

09;15

Когерентный фазовочувствительный рефлектометр с амплитудно-фазовой модуляцией зондирующих импульсов

© А.Э. Алексеев^{1,2}, В.С. Вдовенко², Б.Г. Горшков³,
В.Т. Потапов¹, Д.Е. Симикин²

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московская обл.

² ООО „Петрофайбер“, Новомосковск, Тульская область

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: aleksey.e.alekseev@gmail.com

Поступило в Редакцию 8 августа 2014 г.

Приведены результаты исследования волоконно-оптического когерентного фазовочувствительного рефлектометра с амплитудно-фазовой модуляцией зондирующих импульсов. Использование такого метода модуляции позволяет произвести восстановление сигнала внешнего воздействия на оптическое волокно рефлектометра с использованием техники фазового разнесения (phase diversity). Применимость предлагаемого метода обоснована теоретически и экспериментально.

Важным требованием к современным когерентным рефлектометрам является возможность определения формы сигнала внешнего воздействия, которому подвергается оптическое волокно [1–3]. Одним из основных способов демодуляции сигнала рассеянного излучения является метод фазового разнесения (phase diversity), впервые предложенный в [4] и развитый в [5]. Метод основан на получении и совместной обработке 2 компонент интенсивности рассеянного излучения, одна из которых сдвинута по фазе относительно другой на некоторую известную величину, т.е. 2 рассматриваемые компоненты интенсивности являются разнесенными по фазе. Данный метод, по сути, является аналогом метода квадратурной обработки сигнала с угловой модуляцией, рассмотренной в [6]. В работах [1–3] фазовое разнесение достигалось с помощью применения оптического гибрида (в качестве которого выступал ответвитель 3×3) при приеме оптического сигнала.

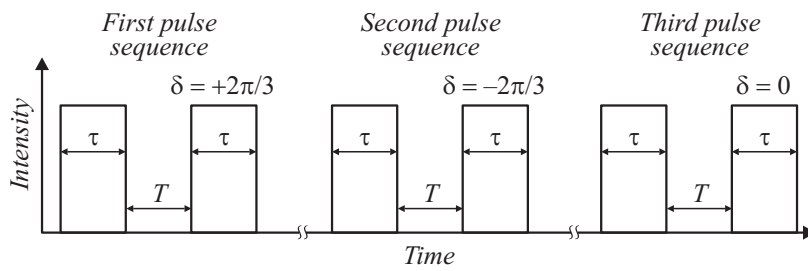


Рис. 1. Амплитудно-фазовая модуляция зондирующих импульсов. Показаны три группы парных импульсов с различными значениями относительной фазы поля во втором импульсе.

В данной работе предложен новый метод, позволяющий восстановить форму сигнала внешнего воздействия, использующий амплитудно-фазовую модуляцию полей зондирующих импульсов [7]. Амплитудная модуляция состоит в формировании изначального длительного оптического импульса последовательности из 2 импульсов прямоугольной формы с длительностью τ , разнесенных по времени относительно друг друга на фиксированную величину времени T , $T \sim \tau$ (рис. 1). Дальнейшая фазовая модуляция оптического поля выполняется фазовым модулятором таким образом, что поле первого импульса из сформированной последовательности не испытывает фазового смещения, поле второго импульса смещается по фазе на величину δ , при этом δ может принимать значения 0 , $2\pi/3$, $-2\pi/3$ (рис. 1). Последовательности парных импульсов, вводимые в волоконный тракт, условно разделяются на 3 группы в соответствии со значением фазового смещения полей второго импульса (рис. 1). В первую группу входят парные импульсы, в которых поле второго импульса испытывает смещение по фазе, равное $\delta = 2\pi/3$; во вторую группу входят парные импульсы, в которых поле второго импульса имеет смещение по фазе, равное $\delta = -2\pi/3$; в третью группу входят парные импульсы, в которых поля обоих импульсов не испытывают фазового смещения: $\delta = 0$ (рис. 1). Первая, вторая и третья группы импульсов вводятся в волоконный тракт рефлектометра последовательно и циклически, через время, необходимое для распространения пары импульсов до конца волоконного тракта и обратно. На входе волоконного тракта наблюдается интерференция

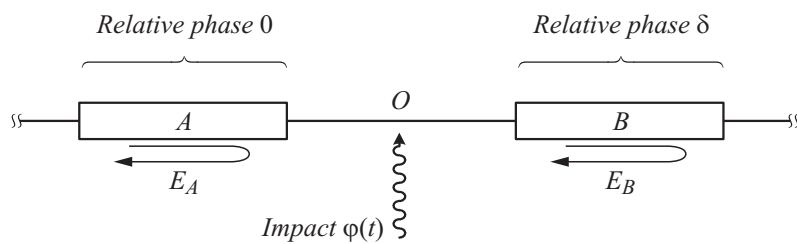


Рис. 2. Схематическое изображение областей рассеяния первого и второго импульса одной из трех импульсных групп. Внешнее воздействие оказывается в некоторой области между областями рассеяния.

полей 2 импульсов, рассеянных в обратном направлении, различными участками волокна. В силу того что дополнительная разность фаз между интерферирующими полями для каждой из 3 групп различна и составляет соответственно $0, \pm 2\pi/3$, на выходе рефлектометра наблюдаются 3 различные рефлектограммы. Внешнее фазовое воздействие на волокно приводит соответственно к появлению 3 меняющихся во времени интенсивностей, сдвинутых относительно друг друга по фазе на величину $\delta = 2\pi/3$, т.е. регистрируемые сигналы оказываются разнесенными по фазе.

Произведем теоретическое рассмотрение предлагаемого метода. Рассмотрим некоторый участок волоконного тракта, занимаемого в некоторый момент времени парой импульсов одной из трех групп, так что оптическое поле второго импульса в группе сдвинуто по фазе относительно оптического поля первого импульса на величину δ (рис. 2). В силу того что импульсы движутся, эффективная область рассеяния для каждого импульса из группы составляет половину его пространственной протяженности, а эффективное расстояние между рассеивающими областями соответствует половине временного интервала между импульсами. Обозначим соответствующие эффективные области рассеяния буквами A и B (рис. 2). Пусть в некоторой точке O , расположенной между этими областями, на волокно оказывается воздействие $\varphi(t)$, приводящее к удлинению оптического волокна. Внешнее воздействие, таким образом, приводит к фазовой модуляции поля, рассеянного областью B , в то время как поле, рассеянное областью A , не подвергается фазовой модуляции. Комплексные амплитуды полей,

рассеянных этими областями, в предположении монохроматичности рассеянного излучения и неизменности его состояния и степени поляризации будут иметь вид:

$$U_A = E_A \exp(i\varphi_A), \quad U_B = E_B \exp(i\varphi_B + i\delta + ik\varphi(t)), \quad (1)$$

где E_A, E_B , — амплитуды рассеянных полей; φ_A, φ_B , — фазы рассеянных полей; $k\varphi(t)$ — сигнал, пропорциональный внешнему воздействию с коэффициентом k ; δ — дополнительная разность фаз, возникающая вследствие фазовой модуляции поля второго оптического импульса, причем $\delta = +2\pi/3$ для первой группы импульсов, $\delta = -2\pi/3$ для второй группы импульсов, $\delta = 0$ для третьей группы импульсов; множители, содержащие характеристическое сопротивление среды, здесь и далее опущены. Рассмотрим интерференцию полей (1), результирующая комплексная амплитуда будет иметь вид

$$U_\Sigma = E_A \exp(i\varphi_A) + E_B \exp(i\varphi_B + i\delta + ik\varphi(t)), \quad (2)$$

где в зависимости от рассматриваемой группы импульсов $\delta = +2\pi/3, -2\pi/3, 0$. При записи выражения (2) сделано предположение, что при переходе от одной группы импульсов к другой изменяется только фаза δ , остальные величины при этом меняются незначительно. Запишем в явном виде интенсивности излучений, рассеянных импульсами первой, второй и третьей группы:

$$I_I = (E_A)^2 + (E_B)^2 + 2E_B E_A \cos(\varphi_B - \varphi_A + k\varphi(t) + 2\pi/3), \quad (3)$$

$$I_{II} = (E_A)^2 + (E_B)^2 + 2E_B E_A \cos(\varphi_B - \varphi_A + k\varphi(t) - 2\pi/3), \quad (4)$$

$$I_{III} = (E_A)^2 + (E_B)^2 + 2E_B E_A \cos(\varphi_B - \varphi_A + k\varphi(t)). \quad (5)$$

Из выражений (3), (4) и (5) видно, что член, содержащий переменную составляющую $k\varphi(t)$, в каждом из трех выражений сдвинут по фазе относительно аналогичного члена в другом выражении на $2\pi/3$, что и является основной особенностью метода фазового разнесения. Исключим из дальнейшего рассмотрения члены, не зависящие от внешнего воздействия, для этого, воспользовавшись тождеством $\cos(\alpha + 2\pi/3) + \cos(\alpha - 2\pi/3) + \cos(\alpha) \equiv 0$, сложим выражения (3), (4) и (5), получим $I_I + I_{II} + I_{III} = 3[(E_A)^2 + (E_B)^2]$. Вычитая

из каждого выражения (3), (4) и (5) их сумму, деленную на 3, получим:

$$\tilde{I}_I = 2E_B E_A \cos(\varphi_B - \varphi_A + k\varphi(t) + 2\pi/3), \quad (6)$$

$$\tilde{I}_{II} = 2E_B E_A \cos(\varphi_B - \varphi_A + k\varphi(t) - 2\pi/3), \quad (7)$$

$$\tilde{I}_{III} = 2E_B E_A \cos(\varphi_B - \varphi_A + k\varphi(t)). \quad (8)$$

Искомое фазовое воздействие может быть теперь извлечено с применением техники, предложенной в [4] и развитой в [5]. Применительно к волоконному интерферометру рассеянного излучения эта техника была рассмотрена в [8,9]. Основная идея заключается в формировании из любых двух разнесенных по фазе на $2\pi/3$ сигналов, например сигналов (6) и (7), сигнала следующего вида:

$$S = I^+ \frac{dI^-}{dt} - I^- \frac{dI^+}{dt}, \quad (9)$$

где $I^+ = \tilde{I}_{II} + \tilde{I}_I$, $I^- = \tilde{I}_I - \tilde{I}_{II}$, d/dt — производная по времени. Переменная S в этом случае пропорциональна производной по времени от модулирующего сигнала: $d(k\varphi(t))/dt$, а ее интеграл с точностью до масштабного коэффициента равен модулирующему сигналу $k\varphi(t)$, т.е. форма сигнала воздействия восстанавливается. Для применения выражения (9) сигналы рассеянного излучения, полученные от импульсов из первой, второй и третьей групп, должны быть синхронизованы по времени, этого можно достичь путем соответствующей обработки сигнала рефлектометра. Подставляя (6) и (7) в (9), получим

$$S = 4\sqrt{3}(E_A E_B)^2 d(k\varphi(t))/dt, \quad (10)$$

интегрируя это выражение по времени, получим восстановленный сигнал фазового воздействия $k\varphi(t)$ с точностью до множителя, слабо зависящего от времени. Из (10) следует, что если произведение $E_A E_B$ мало, восстановленный сигнал близок к нулю, в этом случае возникает так называемое замирание сигнала (фединг), основным методом устранения фединга является изменение частоты зондирующего излучения. Для достижения равномерной чувствительности выражение (10) может быть нормировано на $(E_A E_B)^2$.

Схема экспериментальной установки изображена на рис 3. Полупроводниковый лазер фирмы Redfern Integrated Optics Inc с высокой

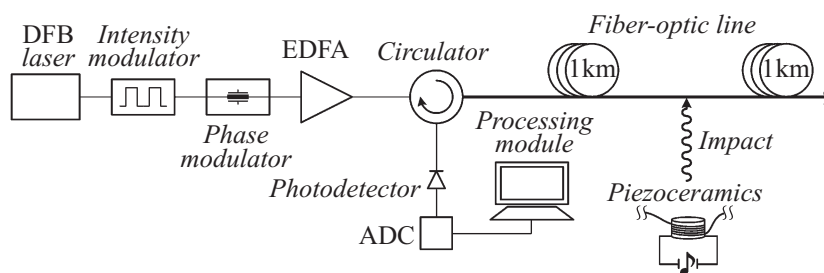


Рис. 3. Схема когерентного рефлектометра с амплитудно-фазовой модуляцией зондирующих импульсов.

степенью когерентности (с шириной спектральной полосы, равной 2 kHz) генерировал в непрерывном режиме излучение на длине волны 1550.92 nm мощностью 10 dB. Модулятор интенсивности производил формирование пары оптических импульсов прямоугольной формы с длительностью 100 ps и задержкой между импульсами 100 ns. Фазовый модулятор PM150 фирмы JDSU производил модуляцию оптического излучения, смещая фазу поля во втором из двух импульсов каждой группы на соответствующую величину δ (рис. 1).

Внешнее фазовое воздействие моделировалось подачей пилообразного сигнала с частотой 100 Hz от генератора Tektronix AFG3021B на пьезокерамический цилиндр, расположенный на расстоянии 1 km от начала волоконного тракта, на цилиндр было намотано волокно длиной около 30 cm. Обработка принятого сигнала состояла в разделении идущих друг за другом сигналов рассеянного излучения на три группы в соответствии с тремя группами импульсов, синхронизации по времени сигналов от трех групп импульсов и извлечения сигнала внешнего воздействия описанным выше методом.

На рис. 4, *a, b* показаны экспериментальные временные зависимости интенсивностей излучений для первой и второй групп импульсов, соответствующие выражениям (6) и (7), при внешнем воздействии на оптическое волокно. На рис. 4, *c* показан демодулированный сигнал; как видно, сигнал внешнего воздействия полностью восстановлен.

Таким образом, амплитудно-фазовая модуляция зондирующих импульсов в когерентном рефлектометре позволяет выполнить демодуляцию рассеянного излучения методом фазового разнесения и вос-

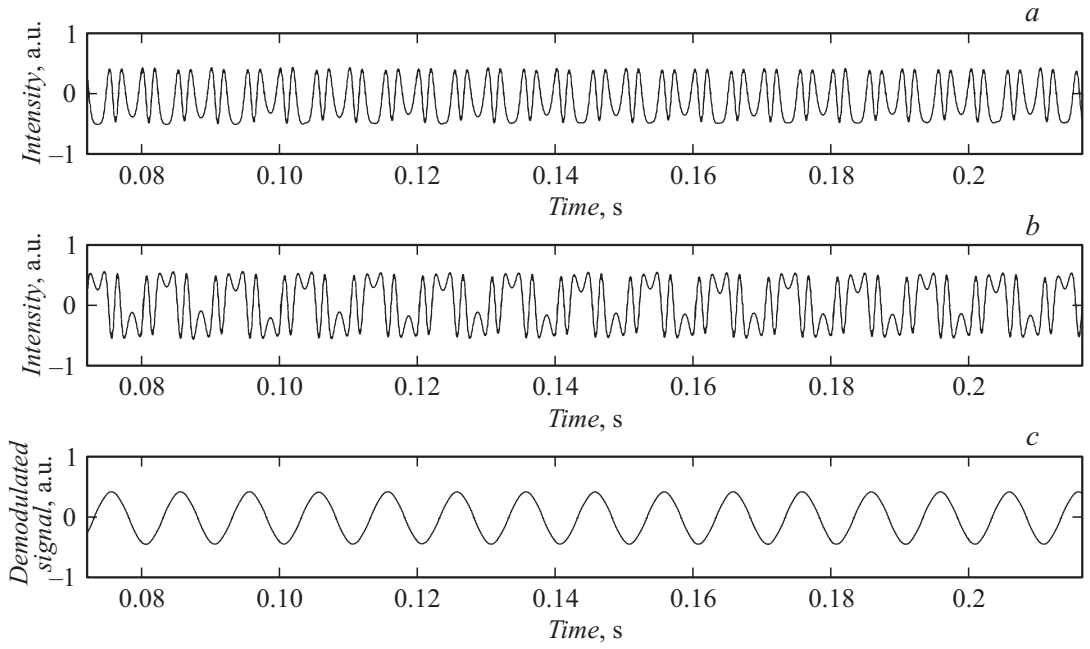


Рис. 4. Экспериментальные зависимости интенсивностей излучений, рассеянных первой и второй группами импульсов, при подаче на пьезокерамический модулятор внешнего гармонического напряжения с частотой 100 Hz, индекс модуляции равен 3 (*a, b*); сигнал, восстановленный методом фазового разнесения (*c*).

становить форму сигнала внешнего фазового воздействия. Преимущество предлагаемой схемы заключается в отсутствии необходимости использования оптического гибрида и дополнительного интерферометра в приемной части рефлектометра. Это, в свою очередь, обеспечивает предлагаемому методу более высокую поляризационную стабильность и устойчивость к внешним воздействиям окружающей среды. Необходимость использования всего одного фотоприемника существенно упрощает приемную часть и позволяет достичь более высокого отношения сигнал/шум на выходе фотоприемника при равной пиковой мощности импульсного излучения, заводимого в оптическое волокно. Пространственное разрешение предлагаемого рефлектометра, в отличие от существующих схем, может быть динамически изменено путем изменения временной задержки между парными импульсами в соответствии с измерительными задачами.

Список литературы

- [1] *Posey R., Johnson G.A., Vohra S.T.* // *Electron. Lett.* 2000. V. 36. N 20. P. 1688–1689.
- [2] *Masoudi A., Belal M., Newson T.P.* // *Measurement Science and Technology.* 2013. V. 24. N 8. P. 1–7.
- [3] *Farhadiroushan M., Parker T.R., Shatalin S.* / 2010. Patent N WO 2010/136810 A2.
- [4] *Koo K.P., Tveten A.B., Dandridge A.* // *Appl. Phys. Lett.* 1982. V. 41. P. 616–618.
- [5] *Zhiqiang Zhao, Demokan M.S., Mac Alpine M.* // *J. Lightwave Technol.* 1997. V. 15. N 11. P. 2059–2068.
- [6] *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 608 с.
- [7] *Горшков Б. Г., Зазирный Д. В., Зазирный М. В., Вдовенко В.С.* / 2011. Патент РФ № 2477838.
- [8] *Алексеев А.Э., Тезадов Я.А., Потапов В.Т.* // *Письма в ЖТФ.* 2012. Т. 38. В. 24. С. 67–74.
- [9] *Алексеев А.Э., Тезадов Я.А., Потапов В.Т.* // *Радиотехника и электроника.* 2013. Т. 58. В. 3. С. 292–299.