

# УВЕЛИЧЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА с использованием эрбиевого усилителя с удаленной накачкой

**А.С.Дудин**, студент МГУ им. М.В.Ломоносова,  
инженер 3 категории ООО "Т8 НТЦ",

**А.Ю.Игуменов**, к.ф.-м.н., доцент МФТИ, инженер-исследователь ООО "Т8" / igumenov.au@mipt.ru,

**Д.Р.Харасов**, руководитель проекта ООО "Т8 Сенсор",

**Э.А.Фомиряков**, аспирант МГУ им. М.В.Ломоносова,  
инженер-исследователь 1 категории ООО "Т8 Сенсор",

**С.П.Никитин**, начальник отдела разработки лазеров ООО "Т8",

**О.Е.Наний**, д.ф.-м.н., проф. МГУ им. М.В.Ломоносова,  
начальник научного отдела ООО "Т8 НТЦ",

**В.Н.Трещиков**, к.ф.-м.н., генеральный директор ООО "Т8 НТЦ",  
с.н.с. Фрязинского филиала Института радиотехники и  
электроники им. В.А.Котельникова РАН

УДК 535, DOI: 10.22184/2070-8963.2023.114.6.30.35

Исследована возможность увеличения дальности работы распределенного датчика "Дунай" разработки компании "Т8 Сенсор" на базе фазочувствительного когерентного импульсного рефлектометра путем установки в волоконно-оптическую линию эрбиевого волоконного усилителя с удаленной накачкой. Проведен анализ зависимостей мощности обратного рассеяния и отношения сигнал-шум фототока от расстояния вдоль волокна. Показано, что установка в линию эрбиевого волоконного усилителя с удаленной накачкой позволяет увеличить дальность работы датчика на 45 км (с 75 до 120 км).

## ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптическая инфраструктура необходима для всех видов передачи данных, поскольку оптическое волокно удовлетворяет требованиям к широкой полосе пропускания, высокой скорости, низким вносимым потерям, низкой стоимости и возможности мультиплексирования сигнала [1]. Основная причина сбоев в оптических каналах связи – непреднамеренные повреждения кабеля, связанные, например, со строительными или сельскохозяйственными работами. Для обнаружения этих угроз волоконно-оптической инфраструктуре до того, как они нанесут ущерб, а также для упреждающего перенаправления трафика на резервные каналы [2] можно использовать распределенные акустические датчики (Distributed acoustic sensing, DAS) на основе фазочувствительных когерентных импульсных рефлектометров (Phase-sensitive optical time domain reflectometry,  $\phi$ -OTDR).

Распределенное акустическое зондирование – это работающий в режиме реального времени эффективный тип технологии дистанционного волоконно-оптического мониторинга, который быстро развивается в последние годы. DAS не только обладает преимуществами обычных волоконно-оптических сенсорных технологий (например, защита от электромагнитных помех, коррозионная стойкость и гибкость), но также может измерять динамические деформации (например, вибрации и звуковые волны) вдоль волоконно-оптических путей на длинных участках. В последнее десятилетие было много успешных применений DAS в области геофизических исследований, таких как получение вертикального сейсмического профиля, мониторинг гидроразрыва пласта, наблюдение землетрясений, а также приповерхностных земных колебаний. В области акустики и биологии DAS также показал свою эффективность.

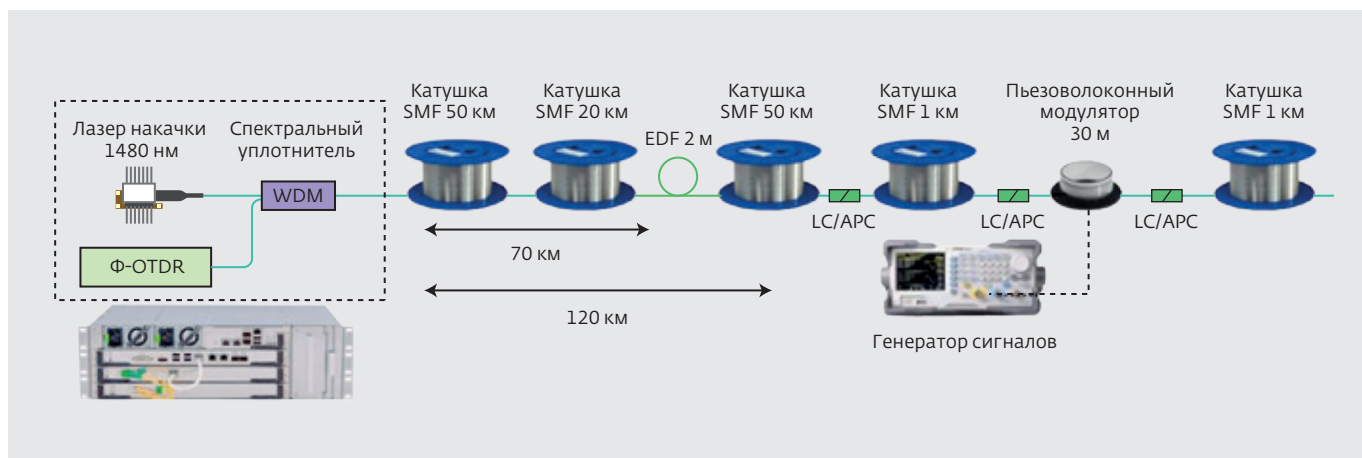
С быстрым развитием методов демодуляции применение DAS постепенно расширилось от суши до океана, ледников и вулканов. Это объясняется возможностью широкомасштабного, дальнего и оперативного измерения с его помощью. Кроме того, оптические кабели хорошо адаптируются к условиям окружающей среды и могут легко собирать огромные данные мониторинга по всей длине волокна. Таким образом, DAS можно адаптировать для мониторинга линейных инфраструктур в сложных и агрессивных условиях. В последние годы исследователи и практики во всем мире провели большое количество полевых исследований линейных инфраструктур с использованием DAS, таких как мониторинг утечек в трубопроводах и состояния железнодорожных путей [3].

Одним из наиболее актуальных направлений развития распределенного акустического зондирования является увеличение дальности работы, которая ограничена затуханием в волокне и обычно составляет не более нескольких десятков километров. Повышение мощности и длительности зондирующего импульса способны увеличить дальность работы DAS, однако, такой подход ограничен возникновением нелинейных эффектов [4] и ухудшением пространственного разрешения. Возможно также применение специальных оптических волокон с увеличенным коэффициентом обратного отражения [5] или их комбинаций [6]. При установке такого волокна после стандартного одномодового волокна уровень обратного отражения/рассеяния с дальнего конца линии повышается, что и обеспечивает увеличение дальности. Существенным недостатком такого подхода является необходимость прокладки дополнительных специальных кабелей. Из-за повышенного коэффициента затухания использование коммерческих специальных волокон позволяет увеличить дальность работы  $\phi$ -OTDR всего на величину порядка 10 км без промежуточных "слепых" зон [7].

Для увеличения дальности работы DAS широкое распространение получили следующие виды волоконно-оптических усилителей:

- распределенные рамановские усилители на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [8];
- распределенные бриллюэновские усилители на эффекте вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна [9];
- эрбиевые волоконные усилители (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA), в частности, двунаправленные EDFA и усилители с удаленной накачкой (Remote Optically Pumped Amplifier, ROPA) [10].

Эффективным и простым методом увеличения дальности является использование двунаправленных EDFA [11], а при отсутствии электропитания – эрбиевых усилителей с удаленной накачкой. При использовании ROPA в волоконную линию вдали от ее начала вваривается один или несколько сегментов волокна, легированного ионами эрбия  $\text{Er}^{3+}$ , к которым подводится излучение накачки на длине волны 1,48 мкм по тому же самому или дополнительным волокнам. Зондирующий импульс и обратное рэлеевское рассеяние усиливается при прохождении эрбиевых волокон. Дополнительное усиление импульс и обратное рассеяние приобретают за счет эффекта ВКР [10].



**Рис.1.** Схема экспериментальной установки. Выходы фазового когерентного импульсного рефлектометра и лазера накачки соединены в одно волокно с помощью спектрального объединителя. Тестируемая линия общей длиной 121,1 км состоит из пяти катушек обычного волокна SMF длинами 49,7; 19,5; 49,9; 1 и 1 км, эрбиевого волокна (Er3+) длиной 2 м между катушками 2 и 3. Между 4-й и 5-й катушками на расстоянии 120 км от начала линии расположен пьезомодулятор (PZT), создающий воздействие

В данной работе представлены результаты исследования распределенного датчика с чувствительным элементом – оптоволоконной линией длиной 120 км, содержащей ROPA. В качестве источника возмущений использовался пьезомодулятор. Показано, что установка ROPA на расстоянии 69 км от начала линии позволяет увеличить дальность работы распределенного датчика "Дунай" компании "Т8 Сенсор" на базе ф-ОТДР от 75 до 120 км.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования влияния ROPA на работу DAS собрана схема на основе ф-ОТДР, пьезомодулятора для генерации возмущений, активного волокна и ~121 км стандартного одномодового волокна. Схема экспериментальной установки изображена на рис.1.

В ф-ОТДР использовался лазер с центральной длиной волны  $\lambda = 1550$  нм. К нему была подключена линия из пяти катушек стандартного одномодового волокна (погонное затухание 0,17–0,18 дБ/км при  $\lambda = 1550$  нм) общей длиной ~ 121,1 км: 49,7; 19,5; 49,9; 1 и 1 км. После 69 км в линию вварено два метра активного эрбиевого волокна с погонным затуханием  $7 \pm 1$  дБ/км на длине волны 1530 нм. На ~ 120,1 км между четвертой и последней катушкой установлен волоконный пьезомодулятор (PZT), представляющий собой пьезоэлемент с намотанным на него стандартным одномодовым волокном длиной  $L_{PZT} \sim 30$  м. Для минимизации потерь оптической мощности первые три катушки и эрбиевое волокно были сварены между собой. Последние

две катушки и PZT были соединены между собой и с остальной частью линии с помощью оптических коннекторов LC/APC.

Для накачки эрбиевого волокна в ROPA использовался лазер на длине волны 1480 нм с выходной мощностью ~ 500 мВт. Накачка ROPA вводилась в линию через спектральный объединитель (WDM). Частота повторения зондирующего импульса ф-ОТДР равнялась 500 Гц, а длительность –  $\tau \sim 200$  нс, что обеспечивает разрешающую способность прибора ~ 20 м. При выключенной накачке ROPA пиковая мощность зондирующего импульса ф-ОТДР на входе в линию устанавливалась на уровне 200 мВт, что является максимальным значением: при более высокой мощности в волокне начинает проявляться модуляционная неустойчивость, дополнительно уменьшающая сигнал рефлектометра с длиной [4]. При включенной накачке импульс усиливается при прохождении по волокну, поэтому, чтобы мощность импульса в точке максимума в волокне не превышала порог модуляционной неустойчивости, необходимо, чтобы входная мощность импульса была гораздо ниже, чем 200 мВт. Кроме того, в каждом случае регулировался коэффициент усиления встроенного в ф-ОТДР усилителя так, чтобы уровень рефлектограммы не превышал верхней границы динамического диапазона аналого-цифрового преобразователя ф-ОТДР. Дополнительно с помощью фотоприемника и осциллографа были измерены профили мощности зондирующего импульса после второй катушки до установки эрбиевого волокна при выключенной и включенной накачке ROPA.

PZT в конце линии был установлен для демонстрации работы DAS: частота воздействия составляла 30 Гц, а амплитуда  $\Delta\phi = 0,1$  рад, или растяжение  $\Delta\epsilon = 0,35$  нанострейн [12]. Такой уровень воздействия примерно соответствует воздействию человеческих шагов на оптический кабель, закопанный на глубине 0,5 м.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Оптимальная мощность импульса на входе в линию была определена с помощью численного моделирования. При значении входной мощности зондирующего импульса ~30–40 мВт и мощности накачки 500 мВт мощность зондирующего импульса не будет превышать порог модуляционной неустойчивости на первых 69 км. Дальность работы ф-OTDR оценивалась путем измерения продольных зависимостей отношения сигнал-шум фототока  $SNR_f$  [13].  $SNR_f$  вычислялось по 100 последовательно измеренным рефлектограммам (общее время измерения  $t_{изм} = 200$  мс) и усреднялось в скользящем окне ~ 0,5 км. Сравнение  $SNR_f$  для схем с включенным и отключенным ROPA представлено на рис.2.

Без использования ROPA дальность работы DAS "Дунай" в стандартном одномодовом волокне достигает ~ 70–75 км, уровень  $SNR_f$  составляет ~10 дБ.

Такого уровня  $SNR_f$  достаточно для регистрации различных слабых воздействий, например шагов человека над закопанным на глубине 0,5–1 м оптическим кабелем. Более сильные воздействия (такие, как движение поезда) можно обнаружить при более низком значении  $SNR_f$ . Из линейной аппроксимации  $SNR_f$  при выключенном ROPA на рис.2 видно, что уровень 10 дБ соответствует ~75 км. При использовании ROPA уровень  $SNR_f$  практически не падает ниже 25 дБ на расстоянии до 50 км, а на 70 км вырастает от 20 до ~25 дБ и снова опускается до порогового значения 10 дБ только приблизительно на 120 км, что на 45 км дальше, чем без использования ROPA.

Анализ спектра сигнала разностной фазы на 120 км, где располагался PZT, а также спектра шума, усредненного по пространственным каналам, где модулятора не было, показал, что уровень сигнала на частоте 30 Гц превышает уровень шума на 20 дБ в полосе 1 Гц. Этого достаточно для определения таких воздействий на закопанный кабель, как шаги человека, копка земли лопатой, проезд автомобиля и др. В качестве примера на рис.3 показана пространственно-временная диаграмма (водопад) разностной фазы после фильтрации с помощью

**Разработка, производство и поставка кабельной продукции:**

- волоконно-оптические кабели для всех типов монтажа;
- волоконно-оптические грозотросы;
- неизолированные провода А, АС;
- изолированные провода СИП-2 и СИП-3 с ВОК;
- LAN кабели для внутренней и внешней прокладки.

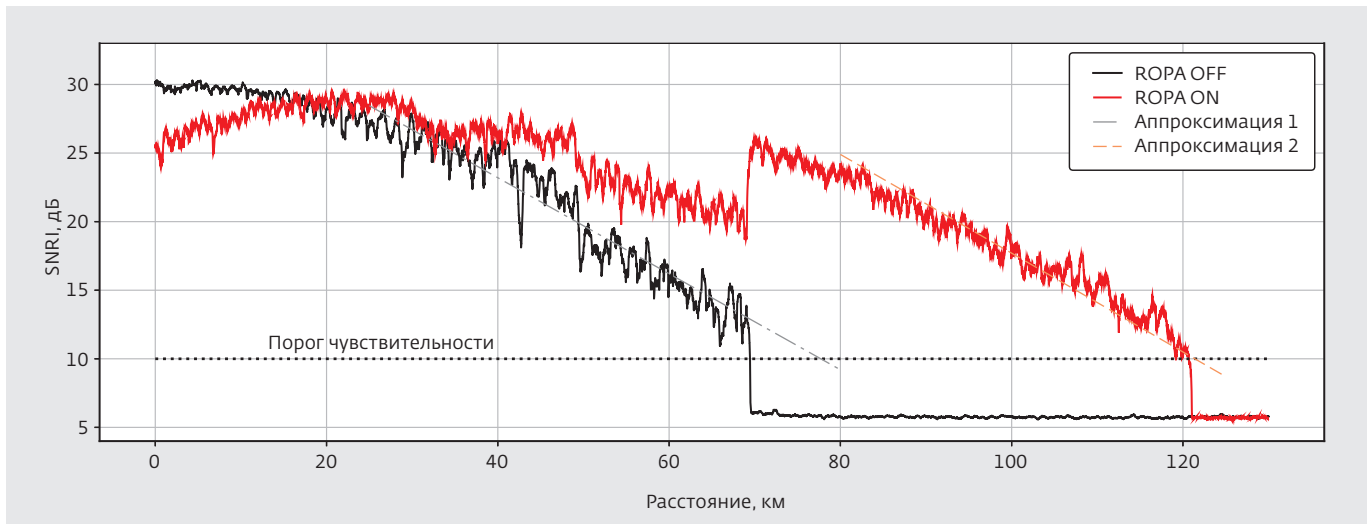
**ИННОВАЦИИ**

**ДИВЕРСИФИКАЦИЯ**

**ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ**

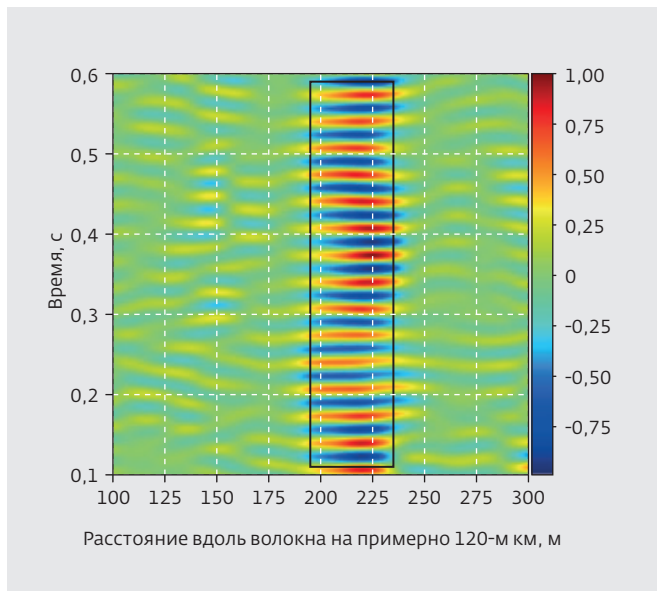
**ГРУППА КОМПАНИЙ**  
**ОПТИКЭНЕРГО**

430001, РМ, г. Саранск,  
ул. Строительная, 3Г, стр. 1  
Тел/факс: +7(8342) 47-38-13, 48-02-99  
optic@sarko.ru www.sarko.ru



**Рис.2.** Зависимость SNRI от расстояния вдоль волокна при выключенной (синяя линия) и включенной (зеленая линия) накачке ROPA в логарифмическом (дБ) масштабе. Наклонные прямые штрихованные линии соответствуют линейным аппроксимациям SNRI на дальних километрах для обоих случаев. Горизонтальная штриховая линия соответствует пороговому уровню  $\sim 10$  дБ

полосового фильтра Баттерворта 3-го порядка в полосе 25–35 Гц. На водопаде хорошо виден отклик на воздействие PZT примерно на 120 км.



**Рис.3.** Водопад разностной фазы после фильтрации в каждом пространственном канале с помощью полосового фильтра Баттерворта 3-го порядка в полосе 25–30 Гц. Черным пунктирным прямоугольником показана граница отклика на воздействие модулятора PZT с длиной намотанного волокна  $\sim 30$  м. Цветом отображается значение разностной фазы после фильтрации относительно своего максимума

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирована возможность увеличения дальности работы распределенного датчика "Дунай" компании "Т8 Сенсор" с 75 до 120 км путем установки в волоконно-оптическую линию эрбиевого волоконного усилителя с удаленной накачкой в простейшей конфигурации: 2 м активного волокна, попутная накачка по сигнальному волокну лазером на длине волны 1480 нм. Показано, что значение  $SNR_1 = 10$  дБ, достаточное для регистрации, например, шагов человека над закопанным на глубине 0,5–1 м оптическим кабелем, достигается на расстоянии 75 км без ROPA и увеличивается до 120 км при включении ROPA.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Munster P., Horvath T., Vojtech J. Distributed sensing as a new tool for fibre infrastructure protection // Security & Future. 2018. No. 4. PP. 190–192.
2. Fernández-Ruiz M.R., Garcia-Ruiz A., Martins H.F., Pastor-Graells J., Martin-Lopez S. and Gonzalez-Herraez M. Protecting Fiber-Optic Links from Third Party Intrusion Using Distributed Acoustic Sensors // 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). 2017. PP. 1–4.
3. Zhu H., Liu W., Wang T., Su J., Shi B. Distributed Acoustic Sensing for Monitoring Linear Infrastructures: Current Status and Trends // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 19. PP. 7550–7571.

4. Nikitin S.P., Ulanovskiy P.I., Kuzmenkov A.I., Nanii O.E. and Treshchikov V.N. Influence of modulation instability on the operation of phase-sensitive optical time domain reflectometers // Laser Physics. 2016. Vol. 26. No. 10. PP. 105106–105112.
5. Официальное описание волокна OFS AcoustiSens. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ofsoptics.com/wp-content/uploads/AcoustiSens-Wideband-GS86545-web.pdf> (дата обращения: 23.01.2023).
6. Masoudi A., Beresna M., Brambilla G. 152 km-range single-ended distributed acoustic sensor based on inline optical amplification and a micromachined enhanced-backscattering fiber // Optics Letters. 2021. Vol. 46. No. 3. PP. 552–555.
7. Cedilnik G., Lees G., Schmidt P.E., Herstrøm S. & Geisler T. Pushing the reach of fiber distributed acoustic sensing to 125 km without the use of amplification // IEEE Sensors Letters. 2019. Vol. 3. No. 3. PP. 1–4.
8. Kharasov D.R., Fomiryakov E.A., Bengalskii D.M., Nikitin S.P., Nanii O.E. and Treshchikov V.N. Distributed Acoustic Sensing over 146 km using Phase-sensitive Optical Time-domain Reflectometer assisted by bidirectional distributed Raman amplifier // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE, 2022. P. 1.
9. Wang Z.N., Li J., Fan M.Q., Zhang L., Peng F., Wu H., Rao Y.J. Phase-sensitive optical time-domain reflectometry with Brillouin amplification // Optics letters. 2014. Vol. 39. No. 15. PP. 4313–4316.
10. Van Putten L.D., Masoudi A., Brambilla G. 100-km-sensing-range single-ended distributed vibration sensor based on remotely pumped Erbium-doped fiber amplifier // Optics Letters. 2019. Vol. 44. No. 24. PP. 5925–5928.
11. Arioka T., Nakamura K. Reduction in differential phase noise of distributed acoustic sensing with bidirectional amplifier // Optics Continuum. 2022. Vol. 1. No. 6. PP. 1375–1383.
12. Headley C., Agrawal G.P. Raman amplification in fiber optical communication systems. N.Y.: Academic press, 2005.
13. Nikitin S., Fomiryakov E., Kharasov D., Nanii O., Treshchikov V. Characterization of ultra-narrow linewidth lasers for phase-sensitive coherent reflectometry using eom facilitated heterodyning // Journal of Lightwave Technology. 2019. Vol. 38. No. 6. PP. 1446–1453.



Тематика конференции «Телеком Евразия» сфокусирована на практическом опыте, стратегиях и решениях беспроводных технологий, развертывании мобильных широкополосных сетей, спутниковой связи, инновационных технологиях на базе сетей нового поколения, строительстве магистральных оптических сетей связи и инфраструктуре для прокладки ВОЛС.

[www.comnews-conferences.ru/te2023](http://www.comnews-conferences.ru/te2023)

«Инновации, взаимодействие и конвергенция сетей сотовой, оптической и спутниковой связи в интересах цифровой экономики»

Организатор:

