

Двухсторонняя передача сигналов времени и частоты по оптическим линиям связи с использованием модемов SATRE

А. В. Наумов¹, Р. И. Балаев¹, А. Н. Малимон¹, Д. М. Федорова^{1,2}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия, e-mail: dmfedorova2706@gmail.com

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Рассмотрено применение модемов SATRE для передачи эталонных сигналов времени на оптической несущей по волоконным линиям длиной до 200 км. Экспериментально оценены неопределённости сравнения шкал времени по волоконному каналу связи при использовании модемов SATRE.

Ключевые слова: передача эталонных сигналов времени и частоты, волоконно-оптическая линия связи, TWOTFT, TWSTFT, модем SATRE.

Проведённая в последние шесть лет модернизация комплексов воспроизведения и хранения единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ШВ) Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1–2012 привела к повышению его точности. Вслед за этим возникла необходимость с наивысшей точностью передавать эталонные сигналы ГЭТ 1–2012 территориально удалённым государственным вторичным и рабочим эталонам времени и частоты (далее – эталонам). Особенно важно с высокой точностью передавать эталонные сигналы рабочему эталону центрального синхронизатора ГЛОНАСС для обеспечения лучшего согласования национальной ШВ UTC(SU) с международной шкалой UTC.

В настоящее время ГЭТ 1–2012 воспроизводит единицы времени и частоты с помощью двух метрологических цезиевых реперов частоты фонтанного типа с неисключённой систематической погрешностью, не превышающей $5 \cdot 10^{-16}$ [1, 2]. В процессе модернизации в состав ГЭТ 1–2012, а также вторичных и рабочих эталонов времени и частоты введены более совершенные водородные хранители (ВХ) – Н-мазеры. Они являются хранителями единиц частоты и времени, долговременная нестабильность частоты которых в интервале времени измерения 1 сутки меньше $3 \cdot 10^{-16}$ [3].

Существуют различные методы и средства высокоточных сравнений частот и ШВ территориально разнесённых стандартов частоты и рабочих эталонов времени и частоты. Исторически первым был метод на основе перевозимых квантовых часов, которые сравнивали с одним эталоном, а затем после транспортировки на автомобиле либо самолёте с другим.

Использование перевозимых часов нового поколения повысило точность сравнений ШВ до уровня 1 нс. Дальнейшие возможности повышения точности этого метода ограничены неопределённостями при расчёте релятивистских поправок, а также погрешностями, связанными с влиянием различных полей на ход часов в процессе их транспортировки.

Для сравнения ШВ эталонов, находящихся на расстояниях до 10 тыс. км, широко применяют спутниковые методы. Они реализуются с применением сигналов космических аппаратов

навигационных систем или спутников связи, которые обеспечивают двухсторонний обмен сигналами между эталонами. Наиболее точные результаты при сравнении ШВ эталонов можно получить методом TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer). Минимальная достижимая погрешность метода TWSTFT и других спутниковых методов сравнения ШВ лежит на уровне порядка 1 нс.

Погрешность сравнения частот территориально удалённых эталонов спутниковыми методами не меньше $5 \cdot 10^{-16}$ в интервале времени измерения в несколько суток. Как отмечено выше, используемые в настоящее время в эталонах ВХ имеют нестабильность частоты $3 \cdot 10^{-16}$ на суточном интервале времени измерения. Следовательно, погрешность сравнения эталонных сигналов частоты и времени (ЭСЧВ) ограничивается не нестабильностью используемых в них квантовых стандартов частоты, а каналом связи и техническими характеристиками аппаратуры, передающей ЭСЧВ. Для решения задач передачи ЭСЧВ на новом уровне точности в метрологических центрах мира исследуется возможность использования волоконно-оптических каналов связи. Исследования по передаче ЭСЧВ на оптической несущей описаны в обзоре [4].

Следует отметить, что точность спутникового двунаправленного метода TWSTFT нельзя повысить даже в случае, если эталоны будут расположены недалеко друг от друга – на расстоянии в десятки и сотни километров. Поэтому при реализации этого метода на таких расстояниях целесообразно заменить протяжённый спутниковый сверхвысокочастотный канал связи наземной волоконно-оптической линией связи (ВОЛС).

Цель настоящей работы – создание экспериментальной установки для передачи ЭСЧВ по ВОЛС длиной до 200 км, в которой для кодирования ЭСЧВ используются модемы SATRE (Satellite Time and Ranging Equipment), производства компании TimeTech. Такие модемы обычно применяются метрологическими центрами различных стран при проведении сличений ШВ методом TWSTFT [5].

На установке были проведены измерения при передаче ЭСЧВ на оптической несущей с длиной волны 1,55 мкм по

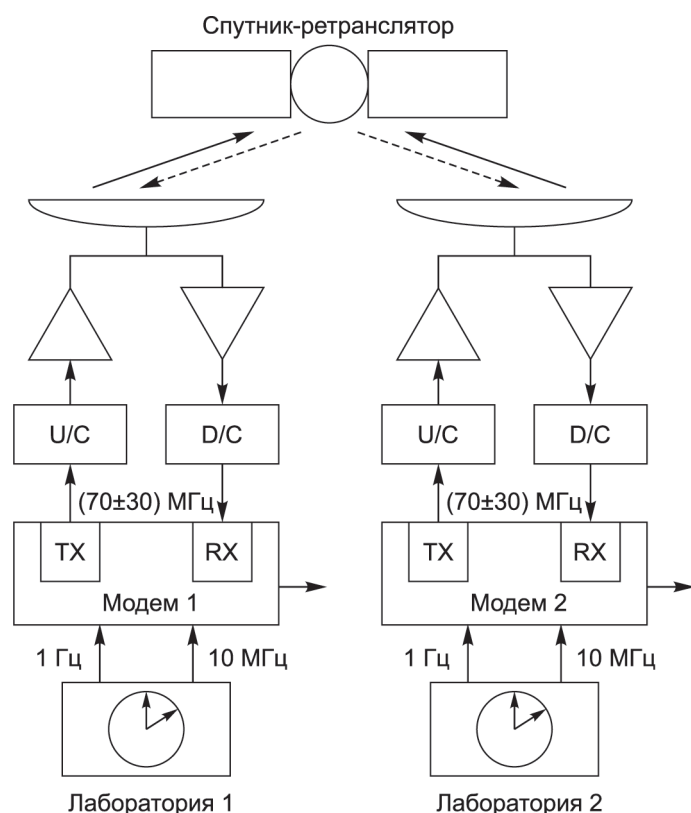


Рис. 1. Схема двусторонней передачи ЭСЧВ через геостационарный спутник на СВЧ-несущей:

U/C, D/C – переносчики частоты в Ku -диапазон; TX – передатчики; RX – ресиверы

ВОЛС разной длины. Измерения позволили оценить потенциальную точность метода передачи эталонных сигналов ВХ по ВОЛС с помощью модемов SATRE.

Спутниковый метод TWSTFT сравнения ШВ. Данный метод основан на одновременном обмене между удаленными лабораториями закодированными сообщениями через геостационарный спутник связи. Для кодирования и декодирования сообщений, несущих информацию о времени и частоте, используются специальные модемы. Схематически этот метод, реализующий встречную передачу ЭСЧВ через спутник-ретранслятор, представлен на рис. 1.

В каждой лаборатории находится локальный источник эталонной частоты и ШВ, как правило, это квантовые часы или физическая реализация шкалы времени UTC этой лаборатории. Синусоидальный сигнал часов частотой 10 МГц и импульсный сигнал времени 1 PPS с частотой следования 1 Гц подаются на входы модема. Каждый модем формирует и отправляет закодированный сигнал, содержащий информацию о ходе часов своей лаборатории, а также декодирует сигнал, поступающий от второй лаборатории. Модемы формируют выходной сигнал на частоте 70 МГц с максимальной полосой спектра до ± 30 МГц. В сформированном сигнале содержится информация о положении фронта входного импульсного сигнала 1 PPS ШВ, расшифровка кода времени, идентификатор лаборатории и другая техническая ин-

формация. Обычно используется двоичная BPSK фазовая манипуляция псевдослучайным кодом. Использование псевдослучайных кодов или псевдослучайных последовательностей необходимо для повышения помехоустойчивости и точности определения временных параметров принимаемого сигнала. Каждый модем измеряет задержку между кодом времени в принятом сообщении и фронтом сигнала 1 PPS локальных часов.

При работе через геостационарный спутник выходной сигнал модема на частоте 70 МГц переносится на сверхвысокочастотную (СВЧ) несущую в Ku -диапазоне в блоке U/C (up converter), усиливается и поступает на параболическую антенну для передачи на спутник-ретранслятор. Проходя через транспондер в спутнике, сигнал усиливается и передается на Землю. При приеме в наземной лаборатории сигнал также усиливается и с помощью блока D/C (down converter) переносится обратно в диапазон частот 70 МГц. После чего сигнал поступает на вход модема другой лаборатории. В модемах сигнал обрабатывается и вычисляется задержка между меткой времени принятого сигнала и собственной меткой времени локальных квантовых часов. Это позволяет сравнить ШВ двух лабораторий.

Модемы SATRE могут работать на скорости кодирования информации 0,5–20 МЧип/с (MChip/s). При реализации спутникового метода TWSTFT модемы функционируют, как правило, на низких скоростях цифровой фазовой манипуляции 1,0–2,5 МЧип/с. На такой скорости при достаточно продолжительных сеансах связи можно получить максимально достижимую точность сравнения ШВ около 1 нс. Работа на низких скоростях цифровой фазовой манипуляции при реализации метода TWSTFT обусловлена высокой стоимостью аренды широкополосных спутниковых каналов связи. Стандартный волоконный DWDM-канал связи на длине волны 1,55 мкм имеет ширину 100 ГГц (0,8 нм). Это дает возможность применить максимальную символьную скорость модемов SATRE – 20 МЧип/с. Точность передачи ЭСЧВ при этом может быть повышена в несколько раз.

В настоящее время оптоволоконные сети имеют достаточно обширную зону охвата. Доступность и возможности такого ресурса вызывают большой интерес у лабораторий, занимающихся развитием методов передачи ЭСЧВ по ВОЛС. Но в обычных телекоммуникационных сетях передача информационных потоков в каждом из волокон оптического кабеля повсеместно ведется только в одну сторону. В узлах связи этот поток может подвергаться различным преобразованиям. Это приводит к неопределенности задержек сигналов, которые по одному волокну кабеля проходят путь в одну сторону, а по другому – в обратную. Поэтому для реализации высокоточного двустороннего канала передачи ЭСЧВ и сравнения ШВ требуется специально выделенная для этих целей одна волоконная жила в оптическом кабеле или выделенный в ней оптический канал DWDM. По такому каналу встречно должны распространяться на оптической несущей закодированные сигналы, передающие информацию о ходе часов, установленных на концах ВОЛС.

Схема установки. Схема установки для встречной передачи закодированных модемами SATRE сигналов времени по одной линии из стандартного волокна SMF-28 представле-

на на рис. 2. Здесь, в отличие от схемы рис. 1, СВЧ-канал заменён ВОЛС, которая состоит из последовательно включённых лабораторных катушек волокна. На концах ВОЛС установлены оптические трансмиттеры $TX1$, $TX2$ на основе DFB-лазеров $L1$, $L2$ и оптические ресиверы $RX1$, $RX2$. Выходные сигналы модемов $S1$, $S2$ модулировали по амплитуде излучение DFB-лазеров $L1$, $L2$. На оба модема подавались сигналы от одних квантовых часов из состава ВХ ГЭТ 1–2012. Модемы работали на максимальной символьной скорости кодирования. Для ослабления влияния паразитных отражений в линии на работу DFB-лазеров использовали дополнительные оптические изоляторы $OИ$. С фотоприёмников $\Phi П1$, $\Phi П2$ ресиверов на входы соответствующих модемов $S1$, $S2$ поступали сигналы, принятые по линии от лазера, установленного на противоположном конце ВОЛС.

Передача закодированных модемами $S1$, $S2$ сигналов, содержащих информацию о ходе квантовых часов ВХ, осуществлялась на оптических несущих лазеров $L1$, $L2$. Длины волн лазеров были настроены на один канал DWDM. Для разделения встречно распространяющихся оптических несущих на концах линии установлены оптические циркуляторы $\mathcal{C}1$, $\mathcal{C}2$. Закодированный сигнал времени от ВХ передаётся по линии во встречных направлениях. Первое направление соответствует на схеме последовательности точек $A-B-C-D-E-F-X2$, второе – последовательности точек $A-G-F-E-D-C-X1$.

При работе с ВОЛС длиной 200 км оптический патчкорд, соединяющий точки D и E , заменяли оптическим двунаправленным EDFA-усилителем. Оптические аттенюаторы $OА$ обеспечивали регулировку уровня несущих при изменении длины ВОЛС.

На основании подаваемых от квантовых часов ВХ сигналов времени в модемах $S1$, $S2$ формируются ШВ модемов $TS1$, $TS2$. Разность шкал модемов $\Delta T^* = TS2 - TS1$ можно рассчитать на основании показаний $TI(2)$, $TI(1)$ измерителей интервалов времени $TIC2$, $TIC1$. Каждый измеритель запускается передаваемым сигналом 1 PPS в момент $1PPS(TX)$, а останавливается принимаемым сигналом $1PPS(RX)$. Соответственно показания $TI(2)$, $TI(1)$ запишем как

$$TI(2) = 1PPS(TX2) - 1PPS(RX2)$$

$$TI(1) = 1PPS(TX1) - 1PPS(RX1),$$

где $1PPS(TX2)$, $1PPS(TX1)$ – моменты времени переда-

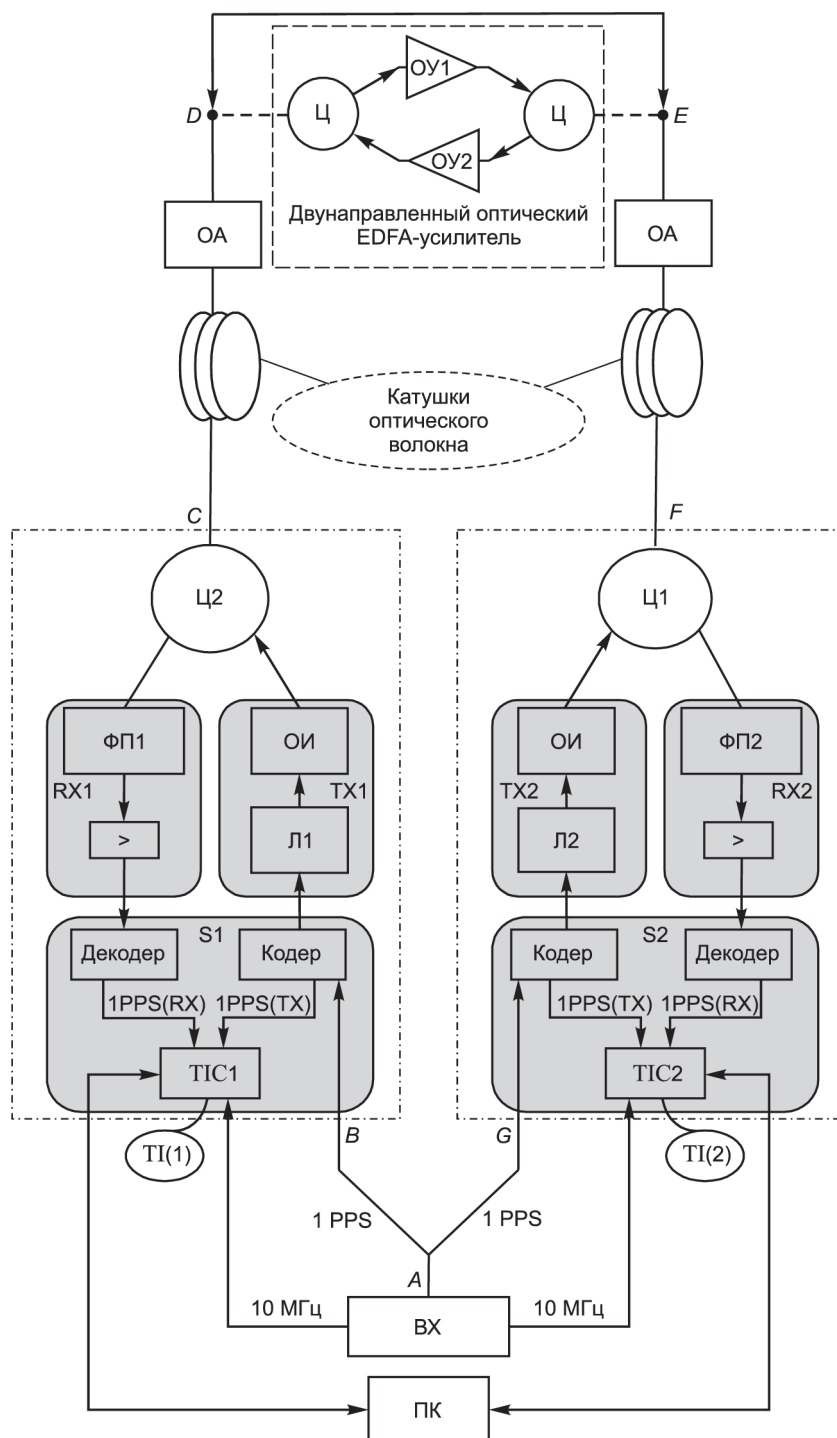


Рис. 2. Схема установки двунаправленной передачи на оптической несущей с помощью модемов SATRE эталонных сигналов по волоконным линиям: $\Phi П1$, $\Phi П2$ – фотоприёмники ресиверов $RX1$, $RX2$; $L1$, $L2$ – DFB-лазеры трансмиттеров $TX1$, $TX2$; $OИ$ – оптические изоляторы; $TIC1$, $TIC2$ и $TI(1)$, $TI(2)$ – измерители интервалов в составе модемов $S1$, $S2$ и их показания, соответственно; ВХ – водородный хранитель; ПК – персональный компьютер; $\mathcal{C}1$, $\mathcal{C}2$, $\mathcal{C}$ – оптические циркуляторы; $OА$ – оптические аттенюаторы; $OУ1$, $OУ2$ – оптические усилители

чи сигналов 1 PPS трансмиттерами $TX2$, $TX1$; $1PPS(RX2)$, $1PPS(RX1)$ – моменты времени приёма сигналов 1 PPS ресивером $RX2$ от модема $S1$ и ресивером $RX1$ от модема $S2$.

Введём также обозначения: $DL(TX1)$ – задержка сигнала от точки B до C , т. е. включая задержку в модеме $S1$, лазере $L1$ и циркуляторе $C1$; $DL(TX2)$ – задержка сигнала от точки G до F ; $DL(RX1)$ – задержка сигнала от точки C до $X1$, т. е. включая задержку в циркуляторе $C1$, фотоприёмнике $ФП1$, усилителе и модеме $S1$; $DL(RX2)$ – задержка сигнала от точки F до $X2$; $DL(CD)$, $DL(DC)$ – задержки сигналов в линии от точки C до D и от точки D до C ; $DL(DE)$, $DL(ED)$ – задержки сигналов от точки D до E и от точки E до D в патчкорде или в двунаправленном EDFA усилителе; $DL(EF)$, $DL(FE)$ – задержки сигналов в линии от точки E до точки F и от точки F до E ;

В принятых выше обозначениях

$$TI(1) = TS(S1) - TS(S2) + DL(TX2) + DL(FE) + \\ + DL(ED) + DL(DC) + DL(RX1).$$

$$TI(2) = TS(S2) - TS(S1) + DL(TX1) + DL(CD) + \\ + DL(DE) + DL(EF) + DL(RX2).$$

Откуда следует, что разность ΔT^* ШВ модемов $TS1$, $TS2$:

$$\Delta T^* = 0,5 \{ [TI(2) - TI(1)] + [DL(TX2) - DL(TX1)] + \\ + [DL(RX1) - DL(RX2)] + [DL(ED) - DL(DE)] + \\ + [DL(DC) - DL(CD)] + [DL(FE) - DL(EF)] \}. \quad (1)$$

В (1) разность ΔT^* требует уточнения, если длины волн лазеров $L1$, $L2$ не равны. При разности длин волн время распространения излучения лазеров $L1$, $L2$ в линии будет отличаться из-за хроматической дисперсии волокна SMF-28 $\alpha = 17$ пс/(нм·км). В установке лазеры $L1$, $L2$ имели разность длин волн $\Delta\lambda = 0,02$ нм. Хроматическая поправка $\Delta T^*(L, \Delta\lambda)$ при длине линии L :

$$\Delta T^*(L, \Delta\lambda) = \alpha L \Delta\lambda. \quad (2)$$

С учётом хроматической поправки (2) разность $\Delta T(L)$ ШВ модемов $TS1$ и $TS2$ составит

$$\Delta T(L) = \Delta T^* + \Delta T^*(L, \Delta\lambda). \quad (3)$$

На установке была определена разность ШВ $\Delta T(L)$ модемов с ВОЛС разной длины. Экспериментальные результаты позволили оценить неопределённость сравнения ШВ.

Методика эксперимента и анализ результатов. С каждого из модемов на персональный компьютер (ПК) поступала информация о времени прохождения сигнала от передающего к принимающему модему. А также поступали данные об измеренной разности между шкалой опорного сигнала 1 PPS и шкалой времени, сформированной в модеме. На основе этих данных в ПК в процессе постобработки рассчитывались разность ШВ ΔT^* , хроматическая поправка $\Delta T^*(L, \Delta\lambda)$ и разность ШВ $\Delta T(L)$, поступавших на модемы.

Так как по линии встречно передаются сигналы одних ча-

сов, то среднее значение разности ШВ должно быть постоянным. Эта разность не будет равной нулю из-за несовпадения длин оптических путей для встречных сигналов. Различия оптических путей вызвано несовпадением длин соединительных оптических патчкордов, коаксиальных кабелей AB и AG .

Были определены разности ШВ $\Delta T(L)$ при длине ВОЛС 1,5 м и 2; 50; 100; 200 км. Измерения на ВОЛС длиной до 100 км проводили без усилителя EDFA. Измерения с 100 км линией были выполнены с усилителем и без него. На ВОЛС длиной 200 км измерения проводили только с оптическим усилителем. Было проведено несколько циклов измерений, продолжавшихся порядка 10 дней для каждой длины линии. На основании данных измерений была вычислена случайная погрешность передачи ЭСЧВ для разных длин линий.

На рис. 3 представлены графики временной нестабильности TDEV переданного сигнала времени для разных интервалов времени измерения. Для ВОЛС длиной от 1,5 м до 100 км без оптического усилителя значение TDEV переданного сигнала времени не превышает 3 пс в интервале времени измерения 10^5 с, при длине линий 100 и 200 км с оптическим усилителем значение TDEV увеличилось до 6 пс в том же интервале измерения. Отметим, что повышение уровня нестабильности наблюдается в интервале времени измерения порядка полусуток. Это вызвано суточными колебаниями температуры в лаборатории, что приводит к увеличению нестабильности в интервалах времени измерения порядка полупериода колебаний температуры [6].

В таблице представлены результаты измерений и расчёта следующих величин: ΔT^* – результат измерений разности ШВ при различных длинах линии L без учёта хроматической поправки; $\Delta T^*(L, \Delta\lambda)$ – хроматическая поправка, рассчитанная согласно (2); $\Delta T(L)$ – разность ШВ с учётом хроматической поправки, рассчитанная согласно (3); $[\Delta T(L)]_{cp}$ – среднее значение разности ШВ по измерениям на линиях разной длины; среднее квадратическое отклонение $SKO[\Delta T(L)]$ – стандартное отклонение, характеризующее рассеяние относительно $[\Delta T(L)]_{cp}$; u_A – неопределённость измерений разности ШВ, соответствующая случайной погрешности TDEV $\Delta T(L)$ в интервале времени измерения 10^5 с; u_B – неопределённость, соответствующая систематической погрешности, которая принята равной $SKO[\Delta T(L)]$; u_C – суммарная неопределённость измерений разности ШВ.

Измерения, выполненные с двунаправленным EDFA усилителем и без него, дали разные значения $\Delta T(L)$. Это связано с асимметрией задержки встречных сигналов в оптическом усилителе. В результате разность задержек $DL(ED) - DL(DE)$ составила порядка 5 нс.

Рассмотрим представленные в таблице результаты, применив термины, принятые в [7]. Особенностью сравнения ШВ двунаправленным методом является то, что результаты измерений разности шкал $\Delta T(L)$ не должны зависеть от длины L ВОЛС. Это следует из того, что разности в пятой и шестой квадратных скобках в (1) остаются постоянными при изменении длины линии. Тем не менее, при изменении длины L в широких пределах, наблюдается разброс $\Delta T(L)$. При изменении длины ВОЛС значительно изменяются уровни сигналов в ней. Это приводит к изменениям задержки сигнала в оптических ресиверах. Представленный в таблице в виде $SKO[\Delta T(L)]$ разброс значений $\Delta T(L)$ для разных L

можно рассматривать как экспериментальную оценку неопределённости u_B .

Представленная на рис. 3 случайная погрешность TDEV при разных L позволяет оценить неопределённость u_A выполненных измерений. Анализ показывает, что неопределённость u_A незначительна по сравнению с u_B . Следовательно, основной вклад в суммарную неопределённость u_c сравнения ШВ по ВОЛС с помощью модемов SATRE вносит неопределённость u_B . В рассматриваемом случае $u_c \approx u_B$. Отметим, что приведённая в таблице оценка u_c получена в предположении, что $u_B \leq \text{СКО}[\Delta T(L)]_{\text{ср}}$. Следовательно, неопределённость u_c не превышает 220 пс для линий длиной до 100 км. Неопределённость u_c для линий длиной 100 и 200 км не превышает 240 пс.

Для более точного определения u_B необходимо выполнение калибровок аппаратных задержек в установленных на концах линии устройствах. Задержки, вносимые аппаратурой, в выражении (1) представлены суммой значений второй, третьей и четвертой квадратных скобок. Вклад в u_B при определении разности ШВ вносят следующие факторы: u_{B1} – неопределённость, вызванная погрешностью $TIC1$ и $TIC2$ и инструментальной погрешностью дополнительного измерителя интервалов при калибровке задержек в коаксиальных кабелях установки; u_{B2} – неопределённость задержки сигнала в модемах SATRE, в оптических трансмиттерах и ресиверах из-за вариаций температуры в лаборатории; u_{B3} – неопределённость, связанная с систематической погрешностью модемов SATRE и зависимостью задержек от уровней сигналов в установке. Итоговое значение u_B может быть оценено следующим выражением:

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2}. \quad (4)$$

Измерители интервалов могут иметь систематическую погрешность в пределах 20–100 пс в зависимости от их типа. При калибровке кабелей установки использовался измеритель с инструментальной погрешностью 50 пс. Изготовитель приводит значение температурного коэффициента задержки для модемов 30 пс/°C. В рассматриваемом случае температура в лаборатории поддерживалась в пределах (22 ± 2) °C. Для инструментальной систематической погрешности модемов изготовитель даёт оценку в пределах 50–400 пс при их работе на скоростях кодирования 20–2,5 МЧип/с.

Вышеперечисленные данные позволяют теоретически оценить величины u_{B1} , u_{B2} . Измерить u_{B3} затруднительно, так как это требует значительного временного ресурса. Но на основе полученной выше экспериментальной оценки для u_B можно получить интервал возможных значений для неопределённости u_{B3} . Из (4) следует, что $80 \text{ пс} \leq u_{B3} \leq 220 \text{ пс}$.

Оцененное авторами значение неопределённости $u_c \leq 240$ пс при передаче сигналов времени ВОЛС длиной 200 км с помощью модемов SATRE согласуется с оценкой $u_c \approx 250$ пс из [8]. Авторы [8] применяли ВОЛС общей длиной до 540 км с оптическими усилителями. Эксперименты по передаче ЭСЧВ с использованием модемов SATRE провели ещё две лаборатории, которые использовали более короткие ВОЛС. В РТВ (Германия) передача осуществлялась на расстояния 2 и 73 км [9, 10]. В Тайваньской телекоммуникационной лаборатории провели эксперимент с ВОЛС длиной 25 км [11]. Эти ла-

Результаты измерений разности ШВ и оценка их неопределённости при передаче сигналов времени по ВОЛС с помощью модемов SATRE

Параметр	Длина L ВОЛС, км					
	без EDFA				с EDFA	
	0,0015	2	50	100	100	200
ΔT^* , пс	–798	–464	–306	–831	4646	4131
$\Delta T^*(L, \Delta\lambda)$, пс	0	1	17	34	34	68
$\Delta T(L)$, пс	–798	–463	–289	–797	4681	4199
$[\Delta T(L)]_{\text{ср}}$, пс	–587	–587	–587	–587	4440	4440
$\text{СКО}[\Delta T(L)]$, пс	220	220	220	220	241	241
u_A , пс	3	3	3	3	6	6
u_B, u_c , пс	≤ 220	≤ 220	≤ 220	≤ 220	≤ 241	≤ 241

боратории оценили суммарную неопределённость $u_c \approx 100$ пс при передаче ЭСЧВ по более коротким линиям.

Закключение. Обычно в практике двунаправленных сравнений ШВ проводят калибровку суммарной аппаратной задержки, используя короткую линию. Затем результаты калибровки учитывают в качестве поправки при выполнении измерений разности ШВ удалённых часов, соединённых длинной линией. Выполненные в настоящей работе измерения показали, что такую практику калибровки необходимо применять с осторожностью. При изменении длины линии в широких пределах существенно изменяются уровни оптических сигналов, поступающих на фотоприёмники ресиверов. Как показано в работе [12] это может приводить к изменению задержки сигнала в ресиверах на сотни пикосекунд.

Поэтому как при калибровке, так и при передаче ЭСЧВ по реальным ВОЛС необходимо поддерживать одинаковыми

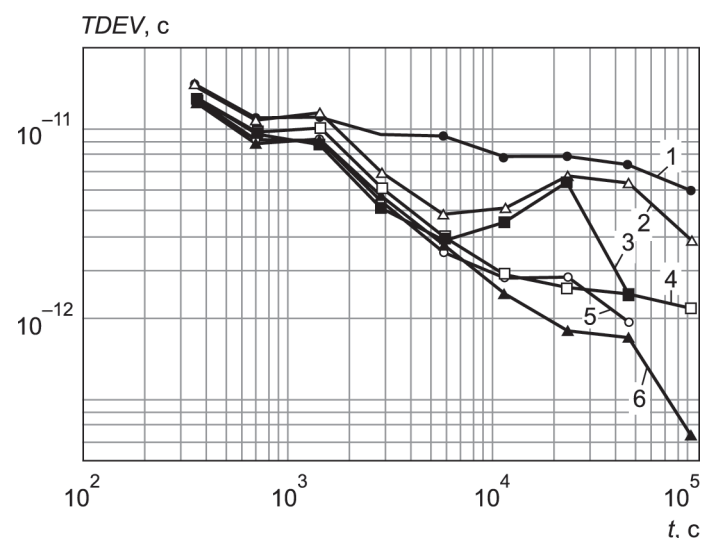


Рис. 3. Нестабильность TDEV переданного сигнала времени 1 PPS по ВОЛС разной длины: 1, 2 – 100 и 200 км с EDFA, соответственно; 3, 4, 6 – 2; 100; 50 км, соответственно; 5 – 1,5 м

уровни оптических сигналов, поступающих на фотоприёмники ресиверов. Выполнение обычного требования по поддержанию постоянства уровней радиочастотных сигналов на входах модемов SATRE недостаточно.

Проведенные в настоящей работе измерения позволили оценить потенциальную точность метода передачи ЭСЧВ на лазерной несущей по ВОЛС с помощью модемов SATRE. По линиям длиной до 200 км можно передавать сигналы времени со случайной погрешностью 6 пс в суточном интервале времени измерений и суммарной погрешностью меньше, чем 240 пс. Следовательно, при переходе от спутниковых СВЧ каналов связи к использованию ВОЛС точность сравнения ШВ с помощью модемов SATRE возрастёт в несколько раз.

Л и т е р а т у р а

1. Донченко С. И., Блинов И. Ю., Гончаров А. С., Норец И. Б. Современное состояние и перспективы развития эталонной базы государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 5–8.
2. Блинов И. Ю., Гончаров А. С., Пальчиков В. Г., Смирнов Ю. Ф. Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли и ее деятельность по обеспечению потребителей эталонными сигналами частоты и времени и информацией о точном времени // Вестник Метролога. 2016. № 4. С. 7–11.
3. Беляев А. А., Демидов Н. А., Медведев С. Ю., Пастухов А. В., Сахаров Б. А., Блинов И. Ю. Аппаратура водородных хранителей эталонов единиц времени и частоты // Вестник Метролога. 2015. № 2. С. 14–23.
4. Хабарова К. Ю., Калганова Е. С., Колачевский Н. Н.

Передача точных сигналов частоты и времени в оптическом диапазоне // Успехи физических наук. 2018. № 2. Т. 188. С. 221–230.

5. **Рекомендация МСЭ-R TF.1153-4 (08/2015).** Оперативное использование двухсторонней передачи сигналов времени и частоты через спутники с применением псевдослучайных шумовых кодов.

6. Федорова Д. М., Балаев Р. И., Малимон А. Н., Курчанов А. Ф., Троян В. И. // Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений. Измерительная техника. 2015. № 9. С. 34–37.

7. **ГОСТ Р 54500.3–2011.** Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

8. Lopez O., Kanj A., Pottie P., Rovera D., Achkar J., Chardonnet C., Klein A., and Santarelli G. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network // Appl. Phys. B. 2013. V. 110. Iss. 1. P. 3–6.

9. Piester D., Fujieda M., Rost M., Bauch A. Time transfer through optical fibers (TTTOF): first results of calibrated clock comparisons. Eprint arXiv:1001.5406. 2010. PP. 1–10.

10. Rost M., Piester D., Yang W., Feldmann T., Wübbena T., Bauch A. Time transfer through optical fibres over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps // Metrologia. 2012. V. 49. No. 6. P. 772–778.

11. Wen-Hung Tseng, Shinn-Yan Lin. A Survey of Time Transfer via a Bidirectional Fiber Link for Precise Calibration Services // NCSLI Measure: J. Meas. Sci. 2013. V. 8. No 2. P. 70–77.

12. Sliwczynski L. Feedforward compensation of propagation delay dependence in fiber-optic receivers for precise time transfer // Meas. Sci. Technol. 2010. V. 21. No. 12. 127003. P. 1–4.

Дата принятия: 09.04.2018.

Two way fiber-optical time and frequency transfer using SATRE modems

A.V. Naumov¹, R.I. Balaev¹, A.N. Malimon¹, D.M. Fedorova^{1,2}

¹All-Russia Research Institute of Physicotechnical and Radio Measurements, Mendeleevo, Russia, e-mail: dmfedorova2706@gmail.com

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia,

SATRE modems are usually used for time and frequency transfer via geostationary satellite (method TWSTFT). In this work, modems are applied for fiber-optical time and frequency transfer with distances up to 200 km. The experimental estimates of uncertainty of time scale comparison via Two Way Optical Time and Frequency Transfer (method TWOTFT) using SATRE modems are given.

Key words: time and frequency transfer, fiber-optical communication lines. TWOTFT, TWSTFT, modern satellite time and ranging equipment (SATRE).