

УЛУЧШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

И.А. Ершов

ershov@corp.nstu.ru

НГТУ, г. Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация

Обработка сигнала в оптоволоконном датчике температуры оказывает серьезное влияние на метрологические характеристики прибора. Поэтому постоянное совершенствование алгоритма обработки сигнала — важный аспект сохранения конкурентоспособности. На примере оптоволоконного датчика температуры (производство ООО «Киплайн») на основе эффекта Рамана показано, как использование эффективных методов обработки сигнала может существенно уменьшить погрешность прибора. В качестве чувствительного элемента использовалось волокно длиной 8258 м, пространственное разрешение прибора 2 м, шум в сигнале распределяется по нормальному закону. Проведены измерения при температурах прибора 25,95 и 44,73 °С. С помощью линейного регрессионного анализа выявлено, что нагрев прибора вызывает наклон термограммы, который необходимо скорректировать. Для корректировки термограммы использована логарифмическая функция. Удалось уменьшить размах значений температуры по длине волокна от 3,47 до 2,35 °С, а СКО — от 0,579 до 0,392 °С. Помимо этого приведена зависимость переходного процесса от нагрева прибора и даны рекомендации по корректировке калибровочных коэффициентов

Ключевые слова

Оптоволоконный датчик, распределенный датчик температуры, метрологическая точность, регрессионный анализ, рамановское рассеяние, обработка сигналов

Поступила 30.08.2021

Принята 15.11.2021

© Автор(ы), 2022

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта № 20-08-00321*

Введение. С каждым годом оптоволоконные датчики температуры набирают все большую популярность. Для коммерческого применения обычно используются датчики, основанные на рамановском рассеянии [1]. Главным конкурентным преимуществом таких датчиков является воз-

возможность измерять температуру по всей длине волокна. Датчики невосприимчивы к электромагнитным помехам и имеют небольшой размер. Применение особого оптоволоконного датчика позволяет использовать датчики в суровых условиях и для измерения высоких температур. В силу этих преимуществ оптоволоконные датчики температуры могут использоваться для решения множества практических задач.

Оптоволоконные датчики температуры активно используются для мониторинга эксплуатации добывающих скважин [2]. В настоящей работе отмечены неоспоримые их преимущества для скважин со сложным заканчиванием. Возможность применения оптоволоконных датчиков температуры для медицинской радиочастотной абляции показана в [3]. Распределенные системы измерения (датчики) температуры могут также использоваться для обнаружения утечек в теплоносителе ядерного реактора [4], обеспечения безопасности нефтебазы в режиме реального времени [5] и пожарной безопасности ленточных конвейеров [6]. Вследствие невосприимчивости к электромагнитным помехам оптоволоконные датчики отлично подходят для мониторинга температуры на электростанциях [7].

Современные оптоволоконные датчики предназначены для широкого диапазона измеряемых температур. Это стало возможным благодаря использованию специального оптического волокна с металлическим покрытием. В работе [8] приведены результаты измерения экстремальных температур оптоволоконным датчиком. Для охлаждения волокна использовался жидкий азот, после чего волокно нагревали до $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем исследовали изменение сигнала при нагреве волокна до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате выявлено, что низкие температуры не вызывают заметных изменений в распространении сигнала. Однако при нагреве волокна более $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ обнаружено изменение слоя металлического покрытия и отмечено, что, начиная с температуры нагрева $187\text{ }^{\circ}\text{C}$, погрешность измерений увеличивалась с 5 до $11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. При использовании золотого покрытия датчик может измерять температуры до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. В [9] предложено использовать графеновое покрытие волокна для уменьшения времени реакции на изменение температуры.

Растущий спрос привел к увеличению числа изготовителей оптоволоконных датчиков температуры. На это также указывает разработка оптических волокон, ориентированных на использование в оптоволоконных датчиках температуры [10]. Обзор оптоволоконных датчиков температуры на основе рамановского рассеяния обратно отраженного света приведен в [11]. Для оценки предложено использовать следующие

метрологические характеристики: пространственное разрешение, абсолютную погрешность каждой точки оптического волокна, пространственную и временную дисперсии. Дана оценка эффективности пяти приборов обнаружения пожара, мониторинга хранилищ радиоактивных отходов и обнаружения утечек воды. Результаты исследования показали значительное расхождение между метрологическими характеристиками приборов. На основании этого сделан вывод, что оптоволоконный датчик температуры необходимо выбирать в зависимости от конечного применения.

В настоящее время конкуренция на рынке оптоволоконных датчиков растет и потребитель может выбирать прибор с наименьшей стоимостью, но удовлетворяющей в достаточной мере его потребности. Зачастую данный критерий является решающим, а потому нельзя оценивать исключительно метрологические характеристики. При разработке методов повышения метрологических характеристик всегда необходимо оценивать рентабельность. Улучшая аппаратную часть прибора для достижения высоких метрологических характеристик, можно потерять конкурентоспособность из-за увеличения себестоимости. Поэтому следует обратить особое внимание на программное обеспечение обработки сигнала.

О важности эффективной обработки сигнала изложено в [12], где рассмотрена проблема увеличения погрешности за счет изгиба волокна. Температурный профиль после места изгиба волокна претерпевает значительные изменения. Конечно, опытный специалист сразу обнаружит аномальное скачкообразное изменение, но это повысит требования к квалификации оператора, что негативно скажется на конкурентоспособности прибора. Можно также применить спектор Бриллюэна для поиска деформаций волокна, но внедрение данной технологии в прибор значительно увеличит его себестоимость. В [12] использовано сочетание метода эмпирической модовой декомпозиции (EMD) и преобразования Гилберта. При этом изгиб обнаружен с помощью стоксовой компоненты, поскольку она значительно менее чувствительна к изменению температуры, в отличие от антистоксовой компоненты. Таким образом, эффективная обработка сигнала способствует значительному снижению погрешности оптоволоконного датчика температуры.

С помощью метода регрессионного анализа можно рассчитать ширину нагреваемого участка волокна [13]. Авторы достаточно точно идентифицировали участок длиной 5 см, применяя датчик с пространственным разрешением 1 м. В качестве первого приближения использована полная ширина на уровне половины высоты (полуширина), далее с помощью полуширины

создана линейная регрессионная модель для определения длины нагретого участка. Увеличение пространственного разрешения благодаря использованию алгоритма обработки сигнала также рассмотрено в [14]. Отмечено, что удалось восстановить корректную форму сигнала при нагреве 30 см волокна с пространственным разрешением 1 м.

Обработка сигнала. Исследование проводилось на оптоволоконном датчике температуры (производство ООО «Киплайн»¹) на основе эффекта Рамана [15]. Набор данных состоит из 80 термограмм с датчика, которым проводились измерения по длине волокна на расстоянии 8258 м с пространственным разрешением 2 м. Пример термограммы приведен на рис. 1.

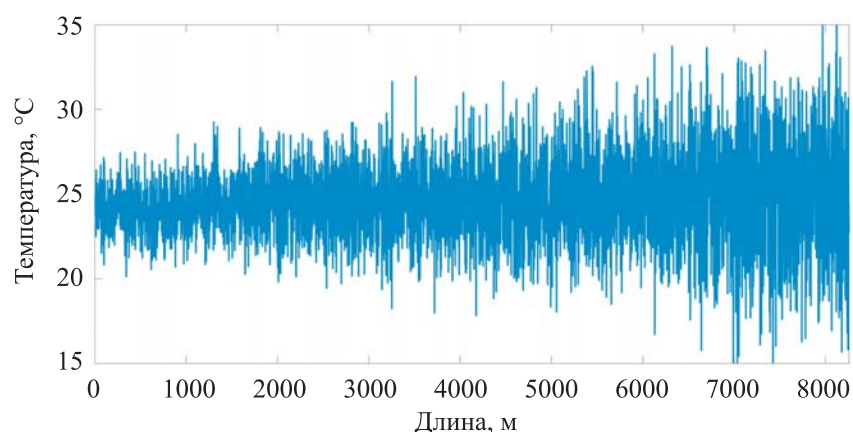


Рис. 1. Пример термограммы

Исследование нацелено на уменьшение погрешности измерений путем использования эффективных способов обработки сигнала. Температуру t волокна измеряли лабораторным термометром ЛТ-300 с абсолютной погрешностью $\pm 0,05$ °С, температуру T_{dts} прибора — датчиком температуры с абсолютной погрешностью $\pm 0,5$ °С. Условия двух серий измерений следующие: $T_{dts} = 25,95$ и $44,73$ °С; $t = 22,07$ и $23,56$ °С; число N термограмм составляло 20 и 60. Число термограмм для каждого случая отличается, поскольку ранее эмпирически обнаружено изменение наклона термограммы при увеличении температуры прибора.

Оптоволоконный датчик и волокно помещены в разные закрытые пространства и выдержаны в течение ~ 1 ч для стабилизации температуры. Большой разброс значений связан с характеристиками прибора, для уменьшения разброса значений обычно используется длительное усреднение реализаций. Схема эксперимента приведена на рис. 2.

¹ *Keepline: веб-сайт.* URL: <https://keepline.biz> (дата обращения: 24.08.2021).

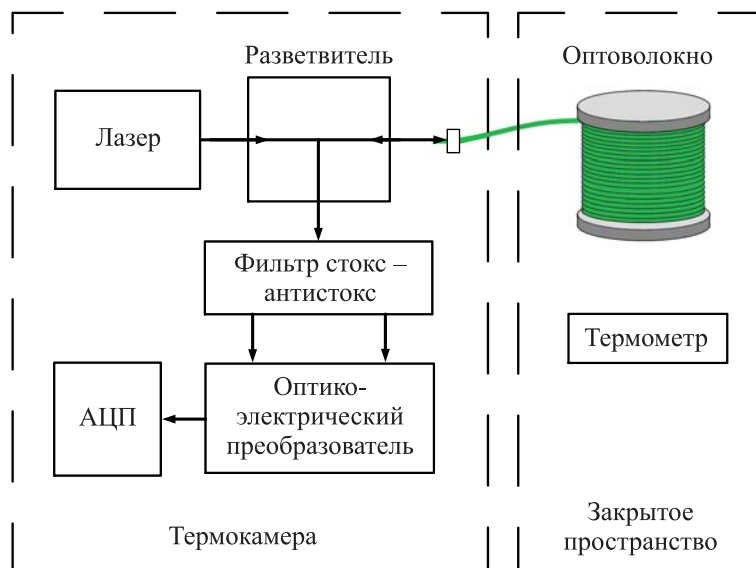


Рис. 2. Схема эксперимента

Первый этап обработки выборки — это проверка выборки на нормальность, что необходимо для обоснования использования среднего арифметического в качестве математического ожидания. Для этого используем выборку из 60 термограмм и построим гистограммы для четырех точек (4, 2000, 4000 и 6000 м) на волокне (рис. 3).

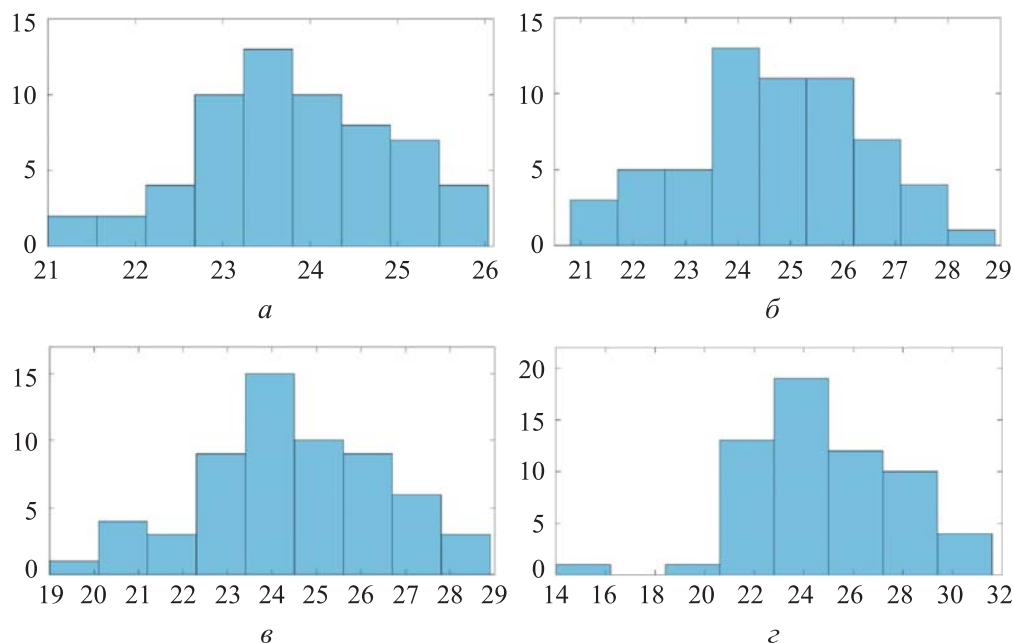


Рис. 3. График изменения СКО для четырех точек на волокне длиной 4, 2000, 4000 и 6000 м (а-г соответственно)

В результате анализа гистограмм на рис. 3 сформулирована гипотеза о том, что распределение является нормальным. Чтобы убедиться, что данные не противоречат гипотезе о нормальном распределении, используем тесты Шапиро — Уилка, Д'Агостино на K^2 и Андерсона — Дарлингга с уровнем значимости $\alpha = 0,05$. Графики значений статистик критериев проверки приведены на рис. 4.

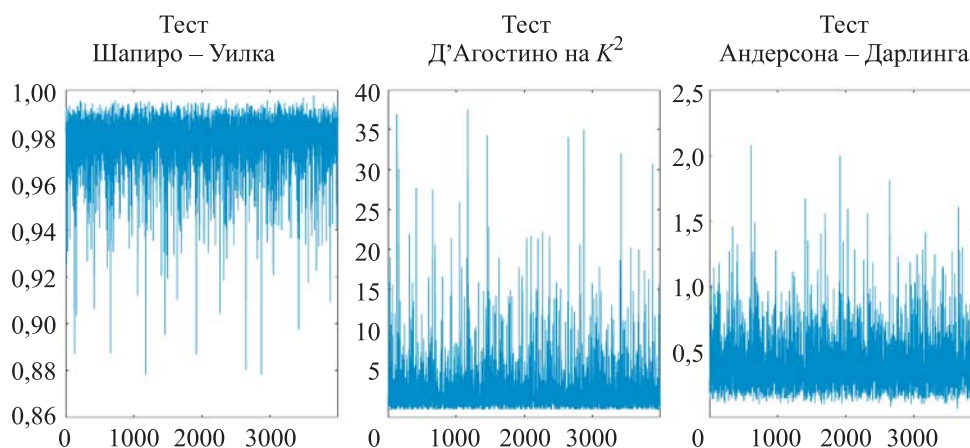


Рис. 4. Графики статистик критериев проверки гипотезы

Ввиду большого числа данных в качестве критерия используем долю точек, для которых основная гипотеза не была отклонена. В результате теста Шапиро — Уилка получено 93 %, теста Д'Агостино на K^2 — 91 %, теста Андерсона — Дарлингга — 94 %. На основании полученных результатов можно сделать вывод о корректности использования среднего арифметического в качестве математического ожидания для выборки, характеризующей температуру в каждой точке. Для первичной оценки используем линейный регрессионный анализ. В результате для $T_{dts} = 25,95$ и $44,73$ °C получены следующие формулы:

$$t_1 = 22,1051; \quad (1)$$

$$t_2 = 0,0002x + 23,9751, \quad (2)$$

где x — координата точки измерения на волокне. Результаты линейного регрессионного анализа приведены на рис. 5.

В соответствии с графиком можно предположить, что логарифмическая функция будет лучше описывать кривую, соответствующую $T_{dts} = 44,73$ °C. Используя нелинейный регрессионный анализ, запишем функцию

$$t_1 = 15,2735 + 1,01568 \ln(x \cdot 1,841 + 4155,19). \quad (3)$$

Результаты нелинейного регрессионного анализа приведены на рис. 6.

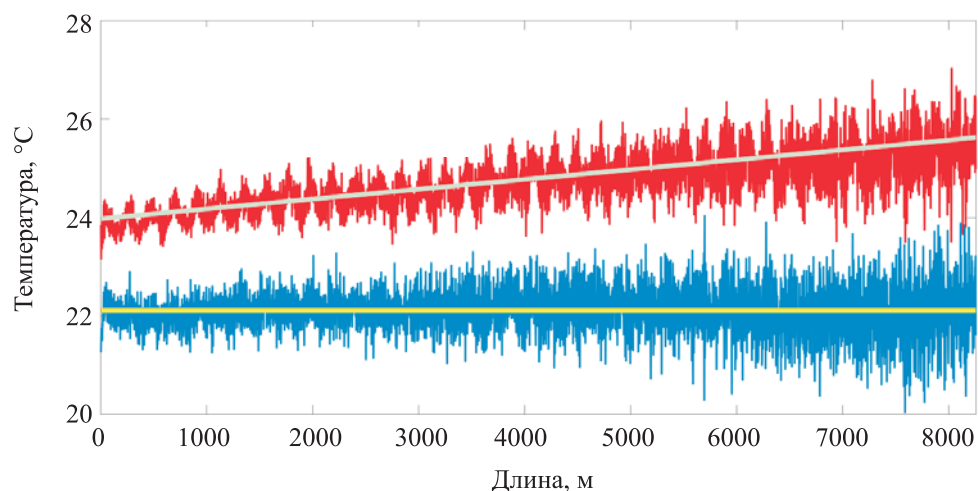


Рис. 5. Результаты линейного регрессионного анализа: термограммы синего и красного цвета — $T_{dts} = 25,95$ и $44,73$ °C; линейные регрессии (1) и (2) — голубая и желтая прямые

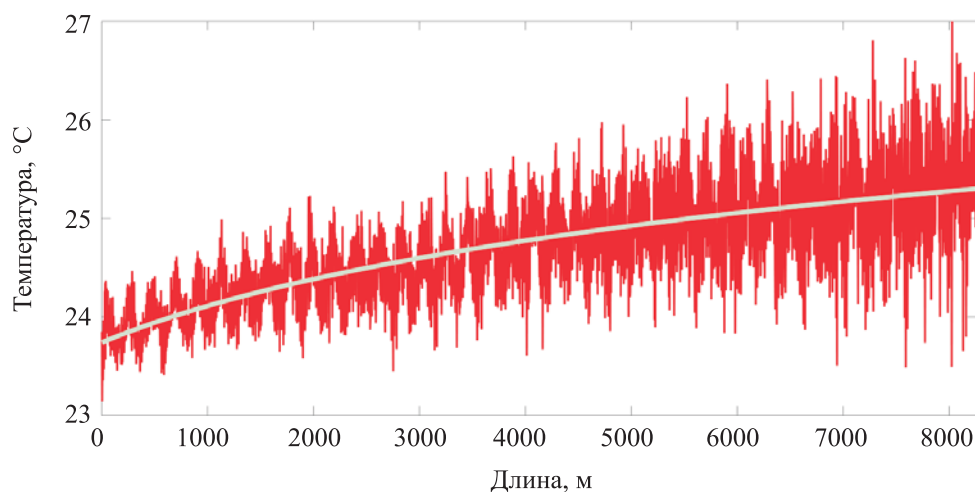


Рис. 6. Результаты нелинейного регрессионного анализа: $T_{dts} = 44,73$ °C; голубая кривая — нелинейная регрессия

Используя метод наименьших квадратов, оценим линейную и нелинейную модели. В результате для нелинейной и линейной моделей получены следующие значения функции: 634,8 и 683,6. На основании этого можно сделать вывод, что нелинейная модель лучше описывает поведение кривой. Однако нелинейность появляется только при значительном увеличении температуры прибора (см. рис. 5). Следовательно, для модели необходимо использовать переменные коэффициенты, которые зависят от температуры прибора:

$$t = a_0(T_{dts}) + a_1(T_{dts}) \ln(x \cdot 1,841 + 4155,19). \quad (4)$$

Найдем коэффициенты формулы (4) для описания термограммы, полученной при $T_{dts} = 25,95$ °С. Формула наиболее точно описывает поведение кривой при $a_0 = 21,9196$; $a_1 = 0,019967$. Для использования формул в качестве калибровочных функций необходимо преобразовать формулы температуры в погрешность измерений. Используем температуру волокна как действительное значение и вычтем ее из функций, получив функцию расчета абсолютной погрешности измерений для $T_{dts} = 25,95$ и $44,73$ °С:

$$\Delta t = -0,1504 + 0,019967 \ln(x \cdot 1,841 + 4155,19); \quad (5)$$

$$\Delta t = -8,2865 + 1,01568 \ln(x \cdot 1,841 + 4155,19). \quad (6)$$

Используя рассчитанные значения коэффициентов a_0 и a_1 , можно найти их зависимость от температуры прибора. Примем допущение, что зависимость линейна. Для проверки обоснованности данного допущения необходимо значительно большее число термограмм. В результате получим формулы расчета коэффициентов a_0 и a_1 :

$$a_0(T_{dts}) = -0,43323 T_{dts} + 11,09197; \quad (7)$$

$$a_1(T_{dts}) = 0,05302 T_{dts} - 1,35590. \quad (8)$$

Скорректируем значения термограмм, используя калибровочные функции. График погрешности для обычной и скорректированной термограмм при $T_{dts} = 44,73$ °С приведен на рис. 7. Графики для $T_{dts} = 25,95$ °С не приведены, поскольку значительного отличия между ними нет.

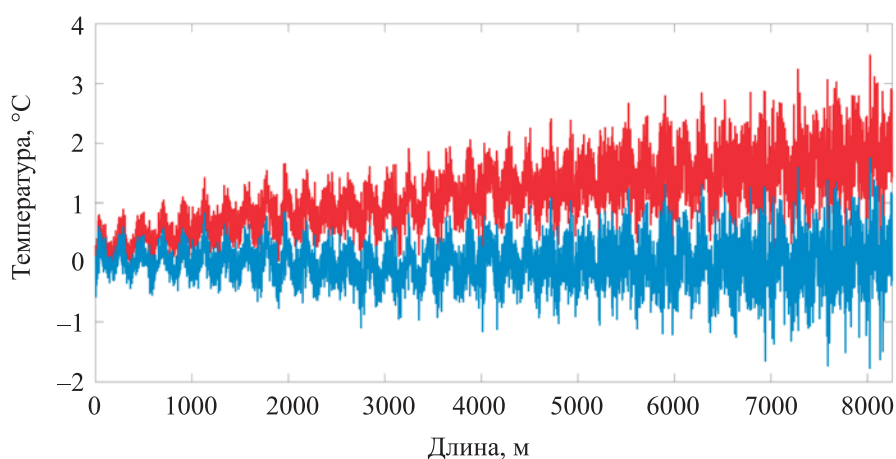


Рис. 7. Результаты использования калибровочной функции: термограмма красного цвета — обычная; синего — скорректированная

Если оценить математическое ожидание и СКО для скорректированной и обычной термограмм, то для скорректированной $\mu = 0,00006$ °С, СКО = 0,39219 °С, а для нескорректированной $\mu = 1,15111$ °С, СКО = 0,57891 °С. При принятом допущении о распределении данных по нормальному закону можно сделать вывод, что 99,7 % точек графика погрешности скорректированной термограммы находятся в интервале от -1,17651 до 1,17663 °С, тогда как для нескорректированной термограммы 99,7 % точек графика погрешности находятся в интервале от -0,58562 до 2,88784 °С.

Таким образом, с помощью калибровочной функции можно уменьшить погрешность прибора и увеличить максимальную температуру эксплуатации, которая в данный момент составляет 40 °С. Отметим, что всегда существуют аппаратные ограничения. Используемый прибор начинает работать некорректно после 50 °С.

Переходный процесс. При наличии возможности вносить изменения в программное обеспечение прибора необходимо обратить внимание на корректировку искажений сигнала, вызванных переходными процессами. График интенсивности стоксовой компоненты сигнала приведен на рис. 8.

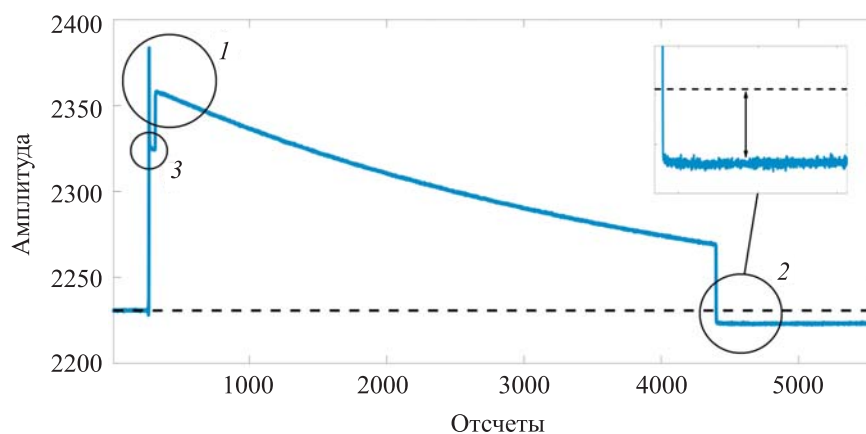


Рис. 8. Интенсивность стоксовой компоненты:

1 и 2 — области начала переходного процесса; 3 — область волокна с известной температурой (балласт)

По второму переходному процессу (область 2, см. рис. 8) можно сделать вывод, что постоянная времени достаточно велика. Это связано с наличием на схеме разделительного конденсатора большой емкости. Для корректировки сигнала используются калибровочные функции с коэффициентами corr_1 для антистокса и corr_2 для стокса. Корректировка,

закрывающаяся в добавлении компенсационного сигнала, основанного на моделировании переходных процессов в приборах данной модели, происходит на начальных этапах обработки сигналов. Экспериментально выявлена зависимость данных коэффициентов от температуры прибора. Зависимости corr_1 и corr_2 от температуры приведена на рис. 9.

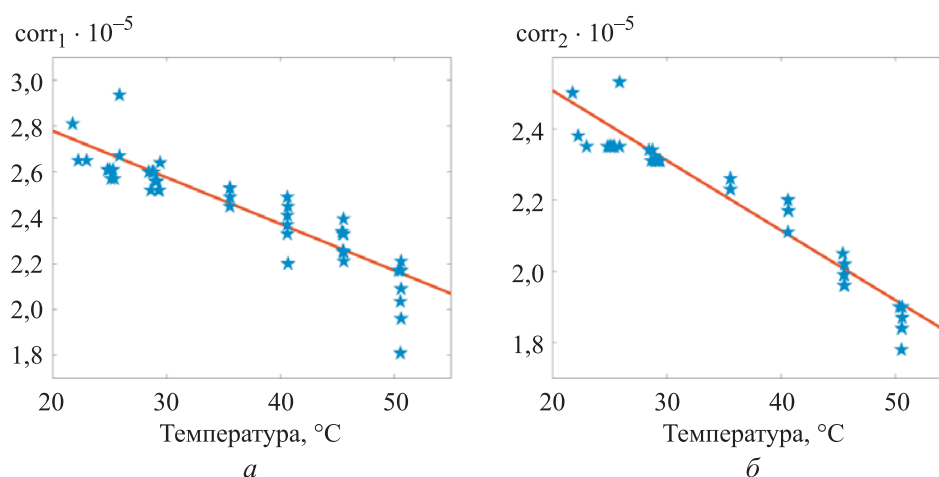


Рис. 9. Зависимости коэффициентов corr_1 (а) и corr_2 (б) от температуры:

— линейная регрессия

Отметим, что коэффициенты corr_1 и corr_2 обратно пропорциональны температуре прибора (см. рис. 9). В связи с этим при отклонении температуры прибора от температуры, при которой проводилась калибровка, возникает погрешность в результате изменений условий измерения. Одним из способов избавиться от этой составляющей погрешности является использование калибровочной функции. Однако гораздо эффективнее применение программы автоматического поиска коэффициентов, поскольку данное решение также решит проблему изменения калибровочных коэффициентов, со временем возникающую во множестве средств измерений. Программа перебирает коэффициенты corr_1 и corr_2 до достижения оптимальной формы сигнала. Оптимальная форма сигнала была найдена путем моделирования переходных процессов. Именно таким образом найдены коэффициенты, приведенные на рис. 9.

Заключение. В условиях конкуренции изготовители оптоволоконных датчиков температуры должны постоянно совершенствовать свою продукцию. Ключевыми характеристиками прибора всегда будут цена и погрешность. Одним из способов улучшения метрологических характеристик без значительного увеличения себестоимости является применение эффективных методов обработки сигнала. Для оптоволоконных

датчиков данный этап измерений особенно важен из-за высокого уровня шума, который невозможно значительно уменьшить без применения дорогостоящих технических средств. Показана необходимость автоматизации поиска калибровочных коэффициентов, связанная с их зависимостью от температуры прибора. С помощью нелинейного регрессионного анализа также удалось уменьшить значения температуры по длине волокна от 3,47 до 2,35 °С, а СКО от 0,579 до 0,392 °С. Помимо этого, используя эффективные методы обработки сигнала, получили возможность увеличить максимальную температуру эксплуатации прибора.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке ООО «Киплайн» и НГТУ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] De Pelegrin J., Bazzo J.P., Vieira da Costa I.B., et al. Total variation deconvolution of Raman distributed temperature sensing signals. *SBMO/IEEE MTT-S IMOC*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMOC43827.2019.9317415>
- [2] Ипатов А.И., Кременецкий М.И., Каешков И.С. и др. Опыт применения распределенной оптоволоконной термометрии при мониторинге эксплуатации добывающих скважин в компании «Газпром нефть». *ПРОнефть. Профессионально о нефти*, 2017, № 3, с. 55–64.
- [3] Tosi D., Poeggel S., Leen G., et al. Distributed fiber-optic sensors for thermal monitoring in radiofrequency thermal ablation in porcine phantom. *Sensors*, 2014, pp. 39–42. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6984927>
- [4] Pandian C., Kasinathan M., Sosamma S., et al. Raman distributed sensor system for temperature monitoring and leak detection in sodium circuits of FBR. *1st Int. Conf. Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications*, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2009.5503761>
- [5] Zhu S.L., Ge H., Pan J.V., et al. Application research of distributed optical fiber Raman temperature sensor in the security of oil depot. *OGC*, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/OGC.2015.7336874>
- [6] Hoff H. Using distributed fibre optic sensors for detecting fires and hot rollers on conveyor belts. *2nd OFSIS*, 2017, pp. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.1109/OFSIS.2017.9>
- [7] Hu C., Wang J., Zhang Z., et al. Application research of distributed optical fiber temperature sensor in power system. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 8311. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.905303>
- [8] Peixoto e Silva M.S., de Barros T.H.C., Alves H.P., et al. Evaluation of fiber optic Raman scattering distributed temperature sensor between –196 and 400 °C. *IEEE Sensors J.*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 1527–1533. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3016322>
- [9] Guo Y., Han B., Du J., et al. Kilometers long graphene coated optical fibers for fast temperature sensing. *Research*, 2021, vol. 2021, art. 5612850. DOI: <https://doi.org/10.34133/2021/5612850>

- [10] Li M., Li S., Stone J.S. Novel optical fibers for distributed sensor applications. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10323. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2272464>
- [11] Failleau G., Beaumont O., Razouk R., et al. A metrological comparison of Raman-distributed temperature sensors. *Measurement*, 2018, vol. 116, pp. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.041>
- [12] Saxena M.K., Jagannadha Raju S.D.V.S., Arya R., et al. Empirical mode decomposition-based detection of bend-induced error and its correction in a Raman optical fiber distributed temperature sensor. *IEEE Sensors J.*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 1243–1252. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2499242>
- [13] Silva L.C.B., Castellani C.E.S., Segatto M.E.V., et al. High accuracy hot spot size estimation technique for Raman Distributed Temperature Sensors. *SBMO/IEEE MTT-S IMOC*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMOC43827.2019.9317584>
- [14] Bazzo J.P., Pipa D.R., Martelli C., et al. Improving spatial resolution of Raman DTS using total variation deconvolution. *IEEE Sensors J.*, 2016, vol. 16, no. 11, pp. 4425–4430. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2539279>
- [15] Стукач О.В., Сычев И.В. Обработка сигнала в распределенных оптоволоконных датчиках температуры на комбинационном рассеянии света: обзор новых результатов. *Радиотехника*, 2018, № 3, с. 86–92.

Ершов Иван Анатольевич — ассистент кафедры защиты информации факультета автоматики и вычислительной техники НГТУ (Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, д. 20).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ершов И.А. Улучшение метрологических характеристик оптоволоконного датчика температуры путем использования эффективных методов обработки сигнала. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2022, № 2 (139), с. 112–125. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-2-112-125>

**IMPROVING THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS
OF A FIBER-OPTIC TEMPERATURE SENSOR
BY EFFECTIVE SIGNAL PROCESSING METHODS**

I.A. Ershov

ershov@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

Signal processing in a fiber optic temperature sensor has a major impact on the metrological performance of the instrument. Therefore, continuous improvement of the signal processing algorithm is an important aspect of remaining competitive. Using a fiber-optic temperature sensor based on the Raman effect manu-

Keywords

Fiber optic sensor, distributed temperature sensor, measurement accuracy, regression analysis, Raman scattering, signal processing

factured by Keepline LLC, it is shown how the application of effective signal processing methods can significantly reduce the instrument error. A fiber 8258 m long was used as a sensitive element, the spatial resolution of the instrument was 2 m. It is found that the noise in the signal is distributed according to the normal law. Measurements were made at instrument temperatures of 25.95 and 44.73 °C. Using linear regression analysis, it was found that heating the instrument causes a slope of the thermogram, which needs to be corrected. A logarithmic function was used to correct the thermogram. Thus, it was possible to reduce the range of temperature values along the length of the fiber from 3.47 to 2.35 °C, and RMS from 0.579 to 0.392 °C. In addition, the dependence of the transient process on the heating of the instrument is given and recommendations for adjusting the calibration coefficients are provided

Received 30.08.2021

Accepted 15.11.2021

© Author(s), 2022

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 20-08-00321

REFERENCES

- [1] De Pelegrin J., Bazzo J.P., Vieira da Costa I.B., et al. Total variation deconvolution of Raman distributed temperature sensing signals. *SBMO/IEEE MTT-S IMOC*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMOC43827.2019.9317415>
- [2] Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I., Kaeshkov I.S., et al. Experience in the application of distributed fiber optic thermometry for monitoring wells in the company Gazprom Neft. *PROneft'. Professional'no o nefti*, 2017, no. 3, pp. 55–64 (in Russ.).
- [3] Tosi D., Poeggel S., Leen G., et al. Distributed fiber-optic sensors for thermal monitoring in radiofrequency thermal ablation in porcine phantom. *Sensors*, 2014, pp. 39–42. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6984927>
- [4] Pandian C., Kasinathan M., Sosamma S., et al. Raman distributed sensor system for temperature monitoring and leak detection in sodium circuits of FBR. *1st Int. Conf. Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications*, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2009.5503761>
- [5] Zhu S.L., Ge H., Pan J.V., et al. Application research of distributed optical fiber Raman temperature sensor in the security of oil depot. *OGC*, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/OGC.2015.7336874>
- [6] Hoff H. Using distributed fibre optic sensors for detecting fires and hot rollers on conveyor belts. *2nd OFSIS*, 2017, pp. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.1109/OFSIS.2017.9>
- [7] Hu C., Wang J., Zhang Z., et al. Application research of distributed optical fiber temperature sensor in power system. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 8311. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.905303>

- [8] Peixoto e Silva M.S., de Barros T.H.C., Alves H.P., et al. Evaluation of fiber optic Raman scattering distributed temperature sensor between -196 and 400 °C. *IEEE Sensors J.*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 1527–1533. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3016322>
- [9] Guo Y., Han B., Du J., et al. Kilometers long graphene coated optical fibers for fast temperature sensing. *Research*, 2021, vol. 2021, art. 5612850. DOI: <https://doi.org/10.34133/2021/5612850>
- [10] Li M., Li S., Stone J.S. Novel optical fibers for distributed sensor applications. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10323. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2272464>
- [11] Failleau G., Beaumont O., Razouk R., et al. A metrological comparison of Raman-distributed temperature sensors. *Measurement*, 2018, vol. 116, pp. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.041>
- [12] Saxena M.K., Jagannadha Raju S.D.V.S., Arya R., et al. empirical mode decomposition-based detection of bend-induced error and its correction in a Raman optical fiber distributed temperature sensor. *IEEE Sensors J.*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 1243–1252. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2499242>
- [13] Silva L.C.B., Castellani C.E.S., Segatto M.E.V., et al. High accuracy hot spot size estimation technique for Raman Distributed Temperature Sensors. *SBMO/IEEE MTT-S IMOC*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMOC43827.2019.9317584>
- [14] Bazzo J.P., Pipa D.R., Martelli C., et al. Improving spatial resolution of Raman DTS using total variation deconvolution. *IEEE Sensors J.*, 2016, vol. 16, no. 11, pp. 4425–4430. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2539279>
- [15] Stukach O.V., Sychev I.V. Signal processing in the distributed temperature sensors by Raman backscatter: review of new outcomes. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2018, no. 3, pp. 86–92 (in Russ.).

Ershov I.A. — Assist. Lecturer, Department of Information Security, Novosibirsk State Technical University (K. Marksa prospekt 20, Novosibirsk, 630073 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ershov I.A. Improving the metrological characteristics of a fiber-optic temperature sensor by effective signal processing methods. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2022, no. 2 (139), pp. 112–125 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-2-112-125>