

Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени с использованием эффекта вынужденного комбинационного рассеяния в оптическом волокне

О. В. Колмогоров, Д. В. Прохоров, С. С. Донченко, Е. В. Чемесова

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
р. п. Менделеево, г. Солнечногорск, Московская обл., Российская Федерация,
e-mail: kolmogorov32@rambler.ru, prokhorov@vniiftri.ru,
donchenko_ss@vniiftri.ru, dobro_k@list.ru

Описаны задачи, требующие проведения высокоточных сравнений и синхронизации шкал времени удалённых стандартов времени и частоты. Для решения ряда задач дальности действия существующих систем сравнения шкал времени недостаточно. Рассмотрены перспективы использования волоконно-оптических линий связи для решения рассматриваемых задач. Предложен способ усиления оптических сигналов в волоконно-оптических линиях связи с помощью эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (рамановского рассеяния). Рассмотрено применение рамановского усилителя в телекоммуникационных системах. Представлена схема и результаты оценки погрешности и дальности действия системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени удалённых объектов, использующей усиление сигналов на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния, реализуемого с помощью двухсторонней встречной накачки. Изложен принцип действия системы и порядок определения расхождения шкал времени удалённых объектов. Показано, что усиление сигналов с помощью эффекта вынужденного комбинационного рассеяния в аппаратуре систем одно- и двухсторонних сравнений шкал времени удалённых объектов позволит более чем в три раза увеличить их дальность действия без снижения точности.

Ключевые слова: эталоны времени и частоты, сравнение шкал времени, синхронизация, волоконно-оптическая линия связи, вынужденное комбинационное рассеяние.

Введение. Задачи, требующие высокоточных сравнений и синхронизации шкал времени. Для функционирования измерительных средств глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС (комплексов метрологического обеспечения, беззапросных и запросных измерительных средств, квантово-оптических систем и др.) необходимо обеспечить передачу к ним эталонных сигналов времени или обеспечить синхронизацию шкал времени (ШВ) измерительных средств со ШВ эталона [1]. Для обеспечения соответствия точностных характеристик измерительных средств ГЛОНАСС заданным требованиям необходимо контролировать расхождение ШВ в пункте размещения измерительного средства и ШВ эталона. Измерительные средства размещаются на объектах (полигонах, комплексах и т. д.), расстояния между пунктами размещения измерительных средств и эталонов могут составлять от сотен метров до десятков километров.

Кроме того, в последние годы активно реализуется идея использования протяжённых волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для дистанционного сравнения сигналов времени и частоты удалённых эталонов при проведении перспективных научных исследований. Например, это даёт возможность мониторинга изменений разности гравитационных

потенциалов между удалёнными точками [2]. На территории Европы уже созданы такие волоконно-оптические измерительные сети протяжённостью сотни километров.

Современные требования к точности синхронизации ШВ пространственно-удалённых эталонов характеризуются погрешностью не более 100–200 пс, а для некоторых задач, например исследований гравитационного поля Земли [2], требуется на порядок меньшая погрешность сравнений ШВ. В настоящее время заданный уровень точности сравнений и синхронизации ШВ удалённых до 100 км пунктов можно достичь только при передаче сигналов по ВОЛС. Причём в ряде случаев экономически целесообразно не создавать специально для систем синхронизации новые ВОЛС, а использовать имеющиеся на объектах ВОЛС при условии их пригодности для данной задачи.

В работе [3] предложена конструкция системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени (СОДС ШВ), использующей ВОЛС для обеспечения сравнения и синхронизации ШВ двух удалённых объектов. Особенности СОДС ШВ являются: использование одного оптического волокна; алгоритмическое исключение времени прохождения оптического импульса в волокне; исключение влияния нестабильности временного положения фронтов

импульсов, генератора импульсов и лазерного передающего модуля на точность сравнения; возможность поэлементной калибровки системы.

В работе [4] показана возможность синхронизации ШВ времени пространственно-разнесённых (до 30 км) объектов с применением СОДС ШВ с погрешностью, не превышающей 70 пс (среднее квадратическое отклонение (СКО)). При этом систематическую погрешность можно уменьшить до 10–20 пс при использовании современных высокоточных средств измерений для калибровки системы.

Таким образом, разработанные в Российской Федерации системы синхронизации ШВ, использующие ВОЛС (СОДС ШВ, системы на основе оптоволоконного шлейфа [5]), зачастую имеют недостаточную дальность действия, составляющую единицы километров для оптоволоконного шлейфа и до 30 км для СОДС ШВ, что существенно ограничивает возможности их применения. Промышленно изготавливаемые системы синхронизации зарубежного производства (например, Timetech Optical Link, OTWTST) также имеют дальность действия значительно меньше 100 км и, кроме того, требуют использования независимой аппаратуры для контроля систематической погрешности.

Вышеизложенное обуславливает необходимость повышения дальности действия систем сравнения и синхронизации ШВ, использующих ВОЛС, причём достичь повышения дальности действия систем требуется без ухудшения их метрологических характеристик.

Перспективы использования эффекта вынужденного комбинационного рассеяния для повышения дальности действия систем сравнений и синхронизации ШВ, использующих ВОЛС. Перспективным направлением совершенствования систем сравнений и синхронизации ШВ в целях повышения дальности их работы представляется

использование эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (рамановского рассеяния) (ВКР) [6–8]. Явление ВКР используется в некоторых телекоммуникационных системах для усиления информационного оптического сигнала, распространяющегося в одном волокне вместе с излучением накачки [9], при этом длина волны сигнального излучения лежит в полосе комбинационного усиления. В процессе распространения по волокну энергия излучения накачки уменьшается в результате преобразования в энергию упругих колебаний молекул среды (оптического волокна), энергия которых, в свою очередь, переходит в энергию сигнальной волны. Таким образом, усиление сигнала за счёт энергии волны накачки происходит по всей длине волокна, которое вместе с источником накачки представляет собой распределённый ВКР-усилитель. Слабое (около 0,5 дБ/км) поглощение оптического излучения на длине волны накачки обеспечивает проникновение накачки на большую дальность, т. е. усиление оказывается распределённым вдоль волокна. В этом случае удаётся получить более равномерное распределение мощности оптического импульса вдоль направления распространения, при этом энергия сигнала не опускается до уровня шумов и уровня, при котором становятся существенными нелинейные искажения сигналов. Свойство распределённости ВКР-усиления позволяет существенно увеличить отношение сигнал/шум при усилении сигнала в ВОЛС и, следовательно, повысить максимальную дальность работы систем сравнения и синхронизации ШВ.

На рис. 1 показаны оптические схемы ВКР-усилителей с сонаправленной и встречной накачками. Толщина линий условно соответствует мощностям излучения накачки и усиливаемого оптического импульса в ВОЛС в зависимости от расстояния от источника импульса. При практической реализации ВКР-усилителей в телекоммуникациях чаще используется встречная

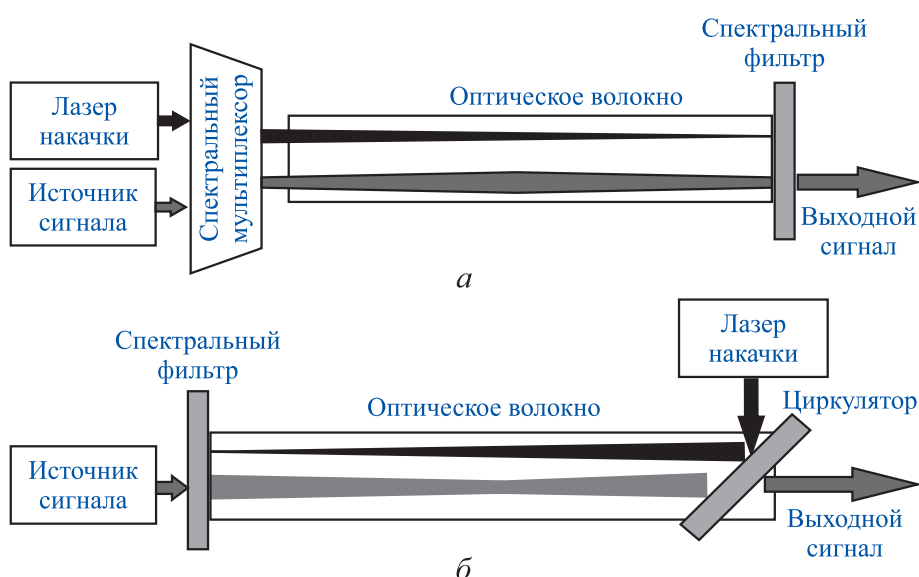


Рис. 1. Оптические схемы ВКР-усилителей с сонаправленной (а) и встречной (б) накачками

Fig. 1. Optical scheme of Raman-amplifiers with one way directed (a) and counter (b) pumping

ная схема. Недостатком сонаправленной схемы применительно к телекоммуникационным системам является эффект, вызванный вынужденным рассеянием Мандельштама–Бриллюэна [6]. При увеличении мощности передаваемого периодического сигнала увеличивается рассеяние в обратную сторону. Вследствие этого увеличение мощности подаваемого в ВОЛС сигнала выше некоторого порогового значения уже не приводит к росту мощности на выходе ВОЛС, а потому не имеет смысла. Таким образом, в телекоммуникационных приложениях ВКР-усилители используют в конце ВОЛС перед фотоприёмным устройством по встречной схеме. Однако в рассматриваемых системах сравнений ШВ используются одиночные короткие, длительностью не более десятков наносекунд, импульсы, при прохождении которых не возникает вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ).

На эффективность ВКР-усиления значительное влияние оказывает взаимное соотношение плоскостей поляризации сигнала и накачки: усиление максимально при совпадении плоскостей поляризации и минимально для их ортогональных положений. Поскольку на прохождение сигнала по ВОЛС оказывает влияние поляризационная модовая дисперсия, поляризация как сигнальной волны, так и волны накачки, может изменяться по длине трассы ВОЛС непредсказуемым образом, что значительно снижает результирующее усиление. Для устранения влияния данного эффекта в ВКР-усилителях накачка осуществляется с помощью двух лазерных источников с ортогональными плоскостями поляризации. Подключение такого ВКР-усилителя к ВОЛС для работы по встречной схеме представлено на рис. 2.

В [10–13] приведены результаты экспериментов по передаче телекоммуникационных сигналов по ВОЛС длиной до сотен километров с использованием ВКР-усилителей, а в [14] представлена система передачи эталонного сигнала частоты по ВОЛС с применением каскада ВРМБ-усилителей. Эти результаты исследований свидетельствуют о перспективности применения таких усилителей в волоконно-оптической технике, в том числе и в системах сравнений и синхронизации ШВ.

Использовать построенный по такой схеме ВКР-усилитель в составе СОДС ШВ возможно, если модернизировать блок разветвителей-объединителей так, чтобы он обеспечивал усиление излученного импульса по сонаправленной схеме и отраженного по встречной. Для построения блока разветвителей-объединителей с функцией усиления (БРО-У) в исходный состав блока следует включить блок лазеров накачки (см. рис. 2) и оптоволоконный объединитель.

При дополнении аппаратуры систем двумя блоками лазеров накачки, установленными на противоположных концах ВОЛС, будет осуществляться двунаправленная накачка (сонаправленная и встречная), что обеспечит более равномерное распределение мощности прямого и обратного сигналов вдоль волокна и максимально возможную дальность передачи сигнала.

СОДС ШВ с усилением сигнала на основе эффекта ВКР. Предлагаемая схема СОДС ШВ с блоком БРО-У и дополнительным блоком лазеров накачки на конце ВОЛС приведена на рис. 3.

Особенностями данной схемы являются:

использование на передающей стороне ВОЛС (пункт 1) блока лазеров накачки БЛН1, обеспечивающего накачку волокна для усиления по сонаправленной схеме прямого сигнала, переданного с лазерного передающего модуля ЛПМ в ВОЛС, и по встречной схеме – усиления обратного сигнала, отраженного от полупрозрачного ретрорефлектора РР;

включение в оптическую схему спектральных фильтров $\Phi 1$, $\Phi 2$, пропускающих на фотоприёмники $\Phi П 1$, $\Phi П 2$ только сигнал от лазерного передающего модуля и фильтрующих излучение накачки;

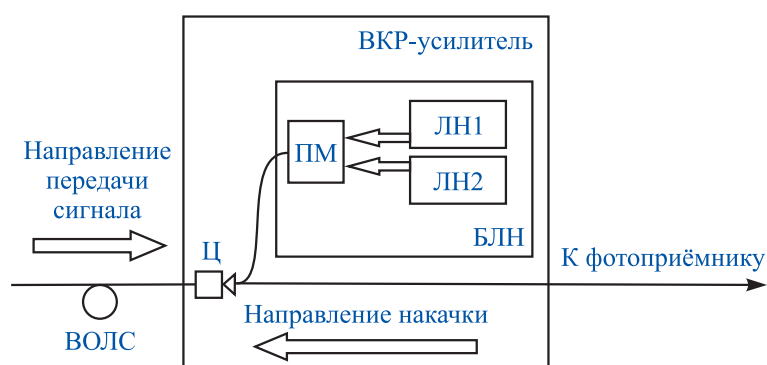


Рис. 2. Встречная схема подключения ВКР-усилителя к ВОЛС: ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи; ПМ – поляризационный мультиплексор; ЛН1, ЛН2 – лазеры накачки с ортогональными состояниями поляризации; БЛН – блок лазеров накачки; Ц – циркулятор

Fig. 2. Scheme of counter connection of Raman-amplifier to FOCL: FOCL – fiber optic communication line; PM – polarization multiplexer; LP1, LP2 – lasers pumping with orthogonal states of polarization; UPL – unit of pump lasers; CR – circulator

использование дополнительного блока лазеров накачки БЛН2, обеспечивающего усиление прямого сигнала по встречной схеме и усиление отраженного сигнала по сонаправленной.

Принцип действия СОДС ШВ состоит в следующем. Генератор импульсов ГИ в течение секундного цикла формирует последовательность импульсов, которые преобразуются лазерным передающим модулем в оптические импульсы. Каждый i -й оптический импульс проходит через блок разветвителей-объединителей БРО-У, где небольшая часть мощности оптического импульса через разветвитель Р, объединитель О и спектральный фильтр $\Phi 1$ поступает в фотоприёмное устройство $\Phi П 1$, а основная часть мощности импульса поступает в ВОЛС. Электрический сигнал с фотоприёмника $\Phi П 1$ поступает в таймер событий ТС1, на который также подаётся импульсный сигнал времени 1 PPS, формируемый стандартом частоты и времени пункта 1 СЧВ1, что обеспечивает фиксацию момента времени t_i излучения импульса в ВОЛС в ШВ пункта 1 ШВ1.

Оптический импульс, пришедший по ВОЛС в пункт 2 с некоторой временной задержкой τ_3 , через полупрозрачный ретрорефлектор поступает в фотоприёмник $\Phi П 2$, который преобразует импульс в электрический сигнал, и попадает на таймер событий ТС2. Также в таймер событий ТС2 от стандарта частоты и времени пункта 2 СЧВ2 поступает сигнал 1 PPS ШВ пункта 2 ШВ2, что позволяет определить время прихода i -го оптического импульса τ_{2i} в ШВ пункта 2.

Часть мощности оптического импульса, пришедшего в пункт 2, отражается от ретрорефлектора и проходит по ВОЛС обратный путь. С временной задержкой, равной задержке τ_3 в линии при прямом прохождении, отраженный импульс через блок разветвителей-объединителей БРО-У поступает на вход фотоприёмника пункта 1 $\Phi П 1$.

Сигнал с фотоприёмника $\Phi П1$ поступает на вход таймера событий $ТС1$, что позволяет зафиксировать время прихода i -го отражённого импульса τ_{1i} в ШВ пункта 1. Время прохождения оптического импульса по ВОЛС протяжённостью сотни километров составляет не более единиц миллисекунд, поэтому изменение длины линии за счёт колебаний температуры не создаёт разницы времени прохождения оптического импульса по ВОЛС в прямом и обратном направлениях.

Компьютеры $ПК1$ и $ПК2$, обрабатывающие измерительную информацию, объединены в локальную сеть FastEthernet. По локальной сети информация с компьютера $ПК1$ о моментах времени τ_{1i} поступает в компьютер $ПК2$ для последующей обработки измерительных данных, поступающих с таймеров событий пунктов 1 и 2.

При необходимости на стандарт частоты и времени пункта 2 $СЧВ2$ можно подать команду коррекции с компьютера $ПК2$ с целью синхронизации ШВ пунктов 1 и 2 $ШВ2$ с $ШВ1$ и передачи синхронизированной $ШВ2$ на измерительное средство $ИС$ пункта 2.

В результате применения блоков лазеров накачки происходит усиление прямых и отражённых оптических импульсов как описано выше.

В работе [4] показана работоспособность системы СОДС ШВ на дальности до 30 км при длине волны лазерного излучения 1310 нм, что при коэффициенте поглощения

в волокне 0,31 дБ/км (стандартное волокно SMF-28) соответствует динамическому диапазону системы 9,3 дБ. Применение оптоэлектронных компонентов с теми же энергетическими характеристиками с длиной волны 1550 нм при коэффициенте поглощения в волокне 0,17 дБ/км обеспечит дальность действия СОДС ШВ до 50 км. В [9] экспериментально показано, что для входного сигнала мощностью 1 мВт и с длиной волны 1550 нм при использовании излучения накачки мощностью 700 мВт и с длиной волны 1455 нм коэффициент усиления за счёт ВКР по встречной схеме в волокне длиной 100 км составляет около 20 дБ (соответственно, удельный коэффициент – 0,2 дБ/км), что практически равно коэффициенту ослабления оптического волокна. Таким образом, при двунаправленной схеме усиления, даже без учёта сонаправленного усиления, дальность работы системы сравнений ШВ составит не менее 100 км.

При работе предложенной системы расхождение ШВ T_i , полученное по результатам измерений для каждого i -го импульса, рассчитывается по формуле

$$T_i = (t_i + \tau_{1i}) / 2 - \tau_{2i} + \tau_{\text{анп}} + \tau_{\text{о.в}}, \quad (1)$$

где t_i – момент времени излучения i -го импульса с пункта 1 в ШВ1; τ_{1i} – момент времени приёма i -го отражённого импульса в пункте 1 в ШВ1; τ_{2i} – момент времени приёма i -го

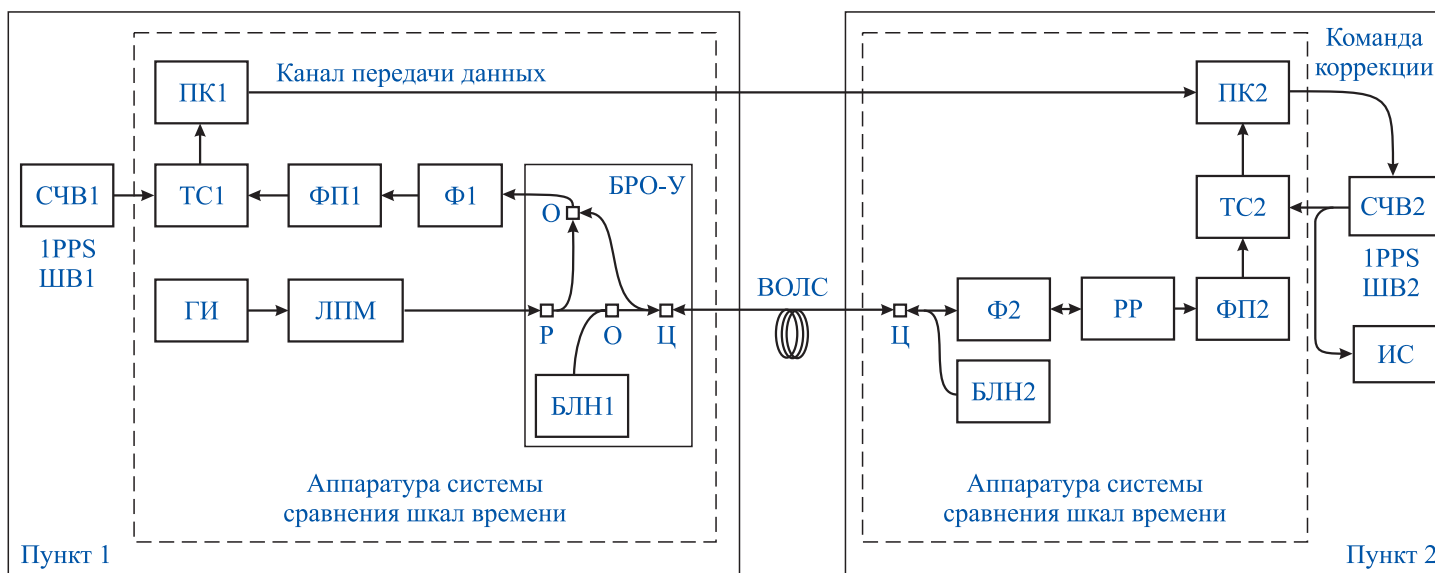


Рис. 3. Система СОДС ШВ с двунаправленным ВКР-усилением:

$СЧВ1$, $СЧВ2$ – стандарты частоты и времени; $ТС1$, $ТС2$ – таймеры событий; $\Phi П1$, $\Phi П2$ – фотоприёмники; $ЛПМ$ – лазерный передающий модуль; $ГИ$ – генератор импульсов; $БЛН1$, $БЛН2$ – блоки лазеров накачки; $БРО-У$ – блок разветвителей-объединителей; $Р$ – разветвитель; $Ц$ – циркуляторы; $О$ – объединители; $\Phi 1$, $\Phi 2$ – спектральные фильтры; $РР$ – ретрорефлектор; $ВОЛС$ – волоконно-оптическая линия связи; $ПК1$, $ПК2$ – персональные компьютеры; $ИС$ – измерительное средство – потребитель сигналов 1 PPS

Fig. 3. System of one- and two-way comparisons of time scales using bidirectional Raman-amplifier

$SFT1$, $SFT2$ – standards of frequency and time; $TIC1$, $TIC2$ – time interval counters; $PD1$, $PD2$ – photodetectors; LTM – laser transmitting module; PG – pulse generator; BPL – block of pumping lasers; $BSC-A$ – block of splitters and combiners; S – splitter; CR – circulator; C – combiner; F – spectral filter; PP – retroreflector; $FOCL$ – fiber optic communication line; $PC1$, $PC2$ – personal computer; CS – measuring instrument – consumer of signals 1 PPS

импульса в пункте 2 в ШВ2; $\tau_{\text{анп}}$ – поправка для учёта задержек сигнала в аппаратуре системы; $\tau_{\text{о.в}}$ – поправка для учёта невзаимности задержки распространения сигнала в прямом и обратном направлении, обусловленной нелинейными и дисперсионными эффектами в оптическом волокне.

При усреднении результатов измерений серии из N импульсов, излучённых в секундном цикле работы системы, усреднённое расхождение ШВ рассчитывается по формуле

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{t_i + \tau_{1i}}{2} - \tau_{2i} + \tau_{\text{анп}} + \tau_{\text{о.в}} \right). \quad (2)$$

Основными составляющими погрешности рассмотренных систем являются погрешности определения моментов времени излучения и приёма импульсов (погрешности таймеров событий – измерителей временных интервалов) и погрешность определения аппаратурной поправки.

Проанализировав выражения (1), (2), запишем выражение для оценки границ неисключённой систематической погрешности (НСП) Θ_{Σ} системы, считая составляющие погрешности некоррелированными:

$$\Theta_{\Sigma}^2 = k^2 \left[\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)^2 \Theta_t^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \tau_1} \right)^2 \Theta_{\tau_1}^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \tau_2} \right)^2 \Theta_{\tau_2}^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \tau_{\text{анп}}} \right)^2 \Theta_{\tau_{\text{анп}}}^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \tau_{\text{о.в}}} \right)^2 \Theta_{\tau_{\text{о.в}}}^2 \right], \quad (3)$$

где k – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности; Θ_t – погрешность определения момента времени излучения импульса в пункте 1; Θ_{τ_1} – погрешность определения момента времени приёма отражённого импульса в пункте 1; Θ_{τ_2} – погрешность определения момента времени приёма импульса в пункте 2; $\Theta_{\tau_{\text{анп}}}$ – погрешность определения аппаратурной поправки; $\Theta_{\tau_{\text{о.в}}}$ – погрешность определения поправки за счёт невзаимности задержки распространения сигнала.

Заметим, что для случая использования одного многостопового измерителя временных интервалов (ИВИ) для регистрации как моментов излучения оптических импульсов в ВОЛС, так и моментов приёма отражённых обратно импульсов, обеспечить выполнение условия отсутствия корреляции его погрешностей можно за счёт выбора длительности интервалов времени между моментами излучения импульсов в линию.

Определив частные производные, входящие в выражение (3), получим

$$\Theta_{\Sigma} = \pm k \sqrt{\Theta_t^2/4 + \Theta_{\tau_1}^2/4 + \Theta_{\tau_2}^2 + \Theta_{\tau_{\text{анп}}}^2 + \Theta_{\tau_{\text{о.в}}}^2}. \quad (4)$$

Для оценки границ абсолютной погрешности Δ_T измерений расхождения ШВ системой запишем соотношение

$$\Delta_T = \pm k \sqrt{\Theta_{\Sigma}^2/3 + \sigma^2}, \quad (5)$$

где σ – случайная составляющая погрешности измерений системы сравнений ШВ, выраженная в виде СКО.

Границы абсолютной погрешности Δ_T , пс, измерений расхождения ШВ СОДС ШВ с ВКР-усилением

Θ_T	Θ_{Σ}	σ , пс		
		10	20	30
± 10	$\pm 20,6$	$\pm 31,1$	$\pm 46,5$	$\pm 64,5$
± 20	$\pm 41,7$	$\pm 51,6$	$\pm 62,1$	$\pm 76,5$
± 30	$\pm 61,7$	$\pm 74,0$	$\pm 81,7$	$\pm 93,2$

Значение σ определяется в результате обработки результатов многократных измерений, выполненных системой сравнений и синхронизации ШВ.

Для оценки точностных характеристик предложенной системы сравнений ШВ, использующей эффект ВКР-усиления, вычислим оценки границ погрешности системы, воспользовавшись выражениями (4), (5). Результаты расчётов приведены в таблице. При расчётах значения Θ_t , Θ_{τ_1} , Θ_{τ_2} , $\Theta_{\tau_{\text{анп}}}$, $\Theta_{\tau_{\text{о.в}}}$ принимали равными указанным в таблице значениям Θ_T ($\Theta_T = \Theta_t = \Theta_{\tau_1} = \Theta_{\tau_2} = \Theta_{\tau_{\text{анп}}} = \Theta_{\tau_{\text{о.в}}}$), а коэффициент охвата $k = 2$.

Полученные результаты расчётов показывают, что границы погрешности систем сравнений ШВ, использующих эффект ВКР-усиления в оптическом волокне, составят $\pm 35... \pm 100$ пс (при доверительной вероятности 0,95), что не уступает по точности лучшим существующим образцам систем сравнений ШВ по ВОЛС. Таким образом, использование ВКР-усилителей в аппаратуре СОДС ШВ позволит более чем в три раза увеличить их дальность действия без снижения точности систем.

Заключение. Перспективным путём повышения дальности действия систем сравнений и синхронизации ШВ удалённых объектов является использование усиления сигналов в оптическом волокне на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния. Предложена схема системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени удалённых объектов, использующей двунаправленное ВКР-усиление. В результате оценки погрешности и дальности действия систем одно- и двухсторонних сравнений шкал времени, использующих ВКР-усиление, выявлено, что реализация ВКР-усиления в аппаратуре таких систем позволит более чем в три раза увеличить их дальность действия без снижения точности систем.

Список литературы

1. Денисенко О. В. и др. Обеспечение единства измерений при развитии и использовании ГЛОНАСС // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 17–20.
2. Фатеев В. Ф. Релятивистская метрология околосветового пространства-времени. М.: ВНИИФТРИ, 2017. 438 с.
3. Донченко С. С., Колмогоров О. В., Прохоров Д. В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 14–17.

4. Колмогоров О. В., Донченко С. С., Прохоров Д. В., Бувев С. Г. Экспериментальные исследования макета системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // Измерительная техника. 2016. № 10. С. 49–51.

5. Садовников М. А., Сумерин В. В. Беззапросные квантово-оптические системы контроля и передачи шкал времени ГЛОНАСС // Вестник ГЛОНАСС. 2012. № 3(7). С. 39–42.

6. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 324 с.

7. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. Пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 512 с.

8. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / Под ред. Дмитриева С. А., Слепова Н. Н. М.: Техносфера, 2010. 608 с.

9. Леонов А. В., Наний О. Е., Трещиков В. Н. Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи // Прикладная фотоника. 2014. № 1. С. 26–49.

10. Hansen P. B. et al., *Electronics Letters*, 1996, vol. 32, no. 11, pp. 1018–1019.

11. Nielsen T. N. et al., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 8, pp. 1079–1081.

12. Zhu B. et al., *Proc. OFS 2002, Postdeadline paper FC8*, 2002, pp. FC8-1–FC8-3.

13. Mikkelsen B. et al., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 10, pp. 1400–1402.

14. Sebastian M. F. Raupach, Andreas Koczwar, Gesine Grosche, *Physical Review A*, 2015, vol. 92, Iss. 2. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.021801>

References

1. Denisenko O. V., Fedotov V. N., Sil'vestrov I. S. et al., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 23–28. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0657-7>

2. Fateev V. F. *Relyativistskaya metrologiya okolozemnogo prostranstva-vremeni*, VNIIFTRI, Mendeleevo Publ., 2018, 439 p. (in Russian).

3. Donchenko S. S., Kolmogorov O. V., Prokhorov D. V., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 18–22. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0656-8>

4. Kolmogorov O. V., Donchenko S. S., Prokhorov D. V., Buev S. G., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 59, no. 10, pp. 1094–1097. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1098-2>

5. Sadovnikov M. A., Sumerin V. V., *Vestnik GLONASS*, 2012, no. 3(7), pp. 39–42 (in Russian).

6. Govind P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 1995, 592 p.

7. Roger L. Freeman, *Fiber-Optic Systems for Telecommunications*, Wiley, 2002, 416 p.

8. *Volononno-opticheskaya tekhnika: sovremennoe sostoyanie i novye perspektivy*, Ed. Dmitriev S. A., Slepov N. N., Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010, 608 p. (in Russian).

9. Leonov A. V., Nanii O. E., Treshchikov V. N., *Prikladnaya fotonika*, 2014, no. 1, pp. 26–49 (in Russian).

10. Hansen P. B. et al., *Electronics Letters*, 1996, vol. 32, no. 11, pp. 1018–1019.

11. Nielsen T. N. et al., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 8, pp. 1079–1081.

12. Zhu B. et al., *Proc. OFS 2002, Postdeadline paper FC8*, 2002, pp. FC8-1–FC8-3.

13. Mikkelsen B. et al., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 10, pp. 1400–1402.

14. Sebastian M. F. Raupach, Andreas Koczwar, Gesine Grosche, *Physical Review A*, 2015, vol. 92, Iss. 2. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.021801>

Дата поступления: 25.11.2019.

Дата принятия: 25.12.2019.

A system of one- and two-way comparisons of time scales using stimulated Raman scattering

Oleg V. Kolmogorov, Dmitriy V. Prokhorov, Sergey S. Donchenko, Ekaterina V. Chemesova

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Solnechnogorsk, Moscow region, Russian Federation, e-mail: kolmogorov32@rambler.ru, prokhorov@vniiftri.ru, donchenko_ss@vniiftri.ru, dobro_k@list.ru

Problems requiring high-precision comparisons and synchronization of time scales of remote time and frequency standards are considered. The prospects of using fiber-optic communication lines to solve these problems are considered. Data on maximum operating distances and accuracy characteristics of time scale comparison systems using fiber-optic communication lines are given. It is shown that the range of existing systems is not enough to solve a number of problems. A method for amplifying optical signals in an optical fiber using the effect of stimulated Raman scattering is considered. The application of the Raman amplifier in telecommunication systems is considered. A method is proposed for using the effect of stimulated Raman scattering (SRS) to amplify the optical signals of time scale comparison systems. A scheme is proposed for a system of one- and two-way comparisons of time scales of distant objects, using signal amplification based on the SRS effect realized using two-way counter-pumping. The principle of the system's operation and the procedure for determining the divergence in the time scales of remote objects are described. The results of estimation of the error and range of systems of one- and two-way comparisons of time scales using Raman amplifier are presented. It is shown that the implementation of Raman-amplification in the equipment of such systems will allow more than three times to increase their range without reducing the accuracy of the systems.

Key words: time and frequency standards, comparison of time scales, synchronization, fiber-optical link, stimulated Raman scattering.