

Сверхдлинный распределенный оптоволоконный датчик температуры на основе комбинационного рассеяния света

А.Г.Кузнецов, Д.С.Харенко, С.А.Бабин, И.Б.Цыденжапов, И.С.Шелемба

Создан сверхдлинный (протяженностью до 85 км) полностью волоконный температурный датчик на основе комбинационного рассеяния света. Датчик выполнен с использованием стандартного телекоммуникационного одномодового волокна SMF-28 и источника зондирующего излучения на длине волны 1.63 мкм. Зондирующее излучение от лазерного диода усиливалось волоконным ВКР-усилителем. Была измерена температура вдоль волоконной линии длиной до 85 км с точностью 8°C и с пространственным разрешением до 800 м.

Ключевые слова: распределенный датчик температуры, комбинационное рассеяние света, оптоволоконная линия.

1. Введение

Оптоволоконные сенсорные системы активно исследуются и применяются в самых разных областях: это угле-, нефте- и газодобыча, мониторинг состояний различных сооружений, авиастроение и т.д. Волоконные датчики позволяют измерять многие параметры среды: температуру, давление, деформацию, магнитное поле и пр. [1, 2]. Что немаловажно, чувствительный элемент данных устройств может располагаться удаленно (вплоть до нескольких десятков километров от блока управления и опроса), не требует подключения к линиям электропередачи, а для измерения используется исключительно оптический сигнал, распространяющийся по волоконной линии. Несмотря на то что эта область техники сравнительно молода, рынок волоконных датчиков стал одним из самых быстрорастущих в мире, а в некоторых сферах уже полностью вытеснил классические электрические датчики. Отличительными преимуществами сенсоров на основе оптоволоконных являются компактность, надежность, долговременная стабильность работы, устойчивость к электромагнитным помехам и химическому воздействию.

В настоящей работе исследуется распределенный температурный датчик, основанный на комбинационном рассеянии (КР) света в волоконном световоде. Анализ динамики интенсивности стоксовой и антистоксовой спектральных компонент КР позволяет вычислить температурный профиль вдоль всей линии световода. Как правило, в качестве импульсного зондирующего излучения рас-

пределённых КР-датчиков используются лазерный диод либо волоконный лазер с длиной волны генерации вблизи 1.55 мкм, которые при необходимости усиливаются с помощью эрбиевых усилителей до нужных пиковых мощностей [3]. Эта длина волны является удобной для исследователей, т.к. она находится в области окна прозрачности оптического волокна и является своего рода стандартом для телекоммуникационных систем. Оптические элементы для этой спектральной области, как активные (лазерные диоды, модуляторы, эрбиевые усилители и т.д.), так и пассивные (изоляторы, циркуляторы, волоконные ответвители и пр.), коммерчески доступны и относительно дешевы.

Одним из факторов, ограничивающих улучшение параметров оптоволоконных датчиков, является вынужденное комбинационное рассеяние, которое не позволяет увеличить мощность зондирующего сигнала, а значит и мощность полезного рассеянного света выше некоторого порога. Подавляющее большинство коммерческих систем распределенных датчиков построены на основе многомодового волокна, в котором за счет большого диаметра сердцевины уменьшается плотность мощности и тем самым повышается порог возникновения ВКР [4]. Это дает возможность существенно увеличить мощность источника излучения и улучшить основные параметры измерительной системы. Однако использование многомодового волокна имеет и ряд недостатков по сравнению с одномодовым: в нем существенно выше потери (~0.5 дБ/км для многомодового против ~0.2 дБ/км для одномодового), что ограничивает максимальную длину линии, при этом межмодовая дисперсия приводит к удлинению зондирующего импульса и к ухудшению пространственного разрешения датчика. Поэтому максимальная длина датчиков температуры на основе многомодовых волокон, как правило, не превышает 8 км, типичное температурное разрешение составляет 1°C, а пространственное – 2 м [5]. При использовании одномодового волокна в качестве чувствительного элемента длина измерительной линии может достигать 16 км [6]. Существующие методики опроса датчиков (циклическое и симплекс-кодирование и др.) позволяют еще больше увеличить максимальную длину линии, вплоть до 55 км [7].

А.Г.Кузнецов, Д.С.Харенко, С.А.Бабин. Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: leks.kuznecov@gmail.com

И.Б.Цыденжапов. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; ООО «Инверсия-Сенсор», Россия, 614990 Пермь, ул. 25 Октября, 106; e-mail: i.b.tsydenzhapov@i-sensor.ru

И.С.Шелемба. ООО «Инверсия-Сенсор», Россия, 614990 Пермь, ул. 25 Октября, 106; e-mail: shelemba@i-sensor.ru

Поступила в редакцию 22 мая 2017 г., после доработки – 26 июля 2017 г.

В настоящей работе демонстрируется возможность увеличения максимальной длины (до 85 км) полностью волоконного распределённого датчика температуры за счет использования зондирующего излучения в области длин волн более 1.6 мкм. Выбор такой рабочей длины волны обусловлен несколькими факторами, которые оказываются критичными для создания сверхдлинного датчика температуры. Во-первых, в этом случае относительно слабая антистоксова компонента КР попадает в окно прозрачности 1.5 мкм, где потери ниже, чем на 1.4 мкм. Во-вторых, стоксова компонента будет находиться в области 1.7 мкм, где потери существенно возрастают и, следовательно, увеличивается порог возникновения ВКР, что дает возможность повысить мощность зондирующего излучения, а значит и интенсивность антистоксовой компоненты КР.

2. Теория и принцип измерения

Комбинационное рассеяние света – это неупругий процесс, который сопровождается заметным изменением частоты рассеиваемого излучения: если источник испускает монохроматический свет, то в спектре рассеянного излучения помимо упругого рассеяния (рэлеевского) на несмещенной частоте ν_0 обнаруживаются дополнительные линии, число и расположение которых тесно связаны с молекулярным строением вещества. Переход молекулы из основного состояния в возбужденное приводит к появлению в спектре КР линий с меньшей частотой $\nu_s = \nu_0 - \Delta\nu$ (стоксова компонента). Аналогично, при переходе молекулы из возбужденного в основное состояние частота рассеянного света увеличивается на $\Delta\nu$: $\nu_a = \nu_0 + \Delta\nu$ (антистоксова компонента).

Известно, что в силикатном оптоволокне компоненты КР отстоят от центральной приблизительно на 440 см^{-1} [8]. Населенность возбужденного уровня зависит от температуры вещества, а значит, и интенсивность антистоксовой компоненты будет проявлять соответствующую температурную зависимость. Мощность рассеянного света в момент времени $t = 2Ln/c$ в точке $z = L$ (n – показатель преломления, c – скорость света) определяется следующими выражениями для стоксовой, антистоксовой и рэлеевской компонент [9, 10]:

$$P_s(T) = P_0 K_s S \nu_s^4 \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] R_s(T) \tau_p, \tag{1}$$

$$P_a(T) = P_0 K_a S \nu_a^4 \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L] R_a(T) \tau_p, \tag{2}$$

$$P_R(T) = P_0 K_R S \nu_R^4 \exp(-2\alpha_0 L) \tau_p, \tag{3}$$

где P_0 – мощность зондирующего импульса; K_a, K_s, K_R – коэффициенты антистоксова, стоксова и рэлеевского рассеяния; S – фактор обратного рассеяния в волокне; T – температура; τ_p – длительность зондирующего импульса; α_0, α_a и α_s – линейные потери зондирующего излучения, антистоксовой и стоксовой компонент рассеяния; $R_s(T)$ и $R_a(T)$ – зависящие от температуры коэффициенты, связанные с населенностью нижнего и верхнего уровня. Населенности уровней описываются распределением Больцмана:

$$R_s(T) = [1 - \exp(-h\Delta\nu/k_B T)]^{-1}, \tag{4}$$

$$R_a(T) = [\exp(h\Delta\nu/k_B T) - 1]^{-1}, \tag{5}$$

где k_B – постоянная Больцмана, а h – постоянная Планка.

Таким образом, измеряя мощность антистоксова рассеяния в волокне P_a и проводя ее нормировку на мощность стоксова (P_s) либо рэлеевского (P_R) рассеяния для исключения нетемпературных эффектов (таких как изгибные потери или потери на точках сварки волокна), можно вычислить температуру, пользуясь одним из следующих соотношений:

$$\frac{P_a(T)}{P_s(T)} \approx \left(\frac{\nu_a}{\nu_s}\right)^4 \exp\left(-\frac{h\Delta\nu}{k_B T}\right) \exp[-(\alpha_a - \alpha_s)L], \tag{6}$$

$$\frac{P_a(T)}{P_R} \approx \left(\frac{\nu_a}{\nu_R}\right)^4 \frac{\exp[-(\alpha_a - \alpha_0)L]}{\exp(h\Delta\nu/k_B T) - 1}. \tag{7}$$

В реальных экспериментах по измерению температуры множество факторов, таких как неодинаковая форма спектрального фильтра для различных компонент, разный спектральный отклик фотодиодов и т. д., приводят к тому, что невозможно точно вычислить температуру по формулам (6), (7) и требуется предварительная калибровка прибора [11]. Для этих целей часть волокна, так называемый балласт, помещается в термостат при известной температуре T_0 , измеряется $P_a(T_0)/P_s(T_0)$ (или $P_a(T_0)/P_R$), и корректируются константы в уравнениях (6), (7).

3. Эксперимент

В качестве источника зондирующего излучения использовался коммерчески доступный лазерный диод производства NEC с длиной волны генерации 1628 нм и с максимальной пиковой мощностью 125 мВт. Для усиления этого излучения был собран ВКР-усилитель на основе одномодового волокна со смещенной дисперсией OFS NZ DSF длиной 10 км с накачкой от волоконного лазера на длине волны 1530 нм (рис.1). Лазер накачки был выполнен по кольцевой схеме резонатора с эрбиевым волокном и с последующим усилением Er–Yb-усилителем. Максимальная выходная мощность излучения на длине волны $\lambda_{\text{pump}} = 1530 \text{ нм}$ после усилителя составила 1.7 Вт. Сигнал лазерного диода на длине волны 1628 нм и излучение накачки (1530 нм) с помощью спектрально-селективного ответвителя WDM заводились в ВКР-усилитель, и при мощности накачки 810 мВт зондирующий сигнал усиливался до пиковой мощности 370 мВт. Дальнейшее усиление ограничивалось порогом возникновения межимпульсной ВКР-генерации. Выходной спектр зондирующего лазера и зависимость мощности сигнала от мощности накачки представлены на рис.2.

Схема регистрации КР приведена на рис.3. Лазерные импульсы с частотой следования 100 Гц и длительностью импульса $\tau_p = 8 \text{ нс}$ заводятся в оптоволоконную линию

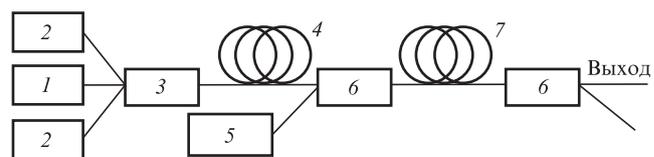


Рис.1. Оптическая схема ВКР-усиления зондирующего сигнала на 1628 нм: 1 – эрбиевый волоконный лазер (1530 нм); 2 – многомодовый лазерный диод накачки (976 нм, мощность 8 Вт); 3 – объединитель накачки; 4 – волокно, легированное Er и Yb; 5 – импульсный лазерный диод (1628 нм); 6 – WDM 1530/1630 нм; 7 – ВКР-усилитель на основе одномодового волокна NZ DSF длиной 10 км.

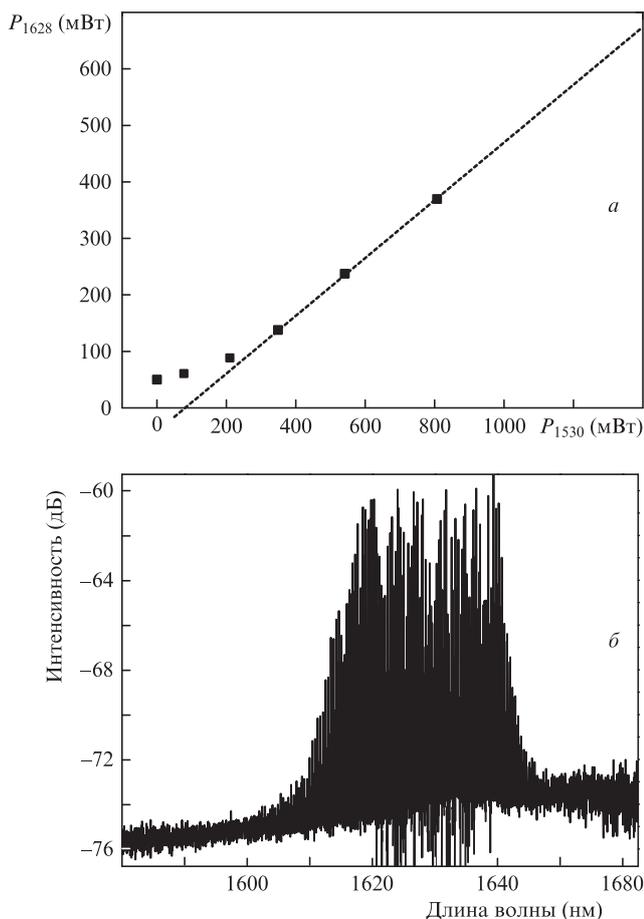


Рис.2. Зависимость выходной мощности усиленного сигнала (1628 нм) от мощности накачки на 1530 нм (а) и соответствующий спектр зондирующего сигнала на выходе ВКР-усилителя (б).

длиной 85 км (Fujikura SMF-28), состоящую из трех последовательно сваренных катушек волокна длиной 50, 30 и 5 км. Катушка с волокном длиной 5 км, находящаяся в термостате в конце линии, нагревается примерно до 60 °С. Сигнал КР в обратном направлении, проходя через спектральный фильтр, разделяется на рэлеевскую и антистоксову компоненты и перенаправляется на два фотодиода с полосой 10 МГц. Аналоговый сигнал с фотодиодов поступает на АЦП и далее на компьютер, где эти сигналы обрабатываются и вычисляется температура по формуле (7).

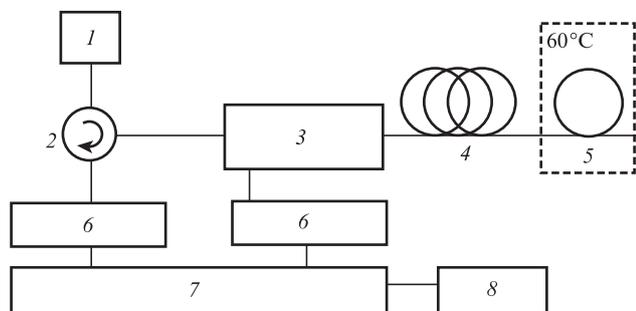


Рис.3. Схема регистрации КР: 1 – импульсный зондирующий лазер с ВКР-усилителем (1628 нм); 2 – циркулятор; 3 – система фильтрации оптического сигнала; 4 – оптоволоконно длиной 80 км при комнатной температуре; 5 – оптоволоконно длиной 5 км в термостате; 6 – фотодиоды, регистрирующие соответствующие спектральные компоненты рассеяния; 7 – АЦП; 8 – устройство обработки сигнала и расчета температуры (компьютер).

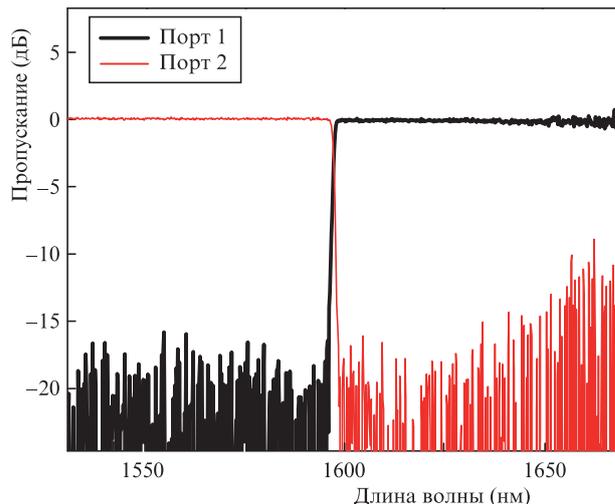


Рис.4. Спектр пропускания FWM.

В качестве спектрального фильтра использовались коммерчески доступные тонкопленочные спектрально-селективные ответвители FWM на телекоммуникационную спектральную L/C-область (их спектр пропускания приведен на рис.4). Для максимальной эффективности фильтрации сигнала три ответвителя соединялись последовательно, так что обратно рассеянный сигнал разделялся данным фильтром на два канала (1.5 и 1.6 мкм) и регистрировался лавинными фотодиодами.

4. Результаты и обсуждение

На рис.5,а показаны рефлектограммы интенсивности рэлеевского рассеяния и антистоксовой компоненты КР света в линии длиной 85 км при усреднении $60000\times$ для минимизации шумов. В конце рефлектограммы антистоксовой компоненты наблюдается увеличение интенсивности, что соответствует нагреву отрезка волокна. Обратим внимание на то, что широкий спектр зондирующего излучения (см. рис.2,б) в нашем случае позволяет регистрировать рефлектограммы в линиях до 90 км с приемлемым качеством, в отличие от случая фазочувствительного рэлеевского рефлектометра [12], где влияние модуляционной неустойчивости [13] при пиковых мощностях свыше 1 Вт существенно сокращает рабочую длину волоконной линии, делая ее менее 10 км.

Из этих данных, с использованием формулы (7), была рассчитана температура вдоль волоконной линии. Распределение температуры приведено на рис.5,б. Точность измерения температуры составила 8 °С, а пространственное разрешение, определяемое длительностью импульса τ_p , в нашем случае ($\tau_p = 8$ мкс) составило 800 м. Отметим, что хотя измеряемая волоконная линия длиной 80 км находится при комнатной температуре, на рис.5,б наблюдается искажение температурного профиля с минимумом в районе 50 км, т.е. в месте сварки двух катушек длиной 50 и 30 км, поскольку в этой точке отмечены разные потери для длин волн 1.6 и 1.5 мкм, а нормировка (7) не исключает в полной мере потери в точках сварки. Для более точного измерения температуры в линии, содержащей одну или несколько точек сварки волокон, требуется либо учет различающихся спектральных потерь в этих точках, либо зондирование чувствительного участка волокна двумя различными источниками: на длине волны 1.5 мкм, на ко-

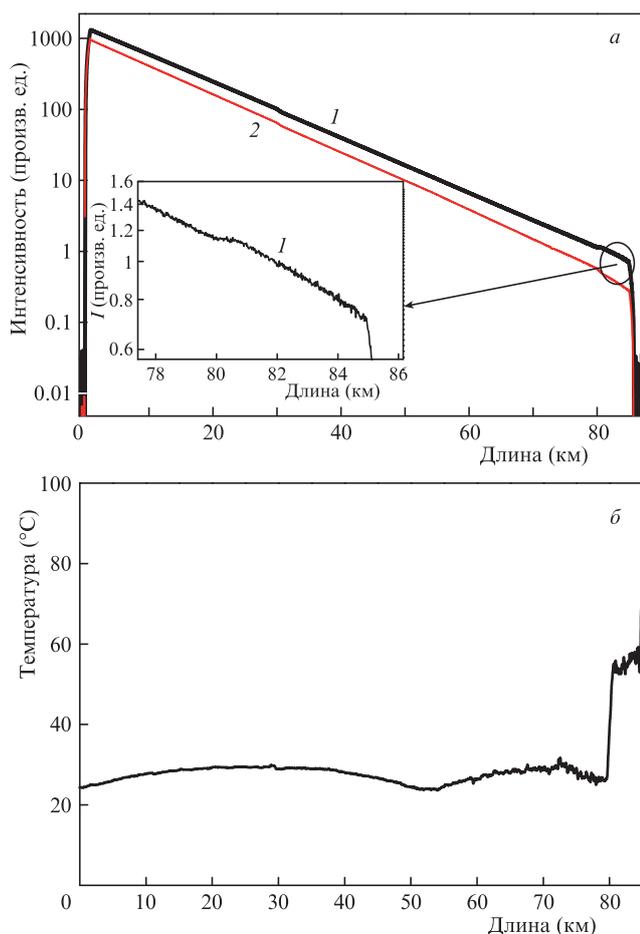


Рис.5. Рефлектограммы интенсивностей рассеяния антистоксовой (1) и рэлеевской (2) компонент (а), а также рассчитанное распределение температуры вдоль волокна (б).

торой регистрируется рэлеевское рассеяние, и на 1.6 мкм, на которой регистрируется антистоксова компонента КР (вместе с длиной волны в области 1.5 мкм).

5. Заключение

В работе продемонстрирована возможность измерения температуры с помощью волоконного сенсора на основе КР в одномодовом волокне протяженностью до 85 км. Отличительной особенностью данного датчика является полностью волоконная схема с источником зондирующего сигнала на длине волны 1.63 мкм. Благодаря переходу в спектральную область вблизи 1.6 мкм удалось

уменьшить потери антистоксовой компоненты КР света и увеличить потери стоксовой, что позволило поднять порог возникновения ВКР.

Максимальная длина измерительной линии составила 85 км при пространственном разрешении 800 м и точности измерения температуры 8°C. В дальнейшем оптимизация ВКР-усилителя и использование, например, симплекс-кодирования позволят существенно улучшить как пространственное, так и температурное разрешение. Данная система измерения температуры может применяться для мониторинга протечек в трубопроводах, идентификации точек нагрева в силовых линиях электропередач и в других протяженных объектах. В частности, прототип данного устройства опробован в составе системы плавки гололеда при оледенении грозотроса вдоль силовых линий, где полученное пространственное разрешение достаточно для мониторинга температуры протяженных участков с оледенением и без.

Авторы выражают благодарность И.Я.Вево за изготовление волоконных ответвителей. Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН с использованием оборудования ЦКП «Спектроскопия и оптика» Института автоматики и электрометрии СО РАН.

1. Кульчин Ю.Н. *Распределенные волоконно-оптические измерительные системы* (М.: Физматлит, 2004).
2. Yu F.T.S., Yin S. *Fiber Optic Sensors* (CRC Press, 2002).
3. Кузнецов А.Г., Бабин С.А., Шелемба И.С. *Квантовая электроника*, **39** (11), 1078 (2009) [*Quantum Electron.*, **39** (11), 1078 (2009)].
4. Stierlin R., Ricka J., Zysset B., Bättig R., Weber Heinz P., Binkert T., Borer W.J. *Appl. Opt.*, **26** (8), 1368 (1987).
5. Bharath Kumar Lagishetty, Balaji Srinivasan., in *Proc. ICOP 2009* (Chandigarh, India, 2009).
6. Karamehmedovic E., Feuchter T., in *Proc. Photonics West* (San Jose, CA, USA, 2004).
7. Muanenda Y.S., Taki M., Nannipieri T., et al. *J. Lightwave Technol.*, **34** (2), 342 (2016).
8. Long D.A. *Raman Spectroscopy* (New York: McGraw-Hill, 1977).
9. Meng Ling, Jiang Ming-shun, Sui Qing-mei. *Optoelectron. Lett.*, **4** (6), 0415 (2008).
10. Farahani M.A., Gogolla T. *J. Lightwave Technol.*, **17** (8), 1379 (1999).
11. Stoddart P.R., Cadusch P.J., Pearce J.B., Vukovic D., Nagarajah C.R., Booth D.J. *Meas. Sci. Technol.*, **16**, 1299 (2005).
12. Тозони О., Аксенов С.Б., Подивилов Е.В., Бабин С.А. *Квантовая электроника*, **40** (10), 887 (2010) [*Quantum Electron.*, **40** (10), 887 (2010)].
13. Исмагулов А.Е., Бабин С.А., Подивилов Е.В., Федорук М.П., Шелемба И.С., Штырина О.В. *Квантовая электроника*, **39** (8), 765 (2009) [*Quantum Electron.*, **39** (8), 765 (2009)].