

06;07;12

## **Многоканальный прием сигналов межмодового волоконно-оптического интерферометра в условиях помех**

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

С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 29 июня 2000 г.

Рассмотрен межмодовый волоконный интерферометр в режиме регистрации "сигнального" воздействия на фоне помех. Для теоретического рассмотрения проблемы применен вероятностный подход. На основе теоретических расчетов и экспериментов демонстрируется высокая эффективность многоканального приема сигнала межмодового интерферометра, позволяющая резко снизить вероятность ошибочного решения о наличии воздействия по сравнению с обычным приемом сигнала одним фотодиодом.

Данная статья, как и предыдущие [1,2], связана с анализом работы межмодового волоконного интерферометра (МВИ) и рассматривает важный для практических приложений вопрос о преимуществах многоканальной регистрации воздействия на МВИ при наличии помех.

В большинстве случаев МВИ используется как распределенная в пространстве измерительная система, подверженная внешним воздействиям различного характера, среди которых всегда существуют как полезные (сигнальные), так и "паразитные" (неинформативные) воздействия. По мнению авторов, именно этот вид шумов (а точнее, помех) является основным в сигнале реального МВИ, работающем в режиме распределенного датчика физических величин. Другие виды шумов, связанные с лазерным источником или фотоприемником, имеют, как показывают эксперименты, меньшие величины и в данной работе не рассматриваются. Отметим, что поведение сигналов МВИ, как "паразитных", так и "полезных", достаточно изучено в литературе, посвященной так называемым модовым шумам в волоконных линиях связи [3,4] и системах передачи данных на базе межмодовой интерференции (дифференциальной фазовой модуляции мод) [5,6]. Однако более подробное

рассмотрение формирования и поведения составляющих сигнала МВИ, важное для датчиковых систем, приводится в [1].

В случае возбуждения многомодового световода длиной  $L$  когерентным источником с частотой  $\omega$  на выходе световода возникает пятнистая картина как результат интерференции многих мод. Если на приемник поступает лишь часть излучения (пятнистой картины) площадью  $S$ , то интенсивность регистрируемого им света можно записать в виде [2]:

$$I(L, S) = I_0(1 + \rho_0 + \rho_1), \quad (1)$$

где

$$I_0 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N A_i^2 \int_S E_i^2 ds$$

— постоянная составляющая,

$$\rho_0 = \frac{1}{I_0} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^N A_i A_k^* \left\{ \int_S E_i E_k^* ds \right\} \cos \psi_{ik}^0$$

— медленно меняющаяся составляющая,

$$\rho_1 = \frac{1}{I_0} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^N A_i A_k^* \left\{ \int_S E_i E_k^* ds \right\} \sin \psi_{ik}^0 \cdot \delta \Psi_{ik}$$

— ”сигнальная” составляющая.

В разложении (1) разности фаз интерферирующих мод  $\psi_{ik}$  представлены в виде двух слагаемых  $\psi_{ik} = \psi_{ik}^0 + \delta \psi_{ik}$ . Слагаемое  $\psi_{ik}^0$  — квазистатическая часть разностей фаз мод, связанная с параметрами мод и внешними условиями световода (температура, давление и т.д.), изменения которой определяют фединг сигнала МВИ. Величины  $\delta \psi_{ik}$  определяются ”быстрыми” воздействиями на волокно и, как правило, являются малыми ( $\delta \psi_{ik} \ll 1$ ).

Далее будем рассматривать лишь слагаемое  $\rho_1$ , поскольку оно содержит информацию о воздействиях и может быть легко выделено из сигнала (1) с помощью фильтрации в диапазоне рабочих частот.

Так же полагаем, что  $\delta \psi_{ik}$  вызываются двумя причинами: 1) сигнальными воздействиями, которые необходимо измерить; 2) паразитными

возмущениями волокна, попадающими в частотный диапазон полезных сигналов. Таким образом,  $\delta\psi_{ik} = \delta\psi_{ik}^S + \delta\psi_{ik}^n$ .

Величину сигнального воздействия обозначим  $S$ , а совокупную величину паразитных воздействий  $n$ . Тогда составляющую  $\rho_1$  сигнала МВИ можно представить в виде двух слагаемых:

$$\rho_1 = K_S \cdot S + K_n \cdot n = \rho_S + \rho_n, \quad (2)$$

где коэффициенты  $K_S$  и  $K_n$  имеют вид:

$$K_S = \frac{1}{I_0} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \sum_{k=1}^N \left( A_i A_k^* \left\{ \int_S E_i E_k^* ds \right\} \sin \psi_{ik}^0 \cdot K_{ik}^S \right),$$

$$K_n = \frac{1}{I_0} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \sum_{k=1}^N \left( A_i A_k^* \left\{ \int_S E_i E_k^* ds \right\} \sin \psi_{ik}^0 \cdot K_{ik}^n \right). \quad (3)$$

В выражениях (3) введены коэффициенты чувствительности разности фаз мод к воздействиям:  $K_{ik}^S = (\delta\psi_{ik}^S/S)$ ,  $K_{ik}^n = (\delta\psi_{ik}^n/n)$ . Как было рассмотрено в [1], для реальных механических воздействий на многомодовый световод, с учетом явления связи мод, коэффициенты  $K_{ik}^{S,n}$  зависят от номеров мод, в результате чего коэффициенты  $K_S$  и  $K_n$  изменяются от внешних условий некоррелированно. Поэтому при изменении внешних условий величины полезной составляющей  $\rho_S$  и составляющей помех  $\rho_n$  в выходном сигнале МВИ подвержены независимому федингу, что, очевидно, резко ограничивает возможность регистрировать информативные воздействия на фоне помех. Для решения проблемы, как и в работе [2], предлагается использовать многоканальный прием сигнала МВИ, а именно направлять выходное излучение световода на  $M$  фотодиодов и суммировать их сигналы по модулю.

Чтобы рассмотреть преимущество многоканального приема, введем простой принцип принятия решения о регистрации воздействия на МВИ: если модуль выходного сигнала (в рабочей полосе частот) превышает некоторый заданный уровень  $X_0$ , то фиксируется наличие воздействия на световод.

Далее, как и в работе [2], используем вероятностное описание. Изменения  $\psi_{ik}^0$  от внешних условий определяются изменениями параметров световода, процессами взаимодействия мод и двулучепреломления и

на практике в каждый данный момент являются фактически непредсказуемыми, т.е. могут быть представлены как случайные величины. Поэтому, ввиду центральной предельной теоремы при большом числе слагаемых двойных сумм в (3), значения  $K_S$  и  $K_n$  в конкретный момент времени можно описать независимыми случайными величинами, имеющими нормальный закон распределения с нулевым средним и некоторой дисперсией  $\sigma_K^2$ . Полезное воздействие  $S$  полагается регулярным, а  $n$  в момент измерения также может быть представлено централизованной гауссовой случайной величиной с дисперсией  $\sigma_n^2$ . Тогда составляющая  $\rho_S$  в (2) представляется гауссовой случайной величиной со среднеквадратическим отклонением  $\sigma = S \cdot \sigma_K$ . Для упрощения рассуждений и большей их наглядности будем полагать, что  $S$  и  $n$  имеют одну размерность, и введем параметр  $A^2 = S^2/\sigma_n^2$ , который имеет смысл отношения по мощности сигнал/помеха для воздействия на МВИ. В противном случае необходимо введение более сложного и менее наглядного параметра, характеризующего уровни полезного и мешающего воздействий, но общность результатов от этого не изменится. Тогда значение составляющей  $\rho_n$  представляется произведением независимых гауссовых величин  $n$  и  $K_n$ , а  $\sigma = S \cdot \sigma_K = A \cdot \sigma_n \cdot \sigma_K$ .

Таким образом, при отсутствии сигнального воздействия:  $S = 0$  (присутствуют только помехи) — значение модуля выходного сигнала МВИ  $x^{(0)}$  задается только модулем от составляющей помех  $x^{(0)} = |\rho_n|$ . Если значение  $x^{(0)}$  превысит порог  $X_0$ , произойдет ошибочное срабатывание решающей системы — ”выброс” составляющей помех принят за результат информативного воздействия. При наличии воздействия  $S$  значение сигнала МВИ  $x^{(S)}$  определяется модулем  $x^{(S)} = |\rho_S + \rho_n|$ . В этом случае ошибочное решение — ”потеря сигнала” может произойти, если значение  $x^{(S)}$  окажется меньше  $X_0$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} S = 0: \quad x^{(0)} = |\rho_n| = |K_n \cdot n|, \\ \quad \quad \quad x^{(0)} < X_0 \text{ — ”верно”, } \quad x^{(0)} > X_0 \text{ — ”ошибка”,} \\ S \neq 0: \quad x^{(S)} = |\rho_S + \rho_n| = |\rho_S + K_n \cdot n|, \\ \quad \quad \quad x^{(S)} > X_0 \text{ — ”верно”, } \quad x^{(S)} < X_0 \text{ — ”ошибка”.} \end{array} \right. \quad (4)$$

В случае многоканального приема с суммированием модулей сигналов  $M$  фотодиодов ситуация аналогична, но значение сигнала МВИ

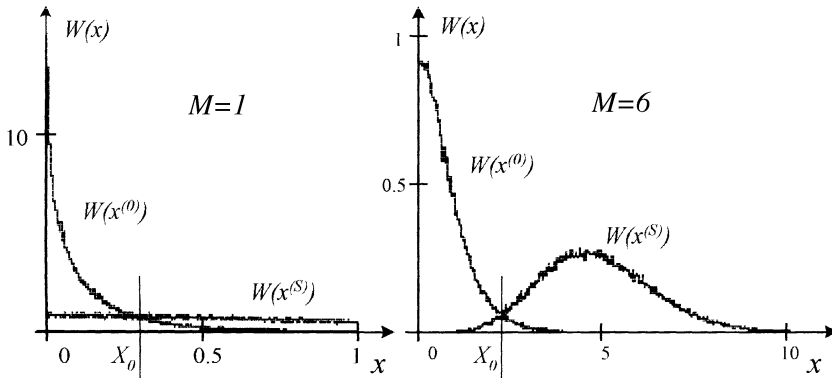
в этом случае описывается более сложной комбинацией случайных величин:

$$\left\{ \begin{array}{l} S = 0: \quad x^{(0)} = \sum_{i=1}^M |K_n^i \cdot n|, \\ \quad \quad \quad x^{(0)} < X_0 \text{ — "верно"}, \quad x^{(0)} > X_0 \text{ — "ошибка"}, \\ S \neq 0: \quad x^{(S)} = \sum_{i=1}^M |\rho_S^i + K_n^i \cdot n|, \\ \quad \quad \quad x^{(S)} > X_0 \text{ — "верно"}, \quad x^{(S)} < X_0 \text{ — "ошибка"}, \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $\rho_S^i$ ,  $K_n^i$ ,  $n$  — независимые центрированные гауссовы случайные величины со среднеквадратическими отклонениями  $\sigma$ ,  $\sigma_K$ ,  $\sigma_n = \sigma / (A \cdot \sigma_K)$  соответственно (при этом полагается, что условия диафрагмирования и уровни колебаний интенсивности для фотоприемников равноценны).

Дальнейший анализ посвящен оценке вероятности ошибки при регистрации воздействия и ее снижения за счет многоканального приема сигнала МВИ. Для оценки вероятности ошибочного решения необходимо определить распределения "сигналов" (4) и (5), выбрать оптимальный порог срабатывания  $X_0$  и найти соответствующие интегралы по областям  $x^{(S)} < X_0$  и  $x^{(0)} > X_0$ . Поскольку расчеты вышеупомянутых распределений по аналитическим выражениям (аналогичным выражениям со свертками, использованным в [2]) при  $M \sim 10$  оказались затруднительными, для оценок использовалось компьютерное моделирование. При этом посредством математического программного обеспечения генерировались независимые центрированные гауссовы случайные величины: 10 величин  $\rho_S^i$  с дисперсией  $\sigma^2 = 1$ , 10 величин  $K_n^i$  с дисперсией  $\sigma_K^2 = 1$  и величина  $n$  с дисперсией  $\sigma_n^2 = 1/A^2$  (т. е. полагалось  $S = 1$ ). В расчетах использовались  $10^5$  значений каждой из этих величин. Для каждого набора значений случайных величин производились вычисления  $x^{(0)}$  и  $x^{(S)}$  по выражениям (4) для  $M = 1, 2, 4, 6, 8, 10$ . Затем строились гистограммы (диапазон значений разбивался на 500 промежутков), которые после нормировки отражали распределение значений моделированных сигналов МВИ. На рис. 1 приведен пример нормированных гистограмм  $x^{(0)}$  и  $x^{(S)}$  для случаев моделирования сигналов одного ( $M = 1$ ) и десяти ( $M = 10$ ) фотодиодов при отношении сигнал/помеха:  $A = 5$ .

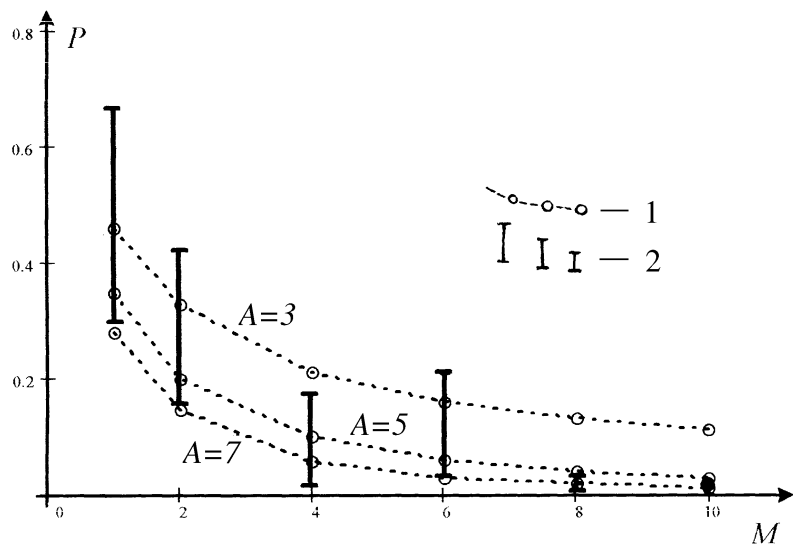
Выбор порога срабатывания  $X_0$  целесообразно осуществлять по принципу, аналогичному критерию идеального наблюдателя в системах



**Рис. 1.** Примеры расчетов нормированных гистограмм значений сигнала МВИ для  $A = 5$ . Слева для одноканального фотоприемника ( $M = 1$ ), справа для шестиканального ( $M = 6$ ).

передачи дискретных сообщений с параллельными каналами [7,8], а именно по точке пересечения распределений (гистограмм)  $x^{(0)}$  и  $x^{(S)}$ . В нашем случае это соответствует условию минимума полной вероятности ошибочного приема, складывающегося из вероятности "потери сигнала" ( $x^{(S)} < X_0$ ) и вероятности "ложного срабатывания" ( $x^{(0)} > X_0$ ). Для каждого значения  $M$  и  $A$  по гистограммам определялся порог  $X_0$  и далее посредством вычисления площади под нормированными гистограммами оценивалась вероятность ошибочного решения о регистрации воздействия. На рис. 2 приведены оценки вероятности ошибки, определенные описанным способом, в зависимости от числа каналов фотоприема и отношения сигнал/помеха.

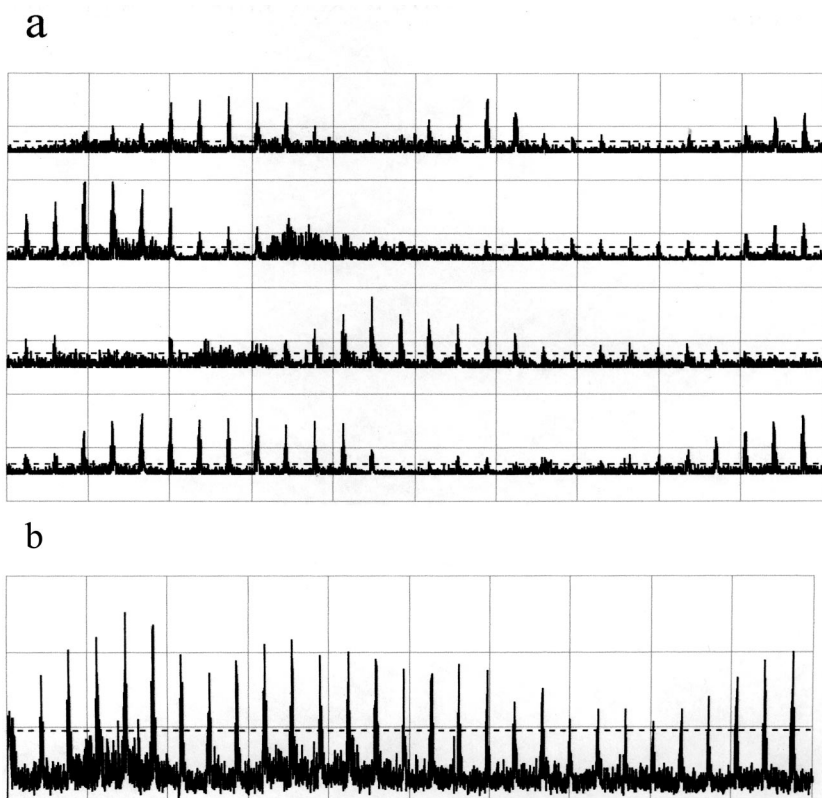
Экспериментальная проверка сделанных выводов проводилась на установке, содержащей He-Ne лазер ( $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ ,  $P = 2 \mu\text{W}$ ), многомодовый градиентный световод длиной 480 м. Выходное излучение световода направлялось на десятиканальный фотоприемник с фотодиодами, расположенными в один ряд, и блок. Через АЦП сигналы фотоприемника регистрировались ЭВМ, кроме того, регистрировался опорный сигнал, задающий моменты наличия воздействия. Часть световода длиной 5 м нагревали в диапазоне температур  $20 \div 40^\circ\text{C}$ , небольшой участок волокна  $\sim 10$  м периодически подвергался слабым



**Рис. 2.** Вероятность ошибки при регистрации воздействия на МВИ в зависимости от числа каналов фотоприемника: 1 — по теоретическим расчетам, 2 — по эксперименту (разброс определяется учетом всех возможных комбинаций из  $M$  приемников при  $M \neq 10$ ).

механическим возмущениям с помощью электродинамического устройства для имитации сигнальных воздействий. Никаких специальных мер для создания помех в экспериментах не применяли. Они возникали вследствие воздействий на световод окружающей среды лаборатории и хорошо регистрировались при соответствующем подборе коэффициентов усиления в каналах фотоприемника.

Регистрация сигналов межмодового интерферометра проводилась при медленном нагреве участка волокна и кратковременных сигнальных воздействиях (длительность воздействия  $\sim 0.5$  s, период следования 10 s). Фрагмент записи сигнала МВИ в двух каналах фотоприемника представлен на рис. 3, а. Хорошо видны особенности поведения сигнала и помехи: медленные флуктуации амплитуды (фединг) сигнала и помехи, отсутствие корреляции фединга сигнальной составляющей и помехи в одном канале и между каналами. По зафиксированным сигналам



**Рис. 3.** Фрагмент зависимости от времени выходных сигналов фотоприемника. *a* — пример зависимостей модулей выходных сигналов четырех (из 10) фотодиодов; *b* — зависимость сигнала после суммирования модулей 10 каналов. Пунктирной линией показан оптимальный порог срабатывания решающего устройства.

фотодиодов, с помощью компьютера, формировались сигналы МВИ с обработкой "сумма модулей" 2, 4, 6, 8 и 10 каналов фотоприемника. На рис. 3, *b* показан фрагмент сигнала МВИ после обработки суммированием модулей 10 каналов фотоприемника.



Затем по сформированным зависимостям определялись выборки значений сигналов МВИ при наличии воздействия на световод, т.е.  $x^{(S)}$ , и в моменты отсутствия воздействия, т.е.  $x^{(0)}$  (для более "жестких" оценок значение  $x^{(0)}$  определялось по пиковому значению сигнала МВИ в течение  $\sim 0.5$  s, непосредственно перед воздействием на световод). Исходя из полученных наборов экспериментальных значений  $x^{(0)}$  и  $x^{(S)}$ , для каждой конкретной комбинации из  $M$  каналов выбирался порог срабатывания  $X_0$  (на рис. 3 показан горизонтальной линией), и по соотношениям значений  $x^{(0)}$  и  $x^{(S)}$ , превышающих и не превышающих  $X_0$ , оценивалась вероятность ошибки.

Результаты экспериментальных оценок вероятности ошибки приведены на рис. 2. При этом отметим, что, исходя из зависимостей выходных сигналов фотоприемника, отношение сигнал/помеха для воздействий на световод в рабочей полосе частот (1–100 Hz) в данном эксперименте составляло примерно 4–5.

Из графиков (рис. 2) нетрудно видеть, что при одноканальном приеме сигнала МВИ вероятность ошибки оказывается чрезвычайно высокой даже при существенном превышении сигнальным воздействием уровня помех. Этого следовало ожидать, поскольку, согласно (2), на выходе МВИ сигнальное воздействие и помеха содержат коэффициенты, подверженные независимому некоррелированному федингу. Как было показано в [2], многоканальный прием с суммированием модулей снижает фединг сигнала МВИ. В данном случае снижение фединга увеличивает "разнесенность" значений составляющей помехи при отсутствии информативного воздействия и сигнала МВИ при его наличии и, следовательно, снижает вероятность ошибочного решения о регистрации воздействия. Так, при  $M = 10$  вероятность ошибки снижается более чем на порядок. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими и демонстрируют несомненный выигрыш при многоканальном приеме.

В заключение отметим, что в данной работе демонстрируется эффективность многоканального приема сигнала МВИ для регистрации воздействий на многомодовый световод на примере простейшей пороговой системы принятия решения. Очевидно, что применение многоканального фотоприемника и более совершенных алгоритмов принятия решения позволит в значительной мере преодолеть серьезные проблемы в применении МВИ, резко повысить работоспособность волоконных сенсорных устройств с межмодовой интерференцией и их практическую применимость.

## Список литературы

- [1] *Косарева Л.И., Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 2. С. 53–63.
- [2] *Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 12. С. 44–50.
- [3] *Petermann K.* // IEEE J. Quantum Electronics. 1980. V. QE-16. N 7. P. 761–770.
- [4] *Петрунькин В.Ю., Николаев В.М., Жахов В.В., Котов О.И., Филипов В.Н.* // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 7. С. 1317–1321.
- [5] *Culshaw B., Ball P.R., Pond I.C., Sadler A.A.* // Electronics and Power. 1981. V. 11. N 2. P. 148–150.
- [6] *Kingsley S.A., Davies D.E.* // Electronic Letters. 1978. V. 14. N 11. P. 335–337.
- [7] *Финк А.М.* Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. радио, 1963. 576 с.
- [8] *Андронов И.М., Финк Л.М.* Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. М.: Сов. радио, 1971. 408 с.