

УДК 621.317.08

О ВЛИЯНИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ НА ТОЧНОСТЬ СЛИЧЕНИЙ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ И ВРЕМЕНИ ДЛЯ ЗАДАЧ ГРАВИМЕТРИИ

В.Ф. Фатеев, О.В. Колмогоров, Е.А. Рыбаков

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

*fateev@vniiftri.ru,
kolmogorov@vniiftri.ru,
rybakov@vniiftri.ru*

Проведён анализ факторов, влияющих на сличение удалённых стандартов частоты и времени (СЧВ) по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) для задач гравиметрии, в частности для измерений разности гравитационных потенциалов в удалённых точках Земли путём сравнений шкал времени двух СЧВ, размещённых в этих точках, и определения гравитационного смещения частоты. Приведены результаты анализа основных составляющих погрешности сравнений шкал времени удалённых СЧВ по ВОЛС и предложены пути повышения точности сравнений шкал времени.

Ключевые слова: стандарт частоты и времени, волоконно-оптическая линия связи, сравнение шкал времени, хроматическая дисперсия.

ON THE INFLUENCE OF FIBER-OPTICAL COMMUNICATION LINES ON THE ACCURACY OF COMPARISONS OF THE TIME AND FREQUENCY STANDARDS FOR GRAVIMETRY PROBLEMS

V.F. Fateev, O.V. Kolmogorov, E.A. Rybakov

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region

*fateev@vniiftri.ru,
kolmogorov@vniiftri.ru,
rybakov@vniiftri.ru*

The analysis of the factors influencing the comparison of remote frequency and time standards (FTS) over fiber-optic communication lines (FOCL) for gravimetry problems, in particular, for measuring the gravity potential difference, and determining the gravitational frequency shift. The results of the analysis of the main components of the error of comparisons of the time scales of remote FTS on fiber-optic lines are presented. The ways to improve the accuracy of comparisons of time scales are proposed.

Key words: frequency and time standards, fiber-optic communication line, comparison of time scales, chromatic dispersion.

Введение

Повышение точности существующей в Российской Федерации системы высот на протяжённости всей её территории, проведение работ по реализа-

ции Международной системы отсчёта высот (IHRS) предполагают проведение измерений разности гравитационных потенциалов в исследуемых точках поверхности Земли. Согласно общей теории относительности, физическими эффектами, непосредственно связанными с разностью гравитационных потенциалов, являются эффекты гравитационного смещения частоты и гравитационного замедления (смещения) времени. Учитывая указанные эффекты, для измерений разности гравитационных потенциалов в удалённых точках Земли можно использовать сравнение частот и шкал времени, формируемых стандартами частоты и времени (СЧВ), размещаемыми в этих точках [1–2]. Для реализации таких измерений необходимо обеспечить синхронизацию СЧВ и высокоточное определение расхождения формируемых ими частот и шкал времени. При проведении экспериментов расстояния между СЧВ могут составлять от десятков метров до сотен километров, а в перспективе и до нескольких тысяч километров. При этом необходимо обеспечить сравнение частот СЧВ с относительной погрешностью не более $10^{-17} \dots 10^{-19}$ [2] и сравнение формируемых ими шкал времени с погрешностью менее одной пикосекунды. В ряде работ (например, [3–7]) показано, что достичь таких уровней точности при указанных расстояниях между СЧВ в настоящее время возможно только с помощью использования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для передачи эталонных сигналов между пунктами размещения СЧВ.

1. Основные способы сличений СЧВ по ВОЛС

Сличения пространственно удалённых СЧВ по ВОЛС могут проводиться с использованием способа сравнений частот, воспроизводимых этими СЧВ [3–7], а также с использованием способа сравнений шкал времени СЧВ, при котором регистрируется изменение расхождения шкал времени за интервал времени наблюдений, и по соотношению этих величин определяется разность частот СЧВ.

Способ сравнений частот сигналов СЧВ с помощью ВОЛС основан на модуляции оптического излучения радиочастотным сигналом, поступающим с первого СЧВ, передаче оптического излучения по оптоволокну в пункт размещения второго СЧВ, демодуляции оптического сигнала с выделением переданного от СЧВ радиочастотного сигнала и сравнении частоты переданного сигнала с частотой от второго СЧВ с помощью частотного компаратора. Для повышения точности сравнений частот за счёт уменьшения влияния возмущений фазы передаваемых по ВОЛС сигналов могут быть использованы системы компенсации фазовых возмущений. Варианты построения систем компенсации предложены в ряде работ, например [8–12].

Сравнения шкал времени удалённых СЧВ по ВОЛС проводятся с использованием способа двухпутевых сравнений, принцип которого поясняет рис. 1.

Способ двухпутевых сравнений основан на передаче по каналу связи между пунктами размещения СЧВ 1 и СЧВ 2 оптических импульсных сигналов, несущих метки времени, и регистрации моментов их излучения и приёма. Применение данного способа основано на предположении о равенстве задержек распространения сигналов по каналу связи в двух направлениях и известной разности задержек в приёмных трактах аппаратуры сравнений, размещаемой в двух пунктах.

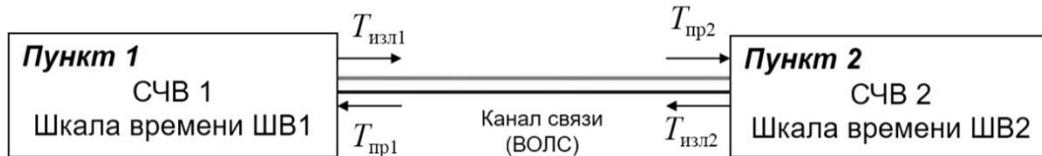


Рис. 1. Сравнение шкал времени удалённых СЧВ по ВОЛС

Для проведения сравнений шкал времени в пунктах 1 и 2 размещается аппаратура системы сравнений шкал времени, включающая передающие и приёмные устройства, и между пунктами организуется отдельный информационный канал связи для обмена данными о моментах излучения и приёма меток времени, зарегистрированных аппаратурой системы.

Вычисление расхождения шкал времени $\Delta T_{шв}$ проводится на основе данных о моментах излучения импульсов $T_{изл1}$, $T_{изл2}$ и моментах их приёма $T_{пр1}$, $T_{пр2}$, зарегистрированных в шкале времени соответствующего пункта (с учётом поправки τ_{app} на разность задержек сигнала в приёмных трактах аппаратуры) [13]:

$$\Delta T_{шв} = (T_{изл1} - T_{изл2} + T_{пр1} - T_{пр2}) / 2 + \tau_{app}. \quad (1)$$

В системах сравнений шкал времени, реализующих способ двухпутевых сравнений (например, в системах, предложенных в работах [13–15]), определение моментов излучения и приёма импульсов проводится с помощью измерителей временных интервалов (ИВИ). На сегодняшний день ИВИ с наиболее высоким разрешением (например, таймеры событий A033ET Event Timer [16]) характеризуются пикосекундными уровнями погрешностей регистрации моментов времени.

Однако при реализации способа двухпутевых сравнений шкал времени по ВОЛС точность сравнений снижается из-за влияния изменений температуры на свойства оптического волокна и на задержки распространения сигналов в аппаратуре, влияния оптического волокна на временные параметры оптических сигналов, а также из-за разности задержек распространения сигналов по ВОЛС в двух направлениях, обусловленной различием спектральных характеристик лазерных передатчиков. Отметим, что системы сравнений шкал времени [13–15] и алгоритмы их работы позволяют исключить влияние

на результаты измерений медленно протекающих температурных изменений задержки в оптоволокне, однако остальные факторы продолжают оставаться источниками погрешностей.

Поэтому для достижения точности сравнений шкал времени, требуемой в задачах гравиметрии, необходимо провести анализ источников погрешности сравнений шкал времени по ВОЛС и предложить пути уменьшения выявленных составляющих погрешности.

2. Анализ факторов, влияющих на точность сравнений шкал времени по ВОЛС при использовании импульсных сигналов

К основным факторам, влияющим на процесс распространения оптического излучения по одномодовому оптическому волокну, относятся: ослабление; хроматическая дисперсия; поляризационная модовая дисперсия; нелинейные эффекты, возникающие при высоких уровнях оптической мощности (такие эффекты, как вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна и др.) [17].

Распространение импульсного оптического излучения в волокне, с учётом ослабления, дисперсии и нелинейных эффектов, для импульсов длительностью более 0,1 пс описывается нелинейным уравнением [17]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i \gamma |A|^2 A, \quad (2)$$

где $A(z, t)$ — огибающая оптического импульса (z — координата по оси распространения оптического излучения; t — время); α — коэффициент, характеризующий ослабление излучения в световоде; β_1 — параметр, характеризующий групповую скорость (скорость распространения огибающей импульса); β_2 — параметр, характеризующий дисперсию групповых скоростей, приводящую к расширению оптического импульса; γ — коэффициент, характеризующий нелинейные эффекты.

Параметры β_1 и β_2 зависят от частоты оптического излучения ω и показателя преломления n [17]:

$$\beta_1 = \frac{1}{c} \cdot \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right);$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \cdot \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right). \quad (3)$$

Оптический импульс, распространяющийся в световоде, подвергается ослаблению, хроматической и поляризационной модовой дисперсии. Что касается нелинейных эффектов, то выбором уровня мощности оптического излучения, передаваемого по волокну, развитие нелинейных эффектов можно снизить.

Изменение параметров импульсов при их распространении по волокну приводит к возникновению дополнительных задержек при регистрации моментов приёма оптических импульсов: задержки из-за влияния хроматической дисперсии $\Delta\tau_{cd}$, задержки из-за влияния ослабления $\Delta\tau_{att}$, задержки из-за влияния поляризационной модовой дисперсии $\Delta\tau_{pmd}$, что поясняет рис. 2, где пороговая мощность фотоприёмника обозначена $P_{пор}$.

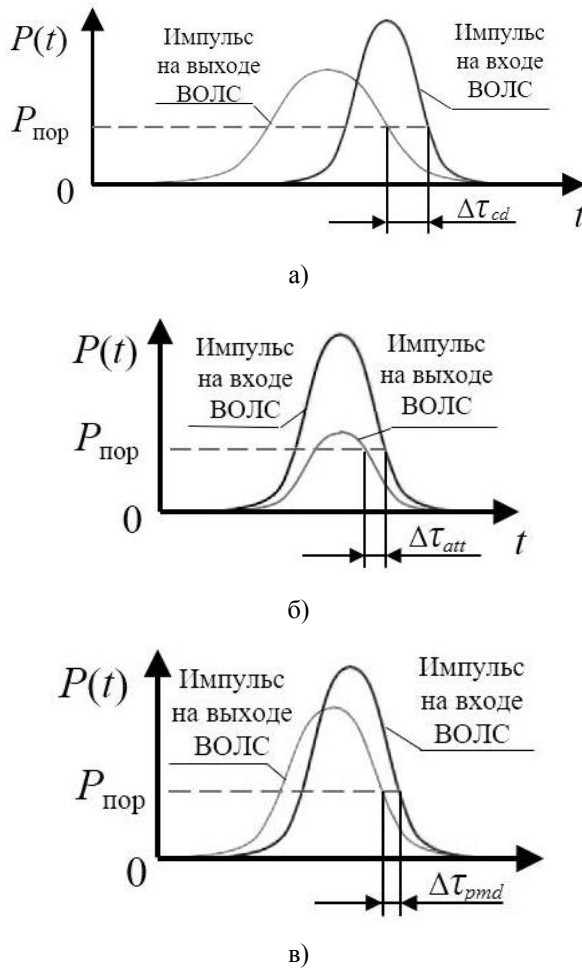


Рис. 2. Изменение формы оптических импульсов при их распространении по волокну

В целом влияние оптического волокна на задержку распространения и временные параметры оптических импульсов приводит к появлению систематической составляющей погрешности сравнений шкал времени.

На основе перечисленных факторов запишем выражения для результатов определения моментов приёма оптических импульсов, переданных по опто-

волокну от двух лазеров, размещённых на противоположных концах ВОЛС (считая, что момент регистрации импульса фиксируется с помощью фотоприёмного устройства с заданным пороговым уровнем).

Регистрируемый в шкале времени пункта 2 (ШВ2) приёмной аппаратурой пункта 2 (п. 2) момент приёма импульса, излучённого в ВОЛС с пункта 1 (п. 1):

$$T_{\text{пр}2} = T_{\text{изл}1} + \Delta T_{\text{шв}} + L(t^0) \cdot \frac{n_{gr}(\lambda_{1ц}, t^0)}{c} + L(t^0) \cdot K_{\text{хд}}(S_1(\lambda), \tau_{\text{имп}1}, P_{01}) + \tau_{\text{осл}}(P_{01}, \alpha(\lambda), L(t^0)) + K_{\text{пмд}} \cdot \sqrt{L(t^0)} + \tau_{\text{апп}2}(t^0), \quad (4)$$

где $T_{\text{изл}1}$ — момент излучения импульса с п. 1, зарегистрированный в шкале времени ШВ1; $\Delta T_{\text{шв}}$ — расхождение шкалы времени ШВ1 эталона п. 1 и шкалы времени ШВ2 п. 2; $L(t^0)$ — длина оптического волокна, зависящая от температуры t^0 ; $n_{gr}(\lambda_{1ц}, t^0)$ — групповой показатель преломления [17] оптического волокна для излучения лазера 1 с центральной длиной волны $\lambda_{1ц}$ при температуре оптического волокна t^0 , характеризующий скорость движения огибающей импульса; c — скорость света в вакууме; $K_{\text{хд}}$ — коэффициент, характеризующий «расплывание» импульса лазера 1, обусловленное хроматической дисперсией в оптическом волокне, которое зависит от спектральной характеристики излучения $S_1(\lambda)$, длительности импульса $\tau_{\text{имп}1}$, мощности импульсов P_{01} ; $\tau_{\text{осл}}$ — задержка момента регистрации оптического импульса фотоприёмником вследствие смещения момента достижения оптической мощностью порогового значения, возникающего из-за ослабления импульса в оптическом волокне с удельным ослаблением $\alpha(\lambda)$; $K_{\text{пмд}}$ — удельный коэффициент поляризационной модовой дисперсии оптического волокна [18]; $\tau_{\text{апп}2}(t^0)$ — задержка сигнала в приёмных трактах аппаратуры п. 2, зависящая от температуры.

Регистрируемый в ШВ1 приёмной аппаратурой п. 1 момент приёма импульса, излучённого в ВОЛС с п. 2 в момент $T_{\text{изл}2}$ в ШВ2:

$$T_{\text{пр}1} = T_{\text{изл}2} - \Delta T_{\text{шв}} + L(t^0) \cdot \frac{n_{gr}(\lambda_{2ц}, t^0)}{c} + L(t^0) \cdot K_{\text{хд}}(S_2(\lambda), \tau_{\text{имп}2}, P_{02}) + \tau_{\text{осл}}(P_{02}, \alpha(\lambda), L(t^0)) + K_{\text{пмд}} \cdot \sqrt{L(t^0)} + \tau_{\text{апп}1}(t^0), \quad (5)$$

где $\lambda_{2ц}$ — центральная длина волны лазера 2; $S_2(\lambda)$ — спектральная характеристика излучения лазера 2; $\tau_{\text{апп}1}(t^0)$ — задержка сигнала в приёмных трактах аппаратуры п. 1, зависящая от температуры.

Из выражений (4) и (5) следует, что на результат регистрации моментов приёма импульсов влияют дисперсионные свойства оптического волокна, центральные длины волн и спектральные характеристики лазерного излучения, задержки сигнала в приёмных трактах аппаратуры. Перечисленные

факторы вносят дополнительные составляющие погрешности в результат регистрации моментов приёма импульсов. Для оценки границ составляющих погрешности, вносимых оптическим волокном, рассмотрим их подробнее.

3. Оценка влияния хроматической дисперсии на длительность оптических импульсов

Проведём расчётную оценку влияния хроматической дисперсии (ХД) на длительность оптических импульсов систем сравнения и синхронизации шкал времени, использующих объектовые ВОЛС.

Увеличение длительности оптического импульса $\tau_{\text{ХД}}$, вызванное влиянием ХД оптического волокна, определяется выражением [19]:

$$\tau_{\text{ХД}} = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L, \quad (6)$$

где $D(\lambda)$ — дисперсионный параметр оптического волокна, характеризующий уширение оптического импульса от лазера с центральной длиной волны λ ; $\Delta\lambda$ — ширина спектра излучения лазера по уровню 0,5; L — длина оптического волокна.

Для одномодового оптического волокна со ступенчатым профилем показателя преломления, соответствующего Рекомендации Международного союза электросвязи ИТУ-Т G.652, эмпирическая зависимость задержки распространения сигнала от длины волны $\tau(\lambda)$, известная как формула Селмейера [17], имеет вид:

$$\tau(\lambda) = A + B \cdot \lambda^2 + C \cdot \lambda^{-2}, \quad (7)$$

где коэффициенты A , B и C определяются эмпирически путём аппроксимации экспериментально полученных данных о задержках распространения сигнала на разных длинах волн.

Коэффициент удельной хроматической дисперсии (дисперсионный параметр) $D(\lambda)$ с учётом формулы Селмейера можно записать в виде [19]:

$$D(\lambda) = \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = 2B \cdot \lambda - 2C \cdot \lambda^{-3}. \quad (8)$$

Для оптических волокон, соответствующих рекомендации ИТУ-Т G.652, в окрестности длины волны 1310 нм находится значение длины волны λ_0 , при котором функция $D(\lambda)$ меняет знак. Значение λ_0 называют длиной волны

нулевой дисперсии [17] ($D(\lambda_0) = 0$), а значение производной $\left. \frac{\partial D}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} = S_0$ —

наклоном кривой $D(\lambda)$ в точке, соответствующей длине волны нулевой дисперсии [17].

С учётом выражения (8) следует, что для длины волны нулевой дисперсии λ_0 :

$$2B \cdot \lambda_0 - 2C \cdot \lambda_0^{-3} = 0; \quad (9)$$

$$S_0 = \left. \frac{\partial D}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} = 2B + 6C \cdot \lambda_0^{-4}. \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) следует, что $\lambda_0 = (C/B)^{1/4}$, а $S_0 = 8B$. Тогда, выразив коэффициенты B и C через λ_0 и S_0 , получим выражение для дисперсионного параметра $D(\lambda)$ на длине волны λ :

$$D(\lambda) = \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \cdot \frac{S_0}{4}. \quad (11)$$

С учётом (11) выражение (7) примет вид:

$$\tau_{\text{ХД}} = \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \cdot \frac{S_0}{4} \cdot \Delta\lambda \cdot L. \quad (12)$$

Как следует из выражения (12), при условии равенства центральной длины волны лазера и длины волны нулевой дисперсии ($\lambda = \lambda_0$) изменение длительности оптического импульса обращается в нуль.

Результаты расчётов, проведённых по выражению (12), показали, что для лазеров с шириной спектра $\Delta\lambda$ не более 0,1 нм (лазеры с брэгговскими зеркалами, лазеры с распределённой обратной связью) влияние ХД на форму импульсов при длине ВОЛС до 30 км пренебрежимо мало. Для лазеров с шириной спектра около 1 нм на изменение длительности импульсов существенно влияет разность λ_p центральной длины волны лазера и длины волны нулевой дисперсии волокна, а увеличение длительности импульса таких лазеров может составить до десятков пикосекунд в ВОЛС длиной 30 км. Импульсы от лазеров с шириной спектра 5–9 нм (лазеров Фабри — Перо) ещё больше подвержены влиянию хроматической дисперсии, и их применение в системах сравнений шкал времени по ВОЛС длиной более километра нецелесообразно. Таким образом, в системах сравнений шкал времени по ВОЛС для задач гравиметрии следует использовать лазеры с шириной спектра $\Delta\lambda$ не более 0,1 нм (например, лазеры с брэгговскими зеркалами, лазеры с распределённой обратной связью), что позволяет уменьшить погрешность, обусловленную влиянием ХД на уширение лазерных импульсов.

4. Оценка влияния хроматической дисперсии на разность задержек распространения импульсов по оптическому волокну

Ещё одной составляющей погрешности систем сравнений шкал времени, использующих встречное излучение оптических импульсов, является погрешность, обусловленная разностью задержек распространения по оптическому волокну импульсов от двух лазеров системы сравнений ШВ, возникающей из-за различия спектров излучения лазеров (главным образом центральных длин волн) и влияния ХД оптического волокна.

Для оценки разности задержек распространения оптических импульсов по волокну от центральной длины волны излучения лазеров λ рассчитаем значения показателя преломления $n(\lambda)$ для различных типов оптических волокон, используя эмпирическую формулу Селмейера [17]:

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2}, \quad (13)$$

где A_i и l_i — коэффициенты ряда Селмейера, определяемые экспериментально для различных типов волокон.

Значения коэффициентов ряда Селмейера зависят от химического состава стёкол, используемых при изготовлении оптического волокна. Наличие тех или иных легирующих добавок позволяет увеличить или уменьшить показатель преломления по сравнению с плавленым кварцем. Большинство используемых в настоящее время в ВОЛС оптических волокон легированы германием с различной концентрацией, но иногда используются и другие элементы [21]. Используя значения коэффициентов ряда Селмейера для различных оптических волокон, приведённые в таблице 1 [21], вычислим значения разности задержек распространения сигнала в оптическом волокне длиной 100 км при различии центральных длин волн лазеров $\Delta\lambda$, составляющем 10, 20 и 50 пм. Эти значения разности длин волн соответствуют предельно допускаемым погрешностям измерений длин волн большинства анализаторов оптического спектра и характеризуют возможную точность контроля спектральных характеристик лазеров с помощью серийных средств измерений параметров ВОЛС.

Таблица 1

Значения коэффициентов ряда Селмейера для оптических волокон с различными легирующими добавками

Состав стекла	A_1	A_2	A_3	l_1	l_2	l_3
13,5% GeO ₂ 86,5% SiO ₂	0,73454395	0,42710828	0,82103399	0,08697693	0,11195191	10,84654
3,1% GeO ₂ 96,9% SiO ₂	0,7028554	0,4146307	0,897454	0,0727723	0,1143085	9,896161
13,5% Be ₂ O ₃ 86,5% SiO ₂	0,70724622	0,39412616	0,63301929	0,080478054	0,10925792	7,8908063
2,2% GeO ₂ 3,3% B ₂ O ₃ 94,5% SiO ₂	0,699339	0,4111269	0,9035275	0,0617482	0,1242404	9,896158

Разность задержек распространения сигналов Δt_p от двух лазеров с центральными длинами волн λ_1 и λ_2 рассчитаем по формуле:

$$\Delta t_p = \frac{L}{c} \cdot (n(\lambda_1) - n(\lambda_2)). \quad (14)$$

Результаты расчёта разности задержек по формуле (14) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчёта разности задержек распространения сигнала
в оптическом волокне длиной 100 км при разности
центральных длин волн лазеров $\Delta\lambda$

Состав стекла	Номинальное значение длины волны, мкм	Разность задержек распространения сигнала (пс) при разности центральных длин волн лазеров $\Delta\lambda$		
		$\Delta\lambda = 10$ пм	$\Delta\lambda = 20$ пм	$\Delta\lambda = 50$ пм
13,5 % GeO ₂ 86,5 % SiO ₂	1,545	32,3	64,6	161,6
	1,550	32,3	64,7	161,7
	1,555	32,4	64,8	161,9
	1,305	32,6	65,1	162,8
	1,310	32,5	65,0	162,6
	1,315	32,5	65,0	162,4
3,1 % GeO ₂ 96,9 % SiO ₂	1,545	40,0	79,9	199,9
	1,550	40,0	80,1	200,2
	1,555	40,1	80,2	200,5
	1,305	38,0	76,0	190,0
	1,310	38,0	76,0	190,0
13,5 % Be ₂ O ₃ 86,5 % SiO ₂	1,545	45,1	90,2	225,6
	1,550	45,2	90,4	226,1
	1,555	45,3	90,6	226,5
	1,305	42,1	84,2	210,4
	1,310	42,1	84,2	210,6
2,2 % GeO ₂ 3,3 % B ₂ O ₃ 94,5 % SiO ₂	1,545	40,2	80,4	201,0
	1,550	40,3	80,5	201,4
	1,555	40,3	80,7	201,7
	1,305	38,1	76,3	190,7
	1,310	38,2	76,3	190,8
	1,315	38,2	76,3	190,8

Результаты расчётов разностей задержек распространения сигнала Δt_p для лазеров с центральными длинами волн около 1550 нм по формуле (14) приведены на диаграммах, представленных на рис. 3.

Номер столбца на диаграммах соответствует оптическому волокну, имеющему следующий химический состав: 1) 13,5% GeO₂ и 86,5% SiO₂; 2) 3,1% GeO₂ и 96,9% SiO₂; 3) 13,5% Be₂O₃ и 86,5% SiO₂; 4) 2,2% GeO₂, 3,3% B₂O₃ и 94,5% SiO₂.

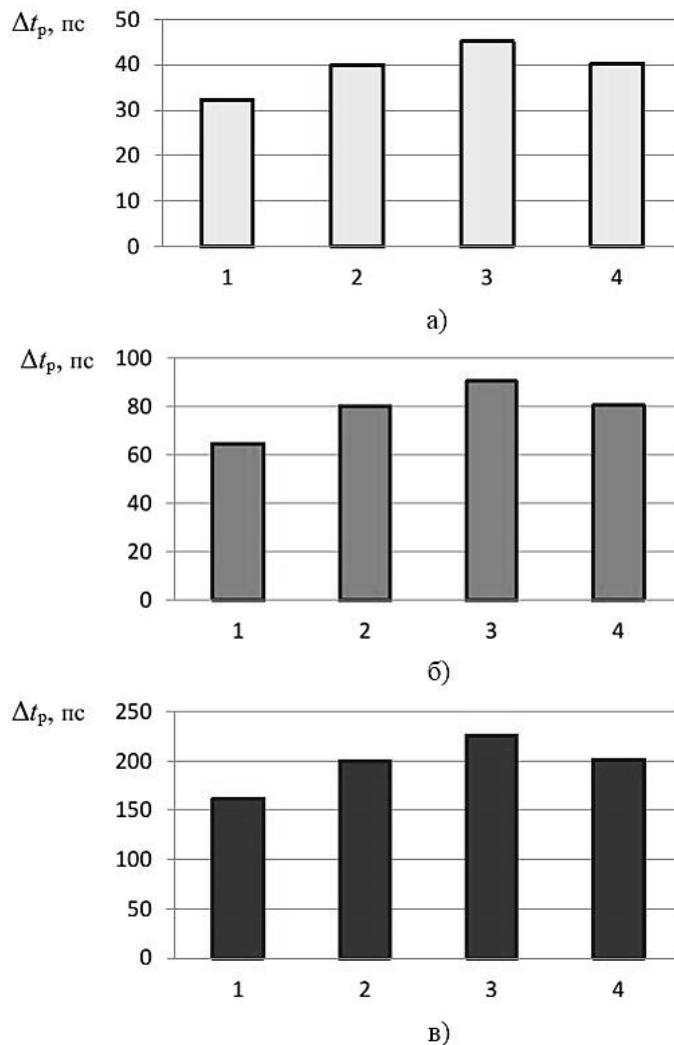


Рис. 3. Результаты расчётов разностей задержек распространения сигнала Δt_p при различии центральных длин волн лазеров $\Delta\lambda$: а — $\Delta\lambda = 10 \text{ пм}$; б — $\Delta\lambda = 20 \text{ пм}$; в — $\Delta\lambda = 50 \text{ пм}$

Из полученных результатов, приведённых в таблице 2 и на рис. 3, следует, что для волокна длиной 100 км разность задержек распространения сигналов от двух лазеров при различии их центральных длин волн на 10 и 20 пм составляет от 30 до 90 пс, а при разности длин волн 50 пм составляет 150–200 пс и более. Эти значения не только соизмеримы с предельно допускаемой погрешностью систем сравнений шкал времени, но и в некоторых случаях превышают её, что приводит к необходимости учёта разности задержек сигналов при разработке и эксплуатации систем.

Влияние поляризационной модовой дисперсии (ПМД) на оптические импульсы, передаваемые по ВОЛС большой протяжённости, практически неизбежно, однако степень этого влияния существенно ниже, чем влияние ХД (увеличение длительности импульсов из-за ПМД для современных телекоммуникационных волокон составляет примерно 10–15 пс на 100 км), и для его учёта следует использовать поправку к показаниям аппаратуры систем сравнений шкал времени, которую можно определить экспериментально для используемой системой линии с погрешностью единицы пикосекунд.

5. Сравнительная оценка влияния различных факторов на точность сравнений шкал времени с использованием ВОЛС

Проведённый анализ факторов, влияющих на процесс сравнений шкал времени удалённых СЧВ по ВОЛС, показал, что основными источниками систематических погрешностей сравнений шкал времени являются: погрешности, вносимые аппаратурой систем сравнений шкал времени (погрешности используемых измерителей временных интервалов (ИВИ), погрешности определения задержек сигналов в аппаратуре, температурный дрейф задержек сигналов), а также погрешности, вносимые линией связи (обусловленные влиянием ВОЛС на передаваемые сигналы систем сравнений шкал времени и вызывающие невзаимность путей распространения оптического сигнала в противоположных направлениях). Ко второй группе погрешностей относятся: погрешность учёта влияния хроматической дисперсии на время распространения импульсов по ВОЛС, погрешности учёта влияния хроматической и поляризационной модовой дисперсии на форму оптических импульсов.

Основными источниками случайных погрешностей сравнений шкал времени по ВОЛС являются: шумы в приёмной аппаратуре, спектральные шумы лазера, шумы и помехи, воздействующие на оптический кабель и другие элементы ВОЛС.

Классификация составляющих погрешности сравнений шкал времени по ВОЛС приведена на рис. 4.

Оценка относительного вклада перечисленных составляющих погрешности в результирующую погрешность сравнений шкал времени удалённых СЧВ по ВОЛС проведена с использованием математической модели границ погрешности систем сравнений шкал времени [22]. Результаты оценки относительного вклада составляющих погрешности сравнений шкал времени удалённых СЧВ при использовании ВОЛС малой протяжённости (до 30 км) и средней протяжённости (до 100 км) приведены на рис. 5.



Рис. 4. Классификация составляющих погрешности сравнений шкал времени, выполняемых с использованием ВОЛС

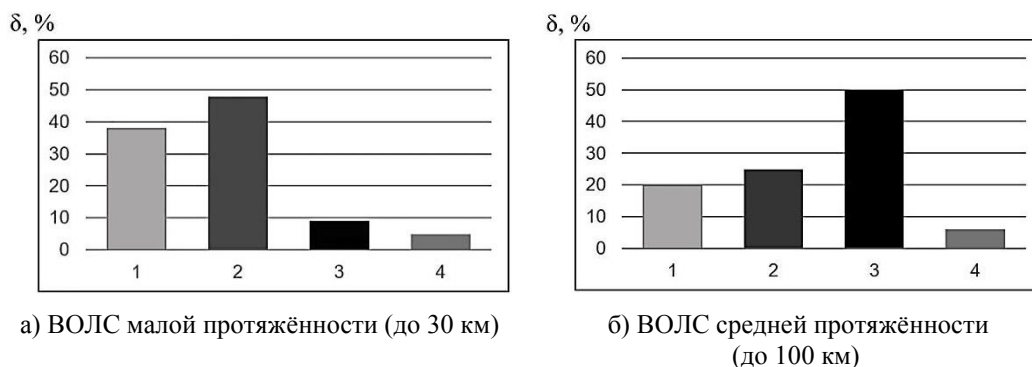


Рис. 5. Относительный вклад δ , %: 1 — погрешность учёта задержек сигнала в оптических элементах и электронных приёмных трактах аппаратуры (погрешность определения аппаратурной поправки); 2 — погрешности измерителей временных интервалов (ИВИ), регистрирующих моменты приёма импульсов; 3 — погрешность, вносимая ВОЛС, обусловленная влиянием хроматической дисперсии (ХД) на временные параметры оптических импульсов и задержку их распространения по ВОЛС; 4 — суммарный вклад остальных погрешностей

Из рис. 4 следует, что основными составляющими погрешности сравнений ШВ системами, использующими ВОЛС, являются:

- при использовании ВОЛС малой протяжённости: погрешность определения аппаратурной поправки и погрешности ИВИ;

- при использовании ВОЛС средней протяжённости: погрешность определения аппаратурной поправки, погрешности ИВИ и погрешность, обусловленная влиянием ХД.

6. Пути достижения требуемой точности систем сравнений шкал времени, использующих ВОЛС

В результате проведённого анализа факторов, влияющих на точность сравнений шкал времени по ВОЛС, и бюджета погрешностей сравнений шкал времени установлено, что для создания систем сравнений шкал времени, предназначенных для сличений удалённых СЧВ с погрешностью менее пикосекунды, необходимо:

- использовать в составе систем сравнений шкал времени аппаратуру для измерений интервалов времени с погрешностью около 0,1–0,3 пс и определять аппаратурные поправки при калибровке аппаратуры с таким же уровнем погрешности;
- выбирать для использования в составе систем сравнений шкал времени лазеры с длинами волн, максимально близкими к длине волны нулевой дисперсии оптического волокна, экспериментально определённой для ВОЛС, на которой развёртывается система (в случае, если протяжённость ВОЛС и её вносимое ослабление позволяют использовать лазеры с рабочей длиной волны около 1310 нм), а также учитывать увеличение длительности импульсов при регистрации момента их приёма на удалённом конце ВОЛС;
- учитывать разность задержек распространения оптических импульсов по ВОЛС, излучаемых двумя лазерами, установленными на разных концах ВОЛС, обусловленную различием спектральных характеристик этих лазеров, путём использования соответствующей поправки к результатам измерений аппаратуры системы сравнений шкал времени, обеспечивающей учёт разности задержек с погрешностью около 0,1–0,3 пс.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11023.

Литература

1. Фатеев В.Ф. Релятивистская метрология околоземного пространства-времени. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. 438 с.
2. Фатеев В.Ф., Щипунов А.Н. Направления развития эталонной базы гравиметрии // Измерительная техника. 2018. № 5. С. 5–9.
3. Lopez O., Amy-Klein A., Lours M., Chardonnet C., Santarelli G. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86-km urban optical link [Electronic resource]. URL: <https://arxiv.org/abs/0907.3500>. 2009.

4. Sliwczyński L., Krehlik P., Czubla A., Buczek L., Lipiński M. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km // *Metrologia*. IOP PUBLISHING, 2013. V. 50. No. 2. P. 133.
5. Piester D., Rost M., Fujieda M., Feldmann T., Bauch A. Remote atomic clock synchronization via satellites and optical fibers // *Advances in Radio Science*. V. 9. 2011. P. 1–7.
6. Hedekvist P.O., Ebenhag S.C. Time and Frequency Transfer in Optical Fibers // *Recent Progress in Optical Fiber Research*. P. 371–386.
7. Иванов А.А., Моховиков Н.В., Каган С.Н., Малимон А.Н., Пестерев С.В., Пальчиков В.Г., Гальшев А.А. Сличения территориально удалённых эталонов времени и частоты с применением волоконно-оптических линий связи // *Труды ИПА РАН*. 2012. С. 131–135.
8. Федорова Д.М., Балаев Р.И., Курчанов А.Ф., Троян В.И., Малимон А.Н. Передача эталонных частот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений // *Измерительная техника*. 2015. № 9. С. 34–37.
9. Гальшев А.А., Каган С.Н., Малимон А.Н., Пальчиков В.Г., Шibaева Д.М. Передача эталонных радиочастот по волоконной линии с оптоэлектронной компенсацией вносимых линией возмущений / *Материалы 6-го международного симпозиума «Метрология времени и пространства»*. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2012. 17–19 сентября. С. 88.
10. Балаев Р.И., Малимон А.Н., Федорова Д.М., Курчанов А.Ф., Троян В.И. Оценка точности передачи эталонного сигнала водородного генератора по волоконно-оптической линии связи с электронной компенсацией возмущений // *Измерительная техника*. 2017. № 8. С. 38–42.
11. Балаев Р.И., Федорова Д.М., Малимон А.Н., Курчанов А.Ф., Бакулинская В.В. Методы передачи эталонных сигналов частоты и времени по волоконно-оптическим линиям с компенсацией возмущений, вносимых линией // *Мир измерений*. 2018. № 1.
12. Малимон А.Н. Передача эталонных сигналов времени и частоты по волоконно-оптическим линиям // *Альманах современной технологии*. 2016. № 8. С. 198–268.
13. Колмогоров О.В. и др. Система встречных сравнений шкал времени // *Альманах современной метрологии*. 2017. № 9. С. 110–116.
14. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // *Измерительная техника*. 2015. № 1. С. 14–17.
15. Колмогоров О.В. и др. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени по ВОЛС с использованием эхо-генератора / *Материалы IX Международного симпозиума «Метрология времени и пространства»*. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. С. 97–101.

16. Bepalko V., Boole E., Buraks I., Vedin V., Vershin A., Spunde R. The Event Timer A033-ET family for SLR automation [Electronic resource] // ILRS Technical Workshop. 2017 October 2. 5. URL: https://www.edi.lv/wp-content/uploads/2019/11/A033ET-Family-2017_Riga.pdf.
17. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: пер. с англ. М.: Мир, 1996. 324 с.
18. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи: пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 512 с.
19. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2001. 267 с.
20. Ларин Ю.Т. Стекла для изготовления оптических волокон и кабелей // ИНФОРМОСТ. Радиоэлектроника и телекоммуникации. Вып. 19. С. 35–38.
21. Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. М.: Эко-Трендз, 2002. 284 с.
22. Колмогоров О.В. Математическая модель погрешности систем сравнения шкал времени, использующих волоконно-оптические линии связи // Датчики и системы. 2018. № 3 (223). С. 19–26.