

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-04-93-101

УДК 535.015, 53.06, 681.785

Установка для измерений абсолютной и дифференциальной задержки распространения сигнала в оптическом волокне

Виктория Муслимовна Хайретдинова¹, Олег Викторович Колмогоров²,
Дарья Александровна Любченко³

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. Солнечногорск, Московская обл., Россия

¹victoria.hairetdinova2001@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0006-4413-4125>

²kolmogorov@vniiftri.ru <https://orcid.org/0000-0001-9051-6227>

³lubchenko@vniiftri.ru <https://orcid.org/0009-0006-5228-8095>

Аннотация

Предмет исследования. Установка для измерений абсолютной и дифференциальной задержки распространения сигнала в оптическом волокне, факторы, влияющие на погрешность установки. **Цель работы.** Разработать установку для измерений абсолютной и дифференциальной задержки распространения сигнала в оптическом волокне, которая в отличие от существующих установок, позволит измерять задержки распространения сигнала в оптических волокнах с пикосекундным разрешением на заданных длинах волн, а также исследовать дисперсионные свойства оптического волокна катушек и других оптоволоконных устройств. **Методы.** Созданная установка основана на использовании фазосдвигающего метода измерений хроматической дисперсии в оптическом волокне. **Основные результаты.** Разработана установка для измерений абсолютной и дифференциальной задержки распространения сигнала в оптическом волокне. Спектральный диапазон установки составляет от 1500 до 1630 нм. Определены основные факторы, влияющие на точность измерений дифференциальной задержки с использованием указанной установки, получены оценки границ погрешности установки в зависимости от частот модулирующих сигналов. **Практическая значимость.** Созданная измерительная установка может использоваться для исследований оптических волокон и оптоволоконных устройств при разработке систем сравнений и синхронизации шкал времени, систем передачи эталонных сигналов времени и частоты и другой аппаратуры волоконно-оптических линий связи.

Ключевые слова: оптическое волокно, задержка распространения сигнала, дифференциальная задержка, хроматическая дисперсия, системы сравнений шкал времени

Ссылка для цитирования: Хайретдинова В.М., Колмогоров О.В., Любченко Д.А. Установка для измерений абсолютной и дифференциальной задержки распространения сигнала в оптическом волокне // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 4. С. 93–101. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-93-101>

Коды OCIS: 060.2400, 060.2430, 060.2270.

Installation for measuring the absolute and differential delay of signal propagation in optical fiber

VICTORIA M. KHAYRETDINOVA¹, OLEG V. KOLMOGOROV², DARIA A. LYUBCHENKO³

All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Measurements, Solnechnogorsk, Moscow region, Russia

¹victoria.hairetdinova2001@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0006-4413-4125>

²kolmogorov@vniiftri.ru <https://orcid.org/0000-0001-9051-6227>

³lyubchenko@vniiftri.ru <https://orcid.org/0009-0006-5228-8095>

Abstract

The subject of the study is installation for measuring the absolute and differential delay of signal propagation in optical fiber, and factors affecting the installation error. **The aim of study** is to develop the installation for measuring the absolute and differential delay of signal propagation in optical fiber, which, unlike the existing installations, will allow to measure the signal propagation delays in optical fibers with picosecond resolution at specified wavelengths, as well as to investigate the dispersion properties of optical fiber coils and other fiber-optic devices. **Method.** The developed installation is based on the use of a phase-shift method of measuring the chromatic dispersion in optical fiber. **Main results.** The installation for measuring the absolute and differential delay of signal propagation in optical fiber has been developed. The spectral range of the installation is from 1500 to 1630 nm. The main factors affecting the accuracy of differential delay measurements using the developed installation are determined, estimates of the error limits of the installation depending on the frequencies of the modulating signals are obtained. **Practical significance.** The developed measuring installation can be used for research of optical fibers and fiber-optic devices in the development of systems for comparing and synchronizing time scales, systems for transmitting reference time and frequency signals and other equipment of fiber-optic communication lines.

Keywords: optical fiber, signal propagation delay, differential delay, chromatic dispersion, time scale comparison systems

For citation: Khayretdinova V.M., Kolmogorov O.V., Lyubchenko D.A. Installation for measuring the absolute and differential delay of signal propagation in optical fiber [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 4. P. 93–101. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-93-101>

OCIS codes: 060.2400, 060.2430, 060.2270.

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) широко используются в области телекоммуникационных технологий, а кроме того, в настоящее время они начинают применяться при решении других специализированных задач. В частности, применение ВОЛС весьма перспективно при обеспечении высокоточной синхронизации шкал времени пространственно удалённых эталонов единиц времени и частоты, при передаче эталонных сигналов частоты и времени от эталонов к потребителям этих сигналов. Кроме того, ведутся активные разработки сенсорных систем на основе ВОЛС, в частности использующих волоконно-оптические датчики на основе волоконных решёток

Брэгга [1–3]. Преимуществами ВОЛС по сравнению с другими каналами связи являются значительно меньшее ослабление сигнала, более низкая, по сравнению с металлическими кабелями, степень влияния нестабильности температуры на задержку распространения сигнала, устойчивость к воздействиям электромагнитных помех. Наиболее высокой точности синхронизации шкал времени (погрешность не более сотен пикосекунд) при расстояниях между эталонами единиц времени и частоты, составляющих от десятков метров до сотен километров, можно достичь за счёт использования ВОЛС [4–7] благодаря их перечисленным преимуществам и применению методов учёта температурной нестабильности

задержек распространения сигнала. Вопросам разработки средств передачи эталонных сигналов и синхронизации шкал времени, использующих ВОЛС, посвящён ряд работ, в частности, [8–11]. Одним из факторов, ограничивающих точность и дальность действия оптоволоконных систем синхронизации шкал времени, является хроматическая дисперсия оптических волокон. Хроматическая дисперсия (ХД) обусловлена зависимостью показателя преломления оптического волокна от частоты оптического излучения, распространяющегося по волокну [12]. ХД влияет на возникновение эффектов, ограничивающих достижимые характеристики ВОЛС, использующих спектральное уплотнение каналов (искажений формы импульсов, четырёхволнового смешения, перекрёстных помех), и ограничивающих возможности интегрирования в такие ВОЛС систем квантового распределения ключей [13]. Применительно к задачам синхронизации шкал времени и передачи эталонных сигналов времени ХД приводит к зависимости задержки распространения оптического излучения по волокну от длины волны излучения. Это обстоятельство вызывает появление двух дополнительных составляющих погрешности сравнений шкал времени по ВОЛС: погрешности, обусловленной искажением формы оптических импульсов из-за влияния ХД, и погрешности, обусловленной разностью задержек распространения сигналов по ВОЛС в прямом и обратном направлении из-за различия длин волн лазерных передатчиков, установленных на противоположных сторонах ВОЛС [14]. При разработке и испытаниях оптоволоконных систем сравнений и синхронизации шкал времени необходимо проводить оценки указанных составляющих погрешности с использованием данных о дисперсионных характеристиках оптических волокон, в первую очередь, о дифференциальной задержке распространения сигнала в оптическом волокне. Дифференциальная задержка распространения сигнала представляет собой приращение задержки распространения сигнала в оптическом волокне, вызванное изменением длины волны лазерного излучения.

Для достижения высокой точности синхронизации шкал времени оптоволоконными системами необходимо учитывать дифференциальные задержки распространения сигнала

в оптических волокнах за счёт введения соответствующих поправок либо на основе данных о дифференциальных задержках выбирать источники лазерного излучения со спектральными характеристиками, обеспечивающими пренебрежимо малый уровень погрешностей, вызванных влиянием ХД.

При разработке и испытаниях оптоволоконных систем сравнения и синхронизации шкал времени необходимо измерять задержки распространения сигналов в оптических элементах и соединительных кабелях, входящих в состав этих систем. Кроме того, при разработке систем с дальностью действия, составляющей десятки километров, возникает задача измерять ХД оптического волокна катушек, применяемых в качестве имитатора протяжённых ВОЛС.

Повышение требований к точности оптоволоконных систем сравнений и синхронизации шкал времени привело к потребности в разработке специализированной установки для измерений абсолютной и дифференциальной задержки распространения сигнала в оптическом волокне.

Цель работы — разработать установку для измерений абсолютной и дифференциальной задержки распространения сигнала в оптическом волокне, которая в отличие от существующих установок позволит измерять задержки распространения сигнала в оптических волокнах с пикосекундным разрешением на заданных длинах волн, а также исследовать дисперсионные свойства оптического волокна катушек и других оптоволоконных устройств.

СОСТАВ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАДЕРЖКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

В состав разработанной установки для измерений абсолютной и дифференциальной задержки распространения сигнала в оптическом волокне входят оптический рефлектометр с пикосекундным разрешением [15, 16], предназначенный для измерения абсолютной задержки на фиксированной длине волны, и установка для измерений дифференциальной в спектральном диапазоне задержки сигнала (далее — УИДЗ).

Принцип действия оптического рефлектометра, структурная схема которого приведена

на рис. 1, основан на использовании метода импульсной рефлектометрии во временной области, предполагающего измерения интервала времени между моментом излучения в оптическое волокно зондирующего оптического импульса и моментом приёма импульса, отражённого от дальнего торца волокна. Для обеспечения высокой точности измерений интервалов времени (погрешность не более ± 100 пс) в составе данного рефлектометра используется таймер событий с пикосекундным разрешением.

Принцип действия УИДЗ основан на фазосдвиговом методе измерений [17]. Метод предполагает подачу модулированного по интенсивности лазерного излучения в два канала УИДЗ: опорный канал и измерительный канал, содержащий исследуемое оптическое волокно или оптоволоконное устройство, регистрацию разности фаз модулирующих колебаний для излучения, прошедшего по двум каналам, при последовательном изменении центральной длины волны лазерного излуче-

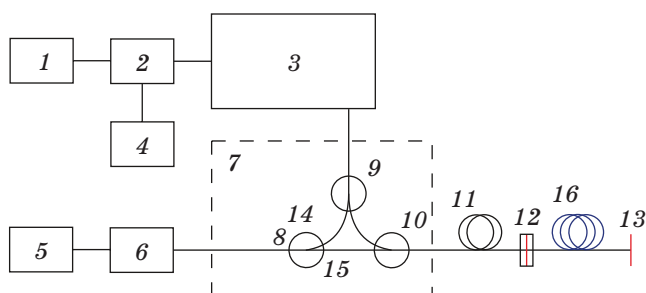


Рис. 1. Структурная схема оптического рефлектометра. 1 — генератор сигнала опорной частоты, 2 — таймер событий, 3 — фотоприёмное устройство, 4 — персональный компьютер, 5 — генератор импульсов, 6 — лазерный модуль, 7 — блок разветвителей и объединителей, 8 — разветвитель, 9 — объединитель, 10 — циркулятор, 11 — встроенная катушка оптического волокна, 12 — соединитель волоконно-оптический, 13 — ретрорефлектор, 14 — канал «1», 15 — канал «2», 16 — измеряемое оптическое волокно

Fig. 1. Block diagram of an optical reflectometer. 1 — reference frequency signal generator, 2 — event timer, 3 — photodetector, 4 — personal computer, 5 — pulse generator, 6 — laser module, 7 — block of splitters and unifiers, 8 — splitter, 9 — unifier, 10 — circulator, 11 — built-in optical fiber coil, 12 — fiber optic connector, 13 — retroreflector, 14 — channel “1”, 15 — channel “2”, 16 — optical fiber being measured

ния. По результатам проведённых измерений вычисляется зависимость изменения разности фаз от длины волны.

Структурная схема УИДЗ представлена на рис. 2.

Принцип функционирования УИДЗ приведён ниже. Генератор 2 подаёт модулирующий электрический сигнал на лазер 3, обеспечивая модуляцию интенсивности его излучения. Излучение от лазера 3 поступает на оптоволоконный разветвитель 4, который направляет его в два канала — в измерительный канал и опорный канал. В измерительный канал включается катушка исследуемого оптоволоконна 5, которая размещается в термокамере 6, а выход катушки подключается к фотоприёмнику 7, установленному на входе «1» цифрового запоминающего осциллографа 9. По опорному каналу излучение подаётся непосредственно на фотоприёмник 8, подключённый к входу «2» осциллографа 9. Осциллограф регистрирует сигналы, поступающие с измерительного и опорного канала, и по полученным данным вычисляется разность фаз между сигналами. Измерения повторяются при последовательной установке заданных значений центральной длины волны излучения лазера, контролируемых при помощи анализатора оптического спектра 1, а затем определяется зависимость разности фаз сигналов

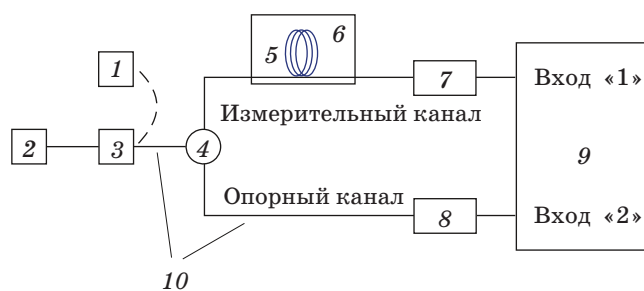


Рис. 2. Структурная схема УИДЗ для измерения дифференциальной задержки сигнала. 1 — анализатор оптического спектра, 2 — генератор, 3 — лазер, 4 — разветвитель оптоволоконный, 5 — исследуемая катушка оптического волокна, 6 — термостат, 7 и 8 — фотоприёмные устройства, 9 — осциллограф, 10 — соединительные кабели

Fig. 2. The block diagram of the UIDZ for measuring the differential delay of the signal. 1 — optical spectrum analyzer, 2 — generator, 3 — laser, 4 — fiber optic splitter, 5 — optical fiber coil under study, 6 — thermostat, 7 and 8 — photodetectors, 9 — oscilloscope, 10 — connecting cables

от длины волны излучения и вычисляются соответствующие значения дифференциальной задержки.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННОЙ УСТАНОВКИ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ УСТАНОВКИ

Для вычисления абсолютной задержки распространения сигнала τ_{abs} при выбранной длине волны λ , находящейся в заданном спектральном диапазоне, используется формула (1):

$$\tau_{\text{abs}} = \tau_r + \tau_d, \quad (1)$$

где τ_r — абсолютная задержка сигнала на длине волны лазера, используемого в рефлектометре, измеряемая оптическим рефлектометром, τ_d — дифференциальная задержка сигнала, зависящая от выбранного значения длины волны λ , измеряемая с помощью УИДЗ.

Для проведения измерений с помощью разработанной установки предложен следующий порядок.

В начале с помощью оптического рефлектометра, входящего в состав установки, измеряется значение абсолютной задержки сигнала в оптическом волокне на фиксированной длине волны лазера, установленного в рефлектометре. Данное значение в последующем будет использоваться при расчёте абсолютной задержки сигнала на других длинах волн в исследуемом спектральном диапазоне.

Далее, с помощью УИДЗ определяются значения разности фаз между сигналами в опорном и измерительном каналах на длинах волн излучения, выбираемых в заданном диапазоне. Затем, используя зарегистрированные значения разности фаз, по формуле (2) рассчитываются значения разности задержек распространения сигналов в измерительном и опорном каналах (без учёта целого числа длин волн):

$$\tau_d = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{2\pi f_m}, \quad (2)$$

где τ_d — дифференциальная задержка при длине волны λ , $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — изменение разности фаз между опорным и измерительным сигналами, возникающее при изменении длины волны излучения, f_m — частота модулирующего сигнала.

При необходимости по результатам проведённых измерений можно рассчитать нормированную дифференциальную задержку сигнала τ_N , используя формулу (3):

$$\tau_N = \frac{\tau_d}{\Delta\lambda}, \quad (3)$$

где $\Delta\lambda$ — разность длин волн.

Анализ источников погрешности УИДЗ показал, что помимо погрешности средства измерений, используемого для измерений разности фаз (цифрового осциллографа), на результаты измерений разности фаз влияет нестабильность температуры оптического волокна во время измерений, вызывающая изменения задержки распространения сигналов в нём и соответствующие изменения фазы, а также погрешность установки длин волн лазерного излучения, которая определяется погрешностью анализатора оптического спектра и дискретностью установки длин волн лазера. Составляющими погрешности измерений разности фаз φ_1 и φ_2 являются погрешность средства измерений разности фаз (цифрового осциллографа) θ_{os} , погрешность, обусловленная нестабильностью температуры при измерениях θ_t и погрешности $\theta_{\lambda 1}$ и $\theta_{\lambda 2}$ установки длин волн λ_1 и λ_2 лазерного излучения соответственно.

Границы погрешности измерений разности фаз $\theta_{\varphi 1}$ и $\theta_{\varphi 2}$ сигналов рассчитываются согласно формулам (4) и (5):

$$\theta_{\varphi 1} = \pm k \sqrt{\theta_{\text{os}}^2 + \theta_t^2 + \theta_{\lambda 1}^2}, \quad (4)$$

$$\theta_{\varphi 2} = \pm k \sqrt{\theta_{\text{os}}^2 + \theta_t^2 + \theta_{\lambda 2}^2}, \quad (5)$$

где k — коэффициент, зависящий от доверительной вероятности, θ_{os} — погрешность осциллографа, θ_t — составляющая погрешности, обусловленная нестабильностью температуры во время измерений, θ_{λ} — погрешность, обусловленная неточностью установки длины волны лазерного излучения.

Оценим границы погрешности измерений дифференциальной задержки $\theta_{\tau d}$, используя формулу для оценки границ погрешности косвенных измерений (6):

$$\theta_{\tau d} = \pm k \left[\theta_{\varphi 1}^2 \left(\frac{\partial \tau_d}{\partial \varphi_1} \right)^2 + \theta_{\varphi 2}^2 \left(\frac{\partial \tau_d}{\partial \varphi_2} \right)^2 + \theta_f^2 \left(\frac{\partial \tau_d}{\partial f_m} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (6)$$

При подстановке частных производных формула (6) принимает вид (7):

$$\theta_{\text{td}} = \pm k \left[\theta_{\varphi 1}^2 \frac{1}{(2\pi f_m)^2} + \theta_{\varphi 2}^2 \frac{1}{(2\pi f_m)^2} + \theta_f^2 \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2\pi f_m^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где k — табличный коэффициент, θ_{td} — погрешность дифференциальной задержки, θ_{φ} — погрешность измерений разности фаз, θ_f — погрешность частоты модуляции.

При разработке УИДЗ проведена численная оценка границ погрешности измерений дифференциальной задержки при следующих исходных данных: частота модуляции от 50 МГц до 200 МГц, разность фаз сигналов от 0,1 до 2π рад, относительная погрешность измерений частоты модулирующего сигнала 10^{-6} , абсолютная погрешность измерений разности фаз от 1 до 5 мрад.

Результаты оценки границ погрешности представлены в таблице.

Из полученных результатов расчётов выявлено, что для измерений с погрешностью θ_{td} не более 10 пс необходима частота модуляции не менее 150 МГц.

Для повышения точности результатов измерений при разработке УИДЗ в её состав были включены анализатор оптического спектра, предназначенный для контроля длин волн лазерного излучения, и термокамера, обеспечивающая стабилизацию температуры оптического волокна.

Значения границ погрешности измерений дифференциальной задержки сигнала (пс)

Values of the measurement error limits of the differential delay of the signal (ps)

Частота модуляции f_m , МГц	Погрешность измерений разности фаз, рад				
	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005
50	4,95	9,91	14,86	19,82	24,77
100	2,48	4,95	7,43	9,91	12,39
150	1,65	3,3	4,95	6,61	8,26
200	1,24	2,48	3,72	4,95	6,19

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ОПТОВОЛОКОННЫХ УСТРОЙСТВ

Функции разработанной установки и диапазоны настройки параметров режимов её работы позволяют использовать данную установку для решения других задач при исследованиях свойств оптических волокон и оптоволоконных устройств. К таким задачам относятся

- измерения хроматической дисперсии оптического волокна катушек, применяемых в качестве имитатора ВОЛС при разработке и испытаниях систем синхронизации шкал времени;
- измерения температурных коэффициентов изменения задержек распространения сигналов в оптических волокнах и оптоволоконных устройствах;
- исследования временных характеристик нестабильности задержек в оптоволоконных устройствах в условиях динамического изменения внешней температуры по заранее заданной зависимости. Внешний вид катушки оптического волокна, помещенной в термокамеру для проведения измерений, представлен на рис. 3.

Результаты измерений, проведённых на установке, можно использовать для вычисления поправок к значениям задержек распространения сигналов в оптических волокнах



Рис. 3. Внешний вид катушки оптического волокна, помещённой в термокамеру

Fig. 3. Appearance of an optical fiber coil placed in a thermal chamber

при изменении температуры, для установления требований к условиям эксплуатации оптоволоконных устройств в части стабильности температуры, для установления допусков на значения длин волн лазеров и их нестабильности, используемых совместно с исследуемыми оптоволоконными устройствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты разработки и исследований установки для измерений абсолютной и дифференциальной задержки распространения сигнала в оптическом волокне. Разработанная установка включает в свой состав оптический рефлектометр, выполняющий измерения задержки распространения сигнала в оптическом волокне с пикосекундным разрешением на фиксированной длине волны лазерного излучения, и установку для измерений дифференциальной задержки сигнала в спектральном диапазоне, обеспечивающую измерения приращений задержки при изменении длины волны лазерного излучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gholampour M., Mansoursamaei M., Malakzadeh A., Nikosefat M. Волоконно-оптический брэгговский датчик с температурной компенсацией на наклонной консольной балке для системы охраны // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 2. С. 52–59. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-02-52-59>
2. Паньков А.А. Математическая модель диагностирования микропористости материалов оптоволоконным датчиком с распределённой брэгговской решёткой // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 4. С. 3–10. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-04-03-10>
3. Yage Zhan, Fan Lin, Aijin Guo, Changheng Feng, Zeyu Sun, Muhuo Yu, Haochun Sun, Kehan Li, Weigao Qiu, Xiaokun Liu. Датчик для мониторинга процессов технологической обработки композитных материалов, использующий брэгговскую решётку в волокне с полиамидной оболочкой // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 8. С. 72–78. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-08-72-78>
4. Rost M., Piester D., Yang W., Feldmann T., Wübbena T., Bauch A. Time transfer through optical fibers over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps // Metrologia. 2012. V. 49. P. 772–778. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/49/6/772>
5. 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 времени и частоты с применением волоконно-оптических линий связи // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 131–135.
6. Predel K., Grosche G., Raupach S.M.F., Droste S., Terra O., Alnis J., Legereau T., Hensch T.V., Udem Th.,

Установка позволяет проводить измерения задержек в спектральном диапазоне от 1500 до 1630 нм, диапазон частот модулирующих сигналов при измерениях на установке составляет от 30 до 200 МГц. Определены основные факторы, влияющие на точность измерений дифференциальной задержки с использованием разработанной установки, получены оценки границ погрешности установки в зависимости от частот модулирующих сигналов.

Установка позволяет исследовать свойства оптических волокон и оптоволоконных устройств как в условиях поддержания стабильной температуры, так и в условиях воспроизведения изменений температуры по заранее заданной зависимости.

Разработанная измерительная установка может использоваться для исследований оптических волокон и оптоволоконных устройств при разработке систем сравнений и синхронизации шкал времени, систем передачи эталонных сигналов времени и частоты и другой аппаратуры волоконно-оптических линий связи.

REFERENCES

1. Golampour M., Mansoursamaei M., Malakzade A., Nikosefat M. Fiber Bragg grating security fence with temperature compensation based on a tilted cantilever beam // Journal of Optical Technology. 2022. V. 89. № 2. P. 101–106. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000101>
2. Pankov A.A. Mathematical model of determining microporosity of materials with a fiber-optic sensor with a distributed Bragg grating // Journal of Optical Technogy. 2020. V. 87. № 4. P. 193–198. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000193>
3. Yage Zhan, Fan Lin, Aijin Guo, Changheng Feng, Zeyu Sun, Muhuo Yu, Haochun Sun, Kehan Li, Weigao Qiu, Xiaokun Liu. Polyimide-coated fiber Bragg grating sensor for monitoring of the composite materials curing process // Journal of Optical Technology. 2020. V. 87. № 8. P. 501–505. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000501>
4. Rost M., Piester D., Yang V., Feldman T., Wübbena T., Bauch A. Transmission of time over optical fibers at a distance of 73 km with an error of less than 100 ps // Metrologia. 2012. V. 49. P. 772–778. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/49/6/772>
5. Ivanov A.V., Mikhovikov N.V., Kagan S.N., Malimon A.N., Pesterev S.V., Palchikov V.G., Galyshev A.A. Comparisons of geographically remote time and frequency standards using fiber-optic communication lines // Proceedings of IPA RAS. 2012. Iss. 23. P. 131–135.
6. Predel K., Grosche G., Raupach S.M.F., Droste S., Terra O., Alnis J., Legereau T., Hensch T.V., Udem T., Holzwarth R., Schnatz H. 920-kilometer fiber-optic

- Holzwarth R., Schnatz H. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place // *Science*. 2012. V. 336. P. 441–444. <http://doi.org/10.1126/science.1218442>
7. Fujieda Miho, Kumagai Motohiro, Nagano Shigeo, Ido Tetsuya. Frequency transfer using optical fibers // *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*. 2010. V. 57. Nos. 3/4. P. 209–217.
 8. Федорова Д.М., Балаев Р.И., Курчанов А.Ф., Троян В.И., Малимон А.Н. Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений // *Измерительная техника*. 2015. № 9. С. 34–37.
 9. Sliwczynski L., Krehlik P., Czubla A., Buczek L., Lipinski M. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km // *IOP PUBLISHING Metrologia*. 2013. V. 50. № 2. P. 133. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/50/2/133>
 10. Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Прохоров Д.В., Донченко С.С., Бувев С.Г., Малимон А.Н., Балаев Р.И., Федорова Д.М. Комплекс средств для сравнения по ВОЛС шкал времени эталонов и передачи эталонных радиочастотных сигналов // *Альманах современной метрологии*. 2017. № 11. С. 150–170.
 11. Krehlik P., Sliwczynski L., Buczek L., Lipinski M. Fiber-optic joint time and frequency transfer with active stabilization of propagation delay // *IEEE Transaction and Measurement*. 2012. V. 61. № 10. P. 2845–2851. <http://doi.org/10.1109/TIM.2012.2196396>
 12. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 324 с.
 13. Тарабрина А.Д., Тупяков Д.В., Воронцова И.О., Гончаров Р.К., Зиновьев А.В., Смирнов С.В., Киселев Ф.Д., Егоров В.И. Применение оптимизационных методов для решения задачи минимизации шумов в системах квантового распределения ключей при их интегрировании в волоконно-оптические линии связи с применением технологии плотного мультиплексирования по длине волны // *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 9. С. 66–74. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-09-66-74>
 14. Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Прохоров Д.В., Донченко С.С., Бувев С.Г. Метод определения разности задержек распространения по оптическому волокну импульсов лазерного излучения систем сравнений и синхронизации шкал времени // *Фотоника*. Т. 12. С. 696–703. <http://doi.org/10.22184/1993-7296.2018.12.7.696.703>
 15. Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Прохоров Д.В., Донченко С.С. Оптический рефлектометр для прецизионных измерений — схема и результаты теоретических и экспериментальных исследований // *Прикладная фотоника*. 2018. Т. 5. № 1–2. С. 92–101. <http://doi.org/10.15593/2411-4367/2018.1-2.06>
 16. Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Денисенко О.В., Донченко С.С., Прохоров Д.В., Бувев С.Г., Чемесова Е.В. Уменьшение погрешности измерений задержек распространения сигнала с помощью оптического рефлектометра с пикосекундным разрешением // *Измерительная техника*. 2020. № 1. С. 30–34. <http://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-1-30-34>
 17. ANSI/TIA-455-169 Chromatic dispersion measurement of optical fibers by the phase-shift method. communication line for frequency metrology from the 19th the decimal point // *Science*. 2012. V. 336. P. 441–444. <http://doi.org/10.1126/science.1218442>
 7. Fujieda Miho, Kumagai Motohiro, Nagano Shigeo, Ido Tetsuya. Frequency transmission using optical fibers // *Journal of the National Institute of Information and Communication Technologies*. 2010. V. 57. № 3/4. P. 209–217.
 8. Fedorova D.M., Balaev R.I., Malimon A.N., Kurchanov A.F., Troyan V.I. Transmission of reference radio frequencies over a fiber-optic line with electronic compensation of disturbances // *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2015. № 9. P. 34–37.
 9. Slivchinsky L., Krekhlik P., Chubla A., Buczek L., Lipinski M. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km // *IOP PUBLISHING Metrologia*. 2013. V. 50. № 2. P. 133. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/50/2/133>
 10. Kolmogorov O.V., Shchipunov A.N., Prokhorov D.V., Donchenko S.S., Buev S.G., Malimon A.N., Balaev R.I., Fedorova D.M. A set of tools for comparing time scales of standards and transmission of reference radio frequency signals by VOLS // *Almanac of Modern Metrology*. 2017. № 11. P. 150–170.
 11. Krekhlik P., Slivczynski L., Buczek L., Lipinski M. Fiber-optic joint transmission of time and frequency with active stabilization of propagation delay // *IEEE transactions and Measurements*. 2012. V. 61. № 10. P. 2845–2851. <http://doi.org/10.1109/TIM.2012.2196396>
 12. Agraval G. Nonlinear fiber optics. Trans. from English. M.: Mir, 1996. 324 p.
 13. Tarabrina A.D., Tupyakov D.V., Vorontsova I.O., Goncharov R.K., Zinoviev A.V., Smirnov S.V., Kiselev F.D., Egorov V.I. Application of optimization methods to minimize noise in quantum key distribution systems integrated into fiber-optic communication lines using dense wavelength division multiplexing // *Journal of Optical Technology*. 2022. V. 89. № 9. P. 549–554. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000549>
 14. Kolmogorov O.V., Shchipunov A.N., Prokhorov D.V., Donchenko S.S., Buev S.G. Method for determining the delay difference in propagation of laser radiation pulses through an optical fiber of systems of comparisons and synchronization of time scales // *Photonics*. 2018. V. 12. P. 696–703.
 15. Kolmogorov O.V., Shchipunov A.N., Prokhorov D.V., Donchenko S.S. Optical reflectometer for precision measurements — scheme and results of theoretical and experimental studies // *Applied Photonics*. 2018. V. 5. № 1–2. P. 92–101. <http://doi.org/10.15593/2411-4367/2018.1-2.06>
 16. Kolmogorov O.V., Shchipunov A.N., Denisenko O.V., Donchenko S.S., Prokhorov D.V., Buev S.G., Chemesova E.V. Reducing the measurement error of signal propagation delays using an optical reflectometer with picosecond resolution // *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2020. № 1. P. 30–34.
 17. ANSI/TIA-455-169. Chromatic dispersion measurement of optical fibers by the phase-shift method.

АВТОРЫ

Виктория Муслимовна Хайретдинова — инженер, Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, 141570, г. Солнечногорск, Московская обл., Россия; <https://orcid.org/0009-0006-4413-4125>, victoria.hairetdinova2001@yandex.ru

Олег Викторович Колмогоров — канд. техн. наук, начальник отдела, Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, 141570, г. Солнечногорск, Московская обл., Россия; Scopus ID: 56600671300, <https://orcid.org/0000-0001-9051-6227>, kolmogorov@vniiftri.ru

Дарья Александровна Любченко — младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, 141570, г. Солнечногорск, Московская обл., Россия; <https://orcid.org/0009-0006-5228-8095>, lubchenko@vniiftri.ru

Статья поступила в редакцию 06.10.2023

Одобрена после рецензирования 06.12.2023

Принята к печати 29.02.2024

AUTHORS

Victoria M. Hairetdinova — Engineer, All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering Measurements, 141570, Solnechnogorsk, Moscow Region, Russia; <https://orcid.org/0009-0006-4413-4125>, victoria.hairetdinova2001@yandex.ru

Oleg V. Kolmogorov — PhD, Head of Department, All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering Measurements, 141570, Solnechnogorsk, Moscow Region, Russia; Scopus ID: 56600671300, <https://orcid.org/0000-0001-9051-6227>, kolmogorov@vniiftri.ru

Daria A. Lubchenko — Junior researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering Measurements, 141570, Solnechnogorsk, Moscow Region, Russia; <https://orcid.org/0009-0006-5228-8095>, lubchenko@vniiftri.ru

The article was submitted to the editorial office 06.10.2023

Approved after review 06.12.2023

Accepted for publication 29.02.2024