



МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОСТИ ЗАДЕРЖЕК РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ВОЛОКНУ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМ СРАВНЕНИЙ И СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛ ВРЕМЕНИ

О. В. Колмогоров, к. т. н.; kolmogorov@vniiftri.ru
А. Н. Щипунов, д. т. н.;
Д. В. Прохоров; С. С. Донченко, к. т. н.; С. Г. Бувев
Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП "ВНИИФТРИ"), Московская обл., Солнечногорский район, пос. Менделеево

Рассмотрено влияние свойств оптического волокна на временные задержки распространения сигналов систем сравнений и синхронизации шкал времени, использующих волоконно-оптические линии связи. Предложен метод экспериментального определения разности задержек распространения сигналов от двух лазеров из состава систем синхронизации и сравнений шкал времени. Метод позволяет вычислить значения поправки к показаниям аппаратуры систем для учета влияния хроматической дисперсии. Приведены результаты экспериментальной апробации предложенного метода

ВВЕДЕНИЕ

Сравнение и синхронизация шкал времени (ШВ) пространственно удаленных эталонов единиц времени и частоты необходимы при обеспечении потребностей страны в сигналах точного времени и эталонной частоты, в частности, для функционирования глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, систем связи и передачи информации, при проведении научных исследований и решения ряда других задач [1, 2]. В метрологической практике сравнение ШВ удаленных эталонов осуществляется при проведении сличений эталонов различных метрологических лабораторий с целью их взаимного контроля для поддержания заданных точностных характеристик [3, 4]. Современные требования к точности сравнений ШВ удаленных эталонов предусматривают погрешность определения расхождения ШВ не более 100–200 пс при расстоянии между эталонами до 100 км. В ряде

METHOD FOR DETERMINING THE DIFFERENCE OF DELAYS OF LASER RADIATION PULSE PROPAGATION THROUGH OPTICAL FIBER IN THE TIME SCALE COMPARISON AND SYNCHRONIZATION SYSTEMS

O.V. Kolmogorov, Candidate of Technical Sciences; kolmogorov@vniiftri.ru
A.N. Shchipunov, Doctor of Technical Sciences;
D.V. Prokhorov;
S.S. Donchenko, Candidate of Technical Sciences;
S.G. Buyev
Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (FSUE "VNIIFTRI"), Russia, Moscow region, Solnechnogorsky district, working settlement Mendeleevo

The influence of the properties of optical fiber on the propagation delays of signals transmitted by time scales comparison and synchronization systems (TSCSS) using fiber-optical communication lines is considered. The method of experimental define of difference propagation delay of signal from two lasers of TSCSS is proposed. The method can be used to define the corrections to measurement results of TSCSS devices for decrease of influence of chromatic dispersion. The results of experimental approbation of the proposed method are presented.

INTRODUCTION

Time scale (TS) comparison and synchronization of spatially distant references of units of time and frequency are necessary to meet the country's needs for accurate time and reference frequency signals, in particular, for the operation of the global navigation satellite system GLONASS, communication systems and information transmission, during scientific research and solving a number of other problems [1, 2]. In metrological practice, the comparison of TS of remote standards is carried out during the comparison of standards of various metrological laboratories with the aim of their mutual control in order to maintain specified accuracy characteristics [3, 4]. Modern



работ, например [5-7], показано, что обеспечить такой уровень точности при расстояниях между эталонами до сотен километров можно только с помощью систем сравнений и синхронизации ШВ, использующих волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) для передачи сигналов между пунктами размещения эталонов.

Системы сравнений и синхронизации ШВ с дальностью действия до 100 км включают в свой состав лазерные передатчики, размещаемые на противоположных концах ВОЛС [8, 9]. При функционировании систем по ВОЛС в противоположных направлениях передаются сигналы (оптические импульсы), моменты излучения и приема которых фиксируются регистрирующей аппаратурой систем, а затем путем обработки полученных данных определяется расхождение шкал времени эталонов, размещенных в удаленных пунктах. Методы расчета расхождения ШВ построены на предположении, что задержки распространения сигналов по ВОЛС в прямом и обратном направлении равны, либо с высокой точностью (с погрешностью около 10–20 пс) известна их разность, которая учитывается в качестве поправки к показаниям аппаратуры систем.

Разность задержек распространения по ВОЛС сигналов от двух лазерных передатчиков возникает по причине неидентичности спектральных характеристик лазеров (главным образом различия центральных длин волн излучения) и влияния хроматической дисперсии оптического волокна (ОВ).

Для оценки разности задержек распространения оптического излучения с различными длинами волн в типовых ОВ длиной 100 км проведен расчет значений показателя преломления ОВ для заданных длин волн с использованием формулы Sellmeyer и коэффициентов ряда Sellmeyer [10, 11] и расчет соответствующих значений задержки. Результаты расчета показали, что разность значений 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 и синхронизации шкал времени, но и в некоторых случаях превышают ее. Поэтому учет разности задержек распространения сигналов по оптическому волокну необходим для достижения требуемой точности сравнений и синхронизации шкал времени.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОСТИ ЗАДЕРЖЕК РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

При проведении расчетов значения разности длин волн лазеров выбраны в соответствии с уровнем

requirements for the accuracy of comparisons of TS of remote standards provide for an error in determining the divergence of TS of no more than 100–200 ps when the distance between the references is up to 100 km. In a number of works, for example, [5–7], it was shown that providing such a level of accuracy with distances between references up to hundreds of kilometers is possible only with the help of comparison systems and synchronization of Wi-Fi using fiber optic communication lines (FOCL) to transmit signals between points of reference location.

The systems of TS comparisons and synchronization with a range of up to 100 km include laser transmitters placed at opposite ends of FOCLs [8, 9]. When systems operate on FOCLs in opposite directions, signals (optical pulses) are transmitted, the moments of radiation and reception of which are recorded by the recording equipment of the systems, and then by processing the received data, the time scales of the references located at remote locations are determined. Methods for calculating the divergence of the TS assume that the propagation delays of signals through the FOCLs in the forward and reverse directions are equal, or their accuracy is known with high accuracy (with an error of about 10–20 ps), which is taken into account as an amendment to the readings of the systems' equipment.

The difference in propagation delays in fiber-optic signals from two laser transmitters arises due to the non-identity of the spectral characteristics of lasers (mainly differences in the central wavelengths of radiation) and the effect of chromatic dispersion of an optical fiber (OF).

To estimate the difference between the propagation delays of optical radiation with different wavelengths in typical OFs with a length of 100 km, the values of the refractive index of OFs for specified wavelengths were calculated using the Sellmeyer formula and the coefficients of the Sellmeyer series [10, 11] and the corresponding delay values were calculated. The calculation results showed that the difference between the propagation delays of signals from two lasers with a difference of their central wavelengths of 10 and 20 pm is from 30 to 90 ps, and with a difference of wavelengths of 50 pm – 150–200 ps or more. These values are not only commensurate with the maximum permissible error of the systems of time scales comparison and synchronization, but in some cases exceed it. Therefore, considering the difference in the propagation delay of signals through an optical fiber is necessary to achieve the required accuracy of comparisons and synchronization of time scales.



погрешности большинства существующих анализаторов оптического спектра, которые можно использовать в качестве средств контроля для систем сравнений и синхронизации ШВ. Результаты проведенных расчетов показывают, что определение разности задержек сигналов в ВОЛС косвенным методом (по результатам измерений длин волн анализатором оптического спектра и данных о хроматической дисперсии ОВ) не обеспечит требуемой точности, необходимой для определения поправок к показаниям систем сравнений и синхронизации ШВ.

С другой стороны, использование в составе систем сравнений и синхронизации ШВ лазеров с аппаратурой высокоточной настройки и стабилизации длин волн излучения приведет к существенному удорожанию систем (в 2-3 раза и более) и дополнительным ограничениям по условиям эксплуатации аппаратуры (термостабилизация, виброизоляция и т.д.). Подобные ограничения, накладываемые на применение таких систем, привели нас к идее использовать иную схему измерений разности задержек распространения сигналов по оптическому волокну.

Из изложенного следует, что предпочтительным путем определения разности задержек распространения по ВОЛС сигналов системы сравнений и синхронизации ШВ являются экспериментальные исследования процесса распространения оптических импульсов лазеров из состава системы по ВОЛС, на которой разветвляется система.

В основе предлагаемого нами метода определения разности задержек распространения оптических импульсов в ВОЛС и временных параметров импульсов лежит следующая процедура действий. Сначала с помощью цифрового запоминающего осциллографа с фотоприемным устройством регистрируем пару импульсов от двух лазеров из состава системы на входе ВОЛС, затем идет регистрация этой же пары импульсов на выходе ВОЛС.

Разность интервалов времени между центрами двух импульсов на входе и выходе ВОЛС, соответствующая разности задержек распространения импульсов по ВОЛС, определяется путем последующей математической обработки зарегистрированных данных.

Вид осциллограмм импульсов на входе и выходе ВОЛС представлен на рис. 1, где $u(t)$ – сигнал на выходе фотоприемного устройства, Δt_p – разность задержек распространения импульсов по ВОЛС. Для проведения экспериментальных исследований предлагается схема, представленная на рис. 2.

Процедуру измерений предлагаем проводить в следующем порядке. Разместить на входе ВОЛС аппаратуру из состава системы сравнений шкал времени (генератор импульсов ГИ и лазерные модули Л1 и Л2),

METHOD FOR DETERMINING THE DIFFERENCE OF DELAYS FOR THE OPTICAL PULSES PROPAGATION

In the calculations, the values of the difference in wavelengths of lasers were chosen in accordance with the level of error of most existing optical spectrum analyzers, which can be used as control means for the TS comparison and synchronization systems. The results of the calculations show that determining the difference in signal delays in the FOCLs by an indirect method (according to the measurement of wavelengths with an optical spectrum analyzer and data on chromatic dispersion of optical substances) will not provide the required accuracy required to determine corrections to the readings of the comparison and synchronization systems.

On the other hand, the use of lasers with high-precision tuning and stabilization of radiation wavelengths equipment as a part of TS comparison and synchronization systems will lead to a significant increase in the cost of systems (2-3 times or more) and additional restrictions on the operating conditions of the equipment (thermal stabilization, vibration insulation, etc.). Similar restrictions imposed on the use of such systems led us to the idea of using a different scheme for measuring the difference in the propagation delays of signals through an optical fiber.

It follows from the above that the preferred way to determine the difference in the propagation delays through the FOCLs of the system of TS comparison and synchronization are experimental studies of the propagation of laser optical pulses through the FOCLs on which the system is being deployed.

The basis of our proposed method is of the difference in the propagation delays of optical pulses in FOCL and time parameters of pulses is the following procedure of actions. First, using a digital storage oscilloscope with a photodetector, we register a pair of pulses from two lasers from the system at the FOCL input, then the same pair of pulses is recorded at the FOCL output.

The difference in time intervals between the centers of two pulses at the FOCL input and output, corresponding to the difference in the propagation delays of pulses along fiber optic links, is determined by the subsequent mathematical processing of the recorded data.

A waveform view of the pulses at the FOCL input and output is shown in Fig. 1, where $u(t)$ is the signal at the output of the photoreceiver, Δt_p is the difference of the propagation delays of the pulses through the FOCL. A scheme proposed for the experimental studies is presented in Figure 2.

оптическую линию задержки ОЛЗ (оптическое волокно длиной несколько метров, необходимое для внесения начальной задержки между импульсами), оптоволоконный объединитель О и цифровой запоминающий осциллограф ЦЗО с фотоприемным устройством ФПУ. Затем, подавая от генератора запускающие электрические импульсы на два лазерных модуля, зарегистрировать с помощью осциллографа осциллограмму пары оптических импульсов от двух лазеров на выходе объединителя (осциллограмму импульсов до входа в ВОЛС). Далее подключить выход объединителя к входу ВОЛС и зарегистрировать осциллограмму пары оптических импульсов от двух лазеров на выходе ВОЛС. Полученные осциллограммы следует сохранить в виде файлов с цифровыми данными для последующей математической обработки.

Осциллограммы, зарегистрированные цифровым осциллографом, представляют собой последовательность дискретных по времени и уровню отсчетов. Эта последовательность определяется формой входных импульсов, но на нее также влияют шумы ФПУ и осциллографа, частота дискретизации осциллографа. Поэтому при обработке осциллограмм для определения разности задержек распространения импульсов необходимо провести аппроксимацию экспериментальных данных – найти функциональную зависимость, описывающую форму каждого импульса. Известно, что оптический импульс гауссовской формы (типичной для импульсных лазеров систем сравнений шкал времени, не использующих солитоны) при распространении в ОВ расширяется из-за влияния дисперсии, однако его форма приблизительно остается гауссовской [10]. Это позволяет выбрать функцию Гаусса в качестве аппроксимирующей для формы импульса.

Для определения параметров аппроксимирующей функции широко используется метод наименьших квадратов, однако для функций сложной формы (в т.ч. гауссовской) его прямое применение затруднительно и ведет к неприемлемым затратам времени при обработке результатов эксперимента. В таких случаях целесообразно применять итерационные методы, использующие последовательное уточнение значений коэффициентов аппроксимирующей функции путем вычисления поправок к приближенным значениям этих коэффициентов. В частности, известно применение итерационного метода для аппроксимации гауссовской функцией пиков спектра отражения волоконно-оптических брэгговских датчиков [12].

Такой итерационный метод можно применить и для аппроксимации формы оптического импульса по цифровым отсчетам зарегистрированной осциллограммы. При этом в качестве функциональной

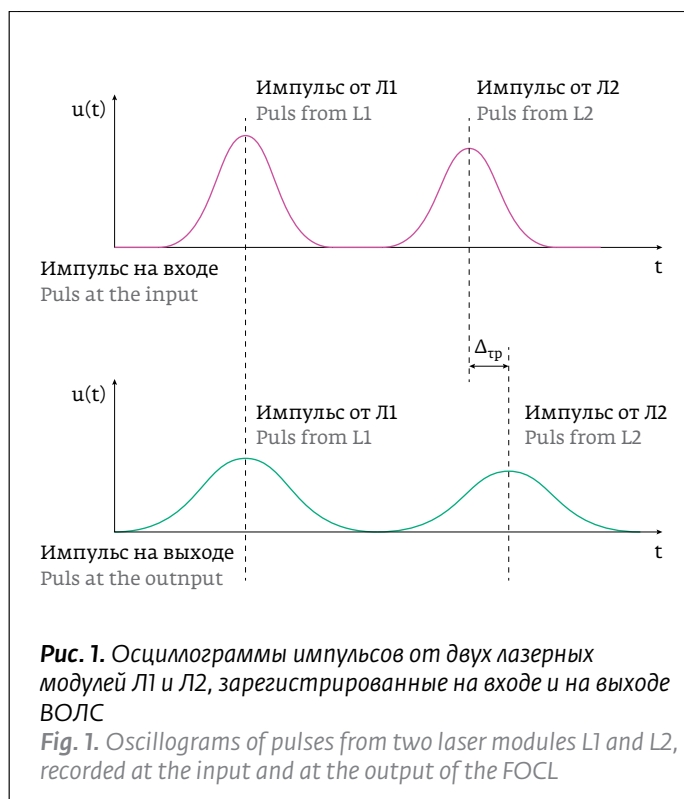


Рис. 1. Осциллограммы импульсов от двух лазерных модулей Л1 и Л2, зарегистрированные на входе и на выходе ВОЛС

Fig. 1. Oscillograms of pulses from two laser modules L1 and L2, recorded at the input and at the output of the FOCL

The measurement procedure is proposed to be carried out in the following order. The equipment from the system of time scale comparison (pulse generator GI and laser modules L1 and L2), optical delay line ODL (optical fiber several meters long, necessary for introducing initial delay between pulses), fiber optic combiner O and digital storage oscilloscope DSO with photoreceiver PR are placed at the FOCL input. Then, applying electric pulses to the two laser modules from the generator, register with the oscilloscope an oscillogram of a pair of optical pulses from two lasers at the output of the combiner (oscillogram of the pulses before the FOCL input). Next, connect the output of the combiner to the FOCL input and register the oscillogram of a pair of optical pulses from two lasers at the FOCL output. The received oscillograms should be stored as files with digital data for subsequent mathematical processing.

The oscillograms recorded by the digital oscilloscope are a sequence of discrete in time and level of readings. This sequence is determined by the shape of the input pulses, but it is also influenced by the noise of the PR and the oscilloscope, the sampling frequency of the oscilloscope. Therefore, when processing waveforms to determine the difference in the propagation delays of pulses, it is necessary to approximate the experimental data –

зависимости будет рассматриваться зависимость напряжения от времени $u(t)$, характеризующая мгновенную оптическую мощность в импульсе. В этом случае аппроксимирующая функция будет иметь вид:

$$u(t, t_m, \sigma) = k_a \cdot \Phi(t, t_m, \sigma) = k_a \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t-t_m}{\sigma}\right)^2\right], \quad (1)$$

где k_a – амплитудный коэффициент; $\Phi(t, t_m, \sigma)$ – функция Гаусса; σ – параметр, характеризующий ширину импульса; t_m – момент времени, при котором функция достигает максимального значения.

Параметры аппроксимирующей функции k_a , t_m , σ определяются путем вычисления поправок к их начальным значениям методом наименьших квадратов. Начальные значения k_{a0} , t_{m0} , σ_0 можно выбрать следующим образом:

- в качестве t_{m0} принять момент времени, соответствующий максимальному значению $u(t)$;
- значение σ_0 рассчитать по формуле $\sigma_0 \approx 0,42 \cdot \Delta t_{0,5}$, где $\Delta t_{0,5}$ – длительность импульса по уровню 0,5 амплитуды U_{\max} ;
- значение k_{a0} рассчитать по формуле $k_{a0} = U_{\max} \cdot \sigma_0 \cdot (2\pi)^{1/2}$.

Поправки δ_{ka0} , δ_{tm0} , $\delta_{\sigma0}$ для уточнения начальных значений параметров функции k_a , t_m , σ определяются путем решения системы уравнений:

$$\begin{aligned} a_{11} \cdot \delta_{ka0} + a_{12} \cdot \delta_{tm0} + a_{13} \cdot \delta_{\sigma0} &= b_1, \\ a_{21} \cdot \delta_{ka0} + a_{22} \cdot \delta_{tm0} + a_{23} \cdot \delta_{\sigma0} &= b_2, \\ a_{31} \cdot \delta_{ka0} + a_{32} \cdot \delta_{tm0} + a_{33} \cdot \delta_{\sigma0} &= b_3. \end{aligned} \quad (2)$$

Для расчета коэффициентов a_{11} , a_{12} , ..., a_{33} , b_1 , b_2 , b_3 используются экспериментальные данные $u(t_i)$, значения функции $\Phi_i = \Phi(t_i, t_{m0}, \sigma_0)$, вычисленные в точках t_i ($i=1..N$, N – количество отсчетов) с использованием приближенных коэффициентов, а также значения частных производных этой функции в указанных точках:

$$A_i = \frac{\partial \Phi}{\partial t_m} \Big|_{t=t_i, t_m=t_{m0}, \sigma=\sigma_0} = \frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0^2} \cdot \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0}\right)^2\right], \quad (3)$$

$$B_i = \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \Big|_{t=t_i, t_m=t_{m0}, \sigma=\sigma_0} = \left(\frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0^3} - \frac{1}{\sigma_0}\right) \cdot \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0}\right)^2\right]. \quad (4)$$

Уточненные значения параметров функции k_{a1} , t_{m1} , σ_1 определяются по формулам:

$$k_{a1} = k_{a0} + \delta_{ka0}; \quad t_{m1} = t_{m0} + \delta_{tm0}; \quad \sigma_1 = \sigma_0 + \delta_{\sigma0}. \quad (5)$$

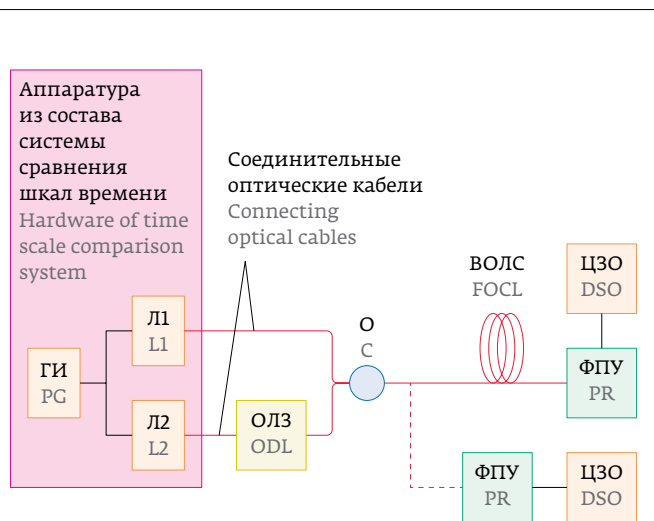


Рис. 2. Схема измерительной установки для исследований временных параметров передаваемых по ВОЛС импульсов систем сравнений и синхронизации ШВ (ГИ – генератор импульсов; Л1 и Л2 – лазерные модули из состава системы сравнений и синхронизации ШВ; ОЛЗ – оптическая линия задержки; О – оптоволоконный объединитель; ФПУ – фотоприемное устройство; ЦЗО – цифровой запоминающий осциллограф; ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи)

Fig. 2. Scheme of the measurement setup for studying the time parameters of the pulses transmitted by FOCL of the TS systems (PG – pulse generator; L1 and L2 – laser modules from the TS comparison and synchronization system; ODL – optical delay line; C – fiber-optic combiner; PR – photoreceiver; DSO – digital storage oscilloscope; FOCL – fiber-optic communication line)

find a functional relationship describing the shape of each pulse. It is known that the optical pulse of a Gaussian form (typical for pulsed lasers of time-comparison systems that do not use solitons) expands due to the influence of dispersion, but its shape approximately remains Gaussian [10]. This allows you to select the Gaussian function as an approximation for the pulse shape.

For determining the parameters of the approximating function, the least squares method is widely used, however, for functions of a complex shape (including Gaussian), its direct application is difficult and leads to unacceptable time costs in processing the experimental results. In such cases, it is advisable to use iterative methods that use a consistent refinement of the values of the coefficients of the approximating function by calculating corrections to the approximate values of these coefficients. In particular, the use of an iterative method to approximate the Gaussian



Далее в качестве приближенных значений коэффициентов аппроксимирующей функции принимаются k_{a1} , t_{m1} , σ_1 и цикл вычислений повторяется.

Изложенные операции проводятся для вычисления параметров каждого зарегистрированного импульса (двух импульсов на входе ВОЛС и двух импульсов на выходе ВОЛС). Разность задержек распространения импульсов по ВОЛС $\Delta_{тр}$ определяется из вычисленных параметров t_m четырех аппроксимирующих функций:

$$\Delta_{тр} = (t_{mII\ out} - t_{mI\ out}) - (t_{mII\ in} - t_{mI\ in}), \quad (6)$$

где $t_{mI\ in}$ и $t_{mI\ out}$ - параметры функции Гаусса для импульсов лазерного модуля Л1 на входе и выходе ВОЛС соответственно; $t_{mII\ in}$ и $t_{mII\ out}$ - параметры функции Гаусса для импульсов лазерного модуля Л2 на входе и выходе ВОЛС соответственно.

Учет вычисленного значения $\Delta_{тр}$ в качестве поправки к показаниям одного из измерителей временных интервалов, входящего в состав системы сравнений шкал времени, позволит исключить составляющую погрешности сравнений шкал времени, вызванную влиянием хроматической дисперсии оптического волокна.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Практическая апробация предложенного метода проведена с использованием катушки оптического волокна длиной 47,5 км. В ходе эксперимента зарегистрированы осциллограммы импульсов от двух лазерных модулей на входе и на выходе катушки оптического волокна. Для зарегистрированных данных проведена аппроксимация вышеизложенным итерационным методом, и по полученным функциональным зависимостям рассчитаны значения интервалов времени между импульсами на входе катушки волокна и на выходе из катушки. Интервал времени между импульсами на входе катушки волокна составил 52,325 нс, а на выходе катушки 52,635 нс. Разность этих интервалов времени, соответствующая разности задержек распространения импульсов от двух лазерных модулей, составила 0,310 нс. Для подтверждения полученных результатов проведены прямые измерения задержек распространения импульсов в этой катушке оптического волокна с помощью электронно-счетного частотомера. Разность полученных значений задержек составила 0,33 нс. Различия разностей задержек, определенных двумя методами, составило 0,02 нс.

function of the peaks of the reflection spectrum of fiber-optic Bragg sensors is known [12].

This iterative method can also be applied to approximate the shape of an optical pulse from digital samples of a registered waveform. In this case, as a functional dependence, the voltage will be considered as a function of time $u(t)$, which characterizes the instantaneous optical power in a pulse. In this case, the approximating function will be of the following form:

$$u(t, t_m, \sigma) = k_a \cdot \Phi(t, t_m, \sigma) = k_a \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t-t_m}{\sigma}\right)^2\right], \quad (1)$$

where k_a is the amplitude coefficient; $\Phi(t, t_m, \sigma)$ is the Gaussian function; σ is the parameter characterizing the pulse width; t_m is the time point at which the function reaches its maximum value.

The parameters of the approximating function k_a , t_m , σ are determined by calculating the corrections to their initial values using the least squares method. The initial values k_{a0} , t_{m0} , σ_0 can be chosen as follows:

- as t_{m0} , take the time corresponding to the maximum value $u(t)$;
- calculate σ_0 using the formula $\sigma_0 \approx 0.42 \cdot \Delta\tau_{0.5}$, where $\Delta\tau_{0.5}$ is the duration impulse level 0.5 amplitude U_{max} ;
- calculate the value of k_{a0} using the formula $k_{a0} = U_{max} \cdot \sigma_0 \cdot (2\pi)^{1/2}$.

Corrections δ_{ka0} , δ_{tm0} , $\delta_{\sigma0}$ to clarify the initial values of the parameters of the function k_a , t_m , σ_0 are determined by solving a system of equations:

$$\begin{aligned} a_{11} \cdot \delta_{ka0} + a_{12} \cdot \delta_{tm0} + a_{13} \cdot \delta_{\sigma0} &= b_1, \\ a_{21} \cdot \delta_{ka0} + a_{22} \cdot \delta_{tm0} + a_{23} \cdot \delta_{\sigma0} &= b_2, \\ a_{31} \cdot \delta_{ka0} + a_{32} \cdot \delta_{tm0} + a_{33} \cdot \delta_{\sigma0} &= b_3. \end{aligned} \quad (2)$$

To calculate the coefficients a_{11} , a_{12} , ..., a_{33} , b_1 , b_2 , b_3 the experimental data $u(t_i)$, the values of the function $\Phi_i = \Phi(t_i, t_{m0}, \sigma_0)$, calculated at the points t_i ($i = 1..N$, N is the number of samples) using approximate coefficients, as well as the values of partial derivatives of this function in points indicated:

$$A_i = \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t_m} \right|_{t=t_i, t_m=t_{m0}, \sigma=\sigma_0} = \frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0^2} \cdot \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0}\right)^2\right], \quad (3)$$



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из-за разности спектральных характеристик лазеров и влияния хроматической дисперсии оптического волокна задержки распространения по ВОЛС сигналов от двух лазерных передатчиков не равны друг другу. Этот эффект снижает точность сравнений и синхронизации шкал времени системами, используемыми ВОЛС. Считаем путь определения разности задержек распространения по ВОЛС сигналов системы сравнений и синхронизации ШВ, предусматривающий экспериментальные исследования процесса распространения импульсов от лазеров системы по ВОЛС, на которой развертывается система, более предпочтительным.

Для доказательства правильности идеи были проведены исследования. В экспериментальной установке разность интервалов времени, соответствующая разности задержек распространения импульсов от двух лазерных модулей, составила 0,310 нс. Были проведены прямые измерения задержек распространения импульсов в этой катушке оптического волокна с помощью электронно-счетного частотомера. Разность полученных значений задержек составила 0,33 нс. Различие разностей задержек, определенных двумя методами, составило 0,02 нс. Хорошая сходимость результатов двух проведенных экспериментов подтверждает возможность применения предложенного метода для определения поправок к показаниям систем сравнений и синхронизации шкал времени, использующих ВОЛС.

ЛИТЕРАТУРА

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.
Donchenko S. I., Blinov I. YU., Goncharov A. S., Norec I. B. Sovremennoe sostoyaniye i perspektivy razvitiya ehталонной bazy Gosudarstvennoy sluzhby vremeni, chastoty i opredeleniya parametrov vrashcheniya Zemli // Izmeritel'naya tekhnika, 2015, № 1, p. 5–8.
2. **Денисенко О. В., Федотов В. Н., Сильвестров И. С., Смирнов Ф. Р., Баженов Н. Р., Гериева Л. Б.** Обеспечение единства измерений при развитии и использовании ГЛОНАСС // Измерительная техника, 2015, № 1, с. 17–21.
Denisenko O. V., Fedotov V. N., Sil'vestrov I. S., Smirnov F. R., Bazhenov N. R., Gerieva L. B. Obespecheniye edinstva izmereniy pri razvitiy i ispol'zovanii GLONASS // Izmeritel'naya tekhnika, 2015, № 1, p. 17–21.
3. **Малимон А. Н.** Передача эталонных сигналов времени и частоты по волоконно-оптическим линиям // Альманах современной метрологии, 2016, № 8, с. 198–268.
Malimon A. N. Peredacha ehталонnyh signalov vremeni i chastoty po volokonno-opticheskim liniyam // Al'manah sovremennoy metrologii, 2016, № 8, p. 198–268.
4. **Иванов А. В., Моховиков Н. В., Каган С. Н., Малимон А. Н., Пестерев С. В., Пальчиков В. Г., Галышев А. А.** Сличения территориально удаленных эталонов

$$B_i = \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \Big|_{t_i=t_m, t_m=t_{m0}, \sigma=\sigma_0} = \left(\frac{(t_i - t_{m0})^2}{\sigma_0^3} - \frac{1}{\sigma_0} \right) \cdot \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

The refined values of the parameters of the function k_{a1} , t_{m1} , σ_1 are determined by the formulas:

$$k_{a1} = k_{a0} + \delta_{ka0}; \quad t_{m1} = t_{m0} + \delta_{tm0}; \quad \sigma_1 = \sigma_0 + \delta_{\sigma_0}. \quad (5)$$

Next, k_{a1} , t_{m1} , σ_1 are taken as approximate values of the coefficients of the approximating function and the calculation cycle is repeated.

The following operations are performed to calculate the parameters of each recorded pulse (two pulses at the FOCL input and two pulses at the FOCL output). The difference in pulse propagation delays through the FOCL Δt_{TP} is determined from the calculated t_m parameters of four approximating functions:

$$\Delta t_{\text{TP}} = (t_{mII \text{ out}} - t_{mI \text{ out}}) - (t_{mII \text{ in}} - t_{mI \text{ in}}), \quad (6)$$

where $t_{mI \text{ in}}$ and $t_{mI \text{ out}}$ are the parameters of the Gaussian function for laser pulses module L1 at the input and output of fiber optic lines, respectively; $t_{mII \text{ in}}$ and $t_{mII \text{ out}}$ are the parameters of the Gaussian function for the pulses of the laser module L2 at the input and output of the FOCL, respectively.

Taking into account the calculated value of Δt_{TP} as an amendment to the readings of one of the time interval gauges that will be used to exclude the error component of the scale comparisons time caused by the influence of chromatic dispersion of optical fiber.

MEASUREMENT RESULTS

The practical testing of the proposed method was carried out using a 47.5 km optical fiber coil. Oscillograms of pulses from two laser modules at the input and output of the optical fiber coil were recorded during the experiment. For the recorded data, an approximation was carried out using the above iterative method and, using the obtained functional dependencies, the values of the time intervals between pulses at the fiber coil input and at the coil exit were calculated. The time interval between the pulses at the input of the fiber coil was 52.325 ns, and the output of the coil was 52.635 ns. The difference of these time intervals, corresponding to the difference of the propagation delays of pulses from the two laser modules, was 0.310 ns. To confirm the results obtained, direct



- времени и частоты с применением волоконно-оптических линий связи // Труды ИПА РАН, 2012, вып. 23, с. 131–135.
- Ivanov A. V., Mohovikov N. V., Kagan S. N., Malimon A. N., Pesterev S. V., Pal'chikov V. G., Galyshev A. A.** Slicheniya territorial'no udalennyh ehtalonov vremeni i chastoty s primeneniem volokonno-opticheskikh linij svyazi // Trudy IPA RAN, 2012, v. 23, p.131–135.
5. **M. Rost, D. Piester, W. Yang, T. Feldmann, T. Wübbena and A. Bauch.** Time transfer through optical fibers over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps // Metrologia, 2012, 49 (6), p.772–778.
 6. **J. Kodet, P. Pánek, I. Procházka.** Two-way time transfer via optical fiber providing subpicosecond precision and high temperature stability // Metrologia, 2016, v.53, № 1, p.18–26.
 7. **Ł. Śliwczyński, P. Krehlik, Marcin Lipiński.** Optical fibers in time and frequency transfer // Measurement Science and Tecnology, 2010, v. 21, № 7. DOI: 10.1088/0957-0233/21/7/075302.
 8. **Колмогоров О. В., Прохоров Д. В., Донченко С. С., Щипунов А. Н., Буев С. Г.** Система встречных сравнений шкал времени // Альманах современной метрологии, 2017, № 9, с. 110–116.
Kolmogorov O. V., Prohorov D. V., Donchenko S. S., SHChipunov A. N., Buev S. G. Sistema vstrechnyh sravnenij shkal vremeni // Al'manah sovremennoj metrologii, 2017, № 9, p.110–116.
 9. Патент РФ RU2604852. Устройство для сравнения и синхронизации шкал времени. Прохоров Д. В., Колмогоров О. В., Донченко С. С. // Опубликовано 10.12.2016, бюл. № 34.
Patent RF RU2604852. Ustrojstvo dlya sravneniya i sinhronizacii shkal vremeni. Prohorov D. V., Kolmogorov O. V., Donchenko S. S. // Opublikovano 10.12.2016, byul. № 34.
 10. **Агравал Г.** Нелинейная волоконная оптика. Пер. с англ. – М.: Мир, 1996.
Agraval G. Nelinejnaya volokonnaya optika. Per. s angl. – М.: Mir, 1996.
 11. **Иоргачев Д. В., Бондаренко О. В.** Волоконно-оптические кабели и линии связи. – М.: Эко-Трендз, 2002.
Iorgachev D. V., Bondarenko O. V. Volokonno-opticheskie kabeli i linii svyazi. – М.: ENKO-Trendz, 2002.
 12. **Веснин В. Л.** Метод гауссовской аппроксимации пика спектра отражения волоконно-оптического брэгговского датчика // Известия Самарского научного центра РАН, 2003, т. 5, № 1, с. 156–164.
Vesnin V. L. Metod gaussovskoj approssimacii pika spektra otrazheniya volokonno-opticheskogo breggovskogo datchika // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2003, t.5, № 1, p.156–164.

measurements of the propagation delays of pulses in this optical fiber coil were carried out using an electron-counting frequency meter. The difference between the delays obtained was 0.33 ns. The difference in the delay differences determined by the two methods was 0.02 ns.

CONCLUSIONS

Due to the difference in the spectral characteristics of the lasers and the effect of the chromatic dispersion of the optical fiber, the propagation delay through the FOCL from the two laser transmitters is not equal to each other. This effect reduces the accuracy of comparisons and synchronization of time scales by the systems using FOCL. We consider the way to determine the difference in propagation delays of signals through the FOCL of the system of TS comparison and synchronization, which provides for experimental studies of the propagation of pulses from the lasers of the system through the FOCL, on which the system is deployed, as more preferable one.

To prove the correctness of the idea, the research was carried out. In the experimental setup, the difference in the time intervals corresponding to the difference in the propagation delays of the pulses from the two laser modules was 0.310 ns. Direct measurements of the propagation delays of pulses in this optical fiber coil were carried out using an electron-counting frequency counter. The difference between the delays obtained was 0.33 ns. The difference in the delay differences determined by the two methods was 0.02 ns. The good convergence of the results of the two experiments confirms the possibility of applying the proposed method to determine the corrections to the readings of the systems of TS comparison and synchronization using FOCL.