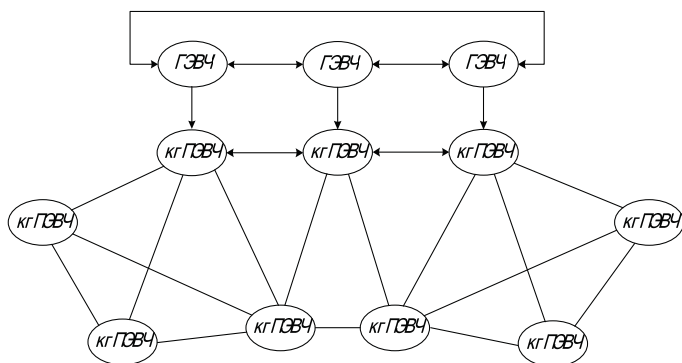


Рис. 8,а. Верхний уровень когерентной сети (ядро) – ГЭВЧ и кгПЭВЧ

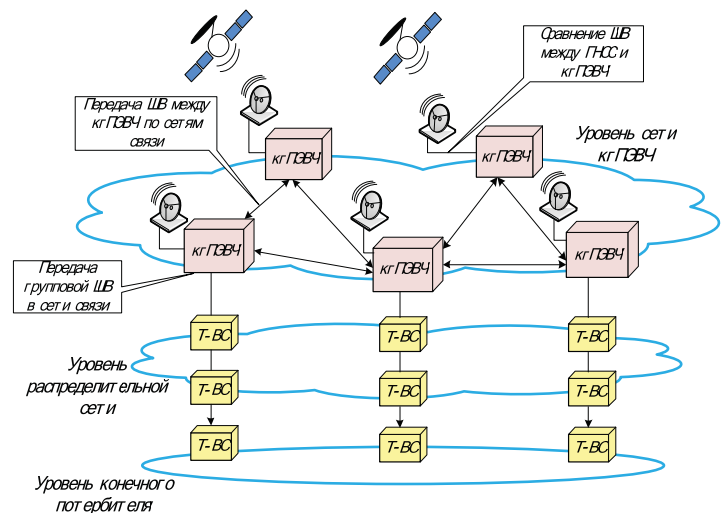


Рис. 8,б. Структурная схема когерентной ССОП

В работе [5], посвященной разработке и исследованию системы передачи эталонных радиочастотных сигналов на оптической несущей по волоконным линиям длиной до 200 км и более с активной электронной компенсацией, сделан вывод, что вклад таких систем в суммарную стандартную неопределенность измерений при сличениях частот территориально удаленных эталонов может не превышать $1 \cdot 10^{-16}$.

При построении когерентной сети целесообразно использовать также аппаратуру распределения сигналов времени (АРСВ) [6] или её улучшенную версию - АПСВЧ, специально разработанную для передачи сигналов времени по ВОЛС в свободных битах (Sa4-Sa8) заголовка потока E12 посредством цифровых систем передачи сети с коммутацией каналов (TDM). АРСВ разрабатывалась в соответствии с техническими требованиями ОАО «НИИАС» и ЗАО «Компания ТрансТелеКом», утвержденными ОАО «РЖД». Аппаратура АРСВ предназначена для работы в составе системы единого точного времени (ЕТВ) для формирования и передачи сигналов ШВ по цифровым каналам ВОЛС на большие расстояния по протоколу SiRF. Шаг коррекции шкалы времени в АРСВ составляет 15,26 нс, в АПСВЧ – менее 1 нс. Реализовано ее сопряжение с ГЭВЧ, позволяющее строить систему ЕТВ, привязанную с требуемой точностью к шкале UTC (SU) через ВОЛС. Такие системы внедрены и эксплуатируются в ОАО «РЖД» и ЗАО «Компания ТрансТелеКом» с выходом на ЦБ РФ. Способ защиты патентом РФ [7].

Проведенные исследования позволили определить общие подходы к построению опорной сети ЕТВ с использованием АРСВ, обладающей при соответствующей организации трактов передачи точностью в десятки наносекунд, повышенной информационной безопасностью и стойкостью к электромагнитной обстановке, исключением активности (влияния) солнца и гарантией качества услуги. При использовании АПСВЧ точность может быть повышена до единиц наносекунд.

Макет АПСВЧ испытан на стенде ГСВЧ в институте ВНИИФТРИ. Потенциальная точность сличений шкал времени пространственно разнесенных стандартов частоты и времени с использованием оптических преобразователей (модемов) и ВОЛС протяженностью до 100 км (одноинтер-

вальная линия) < 600 пс. Использование ее в составе сп-РRTC предложено в [7].

Рисунок 9 иллюстрирует, соответственно, возможную работу РТР в пакетной сети, а работу АРСВ по СЦИ между ОУФШВ ССОП. Количество и места расположения ОУФШВ должны определяться конкретными потребителями, например, операторами сетей 5G и 6G. В качестве среды передачи ШВ должна использоваться технология Long Haul DWDM, а ОУФШВ устанавливаются в точках ввода-вывода трафика, включая места дислокации вторичных задающих генераторов, укомплектованных NTP и РТР серверами, образуя тем самым ядро ЧВО ССОП.

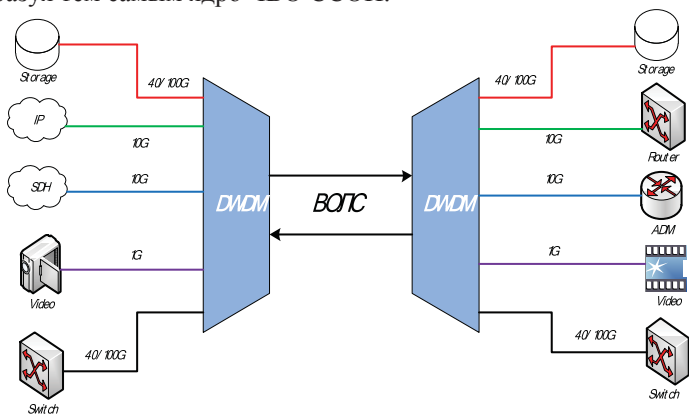


Рис. 9. Тракт DWDM

Когерентная сеть мобильной связи

Когерентность сети мобильной связи стандартов 5G и 6G достигается использованием ядра ЧВО сети фиксированной связи в качестве основного ядра ЧВО мобильной связи стандартов 4G и 5/6G.

Согласно Рекомендации МСЭ-Т G.8271.1 для сетей связи 4-го поколения (4G, LTE-A в режиме временного разделения каналов – TDD) погрешность в ведомых часах линии передачи из 10 коммутаторов по отношению к шкале времени ведущих часов (например, бортовой шкале ГЛОНАСС/GPS) складывается (см. рис. 10) из погрешностей:

- ±100 нс – допустимой погрешности эталонного задающего генератора частоты и времени (гроссмейстерских часов);
- ±50 нс – допустимой погрешности, вносимой одним коммутатором (пограничными часами – Boundary Clock – BC);
- 500 нс – допустимой погрешности, вносимой 10 коммутаторами;
- 200 нс – динамической ошибкой, вызванной вариацией задержки пакетов (PDV);
- ±200 нс – допустимой погрешности, вносимой схемой компенсации асимметрии задержек в прямом и обратном направлениях;
- ±200 нс – допустимой погрешности, вносимой ведомыми часами в свободном режиме (holdover budget);
- 50 нс допустимой погрешности, вносимой ведомыми часами в режиме захвата;
- 150 нс допустимой погрешности, вносимой базовой станцией (eNodeB) или окончательным оборудованием, например интеллектуальным устройством (УСО).

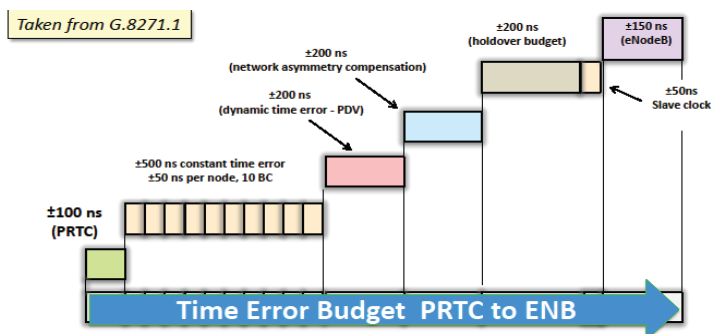


Рис. 10. Бюджет допустимой ошибки времени

Суммарная допустимая погрешность, вносимая такой линией из конца в конец, не должна превышать ±1,5 мкс (G.8271.1). Использование технологии Long Haul DWDM, ОУФШВ с погрешностью ±20 нс (рис. 6, 7) и пограничных часов [8] в последовательной цепи базовых станция (БС) может значительно уменьшить суммарную погрешность. С другой стороны, если рядом работают БС другого оператора или другой зоны синхронизации, не входящие в ядро синхронизации магистральной когерентной сети, то требования по допустимой погрешности (см. рис. 5) между ними не будут выполняться, что приведет к определенным коллизиям, а в предельном случае – неустойчивой совместной работы. В [8] представлены Программа и методики испытаний на ядре мобильной связи.

Для сетей связи следующих поколений 5/6G в рек. МСЭ-Т G.8271.2 этот бюджет ужесточается в 10 раз и достигается за счёт улучшения параметров пограничных часов (Т-ВС), используемых в составе коммутаторов транспортных элементов сети связи. Согласно рекомендации G.8273.2 для сетей 5/6G должны использоваться Т-ВС с вносимой погрешностью синхронизации ШВ ±30 нс (class C) и ±5 нс (Class D), а также уПЭВЧ с погрешностью формирования ШВ не более ±30 нс. Таким образом, должна достигаться точность ШВ на конечном элементе сети (базовой станции) в пределах не хуже ±250 нс для цепи из 10 коммутаторов между уПЭВЧ и базовой станцией.

Обычно внутренняя частота пограничных часов равна 125 МГц, а шаг коррекции времени становится равным 8 нс. Поэтому для реализации Т-ВС классов C и D с погрешностью в несколько наносекунд необходима модернизация существующих устройств.

Важное значение должно придаваться минимизации асимметрии задержки в линиях связи и их элементах, с тем, чтобы добиться высокой точности с точки зрения задержки как внутри устройств, так и задержки передачи в оптических волокнах. Что касается задержек внутри устройств РТР, то в рамках 15 исследовательской группы МСЭ-Т SG15 (сектор стандартизации электросвязи) обсуждаются способы дальнейшего повышения точности синхронизации с учетом фактора задержки колебаний на уровне устройства. Задержка внутри устройств в первую очередь зависит от их реализации, а нормирование значений задержек в качестве стандартов является важной задачей, стоящей перед МСЭ-Т. Что касается асимметрии задержки передачи в волокнах, то параметры оптических волокон (такие как дисперсия длин волн) обсуждаются МСЭ-Т SG15 в сотрудничестве с организациями, изучающими вопросы, связанные с оптическим во-

локном, с целью содействия взаимопониманию с участниками, ответственными за синхронные (когерентные) системы.

Управление сетью синхронизации

Управление синхронными сетями базируется на опыте управления системой ТСС и обсуждалось в МСЭ-Т. МСЭ-Т уже стандартизировал ОАМ (операции, администрирование и техническое обслуживание) основных сигнальных систем, таких как Ethernet. В связи с повышением важности технологии синхронизации времени возрастает потребность в стабильном обслуживании и эксплуатации устройств синхронных систем. МСЭ-Т на основе получаемых от операторов требований технического обслуживания постоянно обсуждает конкретные вопросы мониторинга качества сигналов синхронизации, характеристики измерительных приборов, сигналы аварий и события, касающиеся синхронизированных устройств. SG15 предложила технологии (такие, как технологии мониторинга качества и сигнализации), включаемые в разрабатываемое оборудование, и отразила эти технологии в соответствующем документе (G.Supp1.SynсOAM).

Заключение

Развитие сетей связи приводит к необходимости усложнения систем сетевой синхронизации, в том числе к созданию полноценного частотно-временного обеспечения. Современные системы ЧВО позволяют не только обеспечить фазовую синхронизацию, но и в значительной степени повысить точность передачи частоты в пакетных сетях связи. Иными словами, системы частотной и временной синхронизации, взаимно дополняя друг друга, являются основой для создания перспективных систем ЧВО.

С увеличением объёма передаваемой и обрабатываемой в режиме реального времени информации сетям связи нового поколения требуется реализация более совершенных аппаратных механизмов систем пакетной коммутации и маршрутизации, основанных на прецизионном ЧВО. Эти технологии, в свою очередь, позволят внедрять в жизнь новые услуги, включая управление сложными производствами, технологиями «умного» города, беспилотного транспорта, интернета вещей и т.п.

Существующих технологических решений в оборудовании синхронизации уже не хватает для достижения поставленных перед сетями связи задач. В связи с чем, в настоящее время ведётся активная работа по разработке новых стандартов МСЭ-Т для систем синхронизации и ЧВО как на уровне рекомендаций и стандартов, так и в освоении новых улучшенных видов оборудования. Все ведущие производители вкладывают немалые силы в разработку устройств нового поколения, создавая основу для перехода сетей связи на новый технологический уровень.

Отечественные наработки в этой области создают основу для внедрения новых технологий ЧВО и могут быть использованы для разработки новых устройств систем синхронизации сетей связи 5/6G. Однако для этого требуется существенное обновление отечественной нормативной базы и подходов к проектированию и строительству перспективных систем связи.

Таким образом, анализ рекомендаций МСЭ-Т, развития оборудования частотно-временного обеспечения и технологий

сетей связи, тенденции в стандартизации высокоточных технологий синхронизации времени и частоты для создания мобильных сетей 5/6G позволяет сделать общий вывод – имеются все необходимые предпосылки для решения проблемы. Дело за освоением и реализацией технологий, согласованными действиями министерств, ведомств и операторов связи, разработкой соответствующих нормативных правовых актов.

Литература

1. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Пути формирования прецизионной шкалы времени национальной сети связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 2. С. 17-24.
2. Бакулин М.Г., Крейнделин В.В. Проблема повышения спектральной эффективности и емкости в перспективных системах связи 6G // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. №2. С. 25-31.
3. Подогова С.Д., Мишагин К.Г., Чернышев И.Н. Результаты измерений и новые возможности формирователя эталонных частот резервируемого Ч7-317 // 7-ой Международный симпозиум «Метрология времени и пространства», Суздаль, 2014. С. 92-96.
4. Зуев Э.В., Рыжков А.В., Пелюшенко А.С., Саматов В.И., Сахаров Б.А. Первичный эталонный источник VCN-1008С системы тактовой сетевой синхронизации в цифровых сетях // Электросвязь. 2013. № 2. С. 32-33.
5. Федорова Д.М., Балаев Р.И., Курчанов А.Ф., Троян В.И., Малимон А.Н. Оценка точности передачи эталонного сигнала водородного генератора по волоконно-оптической линии связи с электронной компенсацией возмущений // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 38-42.
6. Иванов А.В. Аппаратура распределения сигналов времени как элемент единой частотно-временной синхронизации // Электросвязь. 2008. № 10. С. 62-65.
7. Васильев О.К., Вериго А.М., Новожилов Е.О., Рыжков А.В., Слюняев А.Н. Способ построения системы единого точного времени с использованием двунаправленных цифровых каналов электросвязи (патент РФ № 2409901), опубликован 20.01. 2011 г.
8. Рыжков А.В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 270 с.
9. Рыжков А.В., Савчук А.В., Шварц М.Л., Дрига И.А. Метрология синхронизации в пакетных сетях электросвязи // Электросвязь. 2013. №2. С. 13-17.
10. Балаев Р.И., Блинов И.Ю., Малимон А.Н., Шварц М.Л. Метрологическое обеспечение сетей связи поколения 5G // Измерительная техника. 2019. №11. С. 36-42.
11. Колтунов М.Н., Шварц М.Л. Актуальные вопросы применения оборудования частотно-временного обеспечения на ЕСЭ России. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т.9. №2. С. 113-120.
12. Шварц М.Л., Колтунов М.Н., Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Эволюция систем частотно-временного обеспечения сетей связи и требований к ним. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т.10. №5. С. 67-71.
13. Рыжков А.В., Донченко С.И., Иванов А.В., Колтунов М.Н., Савчук А.В., Шварц М.Л. Передача сигналов времени по сети связи общего пользования. // Электросвязь. 2010. № 12. С. 42-47.
14. ITU-T G 75/Y.1369. Architecture and requirements for packet-based time and phase distribution. Amendment 2. 2019.
15. ITU-T 273.2/Y.1368.2. Timing characteristics of telecom boundary clocks and telecom time slave clocks. Amendment 1. 2020.
16. TU-T G.8272.1/Y.1367.1. Timing characteristics of enhanced primary reference time clocks. Amendment 2. 2019.
17. TU-T G.8262.1/Y.1362.1. Timing characteristics of enhanced synchronous equipment slave clock. Amendment 1. 2019.
18. ITU-T G 1.1 Timing characteristics of enhanced primary reference clocks. 2017.

PREREQUISITES FOR THE CREATION OF A CO-HERENT PUBLIC COMMUNICATION NETWORK – THE BASIS OF END-TO-END DIGITAL TECHNOLOGIES

Anatoliy V. Ryzhkov, Moscow Technical University of communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia,
ryzhkov.anatoly@yandex.ru

Mikhail L. Schwartz, Moscow Technical University of communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia,
Mschwartz@smsync.ru

Abstract

This article is a logical continuation and concretization of the authors' work [1]. Dedicated to the consideration of the prerequisites and possibilities of creating a coherent public communication network in the interests of end-to-end digital technologies. Justification and use of the core of the time-frequency support of the fixed network as a basis for the synchronization system of 5G and 6G standards communication networks. Based on the ITU-T Recommendations, an analysis was carried out on the current state of the primary reference sources of frequency and time (Primary Reference Timing and Clock – PRTC), the basic requirements for them in terms of frequency and time signal accuracy, the possibility of implementing promising PRTC and enhanced PRTC – ePRTC on domestic equipment. Precision characteristics of frequency and time signals on the network sections from the sources of the State Time and Frequency Service to the ePRTC, between the PRTC core of the backbone network and the wireless communication network synchronization system. The norms for the permissible errors of the main nodes of the network elements are given, their feasibility is shown.

Keywords: time scale, network synchronization, time-frequency support, network time protocols NTP, RTP, methods of comparison and distribution of time scales, backbone communication network and communication networks of 4G, 5G and 6G standards, coherent network.

References

1. Ryzhkov A.V. Schwartz M.L. (2020). Ways of forming a precision time scale of the national communication network. *T-Comm*, vol. 14, no.2, pp. 17-24. (in Russian)
2. Bakulin M.G., Kreyndelin V.B. (2020). The problem of increasing spectral efficiency and capacity in promising 6G communication systems. *T-Comm*, vol. 14, no.2, pp. 25-31. (in Russian)
3. Podogova S.D., Mishagin K.G., Chernyshev I.N. (2014). Measurement results and new capabilities of the redundant Ch7-317 reference frequency former. *7th International Symposium "Metrology of Time and Space"*, Suzdal', pp. 92-96.
4. Zuev E.V., Ryzhkov A.V., Pelushenko A.S., Samatov V.I. Sakharov B.A. (2013). Primary reference source of the VCH-1008C system clock network synchronization in digital networks. *Telecommunication*. No. 2, pp. 32-33.
5. Fedorova D.M., Balaev R.I., Kurchanov A.F., Troyan, V.I., Malimon A.N. (2017). Estimation of the accuracy of the hydrogen generator reference signal transmission over a fiber-optic communication line with electronic compensation of disturbances. *Measuring technology*. No. 8, pp. 38-42.
6. Ivanov A.V. (2008). Time signal distribution equipment as an element of the unified time-frequency synchronization. *Telecommunication*. No. 10, pp. 62-65. (in Russian)
7. Vasiliev O.K., Verigo A.M., Novozhilov E.O., Ryzhkov A.V., Slyunyaev A.N. (2001). The way to build a single accurate system time using bidirectional digital telecommunication channels (RF patent No. 2409901), published on January 20. 2011.
8. Ryzhkov A.V. (2018). Frequency-time provision in telecommunication networks. Textbook for universities. Hot-line – Telecom. 270 p.
9. Ryzhkov A.V., Savchuk A.V., Schwartz M.L., Driga I.A. (2013). Metrology of the synchronization in packet telecommunication networks. *Telecommunication*. No.2. pp.13-17.
10. Balaev R.I., Blinov I.Y., Malimon A.N., Schwartz M.L. (2019). Metrological support of generation 5g communication networks. *Measuring Technology*. No.11. P. 36-42.
11. Koltunov M.N., Schwartz M.L. (2018). Topical issues of application of time-frequency synchronization equipment on the communication network of Russia. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing*. Vol. 9. pp. 113-120.
12. Schwartz M.L., Koltunov M.N., Biriukov N.L., Triska N.R. (2018). The evolution of time-frequency provision systems for communication networks and their requirements. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing*. Vol. 10. P. 67-71.
13. Ryzhkov A.V., Donchenko S.I., Ivanov A.V., Koltunov M.N., Savchuk A.V., Schwartz M.L. (2010). Transmission of the time signals over a public communications network. *Telecommunication*. No.12. P. 42-47.
14. ITU-T G.8275/Y.1369. Architecture and requirements for packet-based time and phase distribution. Amendment 2. 2019.
15. ITU-T G.8273.2/Y.1368.2. Timing characteristics of telecom boundary clocks and telecom time slave clocks. Amendment 1. 2020.
16. ITU-T G.8272.1/Y.1367.1. Timing characteristics of enhanced primary reference time clocks. Amendment 2. 2019.
17. ITU-T G.8262.1/Y.1362.1. Timing characteristics of enhanced synchronous equipment slave clock. Amendment 1. 2019.
18. ITU-T G.811.1 Timing characteristics of enhanced primary reference clocks. 2017.