

07;12

## **Два механизма модуляции фазы в многомодовых волоконных интерферометрах**

© Л.И. Косарева, О.И. Котов, Л.Б. Лиокумович,  
С.И. Марков, А.В. Медведев, В.М. Николаев

С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 20 сентября 1999 г.

Рассмотрены механизмы фазовой модуляции оптического излучения в многомодовых световодах: первый — с одинаковым относительным приращением фаз для всех мод; второй, учитывающий взаимодействие мод, — с разным относительным приращением фаз для каждой моды. Теоретически показано, что в случае нескольких модулирующих воздействий на световод характер поведения сигналов межмодовой интерференции от каждого из них при изменении параметров окружающей волоконной среды зависит от типа воздействия. Изменения сигналов от воздействий первого типа полностью согласованы. Сигналы от воздействий второго типа или разных типов могут меняться по-разному. В экспериментах с межмодовым волоконным интерферометром длиной 500 м модуляторы, относящиеся к механизму первого типа, показали высокую корреляцию (97%) поведения сигналов при дрейфе температуры световода. Изменения сигналов от модуляторов второго типа и разных типов были практически не коррелированы (6 и 1%).

Фазовая модуляция когерентного излучения, распространяющегося в многомодовых волоконных световодах, возникает в результате разнообразных внешних воздействий: изменений температуры, давления, механических перемещений, электрического, магнитного и акустического полей и т.п. [1]. Этот эффект находит применение в волоконно-оптических датчиках (ВОД) физических величин [2,3], линиях сбора данных [4], проявляется в виде "модового" шума в волоконно-оптических линиях связи [5].

Для регистрации фазовой модуляции в таких устройствах применяются одноволоконные схемы, в которых используют интерференцию между различными модами и пространственную фильтрацию части

интерференционной картины [2,3]. Данные системы уместно называть "межмодовыми волоконными интерферометрами".

Наибольшую трудность в рассматриваемых устройствах вызывают две проблемы: 1) фединг полезного сигнала, связанный с квазистатическими изменениями параметров окружающей среды [6]; 2) наличие нескольких пространственно разнесенных модулирующих воздействий, которые необходимо одновременно регистрировать. Последняя задача возникает в распределенных датчиках физических величин [3] или в линиях сбора данных с безразрывным вводом информации посредством волоконных фазовых модуляторов [4].

При этом поведение сигналов от разных воздействий в условиях фединга может быть одинаковым или различным, что определяет выбор метода регистрации и обработки сигналов. В данной работе исследуется корреляция сигналов от разных воздействий в межмодовом интерферометре и полученные результаты объясняются на основе двух механизмов формирования фазовой модуляции когерентного излучения в многомодовых световодах.

Первый механизм присущ физическим воздействиям, вызывающим относительное приращение фазы отдельной моды, не зависящее от номера моды:

$$\frac{\delta\theta_m}{\theta_m} = K \cdot V, \quad K = f(L_1, V, \dots), \quad K = \text{const}(m), \quad (1)$$

где  $\theta_m$  — фазовая задержка  $m$ -й моды на участке световода, подвергнутом воздействию  $V$ ;  $K$  — коэффициент относительного приращения фазы для данного воздействия. Данный механизм действует при однородном нагреве, изотропных давлении и растяжении волоконного световода [1,2].

Ко второму механизму отнесем случаи, когда внешнее воздействие приводит к относительному изменению фазы моды, зависящему от ее номера:

$$\frac{\delta\theta_m}{\theta_m} = K_m \cdot V, \quad K_m \neq \text{const}(m), \quad (2)$$

где  $K_m$  — коэффициент относительного приращения фазы при воздействии  $V$  для  $m$ -й моды. Такая ситуация возникает при воздействиях, вызывающих взаимодействие мод: изгиб, поперечное давление, локальная скрутка, нагрев [7,8].

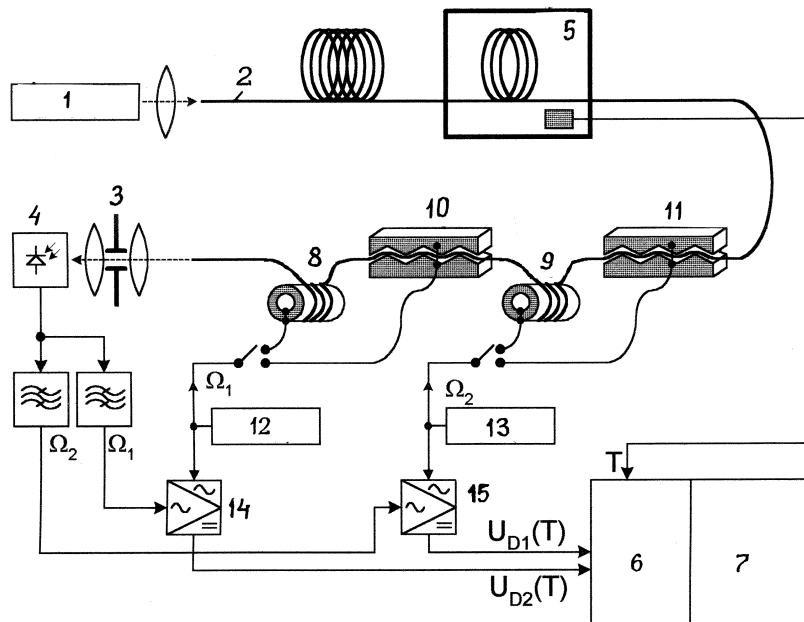


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки.

Далее основное внимание уделено экспериментальному и теоретическому рассмотрению корреляционных свойств поведения сигналов от различных источников фазовой модуляции в условиях медленных изменений параметров световода, имитирующих процессы "фединга".

В экспериментальной установке (рис. 1) применяли гелий-неоновый газовый лазер (1) с  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ , мощностью 2 mW, градиентное волокно (2) с диаметром сердцевины  $50 \mu\text{m}$ , с двумя защитными покрытиями ( $\varnothing = 0.8 \text{mm}$ ), длиной 500 mm. Излучение на выходе световода фокусировалось объективом со встроенной ирисовой диафрагмой (3) на кремниевый фотодиодный приемник (4). Диафрагмирование необходимо для выделения межмодового интерференционного сигнала. Часть световода длиной 10 m помещалась в термостат (5), температура в котором контролировалась датчиком и после АЦП (6) регистрировалась ЭВМ (7).

В установке использовались два типа волоконно-оптических фазовых модуляторов, соответствующие отмеченным выше механизмам ФМ. Модуляторы первого типа (8, 9) представляли собой пьезокерамический цилиндр диаметром 30 мм, с намотанным на его внешнюю поверхность волоконным световодом длиной 3 м (рис. 1). Изменение диаметра цилиндра под воздействием электрических сигналов вызывало изменение оптической длины световода и разности фаз интерферирующих мод. В модуляторах второго типа (10, 11) волокно в защитных оболочках помещалось между парой металлических зубчатых пластин с парой пьезокерамических брусков (рис. 1). Вся конструкция находилась в корпусе с поджимными винтами, позволяющими изменять величину статического давления на пластины для выбора рабочей точки. Возникающие игобы световода вызывали взаимодействие мод, приводящее к изменению их амплитуд и фаз [7,8,10].

Фазовые модуляторы возбуждались гармоническими сигналами (генераторы 12, 13) на частотах  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  в диапазоне 1–30 кГц.

Эксперимент состоял в одновременной регистрации уровня и знака гармоник выходного сигнала с частотами  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  ("отклики" от разных модуляторов) при медленном изменении температуры участка волокна в термостате. Для этого составляющие выходного сигнала селектировались по частоте и детектировались с помощью синхронных детекторов (14, 15) (постоянная времени 0.1 с). Выходные сигналы детекторов  $U_{D1}$  и  $U_{D2}$  подавались на АЦП и регистрировались компьютером.

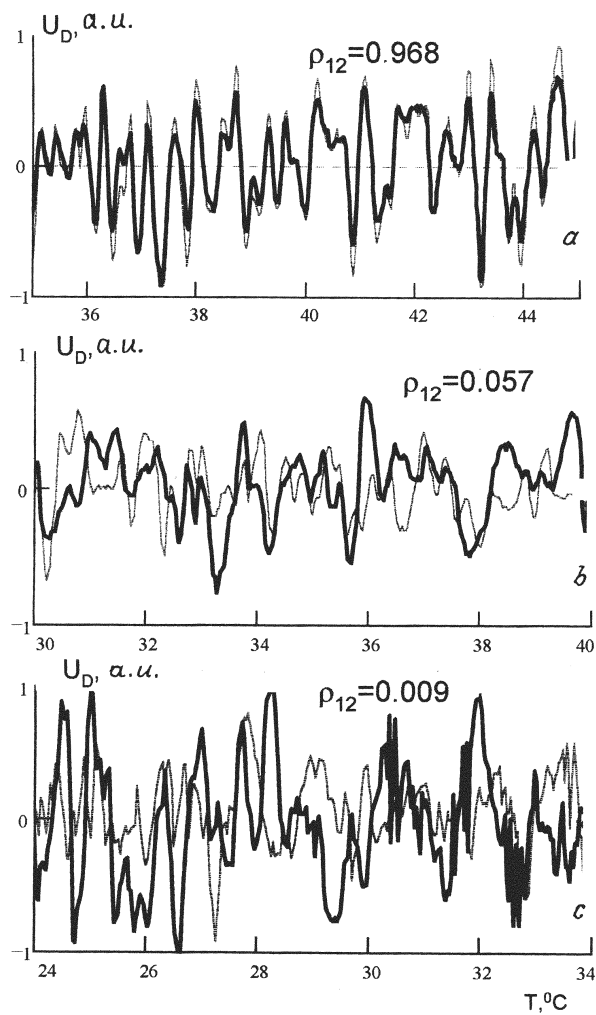
При сканировании температуры участка световода компьютер фиксировал двумерную выборку значений  $\{U_{D1k}; U_{D2k}\}$ . Поскольку температура 10-метрового участка световода изменялась не несколько десятков градусов, то полученная выборка хорошо отражает статистику работы межмодового интерферометра в реальных условиях. Результаты экспериментов (рис. 2) показывают существенную разницу в корреляции значений выходных сигналов в зависимости от типа модуляторов.

Коэффициент корреляции сигналов от модуляторов вычисляли по обычной формуле [9]:

$$\rho_{12} = \frac{c_{12}}{\sigma_1 \sigma_2}, \quad (3)$$

где  $c_{12} = \langle U_{D1} U_{D2} \rangle$  — ковариация,  $\sigma_{1,2}^2 = \langle U_{D1,2k}^2 \rangle$  — дисперсии для совместной выборки  $\{U_{D1k}; U_{D2k}\}$ .

На рис. 2 представлены фрагменты полученных зависимостей в интервале изменения температуры  $\Delta T \sim 10^\circ\text{C}$ . Для вычисления



**Рис. 2.** Зависимость сигналов синхронных детекторов от температуры световода (толстая линия — сигнал  $U_{D1}$ , тонкая линия —  $U_{D2}$ ): *a* — модуляторы I типа (M1 и M3), *b* — модуляторы разных типов (M1 и M2), *c* — модуляторы II типа (M2 и M4).

коэффициентов корреляции использовалась выборка, полученная на интервале  $\Delta T \sim 60^\circ\text{C}$ .

Сигналы от двух модуляторов первого типа практически полностью коррелированы (рис. 2, *a*), коэффициент корреляции  $\rho_{12} = 0.968$ . Этот результат не зависел от места расположения модуляторов и амплитуд модулирующих сигналов (при выполнении условий малости сигналов), количества витков световода на модуляторе, размера диафрагмы на выходе оптической схемы.

Сигналы от двух модуляторов разного типа (рис. 2, *b*) фактически не коррелированы ( $\rho_{12} = 0.057$ ) в широком диапазоне условий эксперимента: положения модуляторов, степени диафрагмирования, амплитуд возбуждающих сигналов.

Сигналы от двух модуляторов второго типа также полностью не коррелированы ( $\rho_{12} = 0.009$ ), несмотря на то что сами модуляторы и условия их работы выбраны максимально близкими (рис. 2, *c*).

Для объяснения полученных зависимостей необходимо рассмотреть интенсивность света на выходе волокна с учетом отмеченных условий приращения фазы для разных типов модуляторов.

При диафрагмировании интенсивность световой волны для монохроматического возбуждения можно записать в виде [1,6]:

$$I = \sum_{m=1}^N a_m + \sum_{m \neq n}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \cos(\Delta\beta_{mn}L + \Delta\Phi_{mn}), \quad (4)$$

где

$$a_m^2 = \frac{1}{2} A_m^2 \iint E_m^2(r, \varphi) ds, \quad a_{mn} = A_m A_n \iint_{\Delta S} E_m(r, \varphi) E_n(r, \varphi) ds,$$

$A_m$  — коэффициент возбуждения  $m$ -й моды;  $E_m(r, \varphi)$  — модовая функция  $m$ -й моды от поперечных координат  $r, \varphi$ ;  $\Delta S$  — поверхность на выходном торце волокна, выделяемая диафрагмой;  $\Delta\beta_{mn}L + \Delta\Phi_{mn} = (\beta_m - \beta_n)L + \Phi_m - \Phi_n$  — разность фазовых задержек излучения  $m$ -й и  $n$ -й мод в световоде;  $\beta_m$  — постоянная распространения  $m$ -й моды;  $L$  — длина световода;  $\Phi_m$  — сдвиг фазы  $m$ -й моды, определяемый многочисленными фазовыми приращениями световой волны за время распространения по волокну, в результате "дефектов" (неоднородностей и изгибов), приводящих к продольной

нерегулярности световода и взаимодействию мод [5,7,8]. Как известно [6,7], диафрагмирование выходного излучения в межмодовых волоконных интерферометрах необходимо для преобразования фазовой модуляции световых волн в модуляцию интенсивности. При регистрации всего излучения, в силу ортогональности мод, коэффициенты  $a_{mn} = 0$  и интерференционный сигнал отсутствует.

Воздействия на волоконный световод, оказываемые посредством фазового модулятора или физической величиной  $V$ , подлежащей измерению, вызывают изменения фазы отдельных мод и их разностей, что приводит к изменению интенсивности  $\delta I(V)$  — сигналу межмодовой интерференции.

Для наглядного описания воздействия первого типа будем использовать модель модуляции геометрической длины световода  $\delta L(V)$ . Учет изменения коэффициента преломления сердцевины при реальном механическом удлинении волокна делает формулы более громоздкими, не меняя сути процессов и результатов рассмотрения. Разность фаз мод можно представить в виде:

$$\Delta\varphi_{mn} = \Delta\beta_{mn}L + \Delta\Phi_{mn} + \Delta\beta_{mn}\delta L(V). \quad (5)$$

Если имеется несколько источников фазовой модуляции первого типа, то каждый из них будет вызывать соответствующее приращение фазы.

Изменение интенсивности света  $\delta I$  от воздействия  $\delta L(V)$  можно получить из выражения (4):

$$\delta I = \delta L(V) \left\{ \sum_{m \neq n}^N \sum_{n \neq m}^N a_{mn} \sin(\Delta\beta_{mn}L + \Delta\Phi_{mn}) \Delta\beta_{mn} \right\}, \quad (6)$$

где учтена малость фазового приращения  $\Delta\beta_{mn} \delta L(V) \ll 1$ . Например, для двух разных воздействий  $V_1$  и  $V_2$ , приводящих к удлинениям  $\delta L_1$  и  $\delta L_2$ , "отклики" по интенсивности составят:

$$\begin{aligned} \delta I_1 &= \delta L_1(V_1) \left\{ \sum_{m \neq n}^N \sum_{n \neq m}^N a_{mn} \sin(\Delta\beta_{mn}L + \Delta\Phi_{mn}) \Delta\beta_{mn} \right\}, \\ \delta I_2 &= \delta L_2(V_2) \left\{ \sum_{m \neq n}^N \sum_{n \neq m}^N a_{mn} \sin(\Delta\beta_{mn}L + \Delta\Phi_{mn}) \Delta\beta_{mn} \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Если удлинение  $\delta L(V)$  фиксировано, то величина и знак соответствующего изменения интенсивности определяются суммой в фигурных скобках. При изменении внешних условий, и прежде всего температуры световода, параметры  $\Delta\beta_{mn}$  и  $L$  изменяются, что вызывает так называемый "феддинг" сигнала межмодового интерферометра [6].

Поскольку, как следует из (6) и (7), изменения интенсивности от удлинений  $\delta L_1$  и  $\delta L_2$  отличаются только фиксированной величиной воздействия, то при изменении температуры световода сигналы будут изменяться единообразно и коэффициент корреляции равен единице:

$$\begin{aligned} \rho_{12} &= \frac{\langle \delta I_1 \delta I_2 \rangle}{\sqrt{\langle \delta I_1^2 \rangle \langle \delta I_2^2 \rangle}} \\ &= \frac{\delta L_1 \delta L_2 \langle \left( - \sum_{m \neq n}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \sin(\Delta\beta_{mn}L + \Delta\Phi) \beta_{mn} \right)^2 \rangle}{\sqrt{\delta L_1^2 \delta L_2^2 \langle \left( - \sum_{m \neq n}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \sin(\Delta\beta_{mn}L + \Delta\Phi) \Delta\beta_{mn} \right)^2 \rangle}} = 1. \quad (8) \end{aligned}$$

Таким образом, составляющие выходного сигнала от всех воздействий первого типа феддингируют одинаково при любых параметрах схемы: дифрагмировании на выходе световода, местоположения и амплитуды воздействий (при сохранении условия малости), модового состава и т. д.

Напомним, что в эксперименте для удобства различения сигналов и их количественных измерений использовались гармонические модулирующие воздействия. Составляющие сигнала от разных модуляторов селектировались по частоте, а затем синхронным детектированием регистрировались их амплитуда и знак.

Воздействия второго типа, приводящие к фазовой модуляции с приращением фаз мод, зависящим от номера моды (выражение (2)), можно объяснить на основе явления связи мод. Причем приращение фазовой задержки моды на длине взаимодействия  $l$  можно записать через приращения постоянных распространения на этом участке:

$$\beta_m(V) = \beta_m + \delta\beta_m = \beta_m + \sum_{n=1}^N \frac{k_{mn}^2}{\Delta\beta_{mn}}, \quad (9)$$

где  $k_{mn}$  — коэффициенты связи мод [8,10].



Тогда приращение выходной интенсивности от воздействия примет вид:

$$\delta I = \left\{ \sum_{m \neq n}^N \sum_{n}^N a_{mn} \cdot \delta \beta_{mn} \cdot l \cdot \sin(\Delta \beta_{mn} L + \Delta \Phi_{mn}) \right\}, \quad (10)$$

где  $\delta \beta_{mn} = \delta \beta_m - \delta \beta_n$  — набор знакопеременных величин, определяемых воздействием, приводящим к связи мод. Для двух воздействий получаем:

$$\begin{aligned} \delta I_1 &= l_1 \left\{ \sum_{m \neq n}^N \sum_{n}^N a_{mn} \cdot \delta \beta_{mn}^{(1)} \sin(\Delta \beta_{mn} L + \Delta \Phi_{mn}) \right\}, \\ \delta I_2 &= l_2 \left\{ \sum_{m \neq n}^N \sum_{n}^N a_{mn} \cdot \delta \beta_{mn}^{(2)} \cdot \sin(\Delta \beta_{mn} L + \Delta \Phi_{mn}) \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

В данном случае, в отличие от (7), сигналы от разных воздействий отличаются коэффициентами при синусоидальных слагаемых в сумме. Таким образом,  $\delta I_1$  и  $\delta I_2$  при дрейфе температуры световода могут изменяться по-разному.

Будем полагать, что из-за сложности и многофакторности механизма связи мод, разные воздействия (отличающиеся по физическому механизму, амплитуде, длине взаимодействия  $l$  и т. д.) приводят к наборам  $\delta \beta_{mn}^{(1)}$ ,  $\delta \beta_{mn}^{(2)}$ , различным по величинам и знакам. При вычислении коэффициента корреляции для сигналов (11), после усреднения по  $T$  (с учетом  $\langle \sin^2(aT) \rangle = 1/2$ , и  $\langle \sin(aT) \sin(bT) \rangle = 0$  при  $a \neq b$ ) получаем:

$$\begin{aligned} \rho_{12} &= \frac{\langle \delta I_1 \delta I_2 \rangle}{\sqrt{\langle \delta I_1^2 \rangle \langle \delta I_2^2 \rangle}} \\ &= \frac{l_1 l_2 \sum_{m \neq n}^N \sum_{n}^N a_{mn}^2 \delta \beta_{mn}^{(1)} \delta \beta_{mn}^{(2)}}{\sqrt{l_1^2 l_2^2 \left( \sum_{m \neq n}^N \sum_{n}^N a_{mn}^2 (\delta \beta_{mn}^{(1)})^2 \right) \left( \sum_{m \neq n}^N \sum_{n}^N a_{mn}^2 (\delta \beta_{mn}^{(2)})^2 \right)}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Поскольку, как уже отмечалось, наборы  $\delta \beta_{mn}^{(1)}$ ,  $\delta \beta_{mn}^{(2)}$  содержат различные знакопеременные коэффициенты, то из (12) видно, что для больших значений  $N$  коэффициент корреляции сигналов (11)  $\rho_{12} \rightarrow 0$ . Как и в

предыдущем случае, этот результат не зависит от параметров ситемы на входе и выходе световода.

Наконец, отметим, что при двух воздействиях разных типов сигналы федингируют некоррелированно. Для двух воздействий разного типа:

$$\delta I_1 = \delta I_1 \left\{ \sum_{m \neq n}^N \sum_{n}^N a_{mn} \cdot \Delta \beta_{mn} \cdot \sin(\Delta \beta_{mn} L + \Delta \Phi_{mn}) \right\},$$

$$\delta I_2 = I_2 \left\{ \sum_{m \neq n}^N \sum_{n}^N a_{mn} \cdot \delta \beta_{mn}^{(2)} \cdot \sin(\Delta \beta_{mn} L + \Delta \Phi_{mn}) \right\} \quad (13)$$

нетрудно видеть, что изменение аргументов синусов приводит к разному изменению  $\delta I_1$  и  $\delta I_2$ , а коэффициент корреляции стремится к нулю по тем же соображениям, что и в предыдущем случае.

Таким образом, полученные результаты показывают, что механизм связи мод, обычно не учитываемый, может вызывать появление некоррелированных сигнальных откликов. Эти особенности необходимо учитывать при разработке волоконно-оптических датчиков, линий сбора данных и других устройств с применением межмодовой интерференции.

Кроме того, эти результаты представляются полезными и для уточнения моделей модового шума в многомодовых волоконных системах.

## Список литературы

- [1] Бутусов М.М., Галкин С.Л., Орбинский С.П., Пал Б.П. Волоконная оптика и приборостроение. Л.: Машиностроение, 1987. 328 с.
- [2] Евтихийев Н.Н., Засовин Э.А., Мирвицкий Д.И. // Итоги науки и техники. Сер. Связь. М.: ВИНТИ, 1991. Т. 8. С. 24–109.
- [3] Гуляев Ю.В., Меш М.Я., Проклов В.В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах. М.: Радио и связь, 1991. 152 с.
- [4] Culshaw B., Ball P.R., Pond J.C., Sadler A.A. // Electronics and Power. 1981. V. 11. N 2. P. 148–150.
- [5] Crosignani B., Yariv A. // J. Opt. Soc. Am. 1983. V. 73. N 8. P. 1022–1027.
- [6] Kingsly S.A., Davies D.E.N. // Electronics letters. 1978. V. 14. N 11. P. 322–324, 335–337.
- [7] Котов О.И., Марусов О.Л., Николаев В.М. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 7. С. 47–52.

- [8] *Унгер Х.Г.* Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980. 656 с.
- [9] *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с.
- [10] *Taylor H.F.* / J. Lightwave technology. 1984. V. 1. LT-2. N 5. P. 617–628.