

УДК 53.082.539

О.В. Колмогоров, А.Н. Щипунов, Д.В. Прохоров, С.С. Донченко

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, г.п. Менделеево, Россия

ОПТИЧЕСКИЙ РЕФЛЕКОМЕТР ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ – СХЕМА И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ²

Предложена схема импульсного оптического рефлектометра с пикосекундным разрешением на основе многостопового таймера событий. Приведены результаты теоретических расчетов границ погрешностей таких рефлектометров, представлены результаты экспериментальных исследований созданного макета рефлектометра. Показано, что предложенная схема рефлектометра и примененные технические решения позволяют обеспечить измерения задержек распространения сигнала с погрешностью не более 100 пс.

Ключевые слова: оптический рефлектометр, таймер событий, задержка распространения сигналов.

O.V. Kolmogorov, A.N. Shipunov, D.V. Prokhorov, S.S. Donchenko

Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radiotechnical
Measurements, s.t. Mendeleevo, Russian Federation

OPTICAL TIME DOMAIN REFLECTOMETER FOR PRECISION MEASUREMENTS – SCHEME AND RESULTS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH

A scheme of a pulsed optical reflectometer with a picosecond resolution based on multistop event timers is proposed. The results of theoretical error limits calculations for such reflectometers are presented, the results of experimental studies of reflectometer are presented. It is shown that the proposed scheme of the optical time domain reflectometer and technical solutions make possible the signal propagation delays measurements with an error of not more than 100 ps.

Keywords: optical time domain reflectometer, event timer, signal propagation delay.

² Статья по материалам доклада на конференции «Оптическая рефлектометрия 2018».

Системы сравнений и синхронизации шкал времени (ШВ) [1], использующие ВОЛС, предъявляют повышенные требования к точности определения задержек распространения сигнала в световодах (оптических волокнах, пассивных оптических элементах). Так погрешность измерений задержки не должна превышать ± 100 пс, а для систем, передающих сигналы по нескольким волокнам, погрешность определения разности задержек распространения сигналов в волокнах не должна превышать ± 20 пс.

Рефлектометры во временной области, используемые для контроля телекоммуникационных ВОЛС, не позволяют решить задачу контроля задержек распространения сигнала в ВОЛС систем сравнения и синхронизации ШВ, так как имеют максимальное разрешение 0,4–0,6 м при измерениях длины, что соответствует разрешению в 2–3 нс при измерениях задержки распространения сигнала.

Характеристики различных типов оптических рефлектометров приведены в табл. 1. Для измерений задержек в ВОЛС с разрешением лучше 20 мм необходимы сложные дорогостоящие приборы, выпуск которых освоен лишь некоторыми зарубежными производителями (например, компания LUNA, США).

Таблица 1

Характеристики рефлектометров

Рефлектометры	Диапазон измеряемых расстояний, км	Мертвая зона прибора при измерениях расстояния, м	Разрешение прибора, мм
EXFO серия FTB-7200D	0...10 (диапазон с макс. разрешением)	1	600
FOD 7302	0...2 (диапазон с макс. разрешением)	1,5	125
LUNA OBR 4600	0,03...2	–	0,01...1
OFM 130	0...20	0,2	5

Недостаток высокоточных рефлектометров LUNA – малый диапазон измеряемой длины оптического кабеля (до 2 км), так как они предназначены в основном для контроля бортовых ВОЛС и пассивных оптических элементов. Телекоммуникационные рефлектометры не обеспечивают требуемой для систем сравнения и синхронизации

ШВ точности определения задержек распространения сигнала даже в волокнах длиной до 1 км. С увеличением измеряемой длины волокна погрешность определения задержки возрастает, а так как в них в качестве опорных генераторов устанавливаются кварцевые генераторы с относительной погрешностью по частоте $1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$, то для измеряемого интервала времени 1 мс, соответствующего времени прохождения оптического импульса по волокну длиной 100 км в прямом и обратном направлении, значения этой составляющей погрешности могут достигать 10–50 нс. Таким образом, существующие серийно выпускаемые в настоящее время оптические рефлектометры не позволяют измерять задержки сигнала в ВОЛС протяженностью до 100 км с погрешностью не более 100 пс, что приводит к необходимости разработки нового рефлектометра, позволяющего решить данную задачу.

Для высокоточного определения задержек в ВОЛС может использоваться частотный метод рефлектометрии [2], однако недостатком этого метода является необходимость обеспечения низкого уровня шума.

Разрешение импульсных рефлектометров зависит прежде всего от характеристик используемых измерителей интервалов времени – разрешения при измерениях интервалов времени и погрешности частоты опорного генератора. Наиболее точные современные измерители интервалов времени имеют разрешение около 10 пс (2σ , где σ – среднеквадратическое отклонение, СКО). Следовательно, для измерений задержек распространения сигнала с погрешностью менее 100 пс можно использовать импульсный метод с применением измерителей интервалов времени с пикосекундным разрешением.

Предлагаемая структурная схема импульсного оптического рефлектометра, построенная с использованием измерителя интервалов времени с пикосекундным разрешением (таймера событий)-EventTimer A033ET/USB [2], представлена на рис. 1.

Принцип действия предложенного рефлектометра состоит в следующем. Генератор импульсов ГИ подает запускающие электрические импульсы на лазерный модуль Л, затем оптические импульсы с выхода лазерного модуля попадают в блок разветвителей-объединителей БРО, где импульс разделяется на два канала: по первому каналу он поступает на фотоприёмник ФП, усиливается усилителем У, преобразуется с помощью устройства временной привязки УВП в импульс требуемой

для таймера событий формы и поступает на вход таймера событий ТС, при этом таймер событий фиксирует момент испускания импульса T_{i1} . Генератор ОГ используется таймером событий в качестве источника сигнала стабильной опорной частоты. По второму каналу импульс поступает через встроенную катушку волокна К в измеряемую волоконно-оптическую линию и распространяется по ней. Отраженный от ретрорефлектора РР, размещенного на торце волокна, импульс проходит по волокну в обратном направлении и через циркулятор Ц поступает на фотоприёмник, при этом ТС фиксирует момент прихода отраженного импульса T_{i2} . Для повышения точности за счет усреднения результатов измерений перечисленные операции повторяются N раз ($i = 1 \dots N$). Задержка распространения импульса T_p по исследуемому волокну в прямом и обратном направлении (двусторонняя задержка) определяется по формуле:

$$T_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{i2} - T_{i1} + \tau_n),$$

где τ_n – аппаратная поправка рефлектометра для учёта разности задержек в каналах БРО и задержки в встроенной катушке волокна, используемой для устранения «мертвой зоны». Измерив двустороннюю задержку распространения, можно определить длину волокна с учетом данных о показателе преломления.

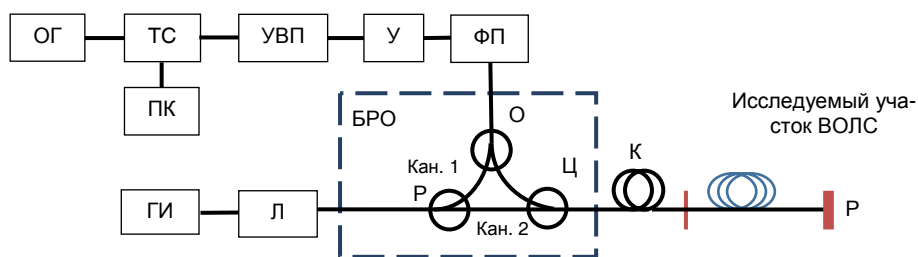


Рис. 1. Структурная схема оптического рефлектометра: ОГ – генератор сигнала опорной частоты; ПК – персональный компьютер, ТС – таймер событий, УВП – устройство временной привязки, У – усилитель, ФП – фотоприёмник, Л – лазерный модуль, ГИ – генератор импульсов, БРО – блок разветвителей и объединителей, О – объединитель, Ц – циркулятор, Р – разветвитель, К – встроенная катушка волокна; РР – ретрорефлектор

Оценим погрешность рефлектометра, построенного по предложенной схеме (см. рис. 1). Составляющими неисключенной системати-

ческой погрешности (НСП) рефлектометра являются: погрешность, обусловленная ошибкой срабатывания триггера таймера событий $\theta_{тр}$; погрешность определения аппаратурной поправки θ_t ; погрешность, обусловленная нестабильностью задержки сигнала в приемном тракте из-за влияния изменений температуры θ_T ; погрешность поправки для учета влияния ослабления и дисперсии оптического волокна на форму фронта импульса θ_f ; погрешность поправки на длину волны источника излучения θ_λ , погрешность, обусловленная долговременной (за 1 год) нестабильностью частоты опорного генератора $\theta_{ог}$, погрешность, обусловленная изменением длины катушки в зависимости от температуры окружающей среды θ_k .

Вклад погрешности, обусловленной нестабильностью генератора не более 10^{-8} при измерении ВОЛС до 100 км, меньше 10 пс, поэтому его можно не учитывать. Изменение задержки при удлинении катушки К можно определить по формуле:

$$\Delta t = L \cdot \frac{\Delta n(T)}{c} + \Delta L(T) \cdot \frac{n}{c},$$

где Δt – изменение задержки в волокне; L – длина оптического волокна; n – показатель преломления; c – скорость света в вакууме; $\Delta n(T)$ – изменение показателя преломления под действием изменений температуры; $\Delta L(T)$ – изменение длины волокна под действием изменений температуры. Результаты расчета приведены на рис. 2.

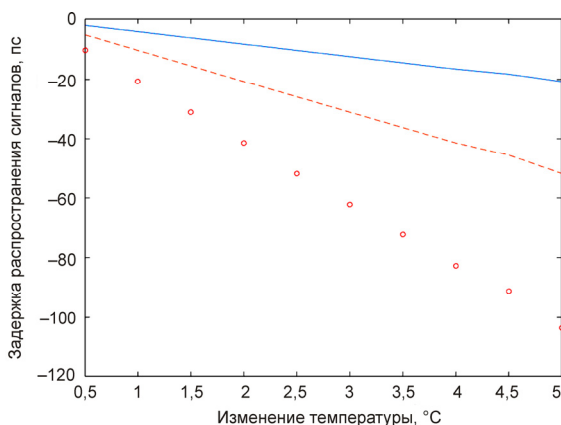


Рис. 2. Изменения задержки распространения сигнала в ВОЛС в зависимости от окружающей температуры

Сплошной линией показана задержка для ВОЛС длиной 1000 м, пунктирной – длиной 500 м, точками – длиной 200 м. Как видно из графика, при колебаниях температуры во время измерений до 5 °С в катушке длиной 200 м изменение задержки составит меньше 20 пс. Поэтому при расчетах и экспериментах далее будет использоваться катушка длиной менее 200 м.

При измерении задержки распространения сигнала в ВОЛС нужно также учитывать, что полученное значение будет использоваться в системах сравнения и синхронизации шкал времени с источниками излучения, у которых будет отличная длина волны от той, при которой проводились измерения на рефлектометре. Рассмотрим волокно SMF-28, для которого величина дисперсии $D(\lambda)$ для длины волны 1550 нм не должна превышать 18 [пс/нм·км]. Тогда при отличии длин волн лазерных источников излучения на 1 нм разница задержек распространения сигналов по ВОЛС длиной 35 км составит 630 пс, для ВОЛС длиной 100 км – 1800 пс. Как видно из расчета, разница длин волн источников рефлектометра и систем сравнения и передачи шкал времени может внести большой вклад в неисключенную систематическую погрешность (НСП) – θ_λ .

Уменьшить величину θ_λ можно двумя путями. Можно использовать источник от систем сравнения и передачи шкал времен в рефлектометре, если его параметры удовлетворяют требованиям к источнику излучения. Недостатком такого подхода является необходимость калибровки задержек в рефлектометре, достоинством является исключение составляющей НСП - θ_λ .

Если параметры источника из системы сравнения и передачи шкал времени не позволяют использовать его в рефлектометре, необходимо измерять длины волн источников лазерного излучения и вводить поправку, если они отличаются. Ниже в табл. 2 приведены характеристики коммерческих спектроанализаторов.

Таблица 2

Погрешность измерения длины волны спектроанализаторами

Спектроанализатор	Погрешность измерения длин волн
Anritsu MS 9740A	± 20 пм
EXFO FTB 5230S	± 20 пм
ViaviOSA-500RS	± 10 пм

Для расчета θ_λ будем считать, что погрешность измерения длины составляет 20 пм (погрешность большинства спектров анализаторов в оптическом спектральном диапазоне 1300–1650 нм). Тогда θ_λ для ВОЛС длиной 100 км составит 36 пс.

С учетом изложенного доверительные границы НСП рефлектометра при вероятности 0,95 будут определяться по формуле:

$$\theta_\Sigma = \pm 1,1 \sqrt{\theta_{тр}^2 + \theta_\tau^2 + \theta_T^2 + \theta_\Phi^2 + \theta_{ог}^2 + \theta_\lambda^2 + \theta_K^2},$$

а доверительные границы Δ абсолютной погрешности измерений рефлектометром задержки распространения сигнала при вероятности 0,95 – по формуле:

$$\Delta = \pm 2 \cdot \sqrt{\frac{\theta_\Sigma^2}{3} + \sigma^2}.$$

Составляющие погрешности рефлектометра приведены в табл. 3.

Таблица 3

Бюджет погрешности рефлектометра

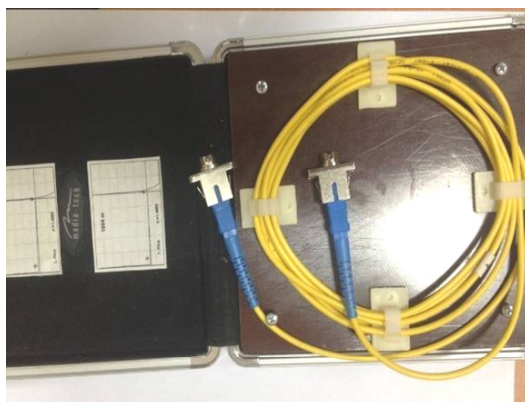
Обозначения составляющих погрешности	Значения при длине ВОЛС 1 км	Значения при длине ВОЛС 50 км	Значения при длине ВОЛС 100 км
$\theta_{тр}$	5 пс	5 пс	5 пс
Обозначения составляющих погрешности	Значения при длине ВОЛС 1 км	Значения при длине ВОЛС 50 км	Значения при длине ВОЛС 100 км
θ_τ	5 пс	5 пс	5 пс
θ_{f0}^*	2 пс	2 пс	2 пс
θ_Φ	–	7 пс	15 пс
θ_f	–	5 пс	10 пс
θ_λ	0,36 пс	18 пс	36 пс
σ	2 пс	3 пс	7 пс
Результаты расчета			
θ_Σ	8,1 пс	23,4 пс	45,3 пс
Δ	10,2 пс	27,7 пс	53,8 пс

* при нестабильности температуры в пределах ± 1 °С

Для проверки работоспособности макета рефлектометра и оценки его разрешения использовались тестовые линии, собранные из бухты оптического волокна длиной 1 км и оптического перехода (короткого отрезка оптического волокна в керамической оболочке, размещенного в металлическом корпусе). Геометрическая длина перехода, предварительно измеренная микрометром, составила 26,2 мм (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Измерение длины волоконного перехода (*а*), тестовая линия (*б*)

Дальнейшие измерения проводились на длине волны 1310 нм в два этапа: вначале рефлектометром измерялась задержка распространения импульса в тестовой линии, состоящей только из волоконной бухты, а затем к концу тестовой линии подключался оптический переход и измерялась суммарная задержка в составной тестовой линии. Нестабильность температуры в помещении не превышала $\pm 1^\circ\text{C}$.

Для волоконной бухты среднее значение задержки распространения сигнала составило 9,8493263 мкс, а для волоконной бухты с оптическим переходом 9,8495758 мкс разность полученных результатов со-

ставила 0,0002495 мкс, что в пересчете на геометрическую длину оптического перехода составляет 25,5 мм. Длина этого оптического перехода, измеренная микрометром, составила 26,2 мм, а разность полученных значений составила 0,7 мм.

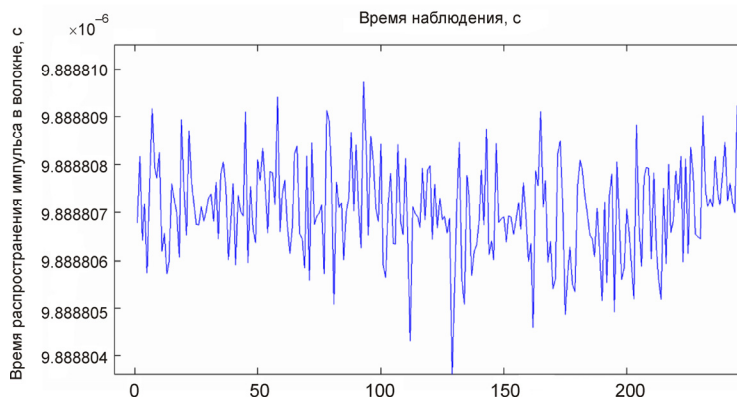


Рис. 4. Результаты измерений времени задержки сигналов в волокне

СКО σ результатов измерений рефлектометра не превысило 1,2 пс. На основе полученных результатов проведена оценка разрешения рефлектометра (минимальной разности задержек, которую может зарегистрировать прибор). Экспериментальные исследования разработанного макета показали, что разрешение рефлектометра не превысило 5–8 пс, а погрешность определения разности задержек распространения сигнала составила не более 11 пс для линий длиной до 1 км и не более 55 пс для линий длиной до 100 км.

Практическая апробация макета рефлектометра проведена при измерениях задержки в реальной волоконно-оптической линии, проложенной между отдельно стоящими зданиями. При этом СКО результатов измерений не превысило 5 пс.

Теоретическая оценка погрешности измерений задержки распространения сигнала предложенным рефлектометром показала, что при использовании опорного генератора с относительной погрешностью по частоте не более $1 \cdot 10^{-8}$ и измерителя длин волн с погрешностью не более 0,02 нм погрешность измерений задержки не превысит ± 110 пс для ВОЛС длиной до 100 км.

Таким образом, для высокоточного определения задержек распространения сигнала в оптическом волокне предлагается использо-

вать метод импульсной рефлектометрии во временной области, реализованный с использованием таймеров событий с пикосекундным разрешением. Особенностью предложенной схемы является использование встроенной в рефлектометр короткой катушки волокна, позволяющей устранить мертвую зону в начале шкалы и определять текущее значение аппаратурной поправки. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что рефлектометр, построенный по предложенной схеме, позволит измерять задержки распространения сигнала в оптических волокнах с погрешностью не более ± 110 пс и определять разность задержек в оптических волокнах и пассивных элементах ВОЛС с погрешностью не более ± 20 пс.

Список литературы

1. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // Измерительная техника. – 2015. – № 1. – С. 14–17.
2. Способ формирования внутренней шкалы времени устройств сравнения и синхронизации шкал времени и оптоволоконных рефлектометров и устройство для его осуществления: пат. RU 2623840 / Д.В. Прохоров, О.В. Колмогоров, С.С. Донченко.

References

1. Donchenko S.S., Kolmogorov O.V., Prokhorov D.V. Sistema odno- i dvukhstoronnikh sravneniy shkal vremeni [One- and two-sided time scales system comparing]. Izmeritelnaya tekhnika, 2015, no. 1, pp. 14-17.
2. Prokhorov D.V., Kolmogorov O.V., Donchenko S.S. Sposob formirovaniya vnutrenney shkaly vremeni ustroystv sravneniya i sinkhronizatsii shkal vremeni i optovolokonnykh reflektometrov i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Inner time scale of comparing devices formation and synchronizing scales with optical fiber reflectometers (method and device)]. Patent Russian Federation RU 2623840.

Получено 02.06.2018