

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бірюков М.Л., Тан К.В., Триска Н.Р.** Синхронізація стиків асинхронних мереж//Зв'язок. — 2005. — № 3. — С. 13—17.
2. **Бірюков Н.Л., Триска Н.Р.** Сети синхронизации. Сценарии взаимодействия//Сети и телекоммуникации. — 2005. — № 08—09.
3. **Бірюков Н.Л., Триска Н.Р.** Синхронизация сетей связи с синхронным и асинхронным режимами передачи: опыт и проблемы//Электросвязь. — 2007. — № 10. — С. 34—37.
4. **Бірюков Н.Л.** Синхронизация сетей с асинхронным (пакетным) режимом передачи/Матер. конф. «Современные проблемы частотного-временного обеспечения сетей электросвязи. Тактовая сетевая синхронизация и единое точное время в традиционных сетях и сетях NGN» — Москва, 2009 — С. 87—91.
5. Проект отчета Генерального секретаря МСЭ для принятия на 4-м Всемирном форуме по вопросам политики в области электросвязи (<http://www.itu.int/osg/csd/wtpf/wtpf2009>).
6. **Брени С.** Синхронизация цифровых сетей связи: Пер. с англ. — М.: Мир, 2003. — 465 с.
7. **Бірюков М.Л., Стеклов В.К., Костік Б.Я.** Транспортні мережі телекомунікацій: Системи мультиплексування: Підручник для студентів вищ. техн. закладів. — К.: Техніка, 2005. — 312 с.
8. **Колгунов М.Н., Леготин Н.Н., Шварц М.Л.** Сетевая синхронизация в системах связи. — М.: SYRUS SYSTEMS, 2007. — 240 с.
9. COM 15-D 262-E (WP3/15) Draft of G.pactiming: Interface requirements/Nickolay Biryukov, Nataliya Triska — May 2005.
10. ITU-T Recommendation G.8261/Y.1361 (04/08). Timing and synchronization aspects in packet networks.
11. **Jean-Loup Ferrant, Mike Gilson, Sebastien Jobert et al.** Synchronous Ethernet: A Method to Transport Synchronization//IEEE Communication Magazine. — September 2008.
12. ITU-T Recommendation G.8262/Y.1362 (08/2007). Timing characteristics of synchronous Ethernet equipment slave clock (EEC).

Получено 16.06.09

УДК 621.395.74.072

СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ

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

А. В. Иванов, старший инженер ООО «АЛТО»

Е. О. Новожилов, главный специалист ОАО «НИИАС»

Ключевые слова: передача времени, волоконно-оптические линии передачи, системы передачи, круговая задержка, точность сигналов времени.

Введение. В настоящее время существует и активно развивается множество систем единого точного времени (ЕТВ), строящихся на основе различных средств передачи, включая волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП).

Совершенствующиеся современные технологии в различных областях деятельности человека выдвигают все более строгие требования к точности сигналов ЕТВ, стимулирующие разработки новых способов передачи сигналов времени (СВ) с высокой ($10^{-9} \dots 10^{-6}$ с) точностью. Например, широко распространенные системы ЕТВ, основанные на IP-сетях передачи данных и сетевом протоколе времени NTP/SNTP, не отвечают требованиям ряда высокотехнологичных потребителей: обсерваторий, метрологических центров, спецслужб и др. «Точный протокол времени» — RTP обещает более высокую точность, но из-за отсутствия практических результатов его применения в сетях связи или передачи данных, пока нельзя утверждать о его универсальности и способности удовлетворить возрастающие потребности пользователей. Также следует отметить, что RTP предназначен для передачи времени на небольшие расстояния в пределах локальных вычислительных сетей.

Учитывая перспективу использования ВОЛП для передачи сигналов времени, ЗАО «Компания ТрансТелеКом» приступило к экспериментальной проверке возможности реализации современной опорной сети ЕТВ на основе ВОЛП, обладающей высокой точностью, повышенной информационной безопасностью и стойкостью к электромагнитной обстановке [1, 2]. При построении опорной сети ЕТВ планируется использовать оборудование ООО «АЛТО» — аппаратуру распределения сигналов времени (АРСВ) [3],

специально разработанную для передачи СВ по ВОЛП в свободных битах потока E12 посредством цифровых систем передачи (СП).

Результаты испытаний различных способов передачи СВ по ВОЛП, проведенных на фрагменте сети, подтверждают возможность организации системы ЕТВ, обладающей высокой точностью и использующей ресурсы действующих сетей связи.

Аппаратура распределения СВ. АРСВ включается в цепи передачи дуплексных каналов связи с пропускной способностью 2048 кбит/с (E12) для обмена информацией с аналоговой аппаратурой. Канальная информация содержит СВ в виде кода, передаваемого на одной из позиций битов Sa4 — Sa8 цикловой структуры сигнала в нечетном цикле нулевого канального интервала. Поскольку информационная нагрузка потока E12 сохраняется, АРСВ может быть включена в существующие каналы передачи без дополнительных затрат и особых требований к каналам при условии синхронного формирования исходного потока E12.

В аппаратуре реализован известный метод двунаправленной передачи времени между ведущими и ведомыми часами [4], основанный на измерении круговой задержки распространения сигнала в канале передачи (суммы задержек в каналах прямого и обратного направления, где прямое направление соответствует передаче времени от ведущей АРСВ к ведомой). При равенстве задержек в прямом и обратном направлениях задержка распространения сигнала от ведущей к ведомой АРСВ компенсируется с точностью, определяемой дискретностью собственной шкалы времени АРСВ (расчетный шаг собственной шкалы времени составляет 15,26 нс). По результатам экспериментальных исследований, точность сведения шкал времени двух комплектов АРСВ, соединенных непосредственно и ис-

пользующих высокостабильные опорные сигналы, была не хуже ± 20 нс.

Особенность аппаратуры АРСВ — возможность использования в качестве опорных частот синхросигналов от системы тактовой сетевой синхронизации (ТСС) сети связи либо от других источников. Это позволяет работать при любой конфигурации сети связи, а также сличать эталонные источники, независимые от системы ТСС.

Один комплект АРСВ (рис. 1) на узле связи или пункте управления способен обеспечить до шести направлений передачи времени, а также формировать выходные СВ, представляющие «секундный импульс» (1PPS) и код времени, для 48 локальных потребителей.

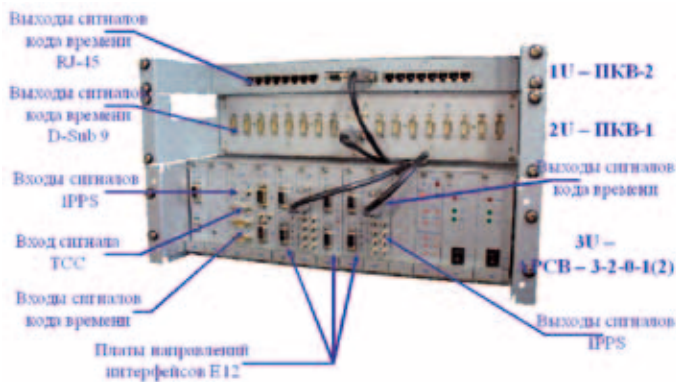


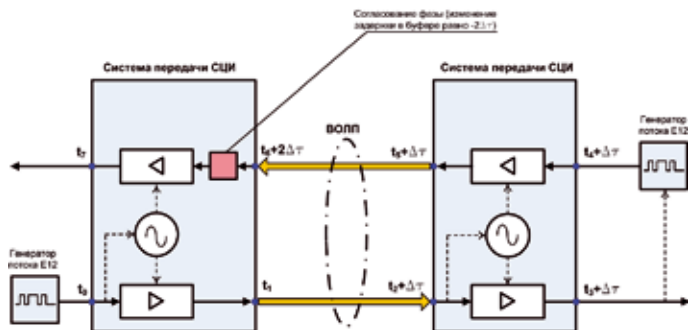
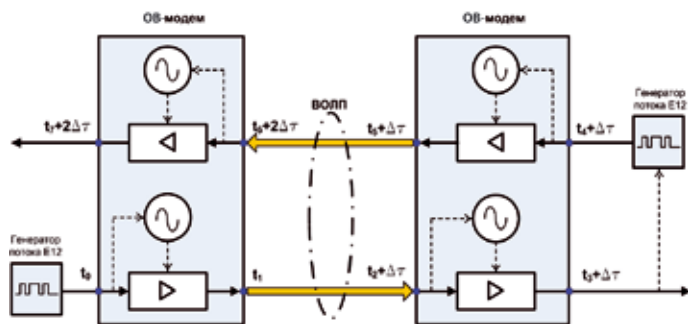
Рис. 1

Способы передачи СВ по ВОЛП. Проведенный анализ функционирования различных СП, работающих по ВОЛП, показал следующее. СП по способу организации синхронизации передачи сигнала в разных направлениях можно условно разделить на две группы. В первую входят СП, позволяющие организовать передачу информационного сигнала и соответствующего ему синхросигнала независимо для каждого направления передачи. Такими системами являются СП плездохронной цифровой иерархии (ПЦИ) и как частный простейший случай — волоконно-оптические модемы. К этой же группе можно отнести системы спектрального уплотнения (Wave Division Multiplexing, WDM).

Ко второй группе относятся системы, в которых синхросигнал распространяется только в одном направлении. Это, как правило, обусловлено наличием в СП только одного (общего) задающего генератора (ЗГ) для прямого и обратного направлений передачи информации. Такими системами являются СП синхронной цифровой иерархии (СЦИ). Исходя из способа организации синхронизации, главная особенность СП СЦИ — необходимость согласования фазы любого внешнего сигнала с фазой ЗГ. Этого можно добиться путем применения буферов согласования в цепях не только компонентных сигналов (С-12, ТУ-12), но и групповых сигналов (АУ-4) схемы мультиплексирования СЦИ.

Рассмотрим два основных способа передачи СВ по ВОЛП: первый — с применением волоконно-оптических (ОВ) модемов и второй — с использованием СП СЦИ (мультиплексоров СЦИ).

При первом способе (рис. 2) сигнал синхронизации для каждого направления передачи всегда выделяется из входного сигнала. Поэтому фазовые соотношения между информационным и синхросигналом постоянны (это также справедливо при фазовых флуктуациях сигнала с частотами



в полосе пропускания системы ФАПЧ, выделяющей тактовый синхросигнал). На рис. 2 и 3 обозначены моменты времени, соответствующие прохождению по тракту контрольного бита. Штриховыми линиями показаны направления синхронизации. При изменении задержки распространения в ОВ постоянно фазового соотношения между информационным сигналом и синхросигналом сохраняется. Таким образом, при одинаковом изменении задержки Δt в ОВ прямого и обратного направлений передачи каналные задержки обоих направлений также изменяются на Δt , следовательно, изменение половины круговой задержки будет равно изменению задержки в канале прямого направления.

При втором способе (рис. 3) сигнал синхронизации для прямого направления передачи выделяется из входного сигнала, поэтому фазовые соотношения между информационным и синхросигналом постоянны. Для обратного направления используется сигнал синхронизации от того же ЗГ системы передачи. В этом случае фаза информационного сигнала, поступающего на вход из ОВ в обратном направлении, не совпадает с фазой синхросигнала.

Согласование данной разности фаз осуществляется в эластичном кольцевом буфере обработчика указателя АУ-4. Фаза сигнала на выходе буфера всегда соответствует фазе ЗГ, а на входе — изменяется в зависимости от температуры ОВ. В итоге, задержка сигнала в буфере меняется в противоположную сторону относительно изменения задержки в ОВ. Буфер компенсирует изменение задержки в ОВ как прямого, так и обратного направлений. Следовательно, при использовании этого способа круговая задержка в линии передачи поддерживается постоянной, а метод двунаправленной передачи времени обеспечивает компенсацию задержки в канале прямого направления с ошибкой Δt . В случае, когда ВОЛП организована подвеской оптического кабеля (ОК) на опорах, влияние окружающей среды может приводить к некомпенсируемой ошибке, измеряемой единицами—десятками микросекунд в зависимости от из-

менения температуры ОВ и протяженности ВОЛП согласно соотношению [5]:

$$\Delta\tau(t^\circ) = \sum_i k_i l_i \Delta t_i^\circ,$$

где $k_i = 85 \cdot 10^{-12}$ с/км · °С — коэффициент изменения задержки в i -м однородном участке кабельной линии [6]; l_i — длина i -го однородного участка кабельной линии передачи, км; Δt_i° — максимальный перепад температуры во времени, воздействующий на i -й однородный участок линии передачи, °С.

Поскольку для ОК, проложенного в грунте, максимальный перепад температуры не превышает 2 °С [6], передача СВ по системе СЦИ и ОК, проложенному в грунте, является предпочтительной по сравнению с вариантом, где ОК подвешен на опорах.

Экспериментальная проверка способов передачи. Сравнительная проверка рассмотренных способов передачи сигналов времени по ВОЛП проводилась в лабораторных условиях. При испытаниях в качестве опытной ВОЛП использовались катушки с ОВ Cornig SMF-28, размещенные в термостате. Длина ОВ была одинаковой в обоих направлениях и составляла по 76 км.

При экспериментальной проверке первого способа в качестве СП использовалась пара ОВ модемов FOM-E1. Как показано на рис. 4, два комплекта APCB соединялись друг с другом через модемы, включаемые в ВОЛП. APCB получали опорные сигналы частоты и времени от двух эталонов — водородного и рубидиевого.

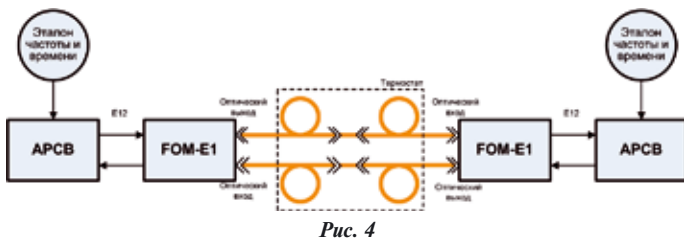


Рис. 4

В течение эксперимента с помощью соединенных APCB сравнивали шкалы времени двух эталонов, при этом температура ОВ изменялась от +4 °С в начале измерения до +40 °С в конце измерения, что соответствовало изменению задержки в ОВ около 230 нс (для каждого направления). График расхождения идентифицируемой шкалы относительно эталонной приведен на рис. 5 (время по осям указано в секундах).

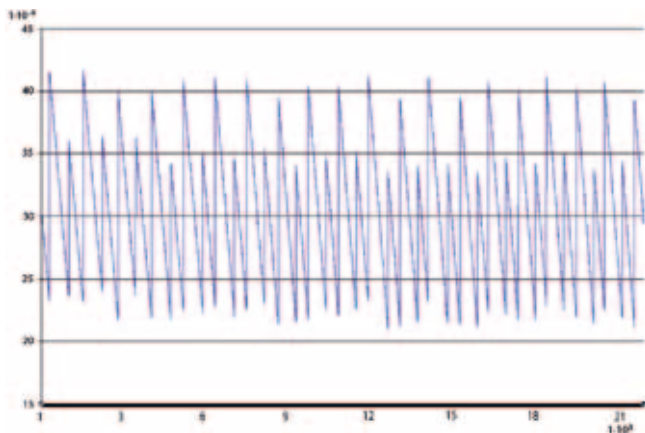


Рис. 5

Наклонные отрезки отражают расхождение шкал времени, обусловленное неравенством частот эталонов, а вертикальные — изменение расхождения шкал при подстройке шкалы времени в ведомой APCB скачком на 1 шаг. Из графика видно, что при данном способе передачи СВ точность сличения шкал времени не зависит от изменения температуры ОВ, так как температурные изменения времени задержки в ОВ в прямом и обратном направлениях компенсируются с высокой точностью.

Точность сличения шкал времени определяется дискретностью (шагом коррекции) внутренней шкалы времени APCB, составляющей ±15,26 нс (испытываемая APCB имела некоторую неравномерность шага коррекции).

Среднеквадратическое отклонение результата определяется разрешающей способностью измерительного оборудования и не превышает 1,5 нс.

Проверку второго способа проводили по схеме, приведенной на рис. 4, но вместо модемов были включены мультиплексоры СЦИ Lucent AMS. При изменениях температуры ОВ от +4 до +40 °С аналогичный график расхождения шкал времени показал дополнительную ошибку, пропорциональную изменению температуры. Этот результат подтверждает, что СП СЦИ обладают механизмом выравнивания круговой задержки, из-за чего применяемый метод двунаправленной передачи времени не позволяет компенсировать изменение задержки в прямом направлении и передача СВ происходит с ошибкой.

Практическое использование способов передачи. Рассмотренные способы могут быть использованы для передачи СВ различным потребителям, например, при подключении потребителей к опорной сети ЕТВ.

Первый из рассмотренных способов — передача СВ посредством ВОЛП и систем с двунаправленной передачей информационного сигнала и независимой передачей сигналов синхронизации в обоих направлениях (см. рис. 2) обеспечивает, как уже отмечалось, предельно достижимую точность, определяемую разрешающей способностью APCB и фазовыми шумами канала передачи. Такими системами могут быть ОВ-модемы, некоторые СП ПЦИ и системы спектрального разделения WDM. Также возможно использование СП СЦИ при условии, что информационный сигнал передается только в направлении распространения сигнала синхронизации (в принципе, такую передачу информационных и синхросигналов можно организовать в обоих направлени-

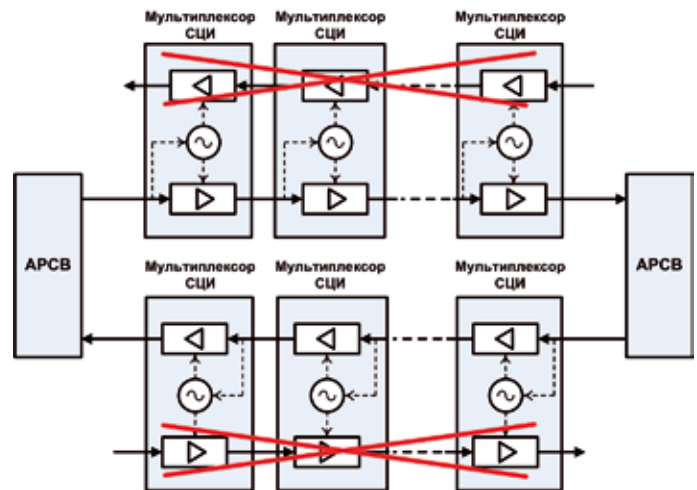


Рис. 6



Рис. 7

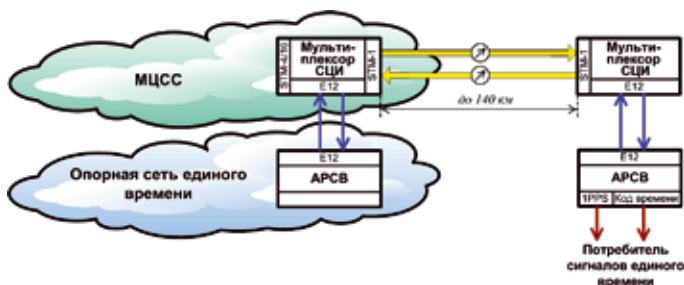


Рис. 8

ях согласно схеме, приведенной на рис. 6). Главное условие достижения предельной точности: ОВ, используемые для передачи сигнала в обоих направлениях, должны входить в один и тот же кабель.

Данный способ характеризуется высокой точностью (± 30 нс) и может применяться, например, для подключения потребителей к опорной сети ЕТВ по I классу точности СВ по схеме, изображенной на рис. 7. Длина линии может наращиваться традиционным способом — добавлением оптических усилителей и регенераторов.

Недостаток способа состоит в необходимости использования выделенной пары ОВ, что не всегда можно в условиях действующей сети связи. Вместо пары ОВ возможно организовать двунаправленную передачу по системе WDM на выделенной паре длин волн (одна в прямом, другая — в обратном направлении), что также требует выделения дорогостоящего сетевого ресурса.

Второй способ (передача СВ посредством ВОЛП и систем, обеспечивающих двунаправленную передачу информационного сигнала и передачу сигналов синхронизации в одном направлении) реализуется на основе СП СЦИ, используемых для организации двунаправленных каналов. Способ характеризуется средней точностью и может применяться, например, для подключения потребителей к опорной сети ЕТВ по II классу точности СВ посредством линии доступа, изображенной на рис. 8.

При таком способе точность СВ в пределах действия сети для подвешенного кабеля ВОЛП будет не хуже ± 20 мкс, для кабеля ВОЛП в грунте — не хуже ± 1 мкс. Достоинством способа является возможность использования каналов E12 существующих сетей СЦИ, например, магистральной цифровой сети связи (МЦСС) ЗАО «Компания ТрансТелеКом».

Применение рассмотренных способов передачи СВ при построении опорной сети ЕТВ требует дополнительного изучения. Представляет интерес способ, используя

щий независимую синхронизацию в обоих направлениях передачи, так как он обеспечивает лучшую из достигнутых точностей. Весьма перспективным может стать применение существующих на МЦСС ЗАО «Компания ТрансТелеКом» СП спектрального разделения CWDM и DWDM. В этом случае становится возможной передача СВ на значительные расстояния с минимальным числом регенераций сигнала.

Существующее на сети оборудование позволяет организовать требуемые каналы для построения опорной сети ЕТВ с использованием как выделенной длины волны, так и служебных каналов. Окончательный вывод о применимости данного способа при построении опорной сети на базе DWDM может быть сделан после проведения соответствующих экспериментальных исследований.

Заключение. Передача СВ по ВОЛП — малоизученное и перспективное направление. Сегодня группой специалистов, включающей авторов данной статьи, проведены исследования возможностей передачи СВ в составе стандартного первичного цифрового сигнала E12 2048 кбит/с с использованием существующих СП, работающих по ВОЛП. В результате разработана специальная аппаратура — АРСВ, позволяющая передавать по ВОЛП сигналы времени на большие расстояния с высокой точностью.

Результаты проведенных исследований позволили определить общие подходы к построению опорной сети ЕТВ, обладающей высокой точностью (десятки наносекунд), повышенной информационной безопасностью и стойкостью к электромагнитной обстановке.

Построение опорной сети ЕТВ на базе сети связи ЗАО «Компания ТрансТелеКом» позволит получить доступ к СВ в большинстве населенных пунктов России, что, несомненно, привлечет как государственных, так и коммерческих потребителей сигналов ЕТВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжков А. В., Колтунов М. Н., Новожилов Е. О., Леготин Н. Н. Распределение сигналов точного времени по наземным цифровым сетям электросвязи // Электросвязь. — 2007. — № 10. — С. 30—34.
2. Рыжков А. В. Опорная сеть системы единого точного времени на основе ВОЛП // Электросвязь. — 2008. — № 10. — С. 54—56.
3. Иванов А. В. Аппаратура распределения сигналов времени как элемент единой частотно-временной синхронизации // Электросвязь. — 2008. — № 10. — С. 62—65.
4. Mills, D. L. On the chronometry and metrology of computer network timescales and their applications to the Network Time Protocol. ACM Computer Communications Review 21,5 (October 1991), 8—17.
5. Рыжков А. В., Кобышева Н. В. и др. Анализ устойчивости системы синхронизации магистральной цифровой сети связи ОАО «РЖД» в реальных условиях окружающей среды // Электросвязь. — 2005. — № 1. — С. 30—34.
6. Рекомендация МСЭ-Т G.823: Управление дрожанием и дрейфом фазы в цифровых сетях, основанных на иерархии 2048 кбит/с (03/2000).

Получено 22.06.09