

07;12

Метод увеличения дальности работы когерентного оптического рефлектометра

© Е.Т. Нестеров, В.Н. Трещиков, А.Ж. Озеров, М.А. Слепцов,
В.А. Камынин, О.Е. Наний, А.А. Сусьян

ООО „Т8“, Москва

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

E-mail: alexander.susyan@gmail.com

Поступило в Редакцию 9 декабря 2010 г.

Предложен, теоретически обоснован и экспериментально продемонстрирован новый метод увеличения работы когерентного оптического рефлектометра. Метод основан на использовании нескольких типов волокон с разной величиной коэффициента обратного рассеяния, причем волокно с более высоким коэффициентом обратного рассеяния подключается к концу участка волокна с наименьшим коэффициентом поглощения на рабочей длине волны, длина которого — максимально возможная для обеспечения заданного уровня чувствительности. Показана возможность увеличения дальности работы когерентного рефлектометра до 50 km.

Исследования когерентных оптических рефлектометров (COTDR), которые также называют фазочувствительными или интерференционными рефлектометрами, активно ведущиеся в течение последних двух десятилетий [1–9], вышли на стадию создания прикладных датчиков вибрационных воздействий, предназначенных для использования в таких приложениях, как мониторинг вибраций сооружений повышенной ответственности, системы пожаробезопасности и системы защиты от несанкционированного доступа.

Принцип действия COTDR схож с принципом действия обычного рефлектометра: в тестируемую линию вводится мощный короткий зондирующий импульс, а временные зависимости мощности рассеянного назад излучения измеряются и анализируются с использованием различных алгоритмов обработки рефлектограмм. Отличительной особенностью когерентного рефлектометра является большая длина когерентности оптического импульса. Это приводит к тому, что рассеяние назад на отдельных рэлеевских центрах световое излучение складывается

когерентно, т.е. складываются комплексные амплитуды рассеянных на отдельных центрах волн. Дальность действия COTDR зависит от потерь в волокне и определяется тем, можно ли при данной мощности шума извлечь из рефлектограммы полезный сигнал. Как правило, для COTDR это расстояния $\sim 30\text{--}40$ km. Основной причиной потерь является рэлеевское рассеяние, поэтому использование волокна с более высоким коэффициентом рэлеевского рассеяния (и, как следствие, затухания) приводит к более быстрому снижению мощности сигнала. Наибольшая дальность работы COTDR достигается при использовании волокна с наименьшим затуханием. Замена его волокном с большим значением коэффициента рэлеевского рассеяния не только не дает выигрыша, но даже ведет к уменьшению дальности работы (рис. 1, *a*).

Однако если волокно с более высоким коэффициентом обратного рассеяния присоединить в точке, в которой значение отношения сигнал-шум (SNR) уменьшается до минимально допустимого, то дальность действия COTDR можно увеличить.

Рассмотрим ситуацию, когда к точке стандартного волокна SSMF, в которой мощность сигнала достигает P_{cr} (на рис. 1, *a* это 27.5 km), приваривается волокно для компенсации дисперсии DCF. Коэффициенты рэлеевского рассеяния и затухания у волокна DCF более чем в 3 раза выше SSMF, следовательно, мощность рассеянного назад излучения увеличится. На рис. 1, *b* приведена зависимость (тонкая линия) для двух соединенных отрезков волокна: SSMF и NZDSF. Горизонтальной линией отмечен критический уровень мощности сигнала $P_{cr} = -59$ dB. На графике видно, что при выбранном уровне P_{cr} использование двух волокон (SSMF длиной 29 km и DCF длиной 6 km) дает выигрыш по дальности в 6 km.

Эта идея увеличения дальности работы рефлектометра может быть развита следующим образом: в точке, в которой SNR снизится опять до минимального допустимого значения, можно присоединить волокно с еще более высоким значением рэлеевского рассеяния. Тогда удастся увеличить дальность работы еще на несколько километров. Из графика на рис. 1, *b* (жирная линия) видно, что при том же уровне P_{cr} и при той же начальной мощности импульса использование трех последовательно соединенных отрезков волокна SSMF, NZDSF и DCF позволяет увеличить дальность от начальных 29 до 43 km.

Для экспериментального подтверждения реализуемости предложенного метода использовался когерентный рефлектометр „Дунай“

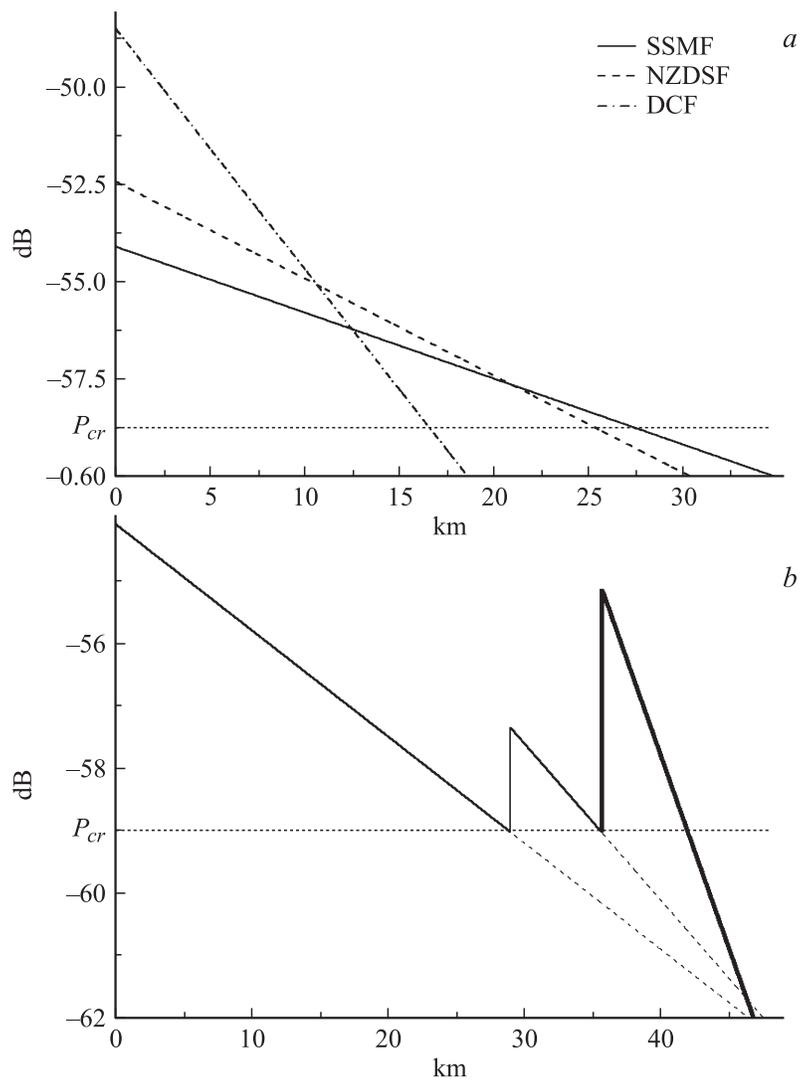


Рис. 1. Зависимость мощности рассеянного назад излучения от дальности: *a* — для трех типов оптических волокон, *b* — для последовательно соединенных волокон, SSMF, NZDSF (тонкая линия) и DCF (жирная линия). P_{cr} — мощность сигнала, соответствующая минимально допустимому значению SNR.

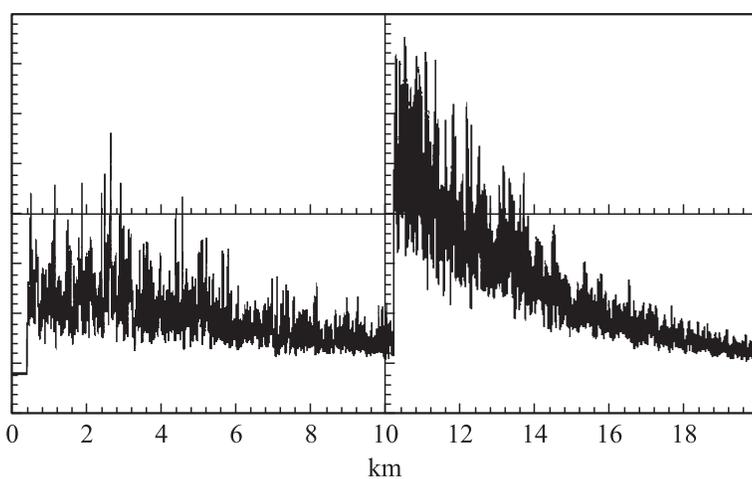
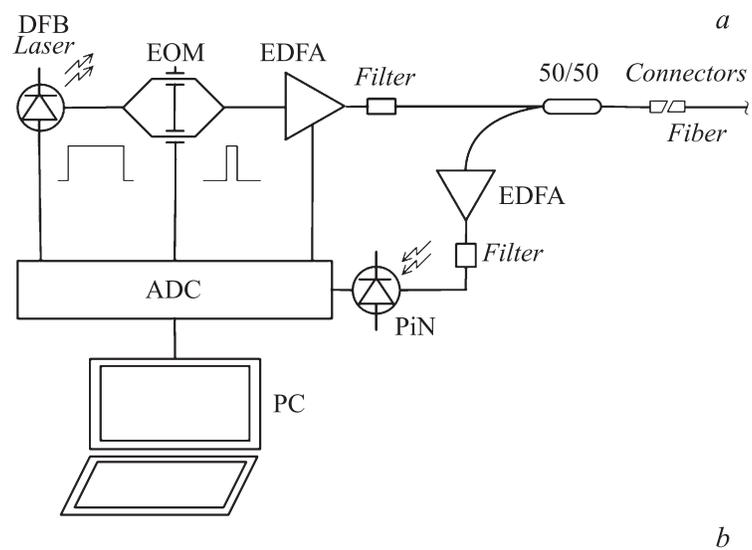


Рис. 2. *a* — принципиальная схема экспериментальной установки, *b* — экспериментальная OTDR, содержащего соединенные участки SSMF длиной 10 km и DCF длиной 10 km.

компании „Т8“, схема которого приведена на рис. 2, *a*. Рефлектометрический блок COTDR содержит передающий и приемный модули с блоком обработки рефлектограмм. Передающий модуль на основе полупроводникового лазера с распределенной обратной связью (РОС-лазера) с внешним модулятором формирует короткий оптический импульс, который через делитель 50/50 и выходной оптический разъем подается в тестируемое волокно, выполняющее роль распределенного датчика. Сигнал обратного рассеяния принимается приемным блоком, обрабатывается устройством обработки и подается на монитор. Для увеличения энергии импульсов использовался волоконный эрбиевый усилитель (EDFA), обеспечивающий импульсную выходную мощность тестового сигнала более 1 W при длительности 100 ns.

Волоконная линия состояла из участка стандартного волокна длиной 10 km и приваренного к нему участка, компенсирующего дисперсию волокна длиной 10 km (DCF). Экспериментальная рефлектограмма, показывающая, что при увеличении длины волоконного датчика на 10 km за счет использования волокна DCF уровень мощности обратного рассеяния не падает ниже критического уровня, приведена на рис. 2, *b*.

Можно поставить вопрос, каким образом должен изменяться коэффициент рэлеевского рассеяния и связанное с ним затухание (потери) от координаты, чтобы SNR сохранял свое значение и был не ниже минимально допустимого уровня.

Если уровень шума в приемном тракте остается постоянным, то условие постоянства отношения сигнал-шум сводится к требованию, чтобы средняя мощность сигнала обратного рассеяния, поступающего на приемки, была постоянна. Тогда условие

$$SNR(x) = SNR(x + \Delta x)$$

можно записать следующим образом:

$$P_R(x) = P_R(x + \Delta x), \quad (1)$$

где $P_R(x)$ — мощность сигнала на приемнике для некоторого x . Причем $P_R(x) = P(x)K(x) \exp(-\alpha x) = P_0 \exp(-2\alpha x)$, где $P(x) = P_0 \exp(-\alpha x)$ — мощность прошедшего сигнала, а K — коэффициент отражения, указывающий, какая доля сигнала отразилась назад. Коэффициент $K(x)$ связан с коэффициентом затухания $\gamma(x)$ прямо пропорционально: $K(x) = \xi \gamma(x)$, где ξ — доля рассеянного излучения, попадающая в моду, распространяющуюся назад. Это верно в

предположении, что доля рэлеевского рассеяния в затухании сигнала является определяющей. Расчет показывает, что для удовлетворения выражения (1) коэффициент затухания должен подчиняться выражению

$$\gamma(x) = \frac{\gamma_0}{1 - \gamma_0 x}. \quad (2)$$

В обычных распределенных датчиках при постоянном коэффициенте затухания мощность отраженного назад сигнала и мощность зондирующего импульса падают экспоненциально. Дальность работы рефлектометра определяется мощностью вводимого сигнала и затуханием в волокне. Если используется волокно с изменяющимся коэффициентом рассеяния для поддержания постоянной мощности сигнала, то дальность будет зависеть и от выбранного уровня сигнала, который необходимо поддерживать. Уменьшение мощности сигнала обратного рассеяния на входе в волокно при этом имеет линейный характер.

Очевидно, что максимальная дальность будет достигнута при использовании волокна, дающего постоянное, минимально достаточное значение сигнала. Так, в ситуации, изображенной на рис. 1, *b*, необходимо волокно, которое в начале рефлектограммы обеспечит уровень сигнала, близкий к критическому P_{cr} : -59 dB, а не -54 dB. Дальность в таком случае будет существенно больше дальности традиционных датчиков. Однако проблема состоит в том, что на начальном участке должно использоваться волокно величиной рэлеевского рассеяния, столь малой, что достичь этого практически невозможно.

Использовать же постоянное значение сигнала, соответствующее уровню рассеяния на начальном участке распределенного датчика, не эффективно, так как в этом случае дальность не только не увеличивается, но даже сокращается. Расчет показывает, что при таком подходе зондирующий импульс полностью затухает (на 56 dB) на длине волокна 25 km.

Таким образом, оптимальным решением представляется использование в качестве чувствительного элемента на первом участке распределенного датчика волокна, коэффициент затухания $\gamma(x)$ которого имеет минимально возможное постоянное значение γ_0 , а на втором $x \in [L, L']$ — волокна, коэффициент затухания которого гиперболически возрастает: $\gamma(x) = \frac{\gamma_0}{1 - \gamma_0(x-L)}$, где L — длина волокна с постоянным затуханием. На первом участке мощность рассеянного назад излучения $P(x)$ экспоненциально затухает до некоторого критического значения P_{cr} ,

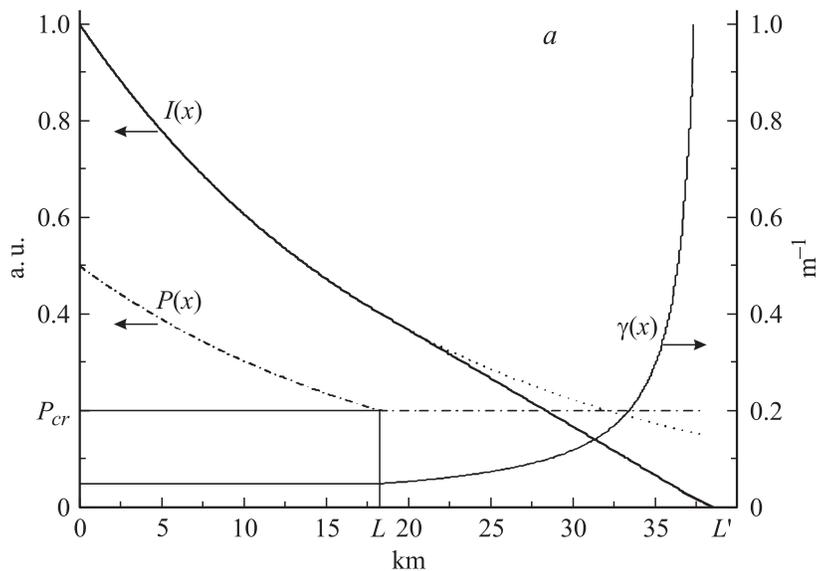


Рис. 3. *a* — общий вид зависимостей $\gamma(x)$, $I(x)$ и $P(x)$ при комбинированном подходе (точками показана зависимость оптической мощности прошедшего сигнала $I(x)$ при $\gamma(x) = \text{const}$), *b* — аналитический расчет зависимостей $I(x)$ и $P(x)$ для волокна SSMF с $\gamma(x) = 0.17$ db/km длиной 29 km и присоединенного волокна с гиперболической зависимостью $\gamma(x)$ длиной 25 km.

которое обеспечивает приемлемое значение SNR. На втором участке волокна мощность отраженного назад сигнала постоянна и равна $P(x) = P_{cr}$. Сущность предложенного метода поясняет рис. 3, *a*, из которого видно, что дальность работы рефлектометра увеличилась на величину $\Delta L = L' - L$. На рис. 3, *b* приведены результаты аналитического расчета прошедшей и рассеянной назад мощности от дальности в линии, состоящей из волокон двух типов. Теоретические результаты показывают, что дальность работы когерентного рефлектометра можно увеличить почти в 2 раза.

Таким образом, в работе предложен метод увеличения дальности работы когерентного оптического рефлектометра, в основе которого лежит использование нескольких отрезков волокон с различными

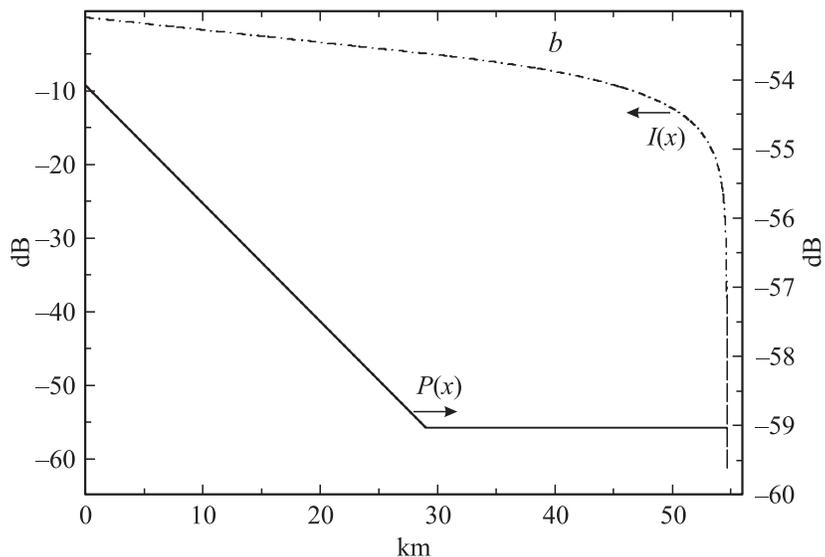


Рис. 3 (продолжение).

коэффициентами обратного рассеяния и связанного с ним затухания. Экспериментально продемонстрировано увеличение дальности работы на 10 km при использовании отрезков волокон SSMF и DCF, при этом максимальная дальность действия рефлектометра „Дунай“ компании T8 может быть увеличена с 40 km до 50 km. Теоретические расчеты показывают, что совместное использование волокна SSMF со специальным волокном с гиперболическим возрастанием коэффициента обратного рассеяния и затухания увеличивает дальность работы рефлектометра почти в 2 раза.

Список литературы

- [1] Taylor H., Lee C. // US Patent. 1993. N 5. V. 194. P. 847.
- [2] Mamedov A.M., Potapov V.T., Shatalin S.V., Juškaitis R. // Opt. Lett. 1994. V. 19. P. 225.
- [3] Shatalin S., Treshicov V., Rogers A. // Appl. Opt. 1994. V. 37. P. 5600.
- [4] Choi K.N., Juares J.C., Taylor H.F. // Proc. SPIE. 2003. V. 5090. P. 134.

- [5] Гориков Б.Г., Парамонов В.М., Курков А.С., Кулаков А.Т. // Lightwave Rus. Ed. 2005. N 4. С. 47–49.
- [6] Гориков Б.Г., Парамонов В.М., Курков А.С., Кулаков А.Т., Зазирный М.В. Квантовая электроника. 2006. Т. 36. В. 10. С. 963–965.
- [7] Koumoto Y., Imahata M., Kubota K., Nogari K. // JLT. 2009. V. 27. P. 1142.
- [8] Слепцов М.А., Трещиков В.Н., Шаталин С.В. // 1-ая Всерос. конф. по волоконной оптике. Пермь, 2007.
- [9] Трещиков В.Н., Наний О.Е., Нестеров Е.Т. // Всерос. конф. по волоконной оптике. Пермь, 2009.