

# Распределённый акустический датчик на базе фазочувствительного рэлеевского рефлектометра с протяжённостью работы $\geq 200$ км

Д.Р. Харасов<sup>1,\*</sup>, Э.А. Фомиряков<sup>1,2</sup>, Д.М. Бенгальский, А.Ю. Данилов,  
С.П. Никитин<sup>1,3</sup>, О.Е. Наний<sup>1,2</sup>, В.Н. Трещиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Группа компаний T8

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

<sup>3</sup> ООО «Фемтовижн»

\* E-mail: kharasov@t8.ru

DOI:10.31868/RFL.2024.97-98

Распределённые акустические датчики (DAS) на базе фазочувствительного рэлеевского импульсного рефлектометра (Ф-OTDR) находят широкое применение для мониторинга протяженных объектов: периметры, трубопроводы, авто- и ж/д-пути [1], линии электропередач. Дальность работы большинства DAS ограничена прежде всего затуханием в оптическом волокне кабеля-датчика и обычно составляет не более 40-50 км. Для увеличения могут быть использованы различные методы: комбинация волокон с различным коэффициентом затухания и отражения [2, 3], сложные форматы модуляции зондирующего импульса [5], дополнительное оптическое усиление вне рефлектометра [6,7,8]. Первый метод приводит к значительному усложнению узлов формирования импульса и обработки сигнала обратного рассеяния (рефлектограммы) и, соответственно, удорожанию рефлектометра. Второй метод на практике не позволяет увеличить дальность больше, чем на ~20 км, без промежуточных «слепых» зон. Поэтому во многих случаях оптимальным вариантом является использование дополнительных оптических усилителей: промежуточных двухсторонних эрбиевых волоконных усилителей (Bi-EDFA) [8], эрбиевых волоконных усилителей с удаленной оптической накачкой (ROPA) [7] или распределённых усилителей на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (DRA) [6]. Bi-EDFA могут устанавливаться только в тех случаях, где на месте есть доступ к электричеству. В тех же случаях, где доступа к питанию нет, приемлемыми вариантами остаются ROPA и DRA.

Ранее нами исследовались возможность увеличения дальности DAS для различных конфигураций DRA [9-11] и ROPA[12]. В экспериментах с DRA тестировались случаи с попутной (FP), встречной (BP) и двухсторонней накачкой на длине волны ~1,45 мкм (см. рис 1а-в). С попутной и встречной было показано увеличение с ~75 км до 120 км в волокне с низким затуханием <0,17 дБ/км (ULL). При двухсторонней накачке общая протяжённость рабочей линии составила 146,5 км из ULL и стандартного одномодового волокна (SSMF). Нами же в экспериментах с ROPA было показано, увеличение дальности до 120 км (см. рис 1г) в SSMF. В них излучение попутной накачки на длине волны 1,48 мкм доставлялось по тому же волокну, по которому распространялся зондирующий импульс. Благодаря этому накачка усиливала импульс и рэлеевское рассеяние за счёт вынужденного комбинационного рассеяния. Единственный сегмент активного эрбиевого волокна (EDF) был установлен на ~69 км, которое накачивалось от лазера накачки с мощностью ~0,5 Вт, установленного с той же стороны что и Ф-OTDR.

В данной работе мы демонстрируем еще большее увеличение работы DAS как с ROPA, так и DRA. Для большей дальности в ROPA использовалась

использовалась более мощная накачка (~1 Вт), а отрезок эрбиевого волокна был установлен на 99 км вместо 69 км. На рис. 2 показаны зависимости отношения сигнал-шум напряженности электрического поля рефлектограммы ( $SNR_E$ ) вдоль длины волокна с включенной и выключенной накачкой. За счёт ROPA  $SNR_E$  на 130-ом км имеет аналогичный уровень, как на 75-80 км без доп. усиления. Такой уровень  $SNR_E \geq 10$  дБ на практике достаточен для фиксации воздействия шагов человека на связной волоконно-оптический кабель, закопанный на глубине порядка полуметра.

Для получения DAS с протяжённостью работы свыше 200 км в ULL волокне мы использовали Ф-OTDR с DRA и быстрым (<100 нс) оптическим переключателем типа 1x2 (см. рис. 1д). В этом случае Ф-OTDR поочередно опрашивал две линии по 120 км. Советующий график  $SNR_E$  показан на рис. 4. Общая протяжённость двух линий составляла 240 км. Уровень  $SNR_E$  превышал 10 дБ вдоль всей линии.

Таким образом экспериментально продемонстрировано, что с помощью ROPA с накачкой по чувствительному волокну можно увеличить дальность работы DAS до 130 км, а с помощью DRA и быстрого переключателя можно осуществлять виброакустический мониторинг вдоль двух волоконных линий с общей протяжённостью 240 км.

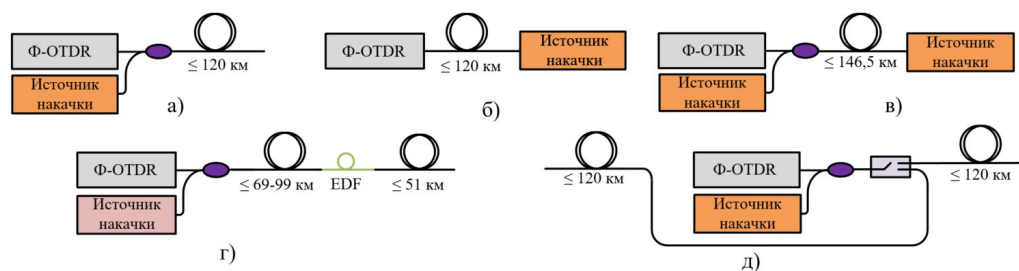


Рис. 1. Блок-схемы Ф-OTDR с DRA с попутной (а), встречной (б) и двухсторонней накачками (в), с ROPA (г), с DRA, двойной линией и переключателем (д).

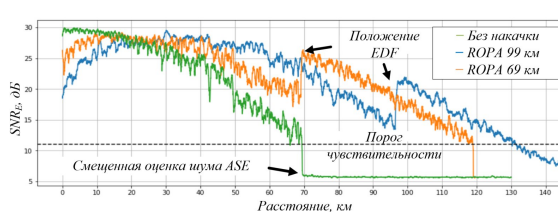


Рис. 2. Зависимость  $SNR_E$  вдоль длины волокна при включённой и выключенной накачке ROPA. Отрезки EDF находились на 69 и 99 км.

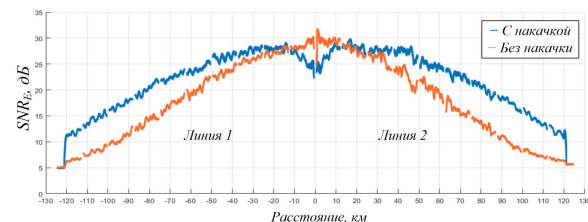


Рис. 3. Зависимость  $SNR_E$  вдоль для двух линий при включённой и выключенной накачке DRA.

## Литература

- [1] М.А. Бухарин и К. В. Шишков, *Железнодорожный транспорт*, **4**, 58-59 (2020).
- [2] Е.Т. Нестеров и др. *Письма в ЖТФ*, **37.9**, 55-63 (2011).
- [3] D.R. Kharasov, et al. *Quantum Electronics*, **50.5**, 510 (2020).
- [4] D.R. Kharasov, et al. *Moscow University Physics Bulletin*, **76.3**, 167-175 (2021).
- [5] O.H. Waagaard, et al., *OSA continuum*, **4.2**, 688-701 (2021).
- [6] H. F. Martins, et al., *Journal of Lightwave Technology*, **32.8**, 1510-1518 (2014).
- [7] Z. Sha, et al., *IEEE Photonics Technology Letters*, **29.16**, 1308-1311 (2017).
- [8] C. Fan, et al. *Photonics Research*, **11.6**, 968-977 (2023).
- [9] D.R. Kharasov, et al. *In 2018 International Conference Laser Optics (ICLO)* (pp. 285-285). IEEE.
- [10] D.R. Kharasov, et al. *In 2020 International Conference Laser Optics (ICLO)* (pp. 1-1). IEEE.
- [11] D.R. Kharasov, et al. *In 2022 International Conference Laser Optics (ICLO)* (pp. 1-1). IEEE.
- [12] Dudin, A. S., et al. *Instruments and Experimental Techniques*, **66.5**, 795-801 (2023)