
ЭЛЕКТРОННАЯ И ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА, ОПТОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.7.068.4.089.6

ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

В.М. БАЛАБАН, Ю.П. МАЧЕХИН, А.И. РАСЧЕКТАЕВА, Е.П. ТИМОФЕЕВ

В статье рассмотрены вопросы метрологического обеспечения параметров оптического волокна, предложен новый метод измерения времени распространения лазерного излучения в оптическом волокне реализованный в национальном эталоне Украины.

Ключевые слова: время распространения лазерного излучения в оптическом волокне, генератор оптических импульсов, неопределенность измерения, оптическое волокно.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время волоконно-оптические системы связи и передачи информации (ВОСП) стали доминирующими во всех индустриальных странах мира. Одним из центральных направлений дальнейшего развития ВОСП являются TDM, WDM и DWDM системы передачи информации [1]. Главной особенностью этих систем является разделение во времени (TDM) или по частоте (WDM) информационных сигналов. Международным телекоммуникационным союзом (ITU) был разработан частотный план [2], в соответствии с которым весь частотный диапазон разделяется на спектральные каналы шириной 100 ГГц. С развитием оптической связи ширина этих каналов последовательно будет уменьшаться и, соответственно, увеличиваться количество каналов. В перспективе ширина каждого канала будет не более 12,5 ГГц. Понятно, что при таких частотных полосах не только стабильность частоты излучения должна обеспечивать прохождение оптических сигналов только по заданному частотному каналу, но и качество оптического волокна начинает влиять на прохождение оптических информационных импульсов. С другой стороны, существуют научные задачи, решение которых основывается на применении обычных оптических линий связи, но при этом их характеристики оказывают принципиальное влияние на качество выполняемых измерений. К таким задачам относятся вопросы передачи высокостабильных оптических частотных сигналов с относительной нестабильностью до 10^{-17} по оптическим каналам связи длиной до 1000 км. В этой связи точное знание параметров используемых оптических каналов связи необходимо для решения очень важных научных и прикладных задач.

При производстве одномодового волокна (ОВ) его сертифицируют на основе результатов измерений параметров оптического волокна. В процессе длительной эксплуатации ВОСП в оптическом волокне возникают деградиационные эффекты, приводящие к изменению параметров волокна, в частности возрастанию потерь, а также

внезапным нарушениям целостности оптического волокна.

Все перечисленные задачи требуют знания длины оптического волокна, и погонных потерь, на основе измерения временных интервалов распространения оптического импульса в волокне. Эти измерения обычно проводятся с помощью оптических рефлектометров (ОР). Принцип работы оптического рефлектометра заключается в измерении интенсивности релеевского рассеяния при распространении по волокну зондирующего импульса. Вопросы калибровки оптических рефлектометров ранее рассматривались неоднократно (например, [3]). Преимущество измерений по обратному расстоянию состоит в том, что они требуют доступа только к одному концу волокна, при этом позволяют определить состояние волокна на протяжении всей его длины.

На Украине эксплуатируется более 300 оптических рефлектометров. В связи со стремительным развитием оптической связи (увеличением объемов и скорости передачи данных) фирмы-производители рабочих средств измерительной техники (СИТ) постоянно совершенствуют характеристики приборов, расширяют диапазоны измерений и повышают точность измерений. Поэтому условия и средства калибровки этих приборов также требуют совершенства и модернизации.

Целью настоящей работы была разработка высокоточного метода и средства калибровки СИТ измерения времени распространения лазерного излучения в оптическом волокне.

1. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ

В работах [3, 4] были подробно исследованы условия формирования в замкнутом оптическом контуре, с линией задержки, периодического оптического сигнала, который по своей форме очень близок к форме меандра. В связи с чем, генерируемый сигнал был назван оптическим меандром. Временные характеристики оптического меандра однозначно связаны с физической длиной линии задержки.

Как было показано в [4], устойчивость генерации зависит от стабильности усиления оптического сигнала в замкнутом контуре. В отсутствие усиления работа системы становится неустойчивой, точнее, генерируемая последовательность оптических импульсов представляет собой последовательность затухающих по амплитуде импульсов. Контролируемое усиление оптического сигнала требует сложного аппаратного обеспечения. В этой связи, для реализации метода [4] требуются такие технические условия, которые обеспечат формирование стабильного уровня амплитуды оптического меандра.

Модифицированный генератор оптического меандра основан на управлении работой полупроводникового лазера через волоконную линию задержки. Если измерить частоту f_1 следования оптического меандра в случае, когда оптическое волокно внесено в тракт задержки оптического сигнала, а частоту генерации f_0 в случае, когда волокно изъято из оптического тракта, то по этим двум частотам можно вычислить время распространения оптического излучения в волокне по (1):

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_0} \right). \quad (1)$$

Исследуемое оптическое волокно вводится в оптический тракт между оптическим аттенюатором и приемниками излучения. Цикл начинается с момента, когда напряжение на входе порогового устройства (компаратора) отсутствует. В этой ситуации включается питание полупроводникового лазера и генерируемое оптическое излучение заполняет всю линию задержки. Как только оптическое излучение достигает фотоприемника, электрический сигнал с выхода фотоприемника поступает на компаратор. Когда напряжение на входе компаратора превысит пороговое значение, то блок питания источника оптического излучения через некоторое время, определяемое постоянными времени порогового устройства и самого блока питания, выключит питание полупроводникового лазера. В результате излучение перестает поступать на вход оптического волокна, полностью выходит из него (в течение времени, пропорционального оптической длине волокна), после чего сигнал на выходе фотоприемника и напряжение на входе порогового устройства уменьшаются до нуля.

В момент, когда напряжение на входе порогового устройства становится меньше порогового значения, блок питания источника оптического излучения (опять же, через время, определяемое постоянными времени порогового устройства и самого блока питания) включает лазер. Непрерывное излучение снова поступает на вход оптического волокна, полностью заполняет его, после чего сигнал на выходе фотоприемника и напряжение на входе порогового устройства увеличи-

ваются до первоначального значения. При этом в момент, когда напряжение на входе порогового устройства превысит пороговое значение, блок питания выключит полупроводниковый лазер и описанный выше процесс повторится с начала.

Таким образом, устройство генерирует периодическую последовательность прямоугольных импульсов, частота следования которых определяется суммарной постоянной времени распространения сигнала по электронному участку цепи, включая фотоприемник оптического излучения, и пороговое устройство.

Основным эффектом, влияющим на погрешность измерения времени распространения оптического сигнала, является нестабильность величины постоянной времени электронного участка цепи. Проведенные исследования показали, что минимизацию погрешности измерения частоты следования импульсов или длительности времени распространения оптического излучения по замкнутому контуру, можно осуществить, контролируя времени прохождения сигнала по электронному участку цепи. Была установлена зависимость времени прохождения электрического сигнала от амплитуды оптического сигнала. Для управления влиянием этого эффекта в состав комплекса был введен оптический аттенюатор. С помощью оптического аттенюатора осуществлялось уменьшение или увеличение ослабления, что позволяло добиться максимального значения частоты генерации последовательности импульсов. Экспериментально измеренная зависимость частоты следования прямоугольных импульсов от значения затухания, установленного с помощью оптического аттенюатора, представлена на рис. 1.

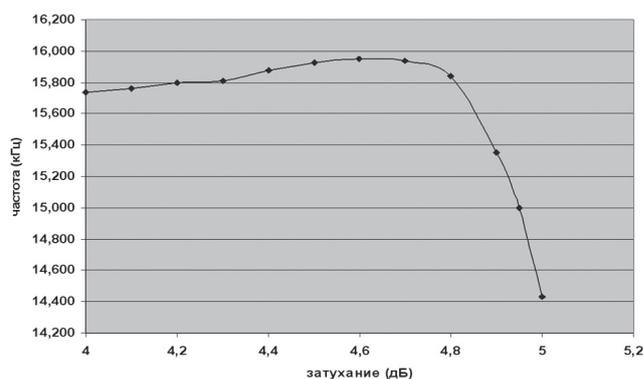


Рис. 1. Зависимость частоты следования прямоугольных импульсов от значения затухания, установленного с помощью оптического аттенюатора

Существенно, что суммарная постоянная времени электронного участка цепи не зависит от наличия волокна в оптическом тракте.

2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ НАИВЫСШЕЙ ТОЧНОСТИ

Разработанная методика измерения времени распространения оптического сигнала по исследуемому волокну была использована при создании Государственного первичного эталона

Украины единиц средней мощности в импульсе излучения, мощности непрерывного излучения в световоде и времени распространения излучения в световоде. На рис. 2 показан комплекс аппаратуры эталона для воспроизведения единицы времени распространения излучения в световоде.

Основой эталона Украины стал автогенератор с оптической линией задержки, в цепях которого происходит преобразование оптического сигнала в электрический и наоборот. Для работы в инфракрасном диапазоне спектра излучения в автогенератор введены PIN фотодиоды на базе германия (Ge) и индий-галий-арсенида (InGaAs). Тем не менее, поскольку последние лишены таких недостатков германиевых фотодиодов, как температурная зависимость, то для выполнения прецизионных калибровочных работ в эталонном измерителе используется фотодиод на базе InGaAs.

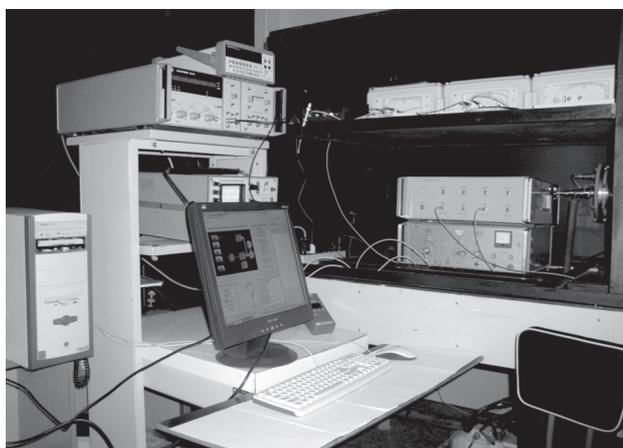


Рис. 2. Комплекс аппаратуры эталона для воспроизведения единицы времени распространения излучения в световоде

Эталонные меры времени распространения излучения в световоде представляют собой оптическое волокно, намотанное на стандартные катушки и помещенное в термостатированный корпус. Хранение эталонных мер включает в себя периодическое измерение их длины в линии задержки оптического автогенератора.

Погрешность измерения оптической длины волокна L_{op} полностью определяется погрешностями измерения частот генерации f_0 и f_1 , а также нестабильностью этих частот. Такие частоты можно измерять с относительными погрешностями порядка $10^{-8} - 10^{-9}$, которые значительно ниже возможных погрешностей измерения опти-

ческой длины волокна в эталоне. Очевидно, что более важным фактором, определяющим суммарную погрешность измерения оптической длины, является нестабильность частот генерации.

Аппаратура обеспечивает воспроизведение времени распространения излучения в световоде на фиксированных длинах волн со среднеквадратическим отклонением (СКО) результата измерения S_T , которое не превышает $(1 \times 10^{-11} + 0,5 \times 10^{-6} \times T)$ с. Неисключенная систематическая погрешностью (НСП) Θ_T , не превышает $(2 \times 10^{-11} + 2 \times 10^{-6} \times T)$ с. Расширенная неопределенность не превышает $U_{0,95} = (2,5 \times 10^{-11} + 2 \times 10^{-6} \times T)$ с для доверительной вероятности $p=0,95$; и $U_{0,99} = (3,75 \times 10^{-11} + 3 \times 10^{-6} \times T)$ с для доверительной вероятности $p=0,99$ [8].

Сравнивая основные характеристики двух национальных эталонов России и Украины (табл. 1), можно сделать вывод об успешности применения разработанного метода в эталоне. Достигнуто значительное повышение точности воспроизведения единицы времени распространения излучения в оптическом волокне (длины оптического волокна).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воспроизведение единицы длины волокна осуществляется путем прямого измерения времени распространения электромагнитной волны в оптическом волокне, что связано с современным определением метра, принятым в 1983 году Международной комиссией по мерам и весам, и связывает единицу длины с единицей времени и частоты через фундаментальную константу скорости света, значение которой принято по международному соглашению.

Практическое значение полученных результатов состоит в следующем. Разработан и экспериментально подтвержден метод измерения времени распространения излучения в световоде (длины оптического волокна). На основании исследования существующих конструкций генераторов оптических импульсов впервые в Украине разработан и внедрен автогенератор оптических импульсов с оптической линией задержки. Государственный первичный эталон единиц средней мощности в импульсе излучения, мощности непрерывного излучения в световоде и времени распространения излучения в световоде обеспечивает единство и достоверность измерений времени распространения излучения в световоде, мощности непрерывного излучения в световоде и

Таблица 1

	Расширенная неопределенность (с)	Диапазон воспроизводимых значений времени распространения оптического сигнала T (с)	Диапазон воспроизводимых значений длины L (м)
Национальный специальный эталон (Российская федерация) [4-6]	от 8×10^{-10} до $4,8 \times 10^{-9}$	от 1×10^{-7} до 5×10^{-3}	от 1×10^1 до 5×10^5
Государственный эталон ДЕТУ 11-03-09 (Украина)	от $2,5 \times 10^{-11}$ до 3×10^{-9}	от $1,5 \times 10^{-8}$ до $1,5 \times 10^{-3}$	от 3 до 3×10^5

средней мощности в импульсе излучения в Украине.

Метрологические характеристики государственного первичного эталона единиц средней мощности в импульсе излучения, мощности непрерывного излучения в световоде и времени распространения излучения в световоде в части воспроизведения единицы времени распространения излучения в световоде превосходят аналогичные характеристики Российского государственного эталона.

Литература

- [1] Андрэ Жирар. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. Москва: EXFO, 2001. 262 с.
- [2] International telecommunication union. G.694.1 Spectral grids for WDM application; DWDM frequency grid. 2002.
- [3] Machehkhin Yu.P., Raschektayeva A.I. Metrology maintenance optic time-domain reflectometers //Proc. LFNМ'2001 3rd International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. 2001. PP. 202-205.
- [4] Данелян А.Г., Мачехин Ю.П., Расчектаева А.И. Исследование устойчивой работы генератора оптического меандра // Прикладная электроника. 2007. Том 6. № 4. С. 578–582.



Поступила в редколлегию 25.11.2010

Балабан Василий Михайлович, старший научный сотрудник Национального научного центра “Институт метрологии”. Области научных интересов: оптико-физические измерения, измерение энергетических характеристик лазерного излучения.



Мачехин Юрий Павлович, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный метролог Украины, академик академии наук прикладной радиоэлектроники, заведующий кафедрой ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: лазерная измерительная техника и оптоэлектронные приборы.



Расчектаева Анжелика Ивановна, научный сотрудник Национального научного центра “Институт метрологии”. Области научных интересов: метрология, оптико-физические измерения, волоконная оптика, метрологическое обеспечение волоконно-оптических систем передачи информации.



Тимофеев Евгений Петрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Национального научного центра “Институт метрологии”. Области научных интересов: оптико-физические измерения, измерение энергетических характеристик лазерного излучения.

УДК 681.7.068.4.089.6

Частотний метод вимірювання довжини оптичного волокна / В.М. Балабан, Ю.П. Мачехін, А.І. Расчектаєва, Е.П. Тимофеев // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2010. Том 9. № 4. – С. 584–587.

У статті розглянуто питання метрологічного забезпечення параметрів оптичного волокна, запропоновано новий метод вимірювання часу розповсюдження лазерного випромінювання в оптичному волокні, який було реалізовано у національному еталоні України.

Ключові слова: час розповсюдження лазерного випромінювання в оптичному волокні, генератор оптичних імпульсів, невизначеність вимірювання, оптичне волокно.

Табл. 01. Іл. 02. Бібліогр.: 04 найм.

UDC 681.7.068.4.089.6

Frequency method of measurement of optical fibre length / V.M. Balaban, Yu.P. Machehkhin, A.I. Raschektayeva, E.P. Timofeev // Applied Radio Electronics: Sci. Mag. – 2010. Vol. 9. № 4. – P. 584–587.

The paper considers problems of metrological provision of parameters of an optical fibre. A new method of measuring time of laser radiation distribution in an optical fibre realised in the national standard of Ukraine is offered.

Keywords: time of laser radiation distribution in an optical fibre, generator of optical impulses, uncertainty of measurement, optical fibre.

Tab. 01. Fig. 02. Ref.: 04 items.