

ОДНОВРЕМЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДЕФОРМАЦИИ РМ-ВОЛОКНА С ПОМОЩЬЮ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА

✉ И. С. Пономарёв^{1,2}, Д. М. Бенгальский¹, Д. Р. Харасов¹,
О. Е. Наний^{1,2}, С. П. Никитин¹, В. Н. Трещиков¹

¹ Группа компаний Т8, Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ ponomarev@t8.ru

В настоящее время проявляется повышенный интерес к фазочувствительному рефлектометру (Ф-ОТDR) [1] как инструменту для решения геофизических и сейсмометрических задач — например, для исследования землетрясений, где важны сигналы на низких частотах (<10 Гц). Сейсмические сигналы имеют схожий спектральный состав с температурными эффектами. При стандартном применении Ф-ОТDR нет возможности различить сигнал от растяжения и температуры [2]. Ранее, в работе [3], было экспериментально продемонстрировано разделение эффектов растяжения и изменения температуры корреляционным методом в РМ-волокне, однако у этого метода есть недостаток — долгое время измерения (дискретизация по времени порядка десятков секунд). В данной работе для разделения эффектов, вызванных температурой и деформацией, предлагается использование РМ-волокна и Ф-ОТDR с поляризационной диверсификацией и измерением фазовых приращений [4, 5].

В численной модели измерялось изменение приращения фазы вдоль волокна между поляризациями, из которых можно рассчитать их полусумму и разность. Вклады от температуры и деформации можно разделить с помощью матричной системы уравнений [3]. Параметры численного моделирования: длина волокна 10 км, скорость света 3×10^8 м/с, частота дискретизации 500 МГц, частота зондирования импульса 1 кГц, длительность импульса 200 нс, длина волны излучения 1550 нм, время записи 5 секунд, средний показатель преломления волокна 1,5, начальная разность показателя преломления между осями равна 56×10^{-5} , изменения показателя преломления между осями с температурой $-5,51 \times 10^{-7}$ 1/К [6], изменение среднего показателя преломления с температурой $9,15 \times 10^{-6}$ 1/К [7]. Погрешность для разности приращения фаз между поляризациями составила порядка сотен про-

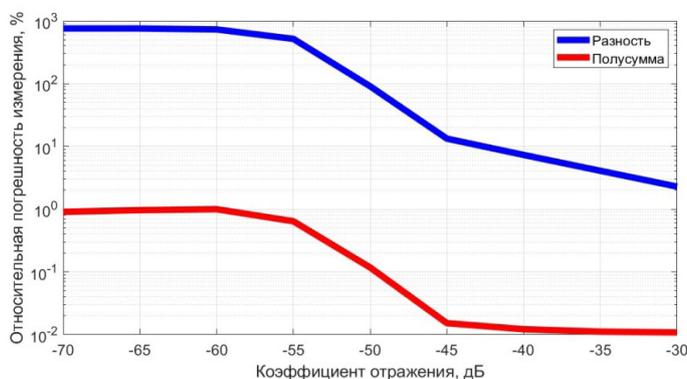


Рис. 1. Относительная погрешность измерения разности и полусуммы приращения фазы между поляризациями в зависимости от коэффициента обратного рассеяния искусственных центров, в логарифмическом масштабе

центов при измерении 1 К. Эта погрешность фазы обуславливается случайностью расположения рэлеевских центров отражения (представляющих собой неоднородности показателя преломления в волокне). Изменяя стандартные параметры, можно уменьшить эту погрешность: например, она сокращается при уменьшении длительности импульса. Если ввести в волокно эквидистантно расположенные искусственные центры с большим коэффициентом отражения, то погрешность уменьшается, как показано на рис. 1. Для разности приращения фазы двух поляризаций при коэффициенте отражения -57 дБ погрешность составляет сотни процентов, а начиная с коэффициента обратного рассеяния -40 дБ и больше относительная погрешность составляет порядка десятка процентов, что позволяет использовать фазовый метод.

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования с коэффициентом отражения центров -40 дБ, приращение фаз каждой поляризации по аналогии с [3] были переведены в изменения температуры и деформацию волокна, на участке между двумя искусственными отражающими центрами. При задании изменения температуры $0,1$ К в отсутствии растяжения погрешность измерения температуры составляет $0,001$ К, а погрешность измерения растяжения — $0,02$ микрострейн; при задании растяжения 2 микрострейна в отсутствие изменения температуры погрешность измерения растяжения составляет $0,01$ микрострейн, а погрешность измерения температуры — $0,001$ К. Таким образом, с помощью численного моделирования было показано, что в РМ-волокне с эквидистантно расположенными искусственными отражающими центрами возможно разделение эффектов изменения температуры и деформации с помощью когерентного рефлектометра с заданной точностью.

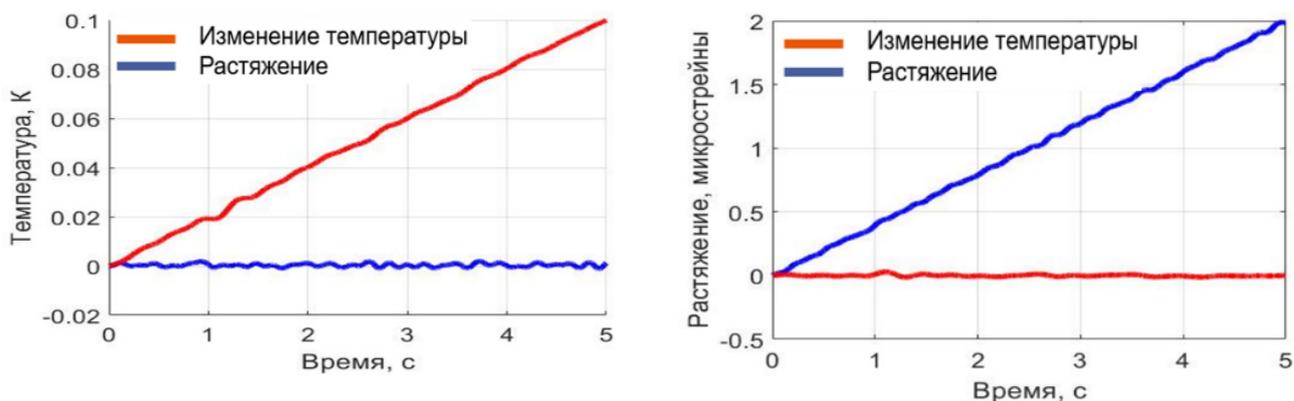


Рис. 2. Ситуация, в которой на волокно воздействовало только изменение температуры со скоростью 1 К/мин (график слева) и только растяжение со скоростью $0,4$ микрострейн/с (график справа); красной и синей линией обозначены соответственно изменения температуры и деформация

Список литературы

1. Shatalin S. V., Treschikov V. N., Rogers A. J. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing // Appl. Opt. 1998. Vol. 37. P. 5600–5604.
2. Koyamada Y., Imahama M., Kubota K., Hogari K. Fiber-Optic Distributed Strain and Temperature Sensing With Very High Measurand Resolution Over Long Range Using Coherent OTD // Journal of Lightwave Technology. 2009. Vol. 27(9). P. 1142–1146.
3. Lu X., Soto M. A., Thévenaz L. Temperature-strain discrimination in distributed optical fiber sensing using phase-sensitive optical time-domain reflectometry // Optics express. 2017. Vol. 25(14). P. 16059–16071.

4. Nikitin S. P. et al. Distributed temperature sensor based on a phase-sensitive optical time-domain Rayleigh reflectometer // *Laser Physics*. 2018. Vol. 28(8). P. 085107.
5. Alekseev A. E. et al. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal // *Laser Physics*. 2014. Vol. 24(11). P. 115106.
6. Ma P. et al. Birefringence sensitivity to temperature of polarization maintaining photonic crystal fibers // *Optics&Laser Technology*. 2012. Vol. 44(6). P. 1829–1833.
7. Othonos A. S., Kalli K. *Fiber Bragg gratings fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Boston: Artech House, 1999.