

В мае 2012 г. в Ивано-Франковске (Украина) состоялась 11-я научно-практическая конференция на тему «Эволюция транспортных сетей. Сети будущего: проблемы синхронизации и распределения времени». В работе конференции, проходившей при поддержке Регионального содружества в области связи (РСС), приняли участие специалисты из России, Украины, Узбекистана и Швейцарии.

В ходе конференции были проанализированы основные современные тенденции и наработки в области транспортных сетей связи и их частотно-временного обеспечения (ЧВО). Участниками мероприятия были высказаны различные мнения относительно перспектив дальнейшего развития систем ЧВО (в частности, в контексте конкуренции и возможного взаимодействия двух базовых технических решений – технологии синхронного Ethernet и протокола передачи времени РТР IEEE1588v2).

Активно обсуждались перспективы регионального сотрудничества стран-членов РСС в сфере стандартизации систем ЧВО. Было предложено расширить деятельность Рабочей Группы по ЧВО сетей связи общего пользования РФ с привлечением специалистов из других стран-членов РСС.

Вниманию читателей предлагается подборка статей по данной тематике, подготовленных участниками конференции.

УДК 621.395

СИНХРОННЫЙ ETHERNET КАК ОСНОВА ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ И БУДУЩИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

Н.Л. Бирюков, доцент НУБиП Украины, с.н.с., к.т.н.

Н.Р. Триска, начальник лаборатории ГП УНИИС, к.т.н., с.н.с.; ntriska@ukr.net

***Ключевые слова:** частотно-временное обеспечение, синхронизация, синхронный Ethernet, РТР, пакетные сети, метка времени, рекомендация МСЭ-Т.*

Введение. Поддержка высоких стандартов качества обслуживания абонентов уровня «операторского класса» ставит перед разработчиками сетей связи нового поколения задачи частотно-временного обеспечения (ЧВО) [1, 2]. Высокое качество частотной и временной синхронизации необходимо для многих важных приложений пакетной сети операторского класса, в частности, для работы систем мобильной связи стандарта LTE, Wi-Max, W-CDMA [3].

Новые технические решения по синхронизации активно внедряются, взаимодействуют и конкурируют в современных сетях связи. При выборе того или иного варианта синхронизации играют роль не только технические, но и экономические факторы, а также перспективы дальнейшего развития сети и предоставляемых ею услуг.

Статья посвящена анализу технологий синхронизации в пакетной транспортной сети – синхронного Ethernet (SyncE) и метода, основанного на протоколе точного времени – РТР

(IEEE 1588), а также перспективам их применения для частотной синхронизации и согласования шкал времени часов.

Основные технологии подстройки тактовой частоты и времени в пакетной транспортной среде. Проблема транспортировки сигналов синхронизации в среде с асинхронным режимом передачи (АРП) рассматривалась в 90-е годы при продвижении технологии АТМ в качестве альтернативы системам с синхронным режимом передачи (СРП) и, в частности, системам синхронной цифровой иерархии – СЦИ. Результаты исследований представлены в Рек. МСЭ-Т I.741 (06/99).

К этим задачам вернулись на этапе всеобщего перехода к пакетным сетям – NGN в 2004 г. Прежде всего речь шла о режиме эмуляции каналов при предоставлении услуг реального времени и взаимодействии сетей с СРП и АРП. Моделирование и эксперименты (<http://www.itu.int/ITU-T/2001-2004/com15/index.asp>) показали, что для четкой работы методов эмуляции каналов (CES – Circuit Emulation Service) в среде с АРП и методов восстановления частоты тактового сигнала – ТС (например, дифференциального или адаптивного)

с требуемым качеством услуг реального времени, необходимо “хорошее” качество сети тактовой синхронизации. Эти методы эмуляции получили дальнейшее развитие в сочетании с синхронным Ethernet [4, 5].

Идея транспортировки сигналов синхронизации в среде Ethernet в условиях перехода к пакетным технологиям NGN была предложена на рассмотрение экспертов Исследовательской Комиссии (ИК-15) МСЭ-Т в 2004 г. Инициаторами такого подхода стали представители крупных европейских телекоммуникационных операторов (в частности, British Telecom), которые, построив пакетные транспортные сети нового поколения, столкнулись с необходимостью обеспечения тактовой сетевой синхронизации (ТСС) ряда важных приложений.

Усилия экспертов МСЭ-Т были направлены на разработку для пакетных сетей простого и эффективного механизма ТСС, который обеспечил бы для тех приложений, которым это необходимо, стабильность тактовых сигналов на уровне традиционных сетей с СРП (СЦИ). Из практических соображений в качестве транспортной среды для нового способа распределения синхро-

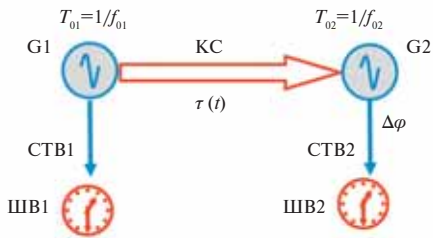


Рис. 1. Модель распределительной сети с двумя часами

сигналов была выбрана наиболее распространенная пакетная транспортная технология физического и канального уровней – Ethernet.

В результате работы, подкрепленной экспериментальными исследованиями и разработкой необходимой элементной базы, идея синхронного Ethernet (SyncE) была изложена в первой редакции G.8261 в 2006 г. [5]. Сегодня SyncE представляет достаточно хорошо отработанную и стандартизованную технологию, совместимую с традиционными сетями синхронизации, опирающимися на инфраструктуру СЦИ, и обеспечивает простое и эффективное взаимодействие с пакетными сетями. Описание принципов работы SyncE, технические требования к оборудованию и рекомендации по применению содержатся в Рек. МСЭ-Т G.8261 [5], G.8262 [6], G.8264 [7] и G.781 [8].

В последние годы параллельно с разработкой и стандартизацией технологии SyncE активно развивалось и другое направление, основанное на использовании протокола РТР (Precision Time Protocol) IEEE 1588 в качестве универсального средства ЧВО сетей с АРП. В частности, Рек. МСЭ-Т G.8265.1 предусматривает подстройку ТС по сигналам точного времени (СТВ) [9]. При этом эксперты отмечают, что с точки зрения качественных показателей сети такой сценарий аналогичен эмуляции канала с адаптивным восстановлением ТС [2].

Для достижения качества, сопоставимого с качеством синхронизации в сети с СРП, необходимо: компенсировать асимметрию задержек в тракте передачи; сглаживать резкие изменения задержек, зависящих от трафика в сети; подбирать соответствующие алгоритмы оценивания параметров и т.д. Иными словами, решать проблемы, с которыми столкнулись при эмуляции каналов в пакетной среде (CES) и внедрении АТМ. В этой связи представляется целесообразным проведение анализа зависимости между точностью подстройки шкалы времени и ТС в сети.

Анализ соотношений между ТС и меткой времени. Для анализа использована упрощенная модель распределительной сети (рис. 1): G1, G2 – генераторы тактовой частоты (ведущий и ведомый, соответственно); ШВ1, ШВ2 – показания шкалы времени; КС – двунаправленный канал связи; СТВ – сигнал, метка времени (сообщение, содержащее код времени); $\Delta\varphi(t)$ – различие в показаниях событий на ШВ (функция времени) [10].

Предполагается, что G1 – идеальный первичный источник, G2 – идеальное ведомое устройство, а информация о времени ведущих часов закодирована в СТВ подобно сигналам цикловой синхронизации, наложенным непосредственно на тактовую последовательность T_{01} , формируемую генератором G1 ведущих часов. Предполагается также, что связи между G и ШВ не вносят искажений, в отличие от КС, который может вносить шумы, искажения, а также погрешность восстановления значащих параметров сигналов в приемном устройстве. Показания ведомых часов определяются по моментам поступления сигналов (меток) времени. Расчетное время поступления СВ в ведомые часы определяется выражением:

$$CB_2(t) = CB_1 + T_{расп} + x(t) + t_{sys} + t_{rand} + t_{обр}, \quad (1)$$

где CB_1, CB_2 – сообщения (метки времени) ведущих и ведомых часов, соответственно; $x(t)$ – ошибка временного интервала (ОВИ); $T_{расп}$ – время распространения (измеренное или вычисленное с помощью протокола РТР или любого другого метода); t_{sys} – задержка в системе передачи; t_{rand} – случайная составляющая задержек (сбои, джиттер); $t_{обр}$ – время на обработку на высших уровнях (выше второго уровня модели

ВОС). Согласно (1), разница $\Delta\varphi(t)$ в показаниях шкалы времени ведущих и ведомых часов составит:

$$\Delta\varphi(t) = CB_2(t) - CB_1 = x(t) + T_{расп} + t_{sys} + t_{rand} + t_{обр}. \quad (2)$$

Отбросив в правой части (2) априорно неизвестные положительные величины $T_{расп}, t_{sys}, t_{rand}, t_{обр}$, получим неравенство:

$$\Delta\varphi(t) \geq x(t). \quad (3)$$

Из (3) следует, что в условиях модели рис. 1, показания часов отличаются не менее, чем на ОВИ. Другими словами, точность ведомых часов зависит от степени рассогласования ТС ведущих и ведомых часов. Следовательно, точность показаний ведомых часов не превышает точность отслеживания тактов ведущих часов на физическом уровне.

Выражение (3) можно выразить непосредственно через интервал времени t и нормированное значение неточности частоты $y = \Delta f/f$. Общую модель ОВИ “идеального” источника, согласно G.810, можно представить как

$$x(t) = x_0 + y_0 t + Dt^2/2 + \varepsilon(t)/2\pi f_{ном}, \quad (1)$$

где x_0, y_0 и D – начальный сдвиг фазы, нормированная частота и дрейф, а $\varepsilon(t)$ – фазовый шум. В предположении отсутствия дрейфа, фазовых шумов и погрешности подстройки частоты выражение (3), с учетом известного выражения $x(t)$, можно записать в виде:

$$\Delta\varphi(t) \geq x(t) = yt, \quad (4)$$

где y – относительная (нормированная) неточность, т.е. расхождение частот ведомого и ведущего генераторов. Таким образом, точность хода ведомых часов в режиме отслеживания полностью определяется отклонением частоты ведомых часов y за время t . Следовательно,

Таблица 1

Параметры	Оборудование		
	Ethernet (обычный)	SyncE (EEC), опция 1, G.8262	SEC, опция 1, G.813
Прием по тактам из линии	Да	Да	Да
Точность генераторного оборудования	± 100 ppm	± 4,6 ppm/год, месяц	± 4,6 ppm
Поддержка режима работы сети:	± 100 ppm	± 4,6 ppm	± 4,6 ppm
- плезиохронного	Да	Да	Да
- синхронного	Нет	Да	Да
Возможность отслеживания ТЧ источника более высокого уровня, например, ПЭГ (PRC):			
- по рабочему тракту (сигналу)	Нет	Есть	Есть
- через выделенный вход (ТЗ)	Нет	Есть	Есть
Полоса пропускания	1...10 Гц		
Джиттер на выходе:			
- для GbE G.8261, Amd.1 (07/2010)	1,5 ЕИ в полосе 2,5 кГц...10 МГц		
- для 10GbE	1,5 ЕИ в полосе 20 кГц...80 МГц		

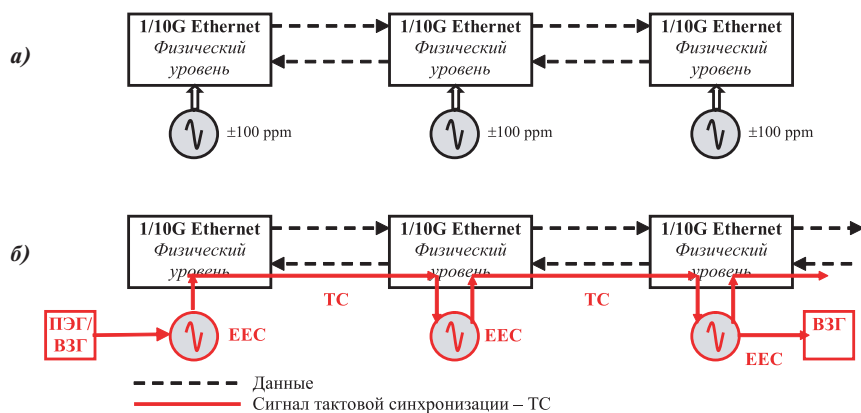


Рис. 2. Принцип работы генераторного оборудования несинхронного (а) и синхронного (б) Ethernet

если параметры канала связи зависят от времени, т.е. канал нестационарный, и расхождение частот ведомого и ведущего генераторов зависит от времени (например, от изменения трафика в сети) $y(t)$, то погрешность показаний часов в значительной степени будет отслеживать возмущения в канале связи, т. е.:

$$\Delta\varphi(t) \sim y(t).$$

Это подтверждает, казалось бы, очевидный факт: для обеспечения высокого качества работы ведомых часов необходимо поддерживать высокое качество параметров канала ТСС на физическом уровне (при соответствующем уровне ведущих и ведомых часов). Очевидно, что приближение показателей КС к «идеальным» повышает точность хода ведомых часов. В этом контексте технологии, подобные СЦИ

или синхронному Ethernet (SyncE), не имеют альтернативы. Сопоставление (3) с выражением (2), содержащим в правой части плохо контролируемые параметры, позволяет утверждать, что чем ближе к физическому уровню (например, на канальном уровне) передаются метки времени, тем проще и точнее проводится подстройка часов. Например, в режиме отслеживания ЧС, когда доминирующая роль систематических составляющих значительно ослабевает, а решающее влияние на ОВИ и, следовательно, на ход часов оказывают случайные составляющие, выражение (4) приобретает вид:

$$\Delta\varphi(t) \geq x(t) = x_0 + \varepsilon(t) / 2\pi f_{ном}.$$

Отметим, что случайная составляющая в правой части вносит значительно меньшую погрешность, чем системати-

ческие составляющие модели ОВИ или величины асимметрии протокола РТР.

Особенности технологий SyncE и РТР: от конкуренции к взаимодействию. В последнее время все чаще высказывается мнение о том, что ни один из существующих методов не обеспечивает одновременную передачу частоты и меток времени с приемлемыми качественными показателями, и, следовательно, нужно искать оптимальную комбинацию различных методов [2, 3, 12, а также <https://www.silabs.com/support>]. Ниже подробно рассмотрены оба подхода к синхронизации пакетных сетей – SyncE и РТР. В табл. 1 и 2 сведены показатели традиционного (несинхронного) и синхронного Ethernet, а также сетевые возможности.

Синхронный Ethernet. Задача технологии состоит в обеспечении возможности передачи стабильной частоты на физическом уровне в составе информационного сигнала. На рис. 2 схематически представлен принцип работы генераторного оборудования несинхронного Ethernet (а) и синхронного Ethernet с генераторным оборудованием Ethernet Equipment Clock – ЕЕС (б). В табл. 1 приведены их основные характеристики для иерархии, основанной на потоке E12 (2,048 Мбит/с) [6]. Стандарт [6] предусматривает более жесткие требования к ЕЕС опции 2, основанные на потоке E11 (1,544 Мбит/с).

Синхронный Ethernet предполагает отслеживание внутренним генератором внешнего опорного сигнала (режим «отслеженного Primary Reference Clock – PRC») подобно тому, как это происходит в генераторном оборудовании СЦИ. Другие параметры генераторного оборудования синхронного Ethernet (долговременная и кратковременная стабильность, фазовые дрожания и др. – Рек. МСЭ-Т G.8262) [6] также соответствуют уровню генераторного оборудования (SEC) мультиплексоров СЦИ (G.813).

Следует отметить, что оборудование Ethernet, поддерживающее режим SyncE, обычно имеет линейные платы Ethernet двух типов – с несинхронным и синхронным режимами работы. Это связано с тем, что некоторые приложения не требуют высоких показателей точности и могут обслуживаться обычными трактами Ethernet.

В табл. 2 представлен краткий обзор основных стандартов, разработанных МСЭ-Т по технологии SyncE и показывающих различные аспекты сети ТСС. В таблицу не включены сетевые рекомендации Ethernet по кольцевым

Таблица 2. Краткая аннотация основных стандартов SyncE

Рекомендация МСЭ-Т	Назначение	Примечание
G.8261 [5] (04/2008)	Аспекты синхронизации в пакетных сетях: – Ethernet [IEEE 802.3; 802.1D; 802.1ad; 802.1Q; P802.1Qay]; – MPLS [ITU-T G.8110]; – T-MPLS [ITU-T G.8110.1] и др.	Архитектура сетей SyncE и сетевые нормы на фазовые блуждания (Приложение А)
Дополнение 1 (Amd.1) (07/2010)	Нормы сетевого джиттера на интерфейсах ЕЕС	См. табл. 1
G.8262 [6] (08/2007)	Минимальные требования к оборудованию ЕЕС: полоса захвата, удержания, точность в режиме отслеживания и хранения частоты и т.д.	См. табл. 1. Определяет также механизм выбора источника и требования к комбинированному оборудованию ЕЕС/SEC
Дополнение 1 (Amd.1) (02/2012)	Приложение IV. Аспекты применения 1000BASE-T и 10GBASE-T	
G.8264 [7] (10/2008)	Определяет протокол обмена сообщениями SSM (Synchronization Status Message) в Ethernet – OSSP (Organization Specific Slow Protocol) по каналу ESMC (Ethernet Synchronization Messaging Channel)	
Исправление 1 (Corrig.1) (11/2009)	Уточнения в отношении SSM и ESMC	
Дополнение 1 (Amd.1) (09/2010)	Определяет аспекты использования SyncE в условиях работы нескольких операторов	
Дополнение 2 (Amd.2) (02/2012)	Использование составных каналов ESMC	
G.781 [8] (09/2008)	Функции слоя синхронизации SyncE	

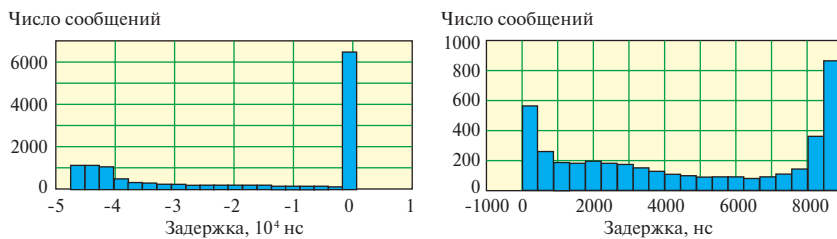


Рис. 3. Гистограммы распределения задержек при загрузке тракта на 80 % (слева) и 90 % (справа)

структурам, резервированию и т.д. Процесс стандартизации SyncE поддержан многочисленными разработками на уровне как оборудования (например, GIGASYNC; www.gillam-fei.be), так и элементной базы (Si570/Si598 Silicon Laboratories Inc, микросхемами Zarlink Semiconductor и др.). Причем качественные показатели этих изделий, как правило, намного лучше рекомендуемых.

Технология синхронного Ethernet унаследовала основные принципы ТСС, успешно зарекомендовавшие себя в «классических» сетях СЦИ, что обеспечивает возможность совместной работы ТСС на основе СЦИ и SyncE.

По определению, технология SyncE предназначена для отслеживания тактовой синхронизации на уровне СЦИ, способной обеспечить точность ТЧ в

сети на уровне первичного устройства синхронизации – ПЭГ (PRC), т.е. около 10^{-11} . Однако новые услуги и, в частности, системы LTE, Wi-Max и W-CDMA требуют поддержания временной синхронизации с точностью порядка 1 мкс, что не предусмотрено стандартами SyncE. Для этих целей предполагалось использовать хорошо зарекомендовавший себя в производственных приложениях протокол точного времени RTP (IEEE 1588).

Протокол RTP. Этот протокол располагает различными приемами подстройки шкал времени и предусматривает подстройку частоты, так называемую синтонизацию (IEEE P1588™ Draft Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems). Поэтому на новую версию стандарта RTP (IEEE1588v2) возлагались большие надежды как на универсальный метод синхронизации частоты и времени в пакетной среде.

Для смягчения зависимости от колебаний задержки пакетов в версии RTP (IEEE1588v2) в промежуточных узлах предусмотрено исправление задержки на величину задержки пакета в узле. Данный прием позволил существенно повысить точность подстройки частоты и фазы. Но достичь данным методом в пакетной среде качества ТЧ, обеспечиваемого системами СЦИ и SyncE, а, следовательно, и декларируемой точ-

ности порядка наносекунд не удалось в силу отмеченных выше (при выводе соотношений (3) и (4)) обстоятельств. Преодолеть влияние канала (см. рис. 1) подобными методами невозможно.

В [11] описан лабораторный эксперимент, имитирующий передачу сигналов синхронизации по трактам Ethernet с использованием устройств, работающих по протоколу RTP (IEEE1588v2). При этом исследовали два режима работы: выделенного канала и имитации рабочего тракта Ethernet с различной степенью загрузки (интенсивностью трафика). При оценке отклонений временных интервалов ОВИ было установлено, что расхождение фаз ведомого и ведущего генераторов тесно коррелировано с параметрами задержки пакетов. Оказалось, что если при незагруженном тракте качественные показатели полученных сигналов ТС приближаются к качеству ТСС (при отсутствии дополнительной нагрузки наблюдались существенные показатели $\Delta f/f$ порядка 10^{-12} , 10^{-11} и МОВИ порядка 400 – 500 нс), то с ростом загрузки тракта эти показатели существенно ухудшаются ($\Delta f/f$ снижается до 10^{-9}).

На рис. 3 представлены гистограммы распределения задержек при разных уровнях загрузки тракта (на 80 и 90 %) и частоте обмена СТВ 1 раз в секунду.

Подобные тенденции были зафиксированы и в других экспериментах, проведенных как в лабораториях, так и на реальных сетях. Так, на рис. 4 представлены графики (построены по данным компании Symmetricom; www.symmetricom.com/products/ieee-1588-ntp-solutions) распределения задержек при работе протокола RTP в сети, состоящей из 10-ти последовательно включенных коммутаторов при различной степени загрузки тракта.

Анализ данных показывает следующие закономерности:

- с ростом загрузки тракта начальная задержка возрастает пропорционально загрузке в последовательности 180, 270, 410 и 650 мкс при загрузке 20, 40, 60 и 80 %, соответственно;
- средняя задержка на коммутатор изменяется от 18 до 65 мкс;
- при возрастании загрузки распределение задержек может изменяться достаточно произвольно (оно приближается либо к гауссовому распределению, либо к распределению арксинус).

В среднем, если нагрузка в тракте больше 1/3 пропускной способности, то показатели передачи и подстройки частоты и шкал времени плохо контролируются.

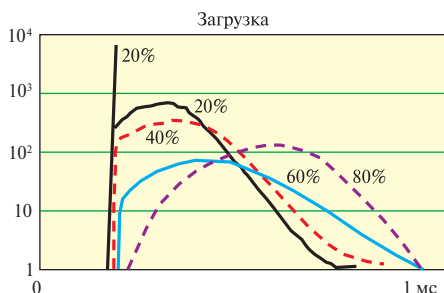


Рис. 4. Распределение задержек в эксперименте с 10-ти последовательно включенными коммутаторами и различной степенью загрузки тракта

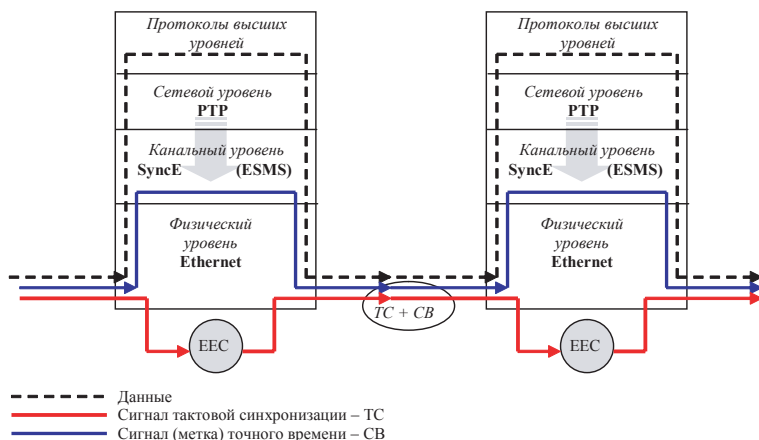


Рис. 5. Принцип работы технологии TSE

То обстоятельство, что подстройка ТС по сигналам времени, передаваемым с помощью двухстороннего сетевого протокола канального уровня (в данном случае протокола РТР) может обеспечить качественную ТСС и точную передачу меток времени только при поддержании на сети высокого качества ТСС на физическом уровне (другими средствами), заставило искать компромисс.

Комбинация SyncE плюс РТР. Предсказуемая функциональная ограниченность методов SyncE и РТР вынудила искать другие решения задачи ЧВО пакетных сетей. При этом у большинства специалистов уже не вызывает сомнений тот факт, что передача меток времени с точностью, необходимой для современных телекоммуникационных приложений (порядка ≤ 1 мкс), должна опираться на распределение ТС высокой точности на физическом уровне [3]. Правильно спланированная, надежная распределительная сеть ТСС способна стать надежной физической основой для работы протоколов передачи времени.

Разработан комбинированный сценарий, предусматривающий совместное использование синхронного Ethernet для передачи ТЧ и какого-либо протокола более высокого уровня для передачи точного времени (как вариант протокола РТР). В качестве примера можно привести технические решения, предлагаемые Silicon Laboratories Inc (<https://www.silabs.com/support>) в методических указаниях по применению (AN420. SyncE and IEEE 1588: Sync Distribution for a Unified Network), а также оборудование Extreme Networks E4G (www.extremenetworks.com) для построения транспортной сети и подключения базовых станций с поддержкой 1–10 Гбит/с. Оно включает встроенное оборудование синхронного Ethernet (ЕЕС), оборудование автоматизированного резервирования Ethernet Automatic Protection Switching (EAPS) по G.8032 и поддерживает протокол РТР.

Новое решение: SyncE с передачей меток времени – TSE. Наличие в структуре SyncE зарезервированных полей дает возможность вводить новые функции, например, передачу сигналов СТВ. Сейчас активно прорабатывается возможность передачи в одном из зарезервированных полей канала ESMS меток времени (например, в формате РТР) [3, 12]. Такое решение, называемое TSE (Time Synchronous Ethernet), позволит упростить работу протокола

РТР, обеспечивая при этом высокую точность передачи времени (рис. 5). Для простоты на рисунке показано распределение сигналов данных, ТС и СВ лишь в одном направлении. В этом случае все узлы в тракте синхронизации должны поддерживать SyncE и работать с точностью $\pm 4,6$ ppm.

Количество узлов в тракте синхронизации желательно подбирать в соответствии с «эталонной цепочкой»: не более 20 ЕЕС между соседними ВЗГ и не более 10 ВЗГ между соседними ПЭГ. При этом обеспечивается такая же точность частоты, как и в традиционных сетях на базе СЦИ (не хуже 10^{-11} в режиме отслеженного ПЭГ), а точность фазы не хуже 1 мкс и менее. Кроме того, поддерживается передача времени суток.

Заключение. Для успешного решения задач ЧВО телекоммуникационных сетей нового поколения необходима правильно спланированная распределительная сеть ТСС, способная стать надежной физической основой для работы протоколов передачи времени. В этой связи особый интерес представляет технология синхронного Ethernet (SyncE), которая:

- полностью стандартизирована, прошла апробацию и за 4 года получила необходимые исправления и обновления; органично вписывается в новые аппаратные комплексы и обеспечена средствами микроэлектроники;

- совместима с действующими сетями ТСС на основе СЦИ и обладает преемственностью в решении задач синхронизации. Это дает операторам возможность максимально использовать существующие ресурсы и многолетний опыт планирования сетей синхронизации в условиях перехода транспортной сети на пакетные технологии, обеспечивая при этом высокий уровень качества сигналов синхронизации, но уже в пакетной среде;

- хорошо сочетается с протокольными методами передачи меток времени, предоставляя им недостающую транспортную платформу физического и канального уровня, что позволяет повысить качественные показатели этих систем;

- может быть модифицирована для передачи СТВ непосредственно на канальном уровне.

Подстройка частоты с помощью протоколов высшего уровня удовлетворяет требованиям только при низкой загрузке тракта. При неконтролируемом изменении трафика качество передачи частоты и меток времени резко

падает. Поэтому применение подобных методов на не синхронизированной по тактам сети может носить ограниченный характер. Например, в сетях мобильной связи на участке между контроллером и базовой станцией (Node B) снижение точности частоты на два порядка можно считать допустимым, если качество сигнала синхронизации на входе имеет порядок 10^{-11} , но едва ли такая ситуация может быть правилом.

Все это позволяет говорить о технологии синхронного Ethernet как о базовой платформе для передачи сигналов ТЧ и меток времени в телекоммуникационных сетях нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюков Н.Л., Коновалов Г.В., Триска Н.Р. Современные тенденции развития и стандартизации частотно-временного обеспечения сетей связи // Электросвязь. – 2011. – № 10. – С. 45–48.
2. Ferrant J.-L., Ruffini S. Evolution of the standards for Packet Network Synchronization // IEEE Communication Magazine. – February 2011. – P. 132–138.
3. Hann K., Jobert S., Rodrigues S. Synchronous Ethernet to Transport Frequency and Phase/Time // IEEE Communication Magazine. – August 2012. – P. 152–160.
4. Триска Н.Р. Синхронный Ethernet как метод обеспечения синхронизации в пакетных сетях // Наукові записки УНДІЗ. – 2009. – № 3 (11). – С. 65–71.
5. ITU-T Recommendation G.8261/Y.1361 (04/2008). Timing and synchronization aspects in packet networks.
6. ITU-T Recommendation G.8262/Y.1362 (08/07). Timing characteristics of synchronous Ethernet equipment slave clock (ЕЕС).
7. ITU-T Recommendation G.8264/Y.1364 (10/08). Distribution of timing through packet networks.
8. ITU-T Recommendation G.781 (10/08). Synchronization layer functions.
9. Recommendation ITU-T G.8265.1/Y.1365.1. Precision time protocol telecom profile for frequency synchronization.
10. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Анализ точности передачи сигналов времени и частоты в телекоммуникационных сетях // Наукові записки УНДІЗ. – 2010. – № 2 (14)– С. 39 – 45.
11. Бирюков Н.Л., Макурин Н.А., Триска Н.Р. Анализ использования двухстороннего протокола для подстройки сигналов тактовой синхронизации // Наукові записки УНДІЗ. – 2010 – №4 (16). – С. 5 – 11.
12. www.itu.int/md/T09-SG15-120910-C/en; www.itu.int/ITU-T/2001-2004/com15/index.asp