

07;12

Особенности многоканального приема сигналов межмодового волоконно-оптического интерферометра: снижение амплитудного фединга

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

С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 28 марта 2000 г.

В окончательной редакции 23 мая 2000 г.

Теоретически и экспериментально рассмотрен метод приема сигналов многомодового волоконного интерферометра на основе блока из M отдельных фотодетекторов с последующей обработкой двумя способами: а) суммирование модулей сигналов разных каналов, б) выбор модуля сигнала с максимальной амплитудой. Показано, что в обоих случаях наблюдается существенное снижение фединга амплитуды результирующего сигнала. В теоретическом анализе применена разработанная авторами статистическая модель многомодового интерферометра, в которой изменения сигналов в отдельных каналах предполагаются независимыми. В экспериментах использованы 10 фотодиодных приемников. Расчет и измерения показали, что отношение среднеквадратичной величины результирующего сигнала в условиях фединга к его среднему значению снижается более чем в 3 раза (при $M = 10$) в обоих способах обработки.

Одним из простейших по своему устройству волоконно-оптических интерферометров является межмодовый волоконный интерферометр (МВИ). Он представляет собой многомодовый волоконный световод длины L , возбуждаемый когерентным оптическим источником с временем когерентности, превышающим разности групповых задержек между модами [1,2]. На выходном торце волокна наблюдается при этом пятнистая картина, являющаяся результатом интерференции мод. Воздействия на световод вызывают фазовую модуляцию распространяющегося по волокну излучения, которая приводит к изменению разности фаз мод (так называемая дифференциальная фазовая модуляция). Последняя

проявляется в изменении интенсивностей различных частей интерференционной картины, что и регистрируется с помощью фотоприемника.

На основе МВИ можно создавать волоконно-оптические датчики физических величин [3,4], линии сбора данных с безразрывным вводом информации [5], фазостабильные световодные линии передачи сигналов [6], оптические сигнальные устройства [7].

Однако МВИ обладают существенным недостатком — федингом амплитуды регистрируемого сигнала [1,2], который связан с изменением фазовых соотношений интерферирующих мод.

Как известно, для борьбы с федингом применяют многоканальный прием сигналов с последующей обработкой. В частности, для МВИ предлагалось использовать четырехканальный приемник с нелинейными устройствами и выделением сигналов на вторых гармониках модуляционного воздействия [8]. Насколько нам известно, в литературе отсутствует детальный анализ МВИ с многоканальным приемником, рассматривающий различные методы обработки сигналов, а также разное количество каналов.

В данной работе представлена статистическая модель МВИ с многоканальным фотоприемником и приведены результаты экспериментального исследования фединга сигнала с 10-канальным детекторным устройством.

Будем рассматривать многомодовый изотропный световод, возбуждаемый когерентным источником с частотой ω . Интенсивность светового потока, регистрируемого одним фотоприемником, можно записать в виде [9,10]:

$$I(S) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N A_i^2 \int_S E_i^2 ds + \sum_{\substack{i,k \\ i>k}}^N [A_i A_k^* \int_S E_i E_k^* ds] \cdot \cos(\Psi_{ik}), \quad (1)$$

где L — длина световода, S — площадь интерференционной картины, регистрируемая данным фотоприемником, N — число распространяющихся мод, $A_{i(k)}$, $E_{i(k)}$ — амплитуда и модовая функция i -й (k -й) моды. Разность фаз мод Ψ_{ik} определяется формулой:

$$\Psi_{ik} = (\beta_i - \beta_k)L + (\phi_i - \phi_k), \quad (2)$$

где $\beta_{i(k)}$ — постоянная распространения i -й (k -й) моды, сдвиги фазы $\phi_{i(k)}$ формируются за счет явлений взаимодействия мод и двулучепреломления и зависят от воздействий на световод.

Для межмодового интерферометра, работающего, как правило, в режиме распределенного датчика, удобно представить величины Ψ_{ik} в виде:

$$\Psi_{ik} = \Psi_{ik}^0 + \delta\Psi_{ik}, \quad (3)$$

где Ψ_{ik}^0 — описывает значительные ($\gg \pi$), но ”медленные” (квазистатические с частотами менее 0.1 Hz) фазовые сдвиги, связанные с изменениями окружающих условий, в которых находится световод, например температуры, давления и т.п.; $\delta\Psi_{ik}$ — описывает ”быстрые” (с характерными частотами выше 10 Hz) и слабые ($\ll \pi$) сдвиги фаз от сигнальных (информативных) воздействий на волокно. При этом, после проведения тригонометрических преобразований, выражение (1) можно переписать в виде:

$$I(S) = I_0(1 + \rho_0 + \rho_1), \quad (4)$$

где I_0 — постоянная составляющая интенсивности, не зависящая от разности фаз мод, ρ_0 — составляющая, медленно меняющаяся с изменением внешних условий:

$$I_0 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N A_i^2 \int_S E_i^2 ds, \quad \rho_0 = \frac{1}{I_0} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N [A_i A_k^* \int_S E_i E_k^* ds] \cdot \cos(\Psi_{ik}^0),$$

а ρ_1 — ”быстро” меняющаяся составляющая, представляющая реакцию интерферометра на воздействие:

$$\rho_1 = -\frac{1}{I_0} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N [A_i A_k^* \int_S E_i E_k^* ds] \cdot \sin(\Psi_{ik}^0) \cdot \delta\Psi_{ik}. \quad (5)$$

Величина ρ_0 — описывает квазистатическую аддитивную помеху, которая может быть устранена посредством частотной фильтрации. Поэтому далее будем рассматривать лишь слагаемое ρ_1 , содержащее полезную информацию о воздействии.

Для дальнейшего анализа введем некоторое физическое воздействие на световод δs . В общем случае сдвиги фаз $\delta\psi_{ik}$, вызванные воздействием, можно записать в виде:

$$\delta\Psi_{ik} = V_{ik} \delta s, \quad (6)$$

где V_{ik} — коэффициенты, зависящие от параметров световода и длины участка, подвергнутого воздействию. Тогда реакцию МВИ на сигнальное воздействие δs можно записать в виде:

$$\rho_1 = \left\{ -\frac{1}{I_0} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N [A_i A_k^* \int_S E_i E_k^* ds] \cdot \sin(\Psi_{ik}^0) \cdot V_{ik} \right\} \cdot \delta s = \rho_2 \cdot \delta s, \quad (7)$$

где коэффициент $\rho_2 = \left\{ -\frac{1}{I_0} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N [A_i A_k^* \int_S E_i E_k^* ds] \cdot \sin(\Psi_{ik}^0) \cdot V_{ik} \right\}$ — коэффициент передачи МВИ, изменения которого зависят от внешних условий и являются мультипликативной помехой полезному сигналу, отражающей известное явление фединга сигнала МВИ.

Согласно (7), коэффициент ρ_2 — сложным образом зависит как от параметров световода, так и от внешних условий. Поэтому для дальнейшего анализа фединга сигнала предлагается перейти к статистическому рассмотрению сигнала МВИ, полагая значение ρ_2 в момент измерения воздействия случайной величиной.

Рассмотрим подробнее выражение (7). Оно представляет собой сумму синусоидальных слагаемых. Амплитуды слагаемых $A_i A_k^* (\int_S E_i E_k^* ds) \cdot V_{ik}$ определяются параметрами мод световода, условиями приема и длиной участка, подвергнутого воздействию, могут иметь разные знаки и большой разброс значений. Фазы синусоидальных слагаемых Ψ_{ik}^0 определяются как параметрами собственно световода, так и внешними условиями (температура, давление и т. п.), причем учитывают явления двулучепреломления и связи мод на неоднородностях.

В результате в произвольный момент регистрации воздействия фазы Ψ_{ik}^0 будем полагать независимыми случайными величинами. При этом величина ρ_2 представляется суммой синусоидальных составляющих с разными знакопеременными амплитудами и случайными независимыми фазами. При большом числе слагаемых, в силу центральной предельной теоремы, случайная величина ρ_2 должна задаваться гауссовым распределением с некоторой дисперсией σ_2 . В целом, $\rho_1 = \rho_2 \delta s$ — реакция МВИ на одно и то же воздействие δs — будет случайной величиной с дисперсией $\sigma_1 = \sigma_2 \delta s$. Плотность распределения ρ_1 задается в виде:

$$W(\rho_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{\rho_1^2}{2\sigma_1^2}}. \quad (8)$$

В такой интерпретации, вследствие фединга, сигнал МВИ при фиксированном воздействии на световод является случайной величиной с нулевым средним. Причем распределение (8) максимально вблизи нулевых значений, что означает высокую вероятность появления малых значений сигнала, т.е. фактически потери информации о воздействии.

Для борьбы с федингом необходимо применить обработку сигналов после фотодетектирования. В первую очередь целесообразно применить операцию обработки по модулю $|z|$. При этом функция плотности распределения новой случайной величины $\eta = |\rho_1|$ будет иметь вид [11,12]:

$$w_1(\eta) = 2w(\eta), \quad \eta \geq 0. \quad (9)$$

В результате сигнал МВИ после обработки $\eta = |\rho_1|$ имеет ненулевое среднее значение η и отношение среднеквадратичного значения $\sqrt{D_\eta}$ к среднему составляет $k = \sqrt{D_\eta}/\bar{\eta} = 0.75$. Это отношение удобно применять для количественной оценки фединга сигнала. Однако плотность вероятности (9) по-прежнему максимальна в области нулевых значений сигнала, что означает высокую вероятность потери информации.

Для снижения величины k предлагается применять два подхода, которые аналогичны методам приема в системах передачи дискретных сообщений с параллельными радиоканалами КВ диапазона [13,14]:

1) увеличивать число фотоприемников и суммировать их сигналы по модулю;

2) с помощью компарирующих электронных устройств выбирать из набора фотоприемников один с наибольшим по модулю сигналом.

С учетом того, что для каждого фотоприемника в (7) будет свой набор амплитуд $A_i A_k^* (\int_S E_i E_k^* ds) \cdot V_{ik}$, предположим, что сигналы разных фотоприемников будут фединговать некоррелированно и случайные величины ρ_2 для разных фотоприемников независимы.

В первом случае для нахождения плотности распределения сигнала суммы M фотоприемников $\xi = \sum_{k=1}^M \eta_k$ можно применить простую рекуррентную формулу, для независимых η_k [12]:

$$w_M^{(1)}(\xi) = \int_0^\xi w_{M-1}(x) \cdot w_1(\xi - x) dx, \quad \xi \geq 0. \quad (10)$$

Во втором случае плотность распределения максимальной из M независимых случайных величин, распределенных одинаково с плотностью $\omega_1(\eta)$, имеет вид [11,12]:

$$w_M^{(2)}(\xi) = M \cdot F^{M-1}(\xi) \cdot w_1(x), \quad (11)$$

где $F(\xi)$ — функция распределения величины ξ :

$$F(\xi) = \int_0^{\xi} w_1(x) dx. \quad (12)$$

На основе этих выражений можно оценить средние значения, дисперсии и коэффициент k для двух видов обработки сигналов в зависимости от количества фотоприемников.

Экспериментальная проверка проводилась на установке, в которой использовали газовый лазер ($\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, $P = 2 \text{ mW}$), многомодовый градиентный волоконный световод (диаметр сердцевины $50 \mu\text{m}$, числовая апертура 0.12, длина 480 м), десятиканальный фотодиодный приемник, сигналы с которого после многоканального АЦП подавались на ЭВМ. Часть световода длиной 5 м помещалась в термостат с регулируемой температурой, и небольшой участок волокна длиной $\sim 10 \text{ cm}$ подвергался слабым механическим возмущениям для имитации сигнального воздействия δs .

Фотоприемным устройством регистрировался "полный" сигнал (4) без фильтрации и обработки. Все дальнейшие операции выполнялись на ЭВМ.

Регистрация сигналов межмодового интерферометра проводилась при медленном нагреве участка волокна и сигнальных воздействиях. Время измерения составляло примерно 1000 с, изменение температуры нагреваемого участка составляло около 20°C . Нагрев световода вызывал фединг сигналов. Фрагмент записи сигнала $I(t)$ с одного из фотоприемников до обработки и фильтрации представлен на рис. 1, *a*, где хорошо видны все составляющие процесса (4): I_0 , ρ_0 , $\rho_1 = \rho_2 \delta s$. Отметим, что изменения от температуры величин ρ_0 и ρ_2 не коррелированы, хотя поступают с одного фотодетектора. Сигнал после цифровой фильтрации (ФВЧ второго порядка) содержит лишь компоненту $\rho_1(t)$ (воздействие δs с мультипликативной помехой ρ_2) рис. 1, *b*. По этим сигналам были определены амплитуды сигнальных импульсов — рис. 1, *c*, которые и

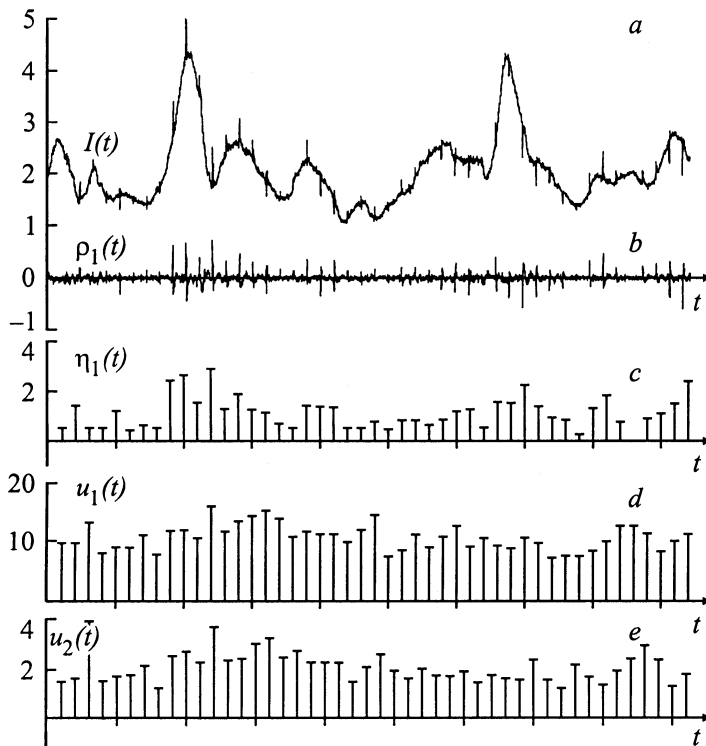


Рис. 1. Зависимости сигналов от времени: *a* — фрагмент сигнала одного из фотоприемников до фильтрации; *b* — сигнал с одного ФПУ после исключения квазистатистических компонент; *c* — выделенные амплитуды сигнальных импульсов одного ФПУ; *d* — амплитуды сигнальных импульсов после обработки "сумма модулей" ($M = 10$); *e* — амплитуды сигнальных импульсов после обработки "максимальный модуль" ($M = 10$).

подвергались дальнейшей обработке и анализу. Заметим, что изменение уровня и знака компоненты ρ_1 вызвано изменением величины и полярности ρ_2 , а не знаком модулирующего воздействия δs , оставшегося постоянным по амплитуде и полярности. Использование десяти фотоприемников с обработкой сигналов указанными выше методами (сумма

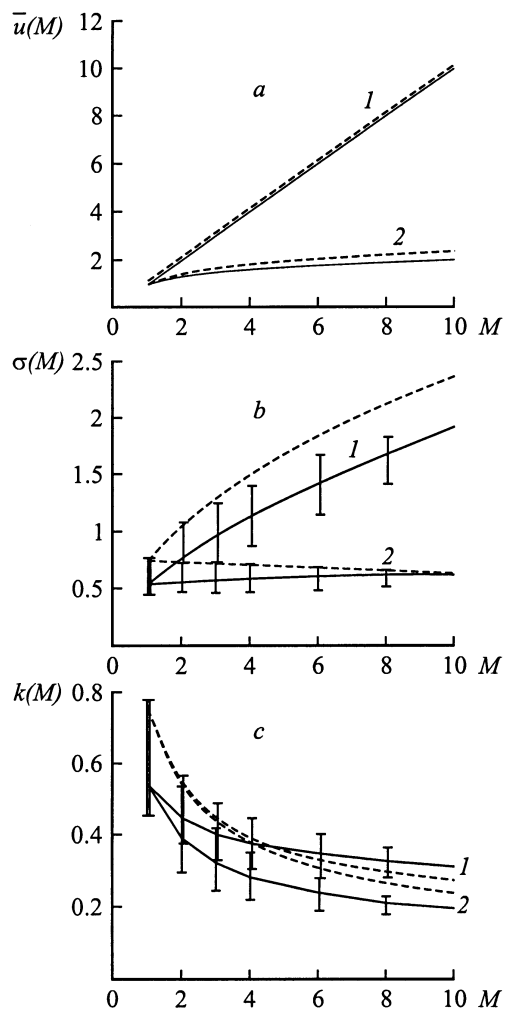


Рис. 2. Зависимости среднего значения сигнала (а), среднеквадратичного отклонения (b) и их отношения (с) от числа фотоприемников. *Сплошная линия* — эксперимент (разброс определяется учетом всех возможных комбинаций из M приемников при $M \neq 10$); *пунктирная линия* — теоретический расчет; *1* — обработка "сумма модулей", *2* — обработка "максимум модуля".

модулей — u_1 и максимальный модуль u_2) приводит к увеличению среднего значения сигналов (рис. 1, d, e).

В расчетах и экспериментах увеличение числа каналов проводилось без изменения отношения площадей чувствительной области фотодетектора и всего пятна излучения световода. Десять фотодетекторов диаметром 4 mm располагались в три ряда (3 + 4 + 3) и диаметр этой конструкции был несколько меньше диаметра пятна выходного излучения световода в дальней зоне.

Как показали результаты расчетов и экспериментов, первый вариант обработки сигналов ("сумма модулей") полностью соответствует классическому случаю суммирования независимых случайных величин, когда среднее значение суммы растет пропорционально числу слагаемых M , а среднеквадратичное значение пропорционально \sqrt{M} (рис. 2, зависимости (1)), что приводит к снижению их отношения — k_1 . Разброс значений, полученных обработкой экспериментальных сигналов, объясняется учетом всех возможных комбинаций из M фотоприемников для случаев $M \neq 10$.

Во втором случае обработки (максимальный модуль) увеличение числа наблюдаемых каналов не дает роста дисперсии максимального из сигналов, но приводит к некоторому увеличению среднего значения сигнала, что также вызывает снижение k_2 (рис. 2, зависимости (2)).

Хорошее соответствие характера теоретических и экспериментальных зависимостей подтверждает сделанное ранее предположение о некоррелированности процессов фединга сигнала в разных каналах и применимости разработанной статистической модели для анализа сигналов многомодовых волоконных интерферометров.

В обоих случаях многоканальная обработка сигнала приводит к резкому снижению вероятности появления в результате фединга сигналов с малой амплитудой. Например, для $M = 10$ вероятность снижения уровня сигнала ρ_1 ниже $0.1\sigma_1$ составляет для обоих способов обработки $P(\rho_1 < 0.1\sigma_1) = P(\rho_2 < 0.1\sigma_2) < 10^{-6}$.

Список литературы

- [1] Kinsley S.A., Davis D.E.N. // *Electr. Lett.* 1978. V. 14. N 11. P. 322–324.
- [2] Kinsley S.A., Davis D.E.N. // *Electr. Lett.* 1978. V. 14. N 11. P. 335–337.
- [3] Spajer M., Carquille B., Maillotte H. // *Optics communications.* 1986. V. 60. N 5. P. 261–264.

- [4] *Layton M.R., Bucaro J.A.* // *Appl. Opt.* 1979. V. 18. N 5. P. 666–670.
- [5] *Calshaw B., Ball P.R., Pond J.C., Sadler A.A.* // *Electronics and Power.* 1981. V. 11. N 2. P. 148–150.
- [6] *Гасюк В.И., Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Николаев В.М.* // *Письма в ЖТФ.* 1994. Т. 20. № 8. С. 1–8.
- [7] *Medvedev A.V., Kosareva L.I., Kotov O.I., Liokumovich L.V., Markov S.I., Nikolaev V.M.* *Proceedings of Int. Workshop NDTCS-99. SPIE.* V. 4064. P. 2000.
- [8] *Ball P.R., Culshaw B., Kingsley S.A.* // *SPIE.* 1980. V. 232. P. 216–233.
- [9] *Petermann K.* // *IEEE J. of Quant. Electr.* 1980. V. QE-16. N 7. P. 761–770.
- [10] *Косарева Л.И., Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М.* // *Письма в ЖТФ.* 2000. Т. 26. № 2. С. 53–63.
- [11] *Левин Б.Р.* *Теоретические основы статистической радиотехники.* М.: Сов. радио, 1989. 656 с.
- [12] *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* *Прикладные задачи теории вероятности.* М., 1983. 416 с.
- [13] *Финк А.М.* *Теория передачи дискретных сообщений.* М.: Сов. радио, 1963. 576 с.
- [14] *Андронов И.С., Финк Л.М.* *Передача дискретных сообщений по параллельным каналам.* М.: Сов. радио, 1971. 408 с.