

## ВОЛОКНО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Е.Ю. Кузнецова. О.В. Стукач  
Томский политехнический университет  
[katua1993k1@mail.ru](mailto:katua1993k1@mail.ru)

### Введение

Под волоконно-оптическим измерением температуры понимают применение оптоэлектронных приборов для измерения температуры, при которой стеклянные волокна используются в качестве линейных датчиков. Типичными случаями применения линейных волоконных температурных датчиков являются сферы, связанные с безопасностью, например, системы пожарного оповещения в автомобильных, железнодорожных или сервисных туннелях; термический контроль силовых кабелей и воздушных линий передач для оптимизации производственных отношений; повышение эффективности нефтяных и газовых скважин; обеспечение безопасного рабочего состояния промышленных индукционных плавильных печей; контроль герметичности контейнеров с сжиженным природным газом на судах в разгрузочных терминалах; обнаружение утечек на плотинах и запрудах; контроль температуры при химических процессах; обнаружение утечек в трубопроводах.

### Принцип работы оптоволоконного датчика

Физические воздействия на оптоволокно, такие как: температура, давление, сила натяжения - локально изменяют характеристики пропускания света и как следствие, приводят к изменению характеристик сигнала обратного отражения. В основе измерительных систем, основанных на оптоволоконных датчиках используется сравнение спектров и интенсивностей исходного лазерного излучения и излучения, рассеянного в обратном направлении, после прохождения по оптоволокну.

Технология волоконно-оптического измерения температуры была изобретена более 20 лет назад. Основные принципы измерения основаны на обнаружении обратного рассеяния света, например, на основе Рэлеевского [1], Рамановского [2], и Бриллюэновского [3] рассеяний. Подобные системы способны измерять температуру с высокой степенью точности на значительных расстояниях. Будучи нечувствительны к электромагнитным помехам волоконно-оптические системы представляют особый интерес для электротехнических систем, например, энергетических систем, кабелей и т.д.

#### А. Рамановское рассеяние

Оптические волокна изготовлены из легированного кварцевого стекла. Кварцевое стекло представляет собой разновидность двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) с аморфной твердотельной структурой. Температурные воздействия инициируют вибрации в молекулярной решетке. Когда свет попадает на термически возбужденные молекулы, происходит взаимодействие между световыми

частицами (фотонами) и электронами. Таким образом, в оптическом волокне происходит световое рассеяние, так же известное, как рамановское рассеяние. У рассеянного света есть спектральное изменение, эквивалентное частоте резонансных колебаний решетки [2], [4].

Обратное световое рассеяние состоит из нескольких спектральных составляющих:

- Рэлеевское рассеяние, с длиной волны аналогичной, используемой в лазерном источнике;
- Стоксовы компоненты Рамановского рассеяния с длиной волны большей, чем у используемого лазерного источника, при которых испускаются фотоны;
- Антистоксовы компоненты Рамановского рассеяния с меньшей длиной волны, по сравнению с Рэлеевским рассеянием, при которых фотоны поглощаются.

Интенсивность рассеяния так называемого антистоксова диапазона зависит от температуры, в то время как, стоксов диапазон от температуры практически не зависит. Локальная температура оптического волокна выводится из отношения антистоксовой и стоксовой интенсивностей света. Это показано на рис. 1, подход был разработан в 1980-х годах в Университете Саутгемптона, Великобритания [2].

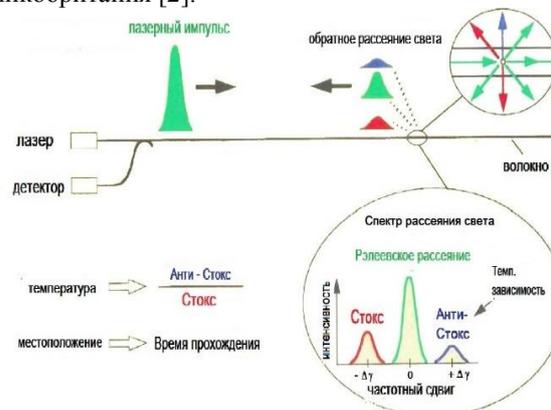


Рис. 1. Волоконно-оптическое измерение температуры на основе Рамановского рассеяния, полученное отношением антистоксовой и стоксовой интенсивностей света.

#### В. Бриллюэновское рассеяние

Бриллюэновские линии имеют спектральный сдвиг, вызванный акустическими колебаниями кристаллической решетки волокна и несущий в себе информацию о механических напряжениях и температурах, воздействующих на волокно. Бриллюэновское частотное смещение определяется частотой акустической волны  $\omega_A$  по формуле:

$$\gamma_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2n\gamma_A}{\lambda_0}, \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления;

$\gamma_A$  – скорость звука;

$\lambda_0$  – длина волны в вакууме.

Методика Бриллюэна может быть использована для измерения как температуры, так и для измерения деформации, но не одновременно.

### Сравнение технологий волконно-оптического измерения

В таблице 1 приведены сравнительный обзор различных технологий волконно-оптического измерения температуры.

Таблица 1. Сравнительный обзор различных технологий волконно-оптического измерения температуры.

Тип рассеяния	Релея	Рамана	Бриллюэна
Темп. Чувств., %/°C	0,54	0,8	0,01
Темп. Диапазон, °C	от 5 до 110	от 0 до 70	от -30 до 60
Точность, °C	1	10	1
Пространственное разрешение, м	1	3	от 3 до 5
Диапазон длинны волокна, м	170	1000	51000
Время измерения, с	2,5	40	4
Деформация, мкм	-	-	100

Из Таблицы 1 видно, что Рэлеевское рассеяние показывает лучшую точность, но оно ограничено с точки зрения диапазона длины волокна, который очень важен в наши дни для контролирования длинных кабелей, например, в подземных системах распределения энергии. Рассеяние Бриллюэна же в свою очередь обеспечивает лучший диапазон длины с самой высокой температурной чувствительностью и с относительно хорошим временем измерения. Рассеяние Бриллюэна может также измерять деформацию, которая не может быть измерена другими двумя методами. Тем не менее, невозможно измерить температуру и деформацию одновременно. Как правило, рассеяния Бриллюэна применяется либо для измерения температуры, либо для измерения деформации. Поэтому рассеянию Бриллюэна, вероятно, будет отдаваться предпочтение в будущих разработках, в качестве замены Рамановского рассеяния.

### Особенности работы с оптоволоконными датчиками измерения температуры

Основная сложность, с которой сталкиваются исследователи, занимающиеся температурными оптоволоконными датчиками – это малая интенсивность рассеянного света. Центральная линия на длине волны 1550 нм соответствует рэлеевскому рассеянию лазерного излучения, а две симметрично отстоящие компоненты на длинах волн ~1450 нм и ~1650 нм (антистокс и стокс, соответственно). Из-за того, что стекло является аморфным

веществом, спектральные максимумы, соответствующие колебательным возбуждениям уширены и перекрываются между собой. Интенсивность антистоксовой компоненты обратно рассеянного света, содержащей информацию о температуре в волокне, на 30 dB меньше чем интенсивность рэлеевского рассеяния. При этом максимальный уровень мощности зондирующего излучения ограничен такими нелинейными эффектами, как вынужденное рассеяние Манделштама-Бриллюэна и вынужденное комбинационное рассеяние света.

Для уменьшения шума, как правило, применяется многократное усреднение полученных сигналов. Многократное усреднение приводит к тому, что сенсорная система становится достаточно инерционной – т.е. для получения хорошего сигнала требуется достаточно долгое накопление сигнала. При этом сенсорная система будет неспособна регистрировать на быстрые температурные флуктуации, так как они будут усредняться по времени. Следовательно, необходим другой подход в уменьшении шума измеряемого сигнала. Например, при кодировании посылаемого в волоконную линию сигнала с последующим декодированием сигналов отражения можно добиться низкого уровня шума. Существует множество различных техник кодирования, но наиболее распространена, так называемая, техника симплекс-кодирования.

Симплекс-кодирование основано на кодах Адамара, которые относятся к локально декодируемым кодам. Суть кодирования заключается в равномерном «размазывании» закодированной информации по всем кодовым словам. Таким образом, слово, закодированное локально декодируемым кодом, можно восстановить при потере значительной части закодированных данных.

### Заключение

В будущем планируется применение симплекс-кодирования основанного на кодах Адамара и экспериментальное подтверждение преимущества данного метода перед усреднением сигнала для уменьшения уровня шума полученных сигналов.

### Литература

1. A. H. Hartog, "A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 1, pp. 498–509, 1983.
2. J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby, and J. N. Ross, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector," *Electron. Lett.*, vol. 21, pp. 569–570, 1985.
3. X. Bao, D. J. Webb, and D. A. Jackson, "Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 2, pp. 141–143, 1994.
4. A. H. Hartog, "Distributed temperature sensing in solid-core fibers," *Electron. Lett.*, vol. 21, pp. 1061–1062, 1985.