ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 4, с. 96–101

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 535.361

ДОСТИЖЕНИЕ 85-КИЛОМЕТРОВОЙ ДАЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕФОРМАЦИИ (ТЕМПЕРАТУРЫ) С ПОМОЩЬЮ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ РЭЛЕЕВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ[1]

© 2020 г. М. А. Таранов[a,b,*], Б. Г. Горшков[c], А. Э. Алексеев[b]

[a] *Общество с ограниченной ответственностью "ПетроФайбер"*
Россия, 301664, Новомосковск Тульской обл., Клинский проезд, 7

[b] *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН*
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

[c] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН*
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

**e-mail: tarma@petrofibre.ru*

Поступила в редакцию 10.02.2020 г.
После доработки 25.02.2020 г.
Принята к публикации 26.02.2020 г.

Продемонстрирована возможность измерения деформации (температуры) на дальностях до 85 км с доступом к оптическому волокну с одного конца при помощи технологии низкокогерентной рэлеевской рефлектометрии. Указанная дальность обеспечена использованием рамановского усиления излучения в комбинации с усилением с помощью встроенных в измеряемую линию коротких сегментов волокна, легированного эрбием.

Возможность перестройки низкокогерентного источника в широком интервале длин волн позволила проводить измерения деформации в диапазоне 500 мкм · м$^{-1}$, что эквивалентно 56°C в единицах температуры. При времени единичного измерения 10 мин и пространственном разрешении 2.6 м стандартная неопределенность измерений деформации составила 3.8 мкм · м$^{-1}$, температуры – 0.42°C.

DOI: 10.31857/S0032816220040187

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределенные измерения деформации (температуры) являются современным высокоинформативным методом мониторинга структурного состояния (Structural Health Monitoring – SHM) объектов, имеющих значительные размеры: мостов, трубопроводов, плотин, эстакад и других сооружений инфраструктуры. Традиционно для этих целей используются распределенные датчики, действие которых основано на регистрации рассеяния Мандельштама–Бриллюэна: BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer), а также BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analyzer) [1, 2].

Последние отличаются высокой технической сложностью и используют петлевую (loop) конфигурацию волоконно-оптической линии, измерения в которой производятся только на половине длины. В этом смысле BOTDR обладают преимуществом, поскольку для их работы требуется однонаправленная (single-ended) линия.

Было продемонстрировано, что для BOTDR за счет использования встроенного в линию усилителя на основе оптического волокна, легированного эрбием (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA), достижима дальность действия до 50 км [3]. При этом пространственное разрешение составило 5 м, а стандартная неопределенность измерений деформации – 23 мкм · м$^{-1}$, температуры – 1.08°C.

Такие точностные показатели типичны для коммерческих BOTDR, однако не всегда удовлетворяют требованиям мониторинга объектов инфраструктуры. Дальнейшее увеличение дальности ограничено нелинейными эффектами, которые приводят к быстрому истощению (depletion) распространяющегося излучения (по мощности и форме спектра) [3].

Сравнительно новыми являются датчики механических и температурных воздействий, основанные на регистрации и сопоставлении друг с

[1] Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции "Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020" (http://or-2020.perms.ru/, 22–24 сентября, Россия, Пермь).

другом спектров рассеяния Рэлея [4–6]. В работе [7] нами предложена технология использования низкокогерентной рэлеевской рефлектометрии с перестройкой длины волны излучения с помощью управляемого от компьютера узкополосного фильтра, выполненного по технологии микроэлектромеханическая система (м.э.м.с.).

Такой фильтр позволил изменять длину волны в довольно широком интервале (±3 нм относительно 1558 нм), обеспечив тем самым возможность измерений в промышленном диапазоне величин деформации (сотен мкм · м$^{-1}$) и температуры (десятков градусов Цельсия) оптического волокна (о.в.). При пространственном разрешении порядка 1 м стандартная неопределенность измерений составила 2.2 мкм · м$^{-1}$ (0.24°C); дальность действия – 8 км. Использование рамановского усиления в измеряемом о.в. позволило увеличить дальность до 25 км, которой все еще может быть недостаточно, например, для мониторинга нефте- и газопроводов.

Измерительные характеристики изученного в [7] датчика ограничены, главным образом, нелинейными эффектами в о.в., приводящими к уширению спектра зондирующего излучения [8]. При некотором их уровне удается достичь удовлетворительных точностных показателей на дальности до 25 км.

Ранее продемонстрировано, что совместное применение рамановского усиления и усиления за счет встроенных в волоконно-оптическую линию коротких сегментов волокна, легированного эрбием (Erbium Doped Fiber – EDF), позволяет существенно (до 100 км) увеличить дальность действия распределенного датчика вибраций (Distributed Vibration Sensor – DVS) [9]. Ввиду того что разработанная нами технология низкокогерентной рефлектометрии использует только С-диапазон длин волн (1530–1565 нм), есть основания полагать, что применение указанных в [9] мер позволит значительно улучшить метрологические характеристики описанной в [8] схемы.

Цель настоящей работы состояла в максимальном увеличении дальности действия распределенного датчика деформации (температуры) путем использования низкокогерентной рефлектометрии одновременно с рамановским усилением и за счет дистанционно накачиваемых, встроенных в линию эрбиевых усилителей (Remotely Optically Pumped Amplifier – ROPA).

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Принцип действия датчиков деформации (температуры) на основе рэлеевской рефлектометрии строится на том, что при растяжении/сжатии, а также нагревании/охлаждении о.в. происходит смещение спектров рассеяния Рэлея. Под этим термином принято понимать спектр мощности обратно рассеянного излучения с выбранной пространственной ячейки (элемента пространственного разрешения) о.в., зарегистрированный в процессе перестройки длины волны зондирующего излучения.

С точки зрения рефлектометрии такой спектр представляет собой поперечное (вдоль оси длин волн) сечение массива рефлектограмм в интересующей продольной координате (ось расстояний). При условии, что приложенное воздействие – изменение натяжения или температуры – распределено равномерно вдоль пространственной ячейки о.в., смещение спектра рассеяния Рэлея относительно исходного положения пропорционально этому воздействию [4].

Таким образом, задача измерений сводится к определению величины смещения спектра с последующим ее пересчетом в искомые единицы, используя следующие коэффициенты чувствительности: к деформации – 1.2 пм (мкм · м$^{-1}$)$^{-1}$ или температуре – 10.8 пм · °C^{-1} (в С-диапазоне длин волн) [7]. Величина смещения может быть рассчитана, например, с помощью корреляционного анализа, подробно описанного в [5, 7].

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался работающий на длине волны 1558 нм суперлюминесцентный диод *СЛД* марки SLD-761 (Superlum, Ирландия) с максимальной мощностью 1 мВт и непрерывным спектром шириной 15 нм (полная ширина на половине высоты (п.ш.п.в.)).

Генерируемые *СЛД* оптические импульсы подавались на вход широкополосного усилителя $У_1$ на основе волокна, легированного эрбием, после чего подвергались спектральной селекции с помощью перестраиваемого м.э.м.с.-фильтра $ПФ_1$ марки MTF500A (DiCon Fiberoptics, США) с шириной полосы пропускания 0.35 нм (п.ш.п.в.). Таким образом, $ПФ_1$ выступал формирователем спектра зондирующего излучения.

Акустооптический модулятор *АОМ* позволял пропускать импульсы далее в оптическую схему, блокируя нестационарное спонтанное излучение $У_1$ – мешающий фактор при фотоприеме сигнала обратного рассеяния.

Поляризационный скремблер $ПС_1$ марки PSM-002 (General Photonics, США) использовался для деполяризации излучения, которое затем подавалось на вход усилителя $У_2$, конструктивно схожего с $У_1$, для компенсации потерь в *АОМ* (порядка 6 дБ).

Сформированное трактом $СЛД–У_1–ПФ_1–АОМ–ПС_1–У_2$ зондирующее излучение вводилось в измеряемую волоконно-оптическую линию через циркулятор *ОЦ* и одно из плеч спектрального

мультиплексора *СМ* (с диапазоном пропускания 1529–1630 нм). Через второе плечо *СМ* (1460–1510 нм) от лазера *ЛН* (FITEL FOL1425 с рабочей длиной волны 1480 нм, Furukawa Electric Co., Япония) подавалось излучение накачки для организации усиления в линии. Скремблер $ПС_2$, аналогичный $ПС_1$, был включен в схему для деполяризации излучения *ЛН*.

Измеряемая линия состояла из четырех соединенных между собой бухт одномодового о.в. длиной по 25 км ($Б_1$, $Б_2$ и $Б_4$) и 10 км ($Б_3$), соответствующего спецификации ITU-T G.652. Рамановское усиление организовывалось только в $Б_1$.

Для усиления излучения с использованием удаленной накачки на входе бухт $Б_2$ и $Б_4$ размещались сегменты легированного эрбием волокна $ЭВ_1$ и $ЭВ_2$ (ROPA). Оконечный сегмент линии *ОС* представлял собой бухту длиной около 200 м и предшествующую ей прямую 9-метровую секцию, размещавшуюся в механизме, позволявшем изменять ее деформацию с высокой точностью.

Обратно рассеянное в линии излучение через *ОЦ* подавалось на вход перестраиваемого м.э.м.с.-фильтра $ПФ_2$ марки MTF500B (DiCon Fiberoptics, США), ширина полосы пропускания которого составляла 0.17 нм (п.ш.п.в.). Затем оно регистрировалось фотоприемником *ФП* – модулем на основе лавинного фотодиода. Электрический сигнал *ФП* с полосой 16 МГц трансформировался в цифровой вид аналого-цифровым преобразователем *АЦП*, после чего подавался в центральный процессор *ЦП* для обработки.

Помимо обработки, *ЦП* осуществлял управление $ПФ_1$ и $ПФ_2$ через общую шину (отмечена на рис. 1 штрихпунктиром), согласовывая тем самым спектр пропускания приемного тракта со спектром зондирующего излучения. Элемент задержки *ЭЗ* обеспечивал отпирание и запирание *АОМ* синхронно с приходом импульса излучения от *СЛД*.

Частота работы *АЦП* 100 МГц задавала величину шага выборки по оси расстояний, равную 1.02 м с учетом группового показателя преломления о.в. (приблизительно 1.47 в С-диапазоне длин волн). Длительность импульса *СЛД* была приблизительно 25 нс (п.ш.п.в.); частота повторения определялась длиной измеряемой волоконной линии.

$У_1$ и $У_2$ были настроены таким образом, что импульсная мощность излучения на входе *ОЦ* достигала 1300 мВт. Дальнейшее ее увеличение приводило к ухудшению точностных характеристик. Мощность излучения *ЛН* составляла 380 мВт. При этом длины $ЭВ_1$ (1.5 м) и $ЭВ_2$ (3 м) были подобраны так, чтобы сигнал обратного рассеяния из $Б_2$–$Б_4$ был энергетически сопоставим с таковым из $Б_1$.

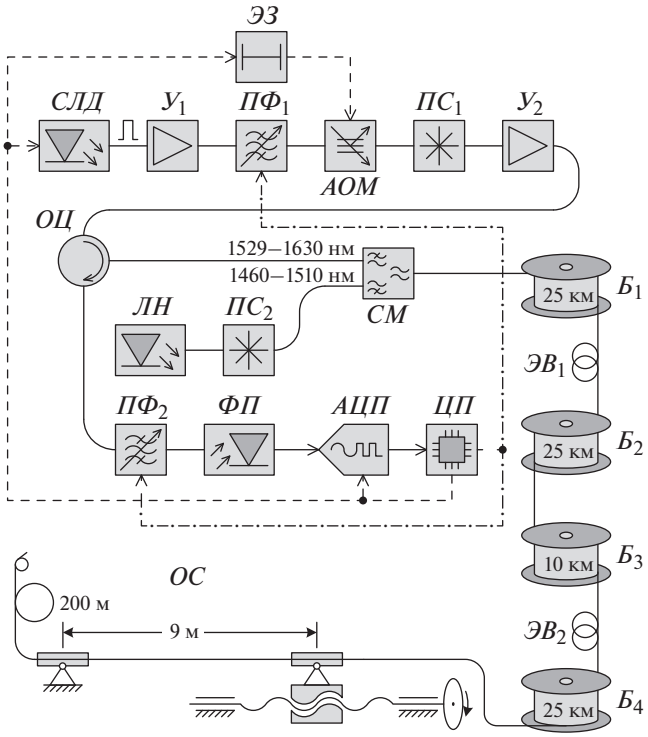

Рис. 1. Схема экспериментальной установки. *СЛД* – суперлюминесцентный диод; $У_1$, $У_2$ – оптические усилители на основе волокна, легированного эрбием; $ПФ_1$, $ПФ_2$ – перестраиваемые м.э.м.с.-фильтры; *АОМ* – акустооптический модулятор; $ПС_1$, $ПС_2$ – поляризационные скремблеры; *ОЦ* – оптический циркулятор; *ЛН* – лазер накачки; *СМ* – спектральный мультиплексор; $Б_1$–$Б_4$ – бухты о.в.; $ЭВ_1$, $ЭВ_2$ – секции волокна, легированного эрбием; *ОС* – оконечный сегмент; *ФП* – фотоприемник; *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь; *ЦП* – центральный процессор; *ЭЗ* – элемент задержки. Штриховой линией обозначена шина синхронизации; штрихпунктирной – шина управления перестраиваемыми фильтрами.

Принятые меры позволили получить в целом оптимальное отношение сигнал/шум в регистрируемых спектрах рассеяния Рэлея по всей длине измеряемой линии. Пространственное разрешение составляло приблизительно 2.6 м (с учетом группового показателя преломления о.в., равного 1.47).

На рис. 2 приведена типичная рефлектограмма, полученная с помощью экспериментальной установки. Присутствующие в ней флуктуации с размахом около 10% от средней мощности характерны для низкокогерентной рефлектометрии [7]. Форма сигнала из $Б_1$ обусловлена, с одной стороны, рамановским усилением в этой бухте, с другой – фазовой самомодуляцией и 4-волновым смешением, доминирующими в начале бухты (резкий пик на первых 700–800 м) [8].

Измерения проводились в следующей последовательности: регистрировались спектры рассеяния Рэлея при исходных условиях (так называемые

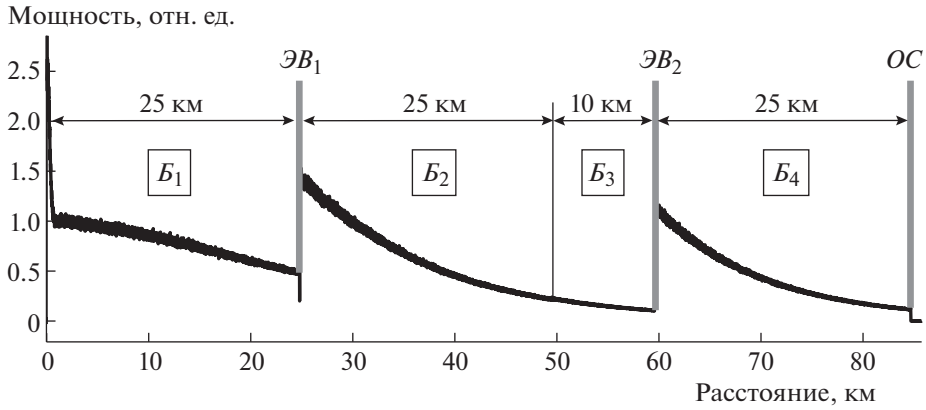

Рис. 2. Типичная рефлектограмма, регистрируемая экспериментальной установкой (длина волны 1558 нм). $Б_1$–$Б_4$ – бухты о.в.; $ЭВ_1$, $ЭВ_2$ – секции волокна, легированного эрбием; *ОС* – оконечный сегмент.

опорные спектры), затем натяжение сегмента *ОС* длиной 9 м увеличивалось, после чего проводилась повторная регистрация спектров (измерительные). Диапазон перестройки длины волны составлял 1555–1561 нм при исходных условиях и 1556.5–1559.5 нм при повторной регистрации; шаг был выбран равным 0.05 нм. Время регистрации опорных спектров составляло 20 мин, измерительных – 10 мин.

Поскольку для серии измерений достаточно было однократной регистрации опорных спектров, время единичного измерения фактически ограничивалось только периодом сбора измерительных спектров. Проводя корреляционный анализ накопленных данных, *ЦП* рассчитывал искомую величину смещения измерительного спектра относительно опорного для каждой точки волоконно-оптической линии, пересчитывая затем это смещение в единицы деформации. Диапазон перестройки длины волны для регистрации опорных спектров был выбран вдвое большим, чем для регистрации измерительных, во избежание деградации взаимно-корреляционной функции спектров при измерении натяжения 9-метровой секции о.в.

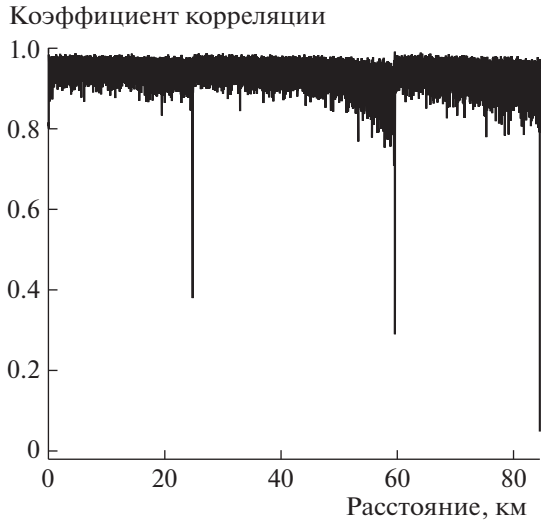

Рис. 3. Коэффициент корреляции (максимальное значение нормированной взаимно-корреляционной функции) опорных и измерительных спектров вдоль волоконно-оптической линии. Сильные выбросы вниз соответствуют неинформативным участкам с $ЭВ_1$ и $ЭВ_2$.

Получаемые с помощью экспериментальной установки опорные и измерительные спектры отличались высокой степенью взаимной корреляции (характеризуется коэффициентом корреляции, рис. 3) вдоль всей волоконно-оптической линии, что косвенно свидетельствовало о хороших измерительных характеристиках устройства.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для оценки качества работы экспериментальной установки была проведена серия измерений деформации 9-метровой секции *ОС*. С помощью механизма, содержащего микрометрический винт, схематично изображенного на рис. 1, величина деформации ступенчато повышалась до 500 мкм · м$^{-1}$ с шагом 100 мкм · м$^{-1}$. Расчет деформации проводился по зарегистрированным на каждом этапе измерительным спектрам. Опорные же спектры были накоплены предварительно – до оказания воздействия на секцию. Результаты одного из таких измерений представлены на рис. 4.

Как видно, измерительные шумы возрастают при приближении к концам $Б_1$, $Б_3$ и *ОС*. Их среднеквадратическое отклонение, равное стандартной неопределенности измерений, в худшем случае (конец $Б_3$ и *ОС*) составляет около 3.8 мкм · м$^{-1}$. Показания экспериментальной установки в пре-

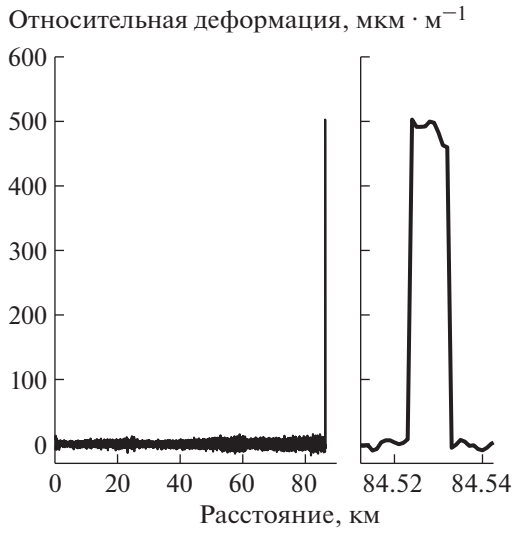

Рис. 4. Измеренное изменение относительной деформации вдоль волоконно-оптической линии (вставка соответствует местоположению натягиваемой секции; заданная деформация 500 мкм · м$^{-1}$; размерности единиц – те же, что и на основном графике). Неинформативные результаты в местах расположения $ЭВ_1$ и $ЭВ_2$ удалены.

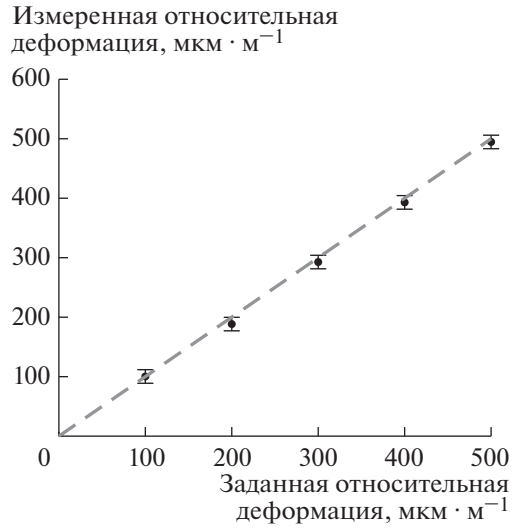

Рис. 5. Зависимость между измеренной деформацией 9-метровой секции *ОС* и ее реальными значениями (штриховой линией отмечена идеализированная характеристика; перемычки соответствуют диапазону ±3 стандартных неопределенности – ±11.4 мкм · м$^{-1}$).

делах 9-метровой секции соответствуют ее реальной деформации (500 мкм · м$^{-1}$).

На рис. 5 приведена зависимость между измеренной деформацией и ее реальными значениями. Высокая линейность и низкая измерительная неопределенность говорят о хорошем качестве экспериментальной установки как датчика.

Неравномерность измерительных шумов вдоль волоконно-оптической линии обусловливает зависимость неопределенности измерений от расстояния. Рис. 6 дает наглядное представление о характере такой зависимости. Изображенная оценка получена методом скользящего среднеквадратического отклонения по 500 отсчетам, что соответствует пространственной протяженности 510 м. Входными выступают данные рис. 4, а также результаты, полученные аналогичным образом с помощью модифицированной версии экспериментальной установки.

Модификация состояла в уменьшении длительности импульса *СЛД* до 10.5 нс, замене *ФП* на более быстродействующий модуль с полосой 50 МГц и укорочении $ЭВ_2$ до 1.75 м с целью достижения лучшего пространственного разрешения (порядка 1 м) при неизменном времени единичного измерения и схожих метрологических характеристиках. Ценой стало уменьшение дальности действия на 10 км (была исключена $Б_3$).

Полученные характеристики показывают преимущества датчиков данного типа в сравнении с BOTDR, а также говорят о перспективности их применения для мониторинга объектов инфраструктуры, имеющих значительную протяженность.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование рамановского усиления излучения в совокупности с усилением за счет встро-

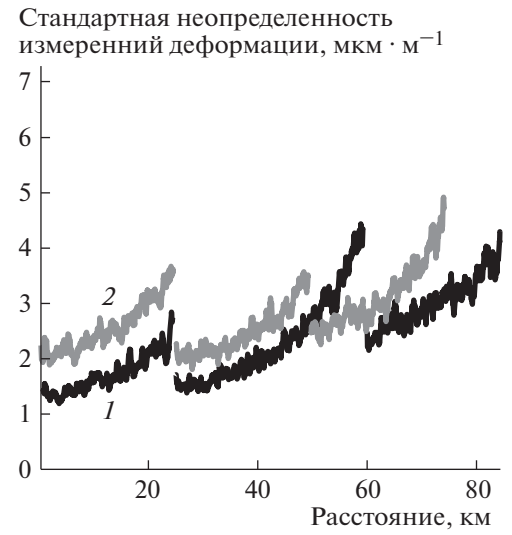

Рис. 6. Оценка стандартной неопределенности измерений деформации вдоль волоконно-оптической линии для экспериментальной установки с пространственным разрешением: *1* – 2.6 м; *2* – порядка 1 м. Разрывы соответствуют местоположению $ЭВ_1$ и $ЭВ_2$.

енных в линию сегментов волокна, легированного эрбием, позволило проводить измерения деформации на расстояниях до 85 км в диапазоне 500 мкм · м$^{-1}$, что эквивалентно 56°C при пересчете в единицы температуры (коэффициент пересчета равен 9 (мкм · м$^{-1}$) · °C^{-1}, как следует из приведенных выше коэффициентов чувствительности). При времени единичного измерения 10 мин и пространственном разрешении 2.6 м стандартная неопределенность измерений деформации составила 3.8 мкм · м$^{-1}$, температуры – 0.42°C. Схожие точностные показатели достигаются и при пространственном разрешении порядка 1 м, однако дальность действия снижается до 75 км.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена частично в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M.* // Opt. Lett. 1990. V. 15. № 18. P. 1038. https://doi.org/10.1364/OL.15.001038
2. *Parker T.R., Farhadiroushan M., Feced R., Handerek V.A., Rogers A.J.* // IEEE J. Quant. Electron. 1998. V. 34. № 4. P. 645. https://doi.org/10.1109/3.663443
3. *Lalam N., Ng W.P., Dai X., Wu Q., Fu Y.Q.* // 16th IEEE SENSORS Conference ICSENS 2017. (29 Oct.–1 Nov. 2017). Glasgow, United Kingdom. P. 1. https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8233878
4. *Froggatt M., Moore J.* // Appl. Opt. 1998. V. 37. № 10. P. 1735. https://doi.org/10.1364/AO.37.001735
5. *Koyamada Y., Imahama M., Kubota K., Hogari K.* // J. Light. Technol. 2009. V. 27. № 9. P. 1142. https://doi.org/10.1109/JLT.2008.928957
6. *Liehr S., Münzenberger S., Krebber K.* // Opt. Express. 2018. V. 26. № 8. P. 10573. https://doi.org/10.1364/OE.26.010573
7. *Gorshkov B.G., Taranov M.A., Alekseev A.E.* // Laser Phys. 2017. V. 27. № 8. P. 085105. https://doi.org/10.1088/1555-6611/aa792f
8. *Gorshkov B.G., Taranov M.A.* // Laser Phys. Lett. 2018. V. 15. № 11. P. 115108. https://doi.org/10.1088/1612-202X/aad991
9. *Van Putten L.D., Masoudi A., Brambilla G.* // Opt. Lett. 2019. V. 44. № 24. P. 5925. https://doi.org/10.1364/OL.44.005925