

УДК 621.395.74.072

ПРОТОКОЛЫ СЛИЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ ДЛЯ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В СЕТЯХ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

А. В. Рыжков, главный специалист ЗАО «Компания ТрансТелеКом», д.т.н.; a.ryjkov@ttk.ru

В. И. Вакась, инженер отдела планирования ЗАО «Киевстар Дж. Эс.Эм.», к.т.н.

А. В. Савчук, технический директор компании «ВИРКОМ», к.т.н.; savas@wircom.com.ua

Ключевые слова: синхронизация, точность сличения времени, шкала времени, протоколы времени, транспортные технологии, пакетные сети операторского класса, SDH, Ethernet.

Введение. По определению Рек. G.810 ITU-T «Синхронизация сети (network synchronization) — это обобщенное понятие способа распределения по всем узлам сети единой тактовой частоты или одинаковых интервалов времени». Но в Рек. G.811 — G.813, G.823 ITU-T, где сформулированы требования к «классической» системе тактовой сетевой синхронизации (ТСС), не было ни слова о «времени». Более того, в контексте ТСС связистам предлагают говорить «не о UTC, а о частоте UTC, поскольку сигнал стандартной частоты — это не шкала времени» (раздел 4.1.11 Рек. G.810 ITU-T).

По мере внедрения IP в ведомственные сети (Intranet) передачи данных операторы электросвязи начали осознавать, что синхронизация текущего времени не просто играет важную роль в системах биллинга и управления обработкой неисправностей, но и становится экономическим фактором развития предприятия электросвязи. В последнее время благодаря глобальному внедрению техники коммутации пакетов (КП) и синхронизация частоты, и сличение времени не только необходимы сами по себе, но и становятся взаимно дополняющими [1, 2].

В зависимости от конкретных условий использование действующих систем ТСС, особенно их прецизионного генераторного оборудования для генерации и хранения сигналов времени (СВ), служит надежным средством распределения по сети сигналов точного времени (СТВ) [3]. И наоборот — в Рек. G.8261 ITU-T (раздел 8.2) отмечено, что способы восстановления тактовой частоты (ТЧ) в сетях с КП на основе «NTP или подобных протоколов» в некоторых случаях могут оказаться «единственной возможностью отслеживания первичного эталонного генератора (ПЭГ — PRC)» для решения проблемы ТСС [2]. В данной работе это утверждение подтверждено результатами линейных испытаний оборудования синхронизации стандарта IEEE 1588—2008.

Цель статьи — показать возможность использования протоколов сличения времени для восстановления частоты и организации ТСС в смешанных сетях и сетях с КП.

Обзор систем сличения времени, основанных на двусторонней передаче сигналов (меток) времени. В инженерной практике *синхронизация текущего времени* — это сличение времени местных часов с всемирным скоординированным временем (UTC). По определению 1972 г. [1] шкала UTC представляет собой комбинацию двух шкал: международного атомного времени (ТАИ) и всемирного времени (UT1), в каждой из которых единица времени — секунда. Но поскольку определения секунды ТАИ и секунды UT1 в принципе несоизмеримы, то для любой даты t в шкале времени UTC действует система уравнений:

$$\begin{aligned} UTC(t) - TAI(t) &= n \text{ секунд } (n - \text{целое число}); \\ |UTC(t) - TAI(t)| &< 0,9 \text{ с.} \end{aligned} \quad (1)$$

Эти соотношения можно считать определением синхронизации в самом общем виде — как искусства согласования несоизмеримых интервалов времени. Такого согласования достигают с помощью «високосной» секунды, которую обычно добавляют к UTC в конце того года, в котором нарушаются соотношения (1). Наиболее распространенным стандартным способом дистанционного сличения времени компьютерных часов служит протокол сетевого времени NTP, доведенный по инициативе нескольких десятков добровольцев до оптимальности применительно к условиям глобальной сети Интернет [4]. При этом достигают точности сличения времени в очень широких пределах 0,012—56,7 мс, так как величина и разброс неопределенности частоты в компьютерных часах клиента весьма велики — от $2 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-7}$ [5].

Точность зависит также от производительности сервера, загрузки IP сети, количества элементов в сети, постоянства и значения асимметрии задержки распространения сигналов на пути сервер — клиент и клиент — сервер. Повышение точности достигается увеличением числа серверов первого уровня и соответствующим уменьшением зоны обслуживания одним сервером. Одновременно достигается более высокая техническая надежность системы единого времени (СЕВ), поскольку серверы второго и более низкого уровня могут и должны подключаться к нескольким (не менее трех) серверам более высокого уровня.

Уместно отметить, что протокол NTP внедрен в поставляемое и широко используемое оборудование связи. Покупая оборудование, оператор автоматически оплачивает возможность создания корпоративной СЕВ на основе UTC (сигналов спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС).

Многие операторы связи (МГТС, «Уралсвязьинформ» и др.) построили по протоколу NTP собственные СЕВ и имеют соответствующие стандарты организации. При проектировании и строительстве ведомственных СЕВ используют NTP серверы первого уровня на основе приемников GPS/ГЛОНАСС. Ассортимент NTP-серверов на рынке весьма разнообразен. Среди них следует отметить первичный эталонный источник — сервер синхронизации времени ССВ-1 Г (разработка ЗАО «НТЦ «КОМСЕТ»), имеющий до 14 независимых выходных NTP портов, и соответствующую систему управления.

Широкое применение NTP обусловлено тем, что эффективное использование централизованных автоматизированных систем обслуживания сетей связи невозможно или по крайней мере весьма затруднено без существования в них сведений о времени, связанных со шкалой UTC (SU). Точное время требуется для биллинговых систем, электронной цифровой подписи, документооборота, служб

оперативно-розыскных мероприятий, учета и сбережения энергоресурсов и т.п. Если компьютеры корпоративной сети работают без привязки к собственной общей шкале времени, то сеть подвержена ряду угроз: сбоям в диагностике функциональных отказов, пропаданию архивных данных, нарушению безопасности доступа к ресурсам сети, проблемам с биллингом, сбоям в работе системы общеканальной сигнализации № 7 (ОКС-7). Точное время необходимо для систем криптографии. В случае сбоев оно способствует быстрейшему восстановлению ключей.

Отметим, что качество обслуживания (QoS) в Интернете по принципу «наилучшее из возможного» («best effort») далеко от традиционного «магистрального» QoS, принятого в сетях электросвязи. «Магистральное» качество обычно оценивают эксплуатационной готовностью 99,995%. И то, что годится для глобальной паутины, не всегда соответствует, например, требованиям государственной службы единого времени или метрологической службы отрасли связи. В этом состоит побудительный мотив, приведший к разработке системы передачи и распределения сигналов единого и точного времени (СЕТВ) на основе аппаратуры распределения сигналов времени (АРСВ) по территории, которую покрывает сеть электросвязи национального оператора [6].

В результате была разработана специальная аппаратура АРСВ [7] для передачи по ВОЛП сигналов времени на большие расстояния. Реализовано ее сопряжение с Государственным эталоном времени и частоты. Она позволяет иметь систему ЕТВ, привязанную с требуемой точностью к шкале UTC (SU) через ВОЛП. Проведенные исследования позволили определить общие подходы к построению опорной сети ЕТВ, обладающей при соответствующей организации трактов передачи точностью в десятки наносекунд, повышенной информационной безопасностью и стойкостью к электромагнитной обстановке, гарантией качества услуги [6].

Основными сигналами для серверов времени на местах в этом случае могут быть сигналы приемных АРСВ, а сигналы GPS/ГЛОНАСС — дублирующими (резервными). На выходной интерфейс АРСВ выдаются технические условия, оформляется электрический паспорт. Следует подчеркнуть, что такой высокий результат по сличению и коррекции шкал времени достигнут благодаря использованию высокостабильной частоты опорных сигналов хорошо спроектированной маломощнейшей системы ТСС и мелкого шага коррекции шкалы времени в приемной АРСВ ($\Delta T = 15$ нс). В этом случае соотношения (1), отражающие принцип работы АРСВ (см. рис. 5 [8]), принимают вид:

$$\begin{aligned} UT(t)_{\text{пер АРСВ}} - UT(t)_{\text{пр АРСВ}} &= n\Delta T; \\ |UT(t)_{\text{пер АРСВ}} - UT(t)_{\text{пр АРСВ}}| &< \Delta T. \end{aligned} \quad (2)$$

Эти соотношения справедливы при условии, что асимметрия задержки в канале скомпенсирована или отсутствует, а характеристики используемого канала передачи идентичны как в прямом, так и в обратном направлениях.

Другой подход сличения времени через синхронизацию частоты состоит в том, чтобы довести параметры NTP до «магистрального» QoS в так называемом «NTP операторского класса» (ccNTP). В чисто программную реализацию «инициативного» NTP вводят аппаратное проставление меток времени, а сам сервер встраивают во вторичный задающий генератор для того, чтобы использовать стабильный опорный сигнал ТСС [9].

Примером синхронизации частоты через сличение времени служит предлагаемое некоторыми поставщиками оборудования техническое решение для базовых станций (БС) на основе серверов NTP высокой производительности [10]. Однако для этой цели больше подходит другой протокол сличения времени стандарта IEEE 1588—2002 под названием «протокол прецизионного времени» (PTP) [11], который адаптировали для применения в сетях электросвязи в виде стандарта IEEE 1588—2008.

В любом случае «*туннельный переход*» ТЧ через сеть с КП в виде подстройки частоты на основе дистанционного сличения времени рассматривают как рабочий вариант ТСС на перевалочной сети мобильной связи (Mobile Backhaul) [5] при невозможности подключения к базовой или любой аттестованной сети ТСС. Кардинальным решением могло бы быть получение синхросигнала на БС станции от приемника GPS/ГЛОНАСС, но это дорого и сопряжено с электромагнитной зависимостью и доступностью к навигационным системам. Отсюда интерес к «*туннельному переходу*».

«*Узкое место*» в сетях электросвязи общего пользования. При переходе от SDN к технике IP/MPLS/Ethernet операторы мобильной связи реализуют главное преимущество сетей с КП — более высокую производительность по сравнению с коммутацией каналов. Кроме того, для целостности и непрерывности передачи информации в транспортной среде с КП непосредственно на магистральном участке не нужна сеть ТСС. Однако для сохранения приемлемого QoS синхронизация частоты жизненно необходима на периферии сети. Наиболее актуальной сегодня становится проблема ТСС перевалочного участка транспортной сети мобильной связи (Mobile Backhaul) между контроллером радиосети (BSC или RNC) и БС (BTS или Node B, соответственно для сетей GSM или UMTS), представленного на рис. 1 [12].

По многочисленным прогнозам, например [10], число абонентов в мировой мобильной связи увеличится от 3,3 млрд в 2007 г. до 5,2 млрд в 2011 г. При этом перевалочные транспортные сети, которые в 2007 г. обеспечивали 2,9 млн точек подключения, должны были быть готовы к тому, чтобы обслужить до 4,8 млн точек подключения уже в 2009 г. В результате персоналу эксплуатации мобильной



Рис. 1

связи придется увеличить суммарную пропускную способность одной соты в 2010 г. до 2—8 потоков E12 плюс Ethernet 20—30 Мбит/с, в то время как в 2006 г. было достаточно 2—16 потоков E12.

Другими словами, операторам мобильной связи придется увеличить производительность перевалочной сети в 2—10 раз. При почти не увеличивающемся среднем доходе на абонента (ARPU) нагрузка будет возрастать экспоненциально. Кроме того, необходимо будет поддерживать большое разнообразие действующей техники: 2G/GSM, 2G/CDMA, 3G/UMTS, 3G/EVDO, HSDPA, WiMAX и LTE. Мало кто сомневается в том что, в конце концов *на перевалочной сети будет внедрена исключительно транспортная среда с КП на основе Ethernet и IP, в которой невозможно передавать ТСС на физическом уровне* [11].

Требования к синхронизации БС. Технические требования по синхронизации сетей 3 G сведены в разделе 4.2 европейского стандарта ETSI TS 125402 — Synchronisation in UTRAN Stage 2: «Основная проблема состоит в том, чтобы для формирования сигналов в радиосегменте обеспечить для базовой станции опорный сигнал синхронизации с точностью частоты лучше, чем $50 \cdot 10^{-9}$. Основная рекомендация для ее решения — источником опорного сигнала должно быть первичное устройство синхронизации, соответствующее Рекомендации ITU-T G.811 (т.е. ПЭГ — PRC). Уровень фазовых блужданий достаточно поддерживать в соответствии с Рекомендацией ITU-T G.813. Параметры оборудования синхронизации элементов сети радиодоступа и распределение в ней опорных сигналов должны быть такими, чтобы обеспечить во время отказов в сети синхронизации точность частоты на базовой станции $50 \cdot 10^{-9}$ ».

Как полагают, для того чтобы удовлетворить последнему требованию к точности частоты в аварийных ситуациях, необходимо доставлять к БС тактовую частоту с точностью не хуже $\sim 16 \cdot 10^{-9}$ [12, 13]. Тогда шаблон стабильности опорного сигнала по показателю максимальной ошибки временного интервала (МОВИ) на входе БС можно представить в виде таблицы.

Таблица

Интервал наблюдения τ , с	МОВИ, нс
$0,1 < \tau \leq 15,625$	250
$15,625 < \tau \leq 125$	100τ
$125 < \tau \leq 2000$	2000
$\tau > 2000$	$433 \tau^{0,2} + 0,01 \tau$

Потенциальные возможности восстановления ТЧ по протоколам сличения времени. По протоколам NTP и RTP точность восстановления ТЧ ограничена вариациями задержек в пакетных сетях и шумами в тракте передачи. К определению потенциальных возможностей восстановления частоты следует подходить с позиций как разработчика, так и потребителя. Разработчики оборудования — серверов первого и второго уровней при создании алгоритмов формирования, передачи и обработки меток времени для достижения предельных точностей должны учитывать уровень, характер распределения и спектральный состав шума тракта передачи. Потребитель при выборе оборудования должен знать точностные характеристики частоты и времени относительно шкалы UTC на соответствующих выходах серверов производителей и на их основе принимать дальнейшие решения.



Рис. 2

Для потребителя потенциальные возможности восстановления ТЧ по данным протоколам характеризуются разностью шкал времени на выходах 1 rps включенных непосредственно друг на друга серверов первого и второго уровней и расхождением частот. Далее потребитель (оператор) самостоятельно определяет конфигурацию, топологию и географию сети передачи частотно-временной информации, исходя из своих возможностей и требований клиента.

Для примера на рис. 2 приведен фрагмент погрешности синхронизации шкалы времени сервера клиента TP500 по шкале времени сервера TP5000 первого уровня (протокол RTP) в установленном режиме при работе по тракту из 3 NE FE и 2 NE GE. Погрешность не выходит за пределы ± 74 нс, а соответствие частот генераторов TP500 и TP5000 по истечению 40000 с достигает уровня $5,6 \cdot 10^{-14}$. Загрузка тракта составляет 20%.

Исследования систем сличения времени по NTP RFC-1305 были проведены на внутренних сетях Intranet (IP/MPLS/Ethernet) двух операторов Украины. Результаты свидетельствуют о том, что в условиях реальной нагрузки погрешность синхронизации находится в пределах от 1 до 20 мс в сегменте локальной сети (LAN) и от 10 до 100 мс в глобальных сетях (WAN). Аналогичные исследования систем сличения времени по RTP показывают, что погрешность синхронизации шкал времени находится в пределах микросекунды и существенно зависит от топологии и загрузки сети, от асимметрии загрузки сети и асимметрии задержек в прямом и обратном направлениях.

Тем не менее эти результаты свидетельствуют в пользу протокола RTP, на который можно делать ставку, чтобы не иметь проблем в процессе обслуживания и эксплуатации *перевалочных* участков транспортной сети. Просматривается наиболее вероятное решение: *выделенные серверы RTP в транспортной среде с КП и встроенные в БС клиенты RTP*.

Результаты линейных испытаний RTP. На сети Intranet в транспортной среде IP/MPLS/Ethernet одного из операторов мобильной связи Украины были проведены линейные испытания сервера [15] и выделенного клиента [16] RTP с целью проверки возможности использования протокола RTP для восстановления ТЧ на перевалочном участке транспортной сети. Схема измерений показана на рис. 3.

Для измерения стабильности восстановленной ТЧ был использован специализированный измеритель временных отклонений ИВО-1 М производства компании «АЛТО»

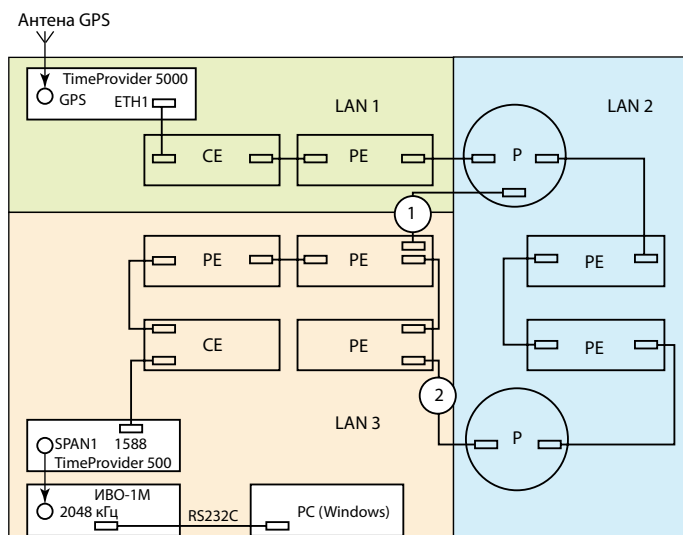


Рис. 3

(С.-Петербург) [17]. Заметим, что стандарт IEEE 1588v2 реализован также в линейке оборудования 1850 TSS фирмы Alcatel-Lucent. Оборудование 1850 TSS 320/160/100 благодаря гибридной матрице позволяет совместить в одном устройстве передачу сигналов TDM (PDH, SDH, WDM) и пакетного трафика (Ethernet, MPLS-TP) с услугой эмуляции каналов (CES), каналов с постоянной скоростью передачи (CBR), например E12, посредством функции межсетевое взаимодействия (IWF). Судя по рекламным материалам, аппаратура работает при всех типах синхронизации — классическая ТСС, используемая в сетях SDH, синхронный Ethernet и синхронизация по протоколу прецизионного времени РTPv2.

Для того чтобы оценить зависимость стабильности восстановленной ТЧ от числа переприемов в реальной сети Intranet со средней нагрузкой 20%, были сконфигурированы два тракта, отмеченные на рис. 3 цифрами 1 и 2:

1) в составе шести элементов сети — двух маршрутизаторов доступа CE (customer edge), трех граничных маршрутизаторов PE (provider edge) и одного магистрального маршрутизатора P (provider);

2) в составе 10 элементов сети — двух маршрутизаторов CE, шести маршрутизаторов PE и двух маршрутизаторов P.

Результаты измерений показаны на рис. 4 в графической форме зависимости МОВИ от интервала наблюдения, привычной для специалистов по синхронизации на фоне шаблона для БС Node B, соответствующего таблице.

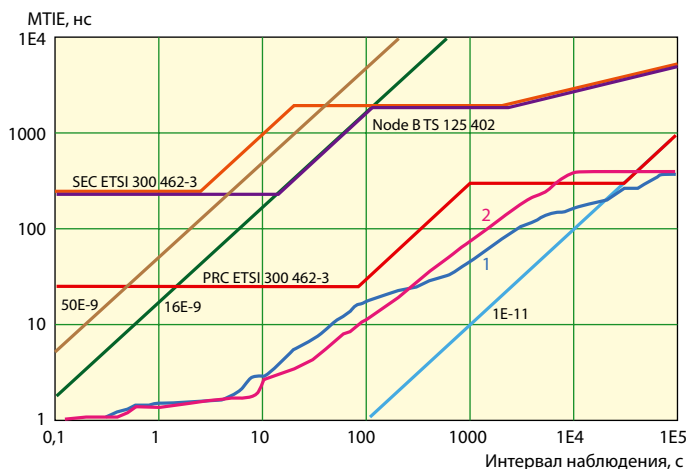


Рис. 4

При моделировании интенсивности нагрузки до 70% и резких ее изменениях в экспериментах на сети Vodafone получены результаты, близкие представленным на рис. 4. По результатам, опубликованным в [18], кривая МОВИ практически совпадает с шаблоном для сетевого стыка ПЭГ.

Синхронный Ethernet. Рассматривая вопросы восстановления частоты в пакетных сетях, нельзя не упомянуть об успехах, достигнутых в области синхронного Ethernet в совокупности с результатами, представленными в ITU-T для обоснования разработки G.8262 [19]. Методика испытаний и измерений соответствует рис. 1, а из ITU-T G.810. Испытуемая схема синхронизации (рис. 5) представляла собой цепочку из четырех последовательно соединенных коммутаторов Ethernet. Тактовый сигнал передавали по сети через стыки 1000 BASE-X и 100 BASE-TX.

Непоказанный на рис. 5 трафик передавался через коммутаторы Ethernet. Последний порт синхронного Ethernet в целях испытаний был нагружен с соотношением 10:1 выходной нагрузки к входной. На рис. 6 приведены результаты измерений отклонения временного интервала (ОВИ) и вычислений МОВИ в течение трех суток (пунктирная линия). Ширину полосы фильтра ФАПЧ устройств синхронизации для испытаний устанавливали равной 10 Гц. Ее можно уменьшить до 0,1 Гц, что должно привести к лучшим характеристикам по показателям ОВИ/МОВИ. ОВИ не выходило за пределы ±10 нс, а значение МОВИ не превышало 25 нс, что соответствует шаблону МОВИ.

Полученные результаты, с учетом требований по подавлению шумов и уровню собственных шумов, совпадают с требованиями к шумовым характеристикам для SDH

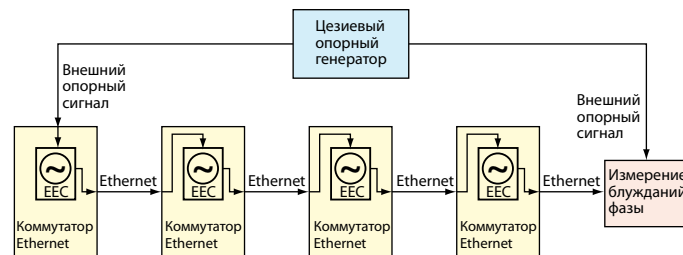
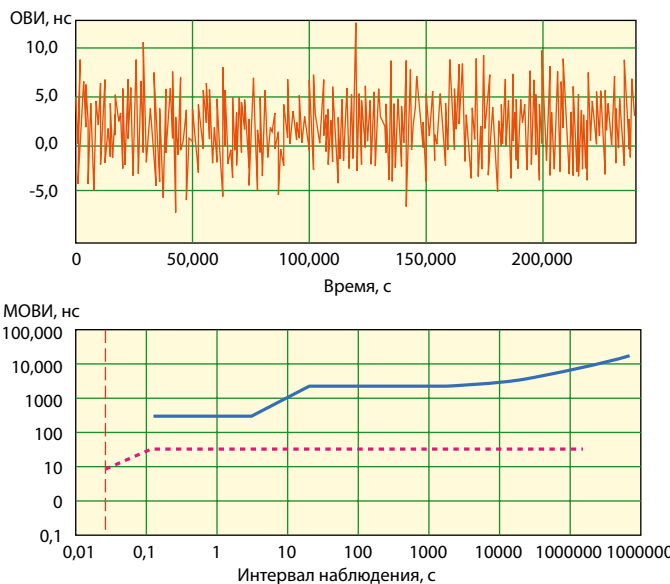


Рис. 5



Шаблон МОВИ для ПЭГ из Рек. ITU-T G.823/6.2.3 табл. 10, рис. 8

Рис. 6

и SONET. Становится ясным, что цепочка синхронизации удовлетворяет требованиям, сформулированным в Рек. ITU-T G.823.

На основании этого можно ожидать, что существующее руководство ETSI по проектированию сети синхронизации и практический опыт проектирования, строительства и эксплуатации систем ТСС будут полезны операторам при переходе от SONET/SDH к Ethernet. Более того, параметры ТЧ не подвержены колебаниям нагрузки в сети, задержкам и вариациям задержек (в этих испытаниях превышение составило 10:1).

Заключение. Результаты исследований восстановления ТЧ в сетях с КП служат основанием для следующих *выводов*.

1. Восстановление ТЧ по протоколу NTP возможно при определенных ограничениях, поскольку протокол оптимизирован под другую задачу и предназначен для сличения времени в «ненормированной» среде глобального Интернет, где стабильность частоты принципиально не может быть высокой. О проведении непосредственных измерений стабильности восстановленной ТЧ в технической периодике сведений нет. Тем не менее очевидно, что протокол NTP безусловно уступает в этой области применения протоколу РТР стандарта IEEE 1588v2.

2. Результаты восстановления ТЧ по протоколу РТР стандарта IEEE 1588v2 показали, что стабильность восстановленной частоты с большим запасом соответствует техническим требованиям TS 125 402 и при скорости передачи сообщений РТР 64 пакетов Sync в секунду слабо зависит от числа переключений. Возможно за счет хорошего качества генератора в сервере клиента. Следует ожидать широкого его применения в перевалочных сетях с КП, так как в них кроме высокой стабильности восстановленной частоты требуется еще и высокая стабильность фазы сигнала, например в сетях CDMA2000, WiMAX и LTE.

3. Идея синхронного Ethernet весьма проста и очевидна (см. рис. 5) для специалистов по синхронизации, имеющих опыт работы в транспортной среде SDH. Опубликованные результаты испытаний свидетельствуют о превосходных характеристиках восстановленного тактового сигнала, не зависящих от нагрузки в сети с КП, и, в этом смысле, не накладывающих каких-либо ограничений на применение.

На данном этапе дать однозначные предпочтения и рекомендации по применению протокола РТР и синхронного Ethernet для рассматриваемой цели в условиях быстрого и разнообразного изменения транспортной среды на перевалочном участке затруднительно, так как это связано с их функциональностью, особенностями проектирования и эксплуатации сети синхронизации, рассмотрение которых выходит за пределы данной статьи. Ведущие разработчики оборудования электросвязи, например Alcatel-Lucent,

предусматривают одновременную реализацию в оборудовании обеих технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbook selection and Use of Precise Frequency add Time Systems: ITU Radiocommunication Bureau.— 1997.
2. ITU-T Recommendation G.8261/Y.1361: Timing and Synchronization aspects in packet networks (05/2006).
3. **Рыжков А. В.** Частота и время в инфокоммуникациях XXI века. — М.: МАС.— 2006.— 320 с.
4. **Mills D. L.** Computer Network Time Synchronization: the Network Time Protocol: CRC Press.— 2006.— 304 p.
5. **Савчук А. В.** Синхронизация в сетях NGN: «туннельный переход» тактовой синхронизации через сети с коммутацией пакетов//Зв'язок.— 2009.— № 1.— С. 13—18.
6. **Рыжков А. В.** Опорная сеть системы единого точного времени на основе ВОЛП//Электросвязь.— 2008.— № 10.— С. 54—56.
7. **Иванов А. В.** Аппаратура распределения сигналов времени как элемент единой частотно-временной синхронизации//Электросвязь.— 2008.— № 10.— С. 62—65.
8. **Рыжков А. В., Иванов А. В., Новожилов Е. О.** Способы передачи сигналов времени по волоконно-оптическим линиям//Электросвязь.— 2009.— № 9.— С. 35—39.
9. Carrier Class NTP for NGN Telecom Networks.Symmetricom Plug-in NTP Server Cards Leverage the SSU-2000 Synchronization Supply Unit: Datasheet.— 2007.
10. Synchronization in packet-based networks: challenges and solutions: Ericsson White Paper 28423—3114 Uen Rev A.— January 2009.— P. 2—15.
11. **John C. Eidson.** Measurement, Control, and Communication Using IEEE 1588: Springer-Verlag New York, Inc.— 2006.— 283 p.
12. **E. Schwartz.** Mobile Backhaul: Challenges and opportunities//RAD Data Communications Ltd. WhitePaper.— 2008.— P. 1—20.
13. **S. Ruffini.** WCDMA and LTE Synchronization Aspects//The 6 th International Telecom Sync Forum, Munich, ITSF.— 2008.
14. **Савчук А. В., Шапошников В. Н.** Исследование систем синхронизации времени по протоколу NTP//Зв'язок.— 2010.— № 1.— С. 1—5.
15. TimeProvider 5000. IEEE 1588—2008 (PTP) Grandmaster Clock: Symmetricom Datasheet, Release 1.0.— 2009.
16. TimeProvider 500. IEEE 1588—2008 (PTP) Translator: Symmetricom Datasheet, Release 1.0.— 2009.
17. **Леготин Н. Н.** Измерения фазовых блужданий//Техника связи.— 2006.— № 1.— с. 56—63.
18. **M. Gasparroni, P. Correa.** IEEE 1588 v2 based solutions for VF Backhaul Networks//The 6 th International Telecom Sync Forum, Munich, ITSF.— 2008.
19. **J.-L. Ferrant, M. Gilson, S. Jobert, M. Mayer, M. Ouellette, L. Montini, S. Rodrigues, S. Ruffini.** Synchronous Ethernet: A Method to Transport Synchronization//IEEE Communication Magazine.— 2008.— № 9.— с. 126—134.

Получено после доработки 16.04.10