

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

В статье рассматривается обработка сигналов с оптоволоконного датчика температуры при помощи экстремальной фильтрации и вейвлет-фильтрации. Целью данной работы является нахождение способа повышения быстродействия оптоволоконного датчика температуры путем использования эффективных методов обработки сигнала. Несмотря на то, что вопрос быстродействия прибора особенно важен в системах мониторинга опасных производственных объектов, в современной литературе он рассматривается редко. Результаты исследования показали, что использование экстремальной фильтрации и вейвлет-фильтрации позволяет значительно сократить количество реализаций, необходимых для выделения полезного сигнала из шума.

Ключевые слова: оптоволоконный датчик, распределенный датчик температуры, метрологическая точность, эмпирическая модовая декомпозиция, вейвлет-преобразование, рамановское рассеяние, мониторинг потенциально опасных объектов.

Введение. Благодаря ряду неотъемлемых преимуществ область применения оптоволоконных датчиков постоянно растет. К ним относятся малый вес и размер, простая конструкция и устойчивость к электромагнитным помехам [1]. Основным преимуществом по сравнению с классическими датчиками является получение информации с множества точек. В качестве чувствительного элемента и линии передачи используется оптическое волокно, что значительно упрощает процесс измерений. Благодаря этому данная технология является незаменимой в системах мониторинга больших объектов, таких как нефтяные и газовые скважины, электростанции, трубопроводы, линии электропередачи [2].

Оптоволоконные датчики температуры могут быть использованы в сочетании с оптоволоконными датчиками деформации для предупреждения возникновения карстовых воронок. В статье [3] сказано, что при использовании бриллюэновского оптоволоконного датчика деформации изменение температуры окружающей среды приводит к возникновению неопределенности при расчете сдвига частоты Бриллюэна. Чтобы избежать повышения погрешности измерений, необходимо разместить возле каждого оптоволоконного датчика деформации оптоволоконный датчик температуры. Таким образом появится возможность использовать метод температурной компенсации. При этом температурный датчик был защищен металлической оболочкой из стальных полос.

Во время эксперимента разница температур достигала 24 °С, поэтому метод температурной компенсации значительно увеличил точность гео-

метрической модели после обрушения карстовой воронки.

Во многих системах мониторинга требуется измерять не только температуру, но и вибрацию. Авторам статьи [4] при помощи обычного мультиплексора с разделением по длине волны удалось объединить в одном оптоволоконном датчике возможность измерять температуру и вибрацию. Измерение вибрации производится путем представления волокна в виде множества малых секций, представляющих собой набор дискретных отражателей. Основываясь на таком представлении, можно рассчитать величину интерференционного поля обратно-отраженного света, полученного в результате рэлеевского рассеяния. Измерение температуры основано на рассеянии Рамана. Обратнотраженный свет в волокне содержит антистоксовую и стоксовую компоненты, величина которых зависит от температуры волокна. Локализация производится путем перевода времени между генерацией импульса и попаданием обратно-отраженного света на фотоприемник. Одним из ограничений данного метода является разница в затухании антистоксовой и стоксовой компонент, обусловленная разницей в длине волны [5]. Погрешность измерений прямо пропорциональна расстоянию от фотоприемника до точки измерений на волокне. Помимо этого, изгибы приводят к появлению в сигнале шумов, что также негативно сказывается на точности результатов измерений.

Авторам статьи [6] удалось совместить в одном приборе датчик температуры и датчик магнитного поля благодаря использованию микроструктурированного оптического волокна. Исследователями

было показано, что изменение преломления магнитной жидкости зависит от изменения магнитного поля и температуры. В данной работе удалось достичь температурной чувствительности 113,1 нм/°С. Авторы утверждают, что данная технология позволяет повысить чувствительность прибора и обеспечивает широкую перспективу применения датчиков на базе микроструктурированного оптического волокна.

Постановка задачи. Одной из проблем разработки оптоволоконного датчика является низкое отношение сигнал/шум на этапе оптико-электронного преобразования. Наиболее популярным решением является использование усреднения тысяч реализаций сигнала. Суть данного способа заключается в нахождении среднего арифметического мгновенных значений сигнала, формирующих ансамбль реализаций. Методы фильтрации при этом применяются к усредненному сигналу. В результате потребитель сталкивается с выбором: пожертвовать точностью в пользу быстродействия или пожертвовать быстродействием в пользу точности. Быстродействие наиболее важно в системах обеспечения пожарной безопасности, описанной в статье [7]. К примеру, при усреднении четырёх тысяч реализаций можно добиться среднеквадратического отклонения порядка 3 °С для длины волокна 2 километра. Этого вполне достаточно, чтобы зафиксировать возгорание, но ни о какой точности измерений речи идти не может. Обратная ситуация — использование оптоволоконной термометрии при мониторинге добывающих скважин. В работе [8] показано, как длительность замера влияет на уменьшение среднеквадратического отклонения. Приведены графики для 5, 10 и 15 минут. В данном случае быстродействие не так важно, и достаточно получить профиль температуры раз в несколько минут.

Задача повышения быстродействия прибора — это, в первую очередь, вопрос конкурентоспособности предприятия, которое его производит. Получение нескольких тысяч реализаций антистоксовой и стоксовой компонент и последующее их усреднение занимает значительный промежуток времени, что крайне негативно сказывается на быстродействии прибора [9]. При этом постоянное повышение производительности вычислительных устройств не является решением проблемы и в результате вычисления могут занимать недопустимо много времени [10]. Поэтому целью данной статьи является рассмотрение способов, позволяющих уменьшить количество необходимых реализаций для выделения полезного сигнала из шума.

Теория. Один из известных методов разложения сигнала по эмпирическим модам (EMD). Метод активно применяется для сигналов различной физической природы. Описание алгоритма данного метода приведено в статье [11].

При применении декомпозиции предполагается, что сигнал состоит из аддитивной комбинации внутренних колебаний. Данные колебания представляют собой функции внутренних мод, которые извлекаются из сигнала. При этом они составляют базис, полная сумма которого позволяет восстановить исходный сигнал. Алгоритм состоит из следующих шагов: выделение всех локальных экстремумов сигнала; построение огибающих экстремумов; вычисление среднего огибающих; извлечение «деталей», путем разницы между исходным сигналом и средним огибающих; повторение процедуры для остатков.

С практической точки зрения, метод достаточно трудоемкий, что негативно скажется на быстродействии системы. Для решения данной проблемы существует метод экстремальной фильтрации [12]. По алгоритму он аналогичен методу EMD, но значительно упрощает промежуточные вычисления. Знакопеременную составляющую выделяют путем центрирования относительно скользящего среднего значения [13]. Используя только экстремальные значения числового ряда, производят сглаживание сигнала оператором, найденного по формуле (1):

$$e_n = 0,25x_{EXn-1} + 0,5x_{EXn} + 0,25x_{EXn+1}, \quad (1)$$

где x_{EXn-1} , x_{EXn} , x_{EXn+1} — это локальные экстремумы.

Высокочастотная составляющая выделяется по формуле (2):

$$h_n = -0,25x_{EXn-1} + 0,5x_{EXn} - 0,25x_{EXn+1}. \quad (2)$$

Данные операции повторяют для e_n до получения приемлемого результата. Главное преимущество метода экстремальной фильтрации по сравнению с методов EMD показано в формуле (2). Это значение соответствует извлечению «деталей», для нахождения которых в методе EMD необходимо строить огибающие сигналы по точкам локальных экстремумов, для чего обычно используют сплайн-интерполяцию, что может негативно сказаться на быстродействии прибора, использующего данный метод.

Другим популярным методом выявления полезного сигнала является вейвлет-фильтрация. С каждым годом все более очевидно, что частотно-временного разрешения классического Фурье-анализа уже недостаточно для решения практических задач. В качестве альтернативы часто используют вейвлет-функции, которые отличаются свойством частотно-временной локализации сигналов [14]. По аналогии с Фурье-преобразованием сигнал восстанавливается из выбранных полос частот. Ключевой особенностью вейвлет-преобразования является использование вейвлетов — математических функций, которые локальны во времени и по частоте. На текущий момент существует множество вейвлетов для решения практических задач. В данной статье будет использован вейвлет из семейства вейвлетов Добеши.

Результаты экспериментов. В статье используются три набора данных, представляющих собой сигналы, характеризующие интенсивность стоксовой и антистоксовой компонент оптоволоконного датчика температуры. Наборы отличаются количеством усреднения реализаций, а именно 15 реализа-

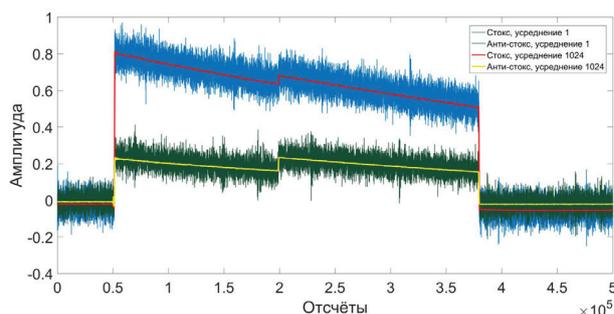


Рис. 1. Исходные сигналы

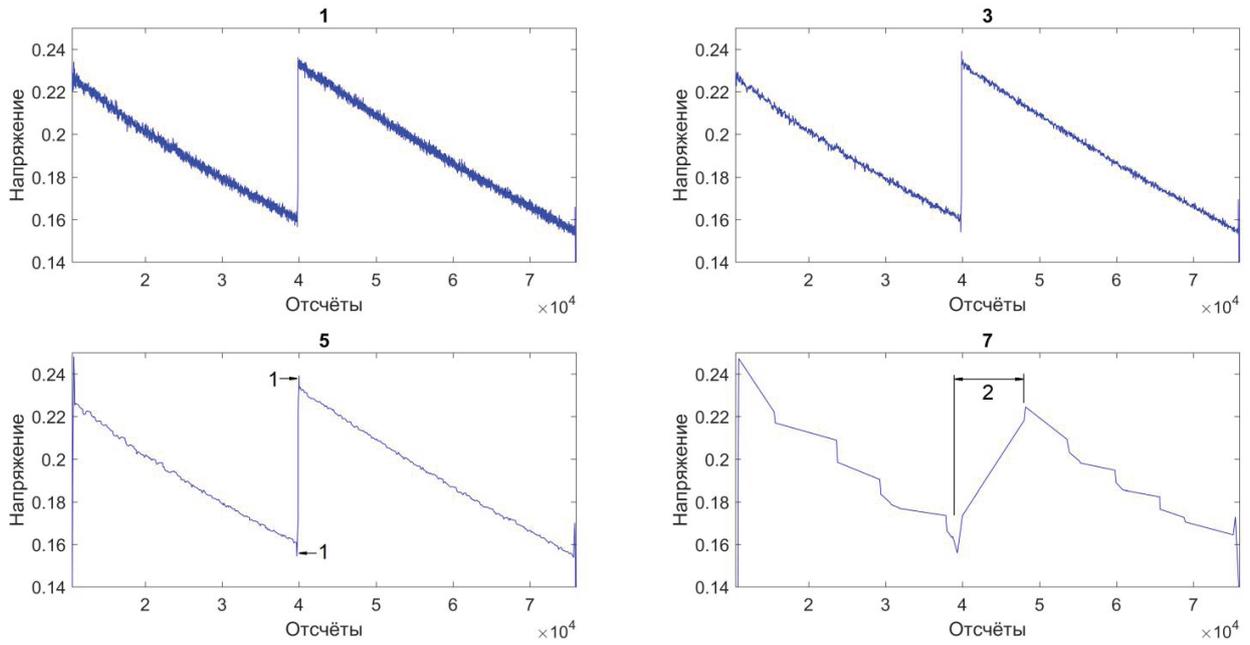


Рис. 2. Итерации алгоритма экстремальной фильтрации

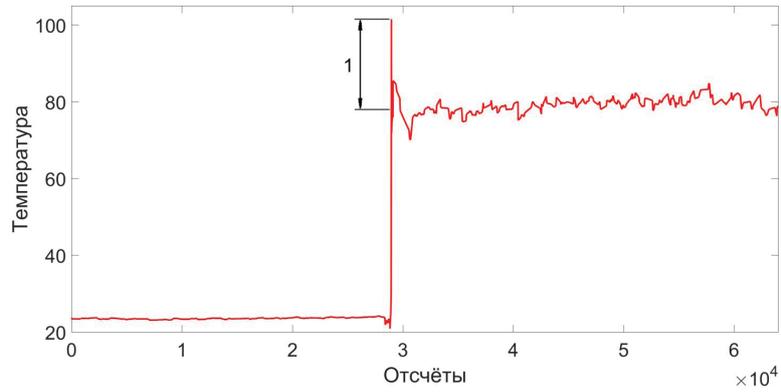


Рис. 3. График температуры из сигналов после экстремальной фильтрации

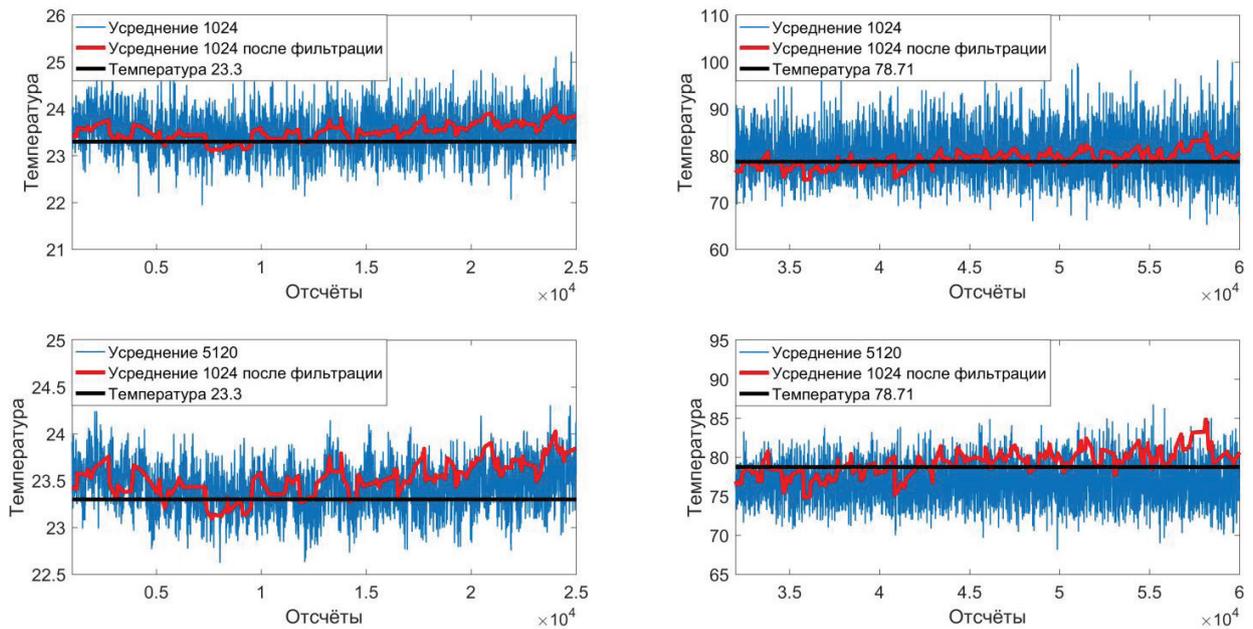


Рис. 4. Графики температуры из сигналов после экстремальной фильтрации

ций с однократным усреднением, одна реализация с усреднением 1024 и одна реализация с усреднением 5120. Пример сигнала антистоксовой и стоксовой компонент показан на рис. 1. Под обозначением «Усреднение N» подразумевается среднее арифметическое мгновенных значений N сигналов (реализаций). Поскольку в данном масштабе усреднение 5120 и 1024 реализаций будут практически аналогичны, первая не показана на графике.

На графике показана рабочая область, которая характеризует геометрическое расположение точки на волокне. В последующих графиках интервалы вне рабочей области будут отброшены.

Для обработки сигналов использован метод экстремальной фильтрации, который подразумевает последовательное повторение алгоритма. Демонстрация работы метода приведена на рис. 2. В данном случае показана обработка антистоксовой компоненты с усреднением 1024. В заголовках графиков написан номер итерации, после которой был получен результат.

На рис. 2 показаны осцилляции, возникающие после малого количества итераций в местах резкого изменения сигнала (график 5) и увеличение фронта сигнала после большого количества итераций (график 7), связанное с уменьшением количества отсчетов после фильтрации. Это ключевые недостатки данного метода. Для систем мониторинга увеличение фронта намного значительнее появления осцилляций, поэтому для решения данной проблемы необходимо заменить область изменения сигнала после большого количества итераций (цифра 2) областью сигнала, полученного после меньшего количества итераций. Таким образом, пространственное разрешение пострадает незначительно.

После фильтрации стоксовой и антистоксовой компонент необходимо рассчитать значения температуры для всей длины волокна. Зависимость

интенсивностей антистоксовой и стоксовой компонент от температуры определяется как [15]:

$$R(T) = I_{as}/I_s = (\lambda_{as}/\lambda_s)^4 \exp(-hc\Delta/(kT)),$$

где I_{as} , I_s — интенсивности антистоксовой и стоксовой компонент; λ_{as} , λ_s — длины волн антистоксовой и стоксовой компонент; h — постоянная Планка; c — скорость света; Δ — величина сдвига по частоте в материале волокна; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Проведем экстремальную фильтрацию сигнала после усреднения 1024 реализаций (рис. 3). Цифрой 1 показаны появившиеся после фильтрации осцилляции, о которых упоминалось ранее. Несмотря на это, до и после области изменения сигнала использование метода дает хороший результат, что показано на рис. 4. На графиках показано сравнение рассчитанной температуры из сигнала после экстремальной фильтрации и из сигналов после усреднений 1024 и 5120. Волокно нагревалось до температур 23,3 °C и 78,71 °C. Измерения проводились лабораторным термометром ЛТ-300, пределы допускаемой основной абсолютной погрешности которого составляют $\pm 0,05$ °C. Из графиков на рис. 4 видно, что, благодаря экстремальной фильтрации, была значительно уменьшена погрешность измерений по сравнению с обычным усреднением реализаций. Графики сравнения с температурой, полученной при усреднении 5120 реализаций, показывают возможность использования данного метода для увеличения быстродействия прибора за счет уменьшения количества используемых реализаций.

Далее выделим полезный сигнал, используя 15 реализаций. Для этого необходимо применить метод экстремальной фильтрации к каждой из реализаций. Далее усреднить полученные сигнала

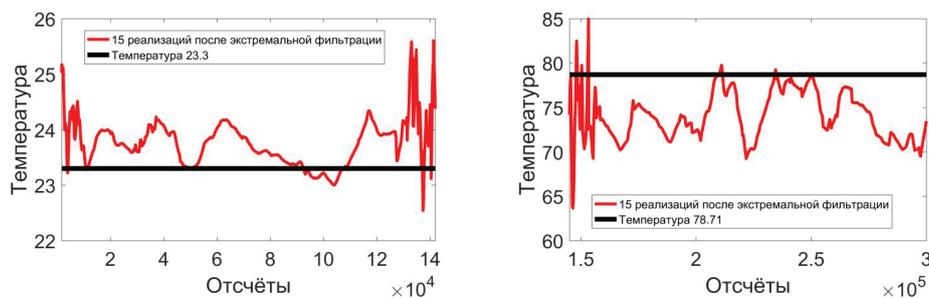


Рис. 5. Графики температуры из сигналов после экстремальной фильтрации

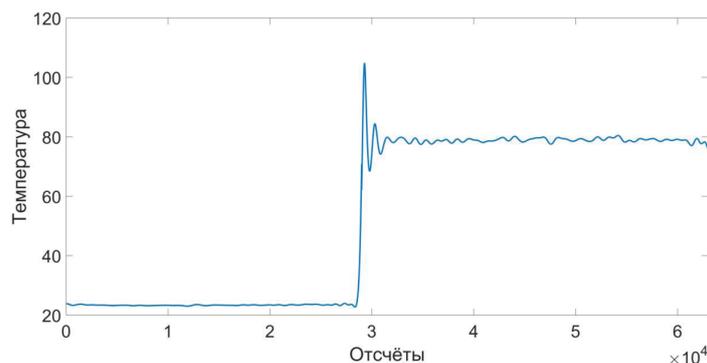


Рис. 6. График температуры из сигналов после вейвлет-фильтрации

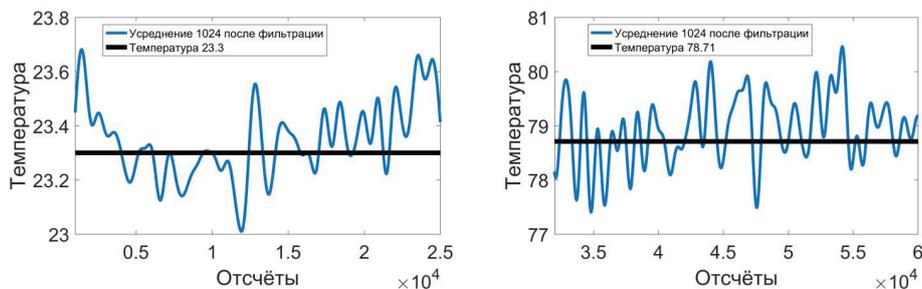


Рис. 7. Графики температуры из сигналов после вейвлет-фильтрации

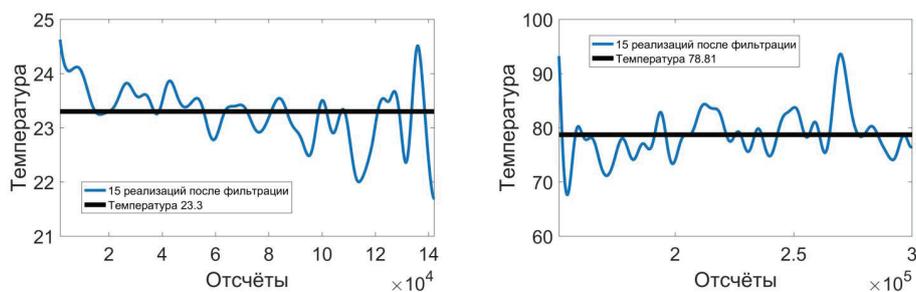


Рис. 8. Графики температуры из сигналов после вейвлет-фильтрации

лы стока и антистока и рассчитать температуру. В результате данных операций получаем графики температуры, показанные на рис. 5.

В первой области погрешность у большей части сигнала находится в пределах от $-0,3$ °C до $1,1$ °C. В начале и конце области погрешность достигает $-0,7$ °C и $2,3$ °C. Это связано с алгоритмом замены областей во время изменения сигнала для сохранения пространственного разрешения, описанного ранее. Во второй области большая часть сигнала находится в пределах от $-9,5$ до 1 . Связано это с повышением уровня шума, которое возникает из-за отдаления от приемника точки волокна, которой соответствует значение температуры.

Далее будет использована фильтрация сигнала на базе вейвлет-преобразования. Данный алгоритм отлично реализован в среде разработки LabVIEW. Основным блоком для решения данной задачи является «Multiresolution Analysis», который использует дискретное вейвлет-преобразование (DWT) для разложения сигнала на высокочастотные компоненты и восстановления сигнала из выбранных полос частот.

Для решения такого рода задач подходят вейвлеты Добеши, поскольку они отлично подходят для сигналов с высоким уровнем шума [16]. В данном случае будет использован вейвлет Добеши 14 (db14) с уровнем разложения 12.

Применим данный метод для фильтрации анти-стоксовой и стоксовой компонент и рассчитаем температуру. Результат показан на рис. 6. На данном графике сразу заметна та же проблема, что и при экстремальной фильтрации, — появление осцилляций при резком изменении сигнала. Графики температуры до и после области изменения сигнала показаны на рис. 7.

В первой области погрешность у большей части сигнала находится в пределах от $-0,9$ °C до $0,7$ °C. В начале и конце области погрешность достигает $-1,5$ °C и $1,3$ °C. Во второй области погрешность достигает $15,1$ °C в центральной части. Можно сделать вывод о том, что в первой области, где уро-

вень шумов значительно ниже, вейвлет-фильтрация и экстремальная фильтрация смогли достаточно точно идентифицировать сигнал. Однако во второй области, где уровень шума возрос за счет отдаления от приемника и повышения уровня сигнала, оба метода оказались неэффективны. Стоит учитывать, что на практике, зачастую, используют тысячи реализаций, поэтому идентификация даже первой области сигнала по 15 реализациям является хорошим результатом.

Выводы. Результаты экстремальной фильтрации показали, что метод позволяет уменьшить количество реализаций для выявления полезного сигнала. При этом экстремальная фильтрация не имеет в своем алгоритме сложных математических вычислений, что благоприятно скажется на быстродействии прибора, в котором используется данный метод. Недостатком экстремальной фильтрации является уменьшение количества отсчетов у отфильтрованного сигнала, что делает невозможным применение метода для фильтрации сигналов с малым количеством отсчетов.

В оптоволоконных датчиках температуры, как правило, данная проблема не возникает. Также результаты показали, что метод достаточно эффективен для выделения полезного сигнала из 15 реализаций с однократным усреднением при нагреве волокна до температуры $23,3$ °C.

Результаты вейвлет-фильтрации показали эффективность данного метода в задаче уменьшения количества реализаций. Недостатком данного метода является необходимость поиска оптимальных параметров разложения сигнала, таких как уровень разложения и используемый вейвлет. Данному этапу необходимо уделять особое внимание, поскольку эффективность использования конкретного вейвлета для разных сигналов сильно варьируется. Оптимальные параметры разложения позволяют выделить полезный сигнал из высокого уровня шума даже при использовании всего 15 реализаций с однократным усреднением при температуре волокна $23,3$ °C.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00321.

Библиографический список

1. Wang Zh., Ye J., Zhao Ch. [et al.]. Design of large-mode-area single-mode optical fiber with lowering bending loss for Raman distributed temperature sensor // *Optical Fiber Technology*. 2013. Vol. 19. Issue 6. P. 671–676. DOI: 10.1016/j.yofte.2013.10.008.
2. Silva L. C. B., Castellani C. E. S., Segatto M. E. V. [et al.]. Analytical investigation of the receiver for Raman-based distributed temperature sensors // *Optical Fiber Technology*. 2021. Vol. 63. 102484. DOI: 10.1016/j.yofte.2021.102484.
3. Chen H., He J., Xue Y. [et al.]. Experimental study on sinkhole collapse monitoring based on distributed Brillouin optical fiber sensor // *Optik*. 2020. Vol. 216. 164825. DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.164825.
4. Zhou Zh., Tian L., Han Y. [et al.]. Distributed vibration and temperature simultaneous sensing using one optical fiber // *Optics Communications*. 2021. Vol. 487. 126801. DOI: 10.1016/j.optcom.2021.126801.
5. Wang Z., Sun X., Xue Q. [et al.]. An optical fiber-folded distributed temperature sensor based on Raman backscattering // *Optics & Laser Technology*. 2017. Vol. 93. P. 224–227. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.03.001.
6. Wang E., Cheng P., Li J. [et al.]. High-sensitivity temperature and magnetic sensor based on magnetic fluid and liquid ethanol filled micro-structured optical fiber // *Optical Fiber Technology*. 2020. Vol. 55. 102161. DOI: 10.1016/j.yofte.2020.102161.
7. Юрченко В. М. К вопросу пожарной безопасности ленточных конвейеров // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016. № 2. С. 134–144.
8. 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 (5). С. 55–64.
9. Ершов И. А., Стукач О. В., Мясникова Н. В. [и др.]. Повышение пространственного разрешения метода экстремальной фильтрации // *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сб. тр. XVII Междунар. науч.-практ. конф.* 2020. С. 275–279.
10. Makarashvili V., Merzari E., Obabko A. [et al.]. A performance analysis of ensemble averaging for high fidelity turbulence simulations at the strong scaling limit // *Computer Physics Communications*. 2017. Vol. 219. P. 236–245. DOI: 10.1016/j.cpc.2017.05.023.
11. Рудницкий А. Г., Рудницкая А. А. Использование метода эмпирических мод для улучшения прогноза цен на золото методом локальной аппроксимации // *Экономика и предпринимательство*. 2013. № 2 (31). С. 95–107.
12. Мясникова Н. В., Берестень М. П., Цыпин Б. В. [и др.]. *Экспресс-анализ сигналов в инженерных задачах: моногр.* Москва: Физматлит, 2016. 184 с. ISBN 978-5-9221-1688-6.
13. Myasnikova N. V., Beresten M. P., Myasnikova M. G. Development of Decomposition Methods for Empirical Modes Based on Extremal Filtration // *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, March 11–13, 2020. Moscow, 2020. DOI: 10.1109/MWENT47943.2020.9067378.
14. Беспалов Д. А. Вейвлет-фильтрация сигналов адаптивными порогами // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2007. № 2 (138). С. 13–15.
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.
16. Kabanov A. A., Nikonova G. V. Gesture recognition system based on electromyography signals // *IOP Conf. Series: Journal of Physics*. 2021. Vol. 1791. 012100. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012100.

ЕРШОВ Иван Анатольевич, ассистент кафедры защиты информации.

AutorID (РИНЦ): 937739

ORCID: 0000-0003-1524-6508

AuthorID (SCOPUS): 57193403344

ResearcherID: ABE-4644-2020

Адрес для переписки: ershov@corp.nstu.ru

Для цитирования

Ершов И. А. Повышение быстродействия оптоволоконного датчика температуры путем использования эффективных методов фильтрации сигнала // *Омский научный вестник*. 2021. № 3 (177). С. 89–94. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-89-94.

Статья поступила в редакцию 08.04.2021 г.

© И. А. Ершов