

УДК 05.11.03

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЗАДЕРЖЕК РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

О.В. Колмогоров, А.В. Дейкун, Е.В. Чемесова

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
kolmogorov@vniiftri.ru*

Представлены результаты разработки установки для измерений задержек распространения сигналов в оптических элементах и световодах. Измерения задержек распространения сигнала в оптических элементах и световодах требуются при разработке различной аппаратуры, в частности при разработке волоконно-оптических систем синхронизации шкал времени для комплексов метрологического обеспечения глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и измерительных средств наземного комплекса ГЛОНАСС, при разработке средств метрологического обеспечения волоконно-оптических систем связи, при разработке радиофотонных систем (например, фазированных антенных решёток с оптоволоконными каналами, измерительных систем с удалёнными антеннами).

Ключевые слова: установка, сигнал, распространение, задержка, оптические элементы.

INSTALLATION FOR MEASURING SIGNAL PROPAGATION DELAYS IN OPTICAL ELEMENTS

O.V. Kolmogorov, A.V. Deikun, E.V. Chemesova

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region
kolmogorov@vniiftri.ru*

The results of the development of an installation for measuring signal propagation delays in optical elements and light guides are presented. Measuring the delays of signal propagation in optical elements and optical fibers required for the development of various instruments, in particular the development of fiber-optic systems the synchronization time scales for complexes of metrological support of the global navigation satellite system GLONASS and measuring means of ground-based GLONASS, the development of metrological maintenance of fiber-optic communication systems, the development radiophotonic systems (e.g., phased antenna arrays with fiber-optical channels, measuring systems with remote antennas).

Key words: installation, signal, propagation, delay, optical elements.

Измерения задержек распространения сигнала в оптических элементах и световодах требуются при разработке различной оптико-электронной аппаратуры, в частности оптических систем передачи эталонных сигналов частоты и времени к комплексам метрологического обеспечения Глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС [1], систем сравнения шкал времени пространственно удалённых эталонов, лазерных дальномерных

систем, оптических линий задержки [2], оптических рефлектометров, многоканальных радиофотонных систем (например, фазированных антенных решёток с оптическими каналами, систем для измерений параметров электромагнитного поля с комплектами распределённых в пространстве датчиков, применяемых для определения диаграммы направленности антенн) [3]. В свою очередь, уровень технических характеристик указанной аппаратуры зависит от точности контроля и учёта задержек распространения сигналов в оптических элементах и световодах.

Для решения перечисленных задач разработана установка для измерений задержек распространения сигналов в оптических элементах, позволяющая реализовать фазовый и импульсный методы измерений задержек [4], вносимых оптическими элементами. Фазовый метод позволяет достичь высокой точности, однако обладает весомым недостатком — сложностью применения для сигналов с малой амплитудой. Его использование требует высокого отношения сигнал/шум на входе приёмной аппаратуры, что не всегда возможно обеспечить или ведёт к значительному усложнению аппаратуры. Импульсный метод, основанный на измерении интервалов времени между импульсами на входе и выходе исследуемого оптического элемента, прост в реализации и может применяться в более широком динамическом диапазоне сигналов, однако имеет меньшую точность. При использовании этого метода с помощью измерителей временных интервалов (ИВИ) регистрируются моменты поступления импульсов на вход ИВИ по заданному пороговому значению уровня входного сигнала (уровню запуска триггера), и измеряется интервал между ними.

Основными составляющими погрешности измерений временных интервалов между импульсами являются погрешность частоты опорного генератора ИВИ, шумы в приёмном тракте, погрешности внутреннего триггера аппаратуры, а также погрешность дискретизации. Уменьшение первой составляющей возможно за счёт калибровки опорного генератора или использования более точного источника сигнала опорной частоты. Для уменьшения влияния остальных составляющих и повышения точности измерений задержек сигнала в оптических элементах при разработке установки предложено реализовать модифицированный импульсный метод, основанный на регистрации формы оптических импульсов с помощью аналого-цифрового преобразователя с установленным на входе фотоприёмным устройством, последующей аппроксимации зарегистрированных данных с учётом информации об исходной форме импульса и определении измеренного значения интервала времени между импульсами с использованием вычисленных параметров аппроксимирующих функций. Особенность предложенного метода состоит в том, что для определения интервала времени между двумя импульсами используются не два единичных отсчёта, а два массива зарегистрированных данных, несущих информацию о форме импульсов. Для уменьшения слу-

чайных погрешностей эти данные подвергаются сглаживанию путём математической обработки.

Структурная схема установки для измерений задержек распространения сигналов представлена на рис. 1.

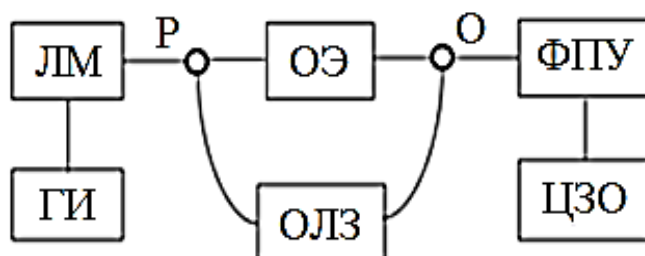


Рис. 1. Схема установки для измерений задержек распространения сигналов в световодах и оптических элементах: ГИ — генератор импульсов; ЛМ — лазерный модуль; ОЭ — оптический элемент; ОЛЗ — оптическая линия задержки; ФПУ — фотоприёмное устройство; ЦЗО — цифровой запоминающий осциллограф

Установка состоит из генератора импульсов ГИ, лазерного модуля ЛМ, оптоволоконного разветвителя Р, оптической линии задержки ОЛЗ (оптическое волокно длиной несколько метров), оптоволоконного объединителя О и цифрового запоминающего осциллографа ЦЗО с фотоприёмным устройством ФПУ. Измерительная установка функционирует следующим образом. С генератора импульсов ГИ на лазерный модуль ЛМ подаётся запускающий электрический импульс. Оптический импульс с лазерного модуля ЛМ поступает на вход разветвителя Р, который распределяет оптическое излучение по двум каналам. Первый канал (измерительный) через объединитель О соединяется с входом ФПУ. Исследуемый оптический элемент ОЭ при измерениях устанавливается в первый канал между разветвителем Р и объединителем О. Второй канал (опорный) содержит оптическую линию задержки (ОЛЗ), предназначенную для внесения начальной задержки между импульсами, поступающими на ФПУ по двум каналам. Осциллограф с ФПУ регистрирует два импульса: импульс, пришедший напрямую по каналу 1, и импульс, пришедший по каналу 2 через ОЛЗ. Зарегистрированные осциллографом данные сохраняются в файл для последующей математической обработки с целью вычисления значения интервалов времени между импульсами.

Измерения задержки распространения сигнала в оптическом элементе проводятся в два этапа. На первом этапе определяется разность задержек, вносимых двумя каналами установки, при этом исследуемый оптический элемент ОЭ в схему установки не включается, а разветвитель Р напрямую подключается к объединителю О. Оптический импульс, излученный с ЛМ, поступает на ФПУ по двум каналам, при этом ЦЗО с ФПУ регистрирует два

импульса, интервал времени T_{ref} между которыми представляет собой разность задержек, вносимых двумя каналами установки. На втором этапе в измерительный канал установки включается исследуемый оптический элемент ОЭ и измеряется интервал времени T_{meas} между оптическими импульсами, поступающими на вход ФПУ. Пример осциллограмм, полученных на первом и втором этапах, приведён на рис. 2.

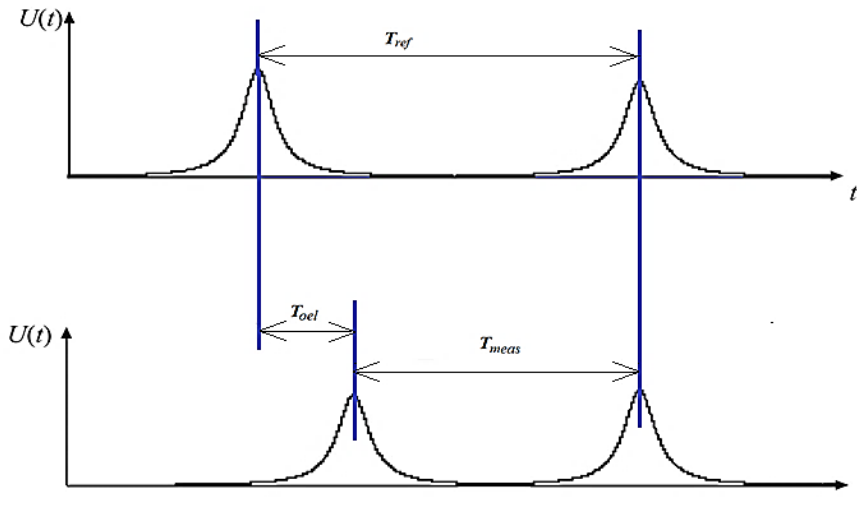


Рис. 2. Осциллограммы импульсов, регистрируемых на первом этапе измерений (без исследуемого оптического элемента) и на втором этапе (с оптическим элементом)

Далее вычисляется разность между значениями интервалов времени T_{meas} и T_{ref} , значение которой равно значению задержки распространения сигнала T_{oel} , вносимой исследуемым оптическим элементом по формуле:

$$T_{oel} = T_{ref} - T_{meas}. \quad (1)$$

Зарегистрированные осциллографом данные, характеризующие форму оптических импульсов, представляют собой последовательность дискретных по времени и уровню отсчётов. При регистрации оптических импульсов на регистрирующую аппаратуру (цифровой осциллограф и ФПУ) неизбежно воздействуют шумы, которые вносят случайную погрешность в результаты измерений интервалов времени. Наиболее существенно это влияние проявляется при регистрации момента приёма импульса по единственному пороговому значению на нарастающем фронте импульса. Для уменьшения случайной погрешности предлагается использовать аппроксимацию данных о зарегистрированной форме всего импульса, что позволит за счёт избыточности данных провести их сглаживание, тем самым уменьшив влияние шумов.

При этом в качестве значения интервала времени между импульсами будем принимать разность моментов времени между максимумами «сглаженных» зависимостей, описывающих форму импульсов.

В составе измерительной установки могут быть использованы лазерные модули и импульсные лазеры различных типов. Типичными формами импульсов для ряда импульсных лазеров является гауссовский импульс и лоренцевский импульс [5]. В зависимости от формы импульса лазера, используемого в составе установки, для зарегистрированных осциллограмм следует выбирать соответствующие аппроксимирующие функции (функцию Гаусса и функцию Лоренца).

Аппроксимация экспериментальных данных предполагает определение таких параметров аппроксимирующей функции, при которых она наилучшим образом (по заранее выбранному критерию) соответствует имеющимся экспериментальным данным. Для определения параметров аппроксимирующей функции широко используется метод наименьших квадратов, однако для функций сложной формы (в т.ч. гауссовской и лоренцевской) его прямое применение затруднительно и ведёт к неприемлемым затратам времени при обработке результатов эксперимента. В таких случаях целесообразно применять итерационные методы, использующие последовательное уточнение значений коэффициентов аппроксимирующей функции путём вычисления поправок к приближенным значениям этих коэффициентов.

Используем итерационный метод для аппроксимации формы лоренцевского оптического импульса по цифровым отсчётам зарегистрированной осциллограммы. При этом в качестве функциональной зависимости рассмотрим зависимость напряжения от времени $U(t)$, регистрируемую осциллографом с ФПУ и характеризующую мгновенную оптическую мощность в импульсе. В этом случае аппроксимирующая функция будет иметь вид [5]:

$$U_L(U_0, t_0, \tau) = 1 / (1 + 4(t_i - t_0)^2 / \tau^2) \cdot U_0, \quad (2)$$

где $U_L(U_0, t_0, \tau)$ — функция Лоренца; U_0 — амплитудный коэффициент; t_0 — координата максимума; τ — параметр, характеризующий длительность импульса.

Для параметров аппроксимирующей функции примем обозначения: $U_0 = \alpha_1$, $t_0 = \alpha_2$, $\tau = \alpha_3$. При использовании итерационного метода параметры аппроксимирующей функции α_1 , α_2 , α_3 определяются путём вычисления поправок к их начальным значениям α_{10} , α_{20} , α_{30} методом наименьших квадратов.

Поправки $\delta\alpha_1$, $\delta\alpha_2$, $\delta\alpha_3$ для уточнения начальных значений параметров аппроксимирующей функции определяются путём решения системы уравнений:

$$\begin{cases} a_{11} \cdot \delta\alpha_1 + a_{12} \cdot \delta\alpha_2 + a_{13} \cdot \delta\alpha_3 = b_1, \\ a_{21} \cdot \delta\alpha_1 + a_{22} \cdot \delta\alpha_2 + a_{23} \cdot \delta\alpha_3 = b_2, \\ a_{31} \cdot \delta\alpha_1 + a_{32} \cdot \delta\alpha_2 + a_{33} \cdot \delta\alpha_3 = b_3. \end{cases} \quad (3)$$

Для расчёта коэффициентов $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{33}, b_1, b_2, b_3$ используются экспериментальные данные $U(t_i)$, значения функции $U_i = U_L(U_0, t_0, \tau)$, вычисленные в точках t_i ($i = 1, \dots, N$; N — количество отсчётов) с использованием приближенных коэффициентов, а также значения частных производных этой функции в указанных точках по формулам:

$$\begin{aligned} A_i &= \left. \frac{\partial U}{\partial U_0} \right|_{t=t_i} = (1 + 4(t_i - t_0)^2 / \tau^2); \\ B_i &= \left. \frac{\partial U}{\partial t_0} \right|_{t=t_i} = U_0 \cdot \frac{8\tau^3(t_i - t_0)}{(1 + 4(t_i - t_0)^2)^2}; \\ C_i &= \left. \frac{\partial U}{\partial \tau} \right|_{t=t_i} = \frac{8U_0\tau(t_i - t_0)^2}{(1 + 4(t_i - t_0)^2)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициенты $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{33}$ определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \sum_{i=1}^N A_i^2; \quad a_{12} = \sum_{i=1}^N (A_i \cdot B_i); \quad a_{13} = \sum_{i=1}^N (A_i \cdot C_i); \\ a_{21} &= \sum_{i=1}^N (A_i \cdot B_i); \quad a_{22} = \sum_{i=1}^N B_i^2; \quad a_{23} = \sum_{i=1}^N (B_i \cdot C_i); \\ a_{31} &= \sum_{i=1}^N (A_i \cdot C_i); \quad a_{32} = \sum_{i=1}^N (B_i \cdot C_i); \quad a_{33} = \sum_{i=1}^N C_i^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Уточнённые значения параметров функций $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_{10} + \delta a_1; \\ \alpha_2 &= \alpha_{20} + \delta a_2; \\ \alpha_3 &= \alpha_{30} + \delta a_3. \end{aligned} \quad (6)$$

Далее в качестве приближенных значений коэффициентов аппроксимирующей функции принимаются $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, и цикл вычислений повторяется до тех пор, пока значения поправок не станут меньше заранее выбранного малого значения.

В качестве начальных значений параметров аппроксимирующей функции α_1 и α_3 целесообразно выбирать значение амплитуды, соответствующее пику мощности импульса, и значение длительности импульса по уровню 0,5 от максимума. Для определения начального значения параметра t_0 , обеспечивающего наилучшее приближение функции к экспериментальным данным, следует использовать несколько значений в окрестности пика импульса, для каждого из них провести цикл итераций и расчёт суммы квадратов отклонений значений аппроксимирующей функции от экспериментальных данных. В качестве начального значения параметра t_0 следует принять то, при котором сумма квадратов отклонений минимальна.

В случае использования гауссовских оптических импульсов для аппроксимации экспериментальных данных целесообразно применять итерационный метод [6], предусматривающий использование в качестве аппроксимирующей зависимости функции Гаусса с амплитудным коэффициентом по формуле:

$$U(t, t_m, \sigma) = k_a \cdot U_G(t, t_m, \sigma) = k_a \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t-t_m}{\sigma}\right)^2}, \quad (7)$$

где k_a — амплитудный коэффициент; $U_G(t, t_m, \sigma)$ — 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 путём вычисления поправок к их начальным значениям методом наименьших квадратов.

Начальные значения k_{a0} , t_{m0} , σ_0 рекомендуется выбирать следующим образом:

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

Поправки δk_{a0} , δt_{m0} , $\delta \sigma_0$ для уточнения начальных значений параметров функции k_{a0} , t_{m0} , σ_0 определяются путём решения системы уравнений, аналогичной системе (2).

Для расчёта коэффициентов a_{11} , a_{12} , ..., a_{33} , b_1 , b_2 , b_3 используются экспериментальные данные $U(t_i)$, значения функции $U_i = U_G(t_i, t_{m0}, \sigma_0)$, вычисленные в точках t_i ($i = 1, \dots, N$; N — количество отсчётов) с использованием приближенных коэффициентов, а также значения частных производных этой функции в указанных точках, вычисленные по формулам:

$$A_i = \left. \frac{\partial U}{\partial t_m} \right|_{t=t_i; t_m=t_{m0}; \sigma=\sigma_0} = \frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0^3 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0}\right)^2}; \quad (8)$$

$$B_i = \left. \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right|_{t=t_i; t_m=t_{m0}; \sigma=\sigma_0} = \left(\frac{(t_i - t_{m0})^2}{\sigma_0^3} - \frac{1}{\sigma_0} \right) \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_i - t_{m0}}{\sigma_0}\right)^2}. \quad (9)$$

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

$$k_{a1} = k_{a0} + \delta k_{a0}; \quad t_{m1} = t_{m0} + \delta t_{m0}; \quad \sigma_1 = \sigma_0 + \delta \sigma_0. \quad (10)$$

Далее в качестве приближенных значений коэффициентов аппроксимирующей функции принимаются k_{a1} , t_{m1} , σ_1 , и цикл вычислений повторяется, пока значения поправок не станут меньше заранее выбранного малого значения.

Применение этого итерационного метода для аппроксимации формы оптического импульса при определении разности задержек распространения по оптическому волокну гауссовских импульсов лазерного излучения подробно изложено в работе [7].

Определив для каждого из зарегистрированных импульсов параметры аппроксимирующей функции — координаты максимума (пикового значения импульса) по оси времени, вычисляется значение интервала времени (T_{ref} или T_{meas}) между импульсами как разность их координат максимума. Перечисленные операции по определению интервалов времени между импульсами повторяются многократно, затем вычисляются усреднённые значения интервалов времени, которые используются для определения задержки, вносимой оптическим элементом, по формуле (1).

Границы случайной погрешности определения предложенным методом задержки распространения сигнала в оптическом элементе σ_{oel} , выраженной в виде СКО, оценим соотношением:

$$\sigma_{oel} = \sqrt{\sigma_{ref}^2 + \sigma_{meas}^2}, \quad (11)$$

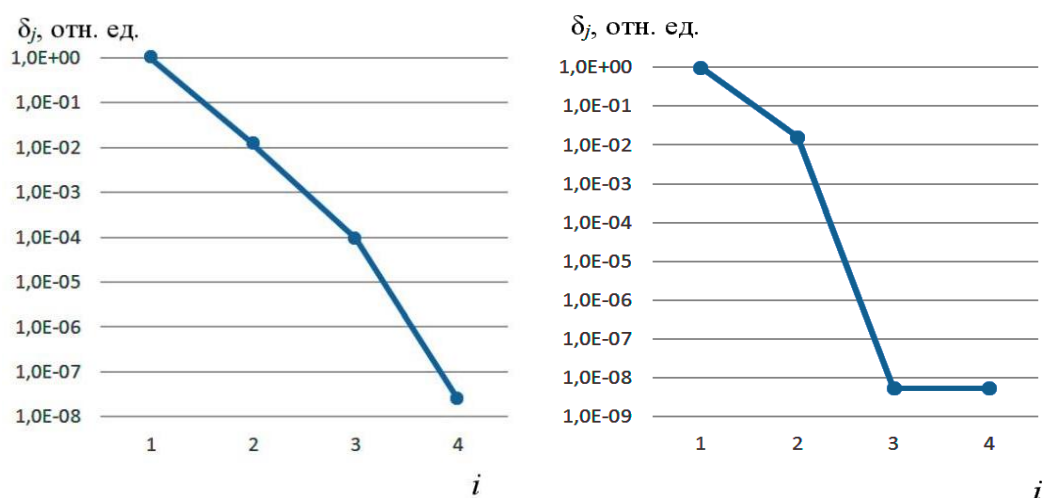
где σ_{ref} — СКО определения интервала времени T_{ref} , σ_{meas} — СКО определения интервала времени T_{meas} , которое используем для характеристики точности проводимых измерений.

Неисключённая систематическая погрешность (НСП) зависит от характеристик используемых ЦЗО и длительности измеряемых интервалов между импульсами. Для современных ЦЗО в рассматриваемых условиях (измерения в диапазоне до сотен наносекунд) НСП оказывается существенно меньше случайной погрешности.

Экспериментальная апробация изложенного метода проведена на созданной установке при использовании лазерных модулей с гауссовской и с лоренцевской формами импульса.

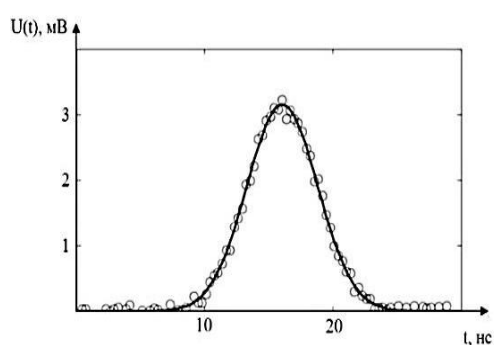
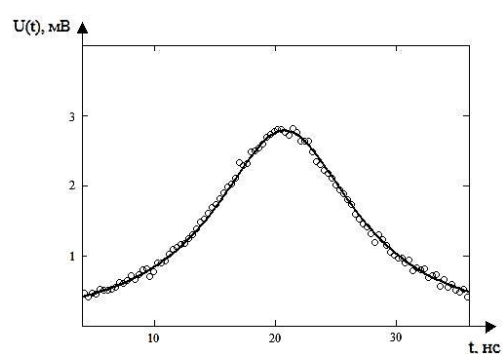
Для оценки достаточного количества итераций в процессе вычислений проводится расчёт разности параметров t_{mi} аппроксимирующих функций, а также отношения $\delta_j = S_j / S_1$ сумм квадратов отклонений значений аппроксимирующих функций, полученных на j -й и $j + 1$ итерациях ($j = 1, \dots, M$; M — количество итераций) до того момента, пока они не станут меньше заранее выбранных малых значений. Примеры результатов расчёта значений δ_j приведены на рис. 3а и 3б, из которых видно, что за четыре итерации δ_j уменьшается примерно в 10^8 – 10^9 раз. Исследования показали, что для вычисления параметров аппроксимирующих функций достаточно не более 4–5 итераций.

В результате математической обработки зарегистрированных данных для них вычислены параметры аппроксимирующих функций и определены значения задержек в исследуемых оптических элементах. Пример графиков аппроксимирующих функций Гаусса и Лоренца приведён на рис. 4 и 5.



а — аппроксимирующая функция Гаусса

б — аппроксимирующая функция Лоренца

Рис. 3. Зависимость δ_j отношения сумм квадратов отклонений значений аппроксимирующих функций от количества итераций i Рис. 4. График аппроксимирующей функции Гаусса: — — функция Гаусса; $\circ$ — экспериментальные данныеРис. 5. График аппроксимирующей функции Лоренца: — — функция Лоренца; $\circ$ — экспериментальные данные

По результатам экспериментов установлено, что при использовании предложенного метода случайная погрешность измерений интервалов времени между импульсами примерно одинаковой амплитуды, выраженная в виде СКО, уменьшается на 15–20% по сравнению с базовым импульсным методом. В случаях, когда амплитуда опорного и измерительного импульсов различается в 2–4 раза (например, при измерениях задержек в устройствах ослабления сигнала) за счёт применения предложенного метода можно достичь уменьшения СКО результатов измерений интервалов времени в 1,5–2 раза. Из полученных результатов следует, что применение предложенного метода позволяет уменьшить случайную погрешность измерений задержки

распространения сигнала в оптических элементах и световодах на 15–20%. Результаты экспериментальной апробации подтвердили возможность использования предложенного метода для повышения точности измерений задержек распространения сигнала в световодах и в оптических элементах с большим вносимым ослаблением сигнала.

Экспериментальная апробация модифицированного импульсного метода с использованием аппроксимации, проведённая на измерительной установке, показала, что погрешность измерения задержек распространения сигналов снизилась на 15–20% по сравнению с импульсным методом. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность высокоточных измерений задержек распространения сигнала в оптических элементах с помощью представленной установки.

Литература

1. Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Прохоров Д.В., Донченко С.С., Бувев С.Г., Малимон А.Н., Балаев Р.И., Федорова Д.М. Система передачи эталонных сигналов частоты и времени измерительным средствам наземного комплекса ГЛОНАСС по оптическому кабелю // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 29–32.
2. Щербakov В.В., Солодков А.Ф., Шелков Н.В., Озеров Ю.В. Экспериментальное исследование отечественного оптического волокна в составе волоконно-оптической линии задержки // Фотон-Экспресс. 2016. № 1 (129).
3. Урик Винсент Дж.-мл., МакКинни Джейсон Д., Вилльямс Кейт Дж. Основы микроволновой фотоники: пер. с англ. М.: Техносфера, 2016. 376 с.
4. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. М.: Syrus Systems, 1999. 672 с.
5. Гауэр Дж. Оптические системы связи: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 504 с.
6. Веснин В.Л. Метод Гауссовской аппроксимации пика спектра отражения волоконно-оптического Брэгговского датчика // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2003. Т. 5. № 1. С. 156–164.
7. 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. 2018. Т. 12. № 7 (75). С. 696–703.