

Корреляционный метод обработки спекловой картины сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров с использованием приборов с зарядовой связью

Ю.Н.Кульчин, О.Б.Витрик, А.Д.Ланцов

Экспериментально и теоретически исследован корреляционный метод обработки сигналов одноволоконного многомодового интерферометра с использованием цифрового устройства с зарядовой связью. Определены оптимальные условия регистрации картин многомодовой интерференции приборами с зарядовой связью. Установлено, что нелинейность характеристик таких приборов влияет на результаты корреляционных измерений. Предложен способ устранения этого влияния. Рассмотренный корреляционный метод позволяет определять величину линейной деформации интерферометра в пределах 0–80 мкм с точностью до ± 3 мкм для типовых многомодовых волокон с диаметром сердцевины 50 мкм.

Ключевые слова: волоконный интерферометр, корреляционный метод обработки сигнала, спекл-картина.

Одной из наиболее перспективных схем волоконно-оптических интерференционных преобразователей (ВОИП) для систем мониторинга напряженно-деформированного состояния технологических объектов является схема одноволоконного многомодового интерферометра (ОМИ) [1], позволяющая сочетать предельную простоту с высокими метрологическими характеристиками. Основная проблема при использовании ОМИ для создания ВОИП – извлечение данных о величине деформации чувствительного световода из случайно-неоднородной спекл-картины многомодовой интерференции. Решение этой проблемы, найденное в работах [2–4], базируется на зависимости коэффициента корреляции спекл-полей, формируемых ОМИ, от фазовых изменений мод деформируемого световода. Однако предложенные в указанных работах корреляционные голографические и амплитудные транспаранты [2–4] требуют постоянной перезаписи вследствие неконтролируемого рассогласования спекл-картины с записываемым на транспаранте опорным изображением при изменении температуры окружающей среды, что препятствует применению предложенных методов в практических измерительных системах. По-видимому, использование цифровых электронных устройств для регистрации и обработки спекл-сигналов ОМИ может привести к решению названной проблемы при автоматизации процессов перезаписи опорных изображений и повышению точности корреляционных вычислений. Поэтому цель настоящей статьи – разработка и изучение метода электронной регистрации и корреляционной обработки сигналов ОМИ с применением ПЗС-матрицы высокого разрешения и ЭВМ.

В предлагаемом методе ПЗС-матрица видеокамеры регистрирует опорное изображение спекл-картины, формируемой ОМИ, которое соответствует начальному состоянию волоконного световода (ВС) в интерферометре. Деформация световода вследствие внешних воздействий приводит к изменению пространственного расположения спеклов в регистрируемой ПЗС-матрицей картине. Сравнение спекл-сигналов до и после деформационного воздействия на ВС проводится корреляционным способом с использованием коэффициента корреляции, который согласно результатам работ [2–4] в рамках приближения LP-мод определяется выражением

$$\rho_{12} = \frac{\sin^2(\Delta\Psi_{\max}/2)}{(\Delta\Psi_{\max}/2)^2}, \quad (1)$$

где $\Delta\Psi_{\max}$ – максимальный набег фаз между модами в ОМИ. Из (1) следует, что ρ_{12} зависит только от $\Delta\Psi_{\max}$, причем на величину коэффициента корреляции не влияет начальное распределение спеклов в картине межмодовой интерференции.

Изменение фазы LP_{pq}-моды вследствие деформации световода может быть представлено в виде [1]

$$\Delta\Psi_{pq} = kn_{pq} \frac{dl}{dZ} \Delta Z + kl \frac{dn_{pq}}{dZ} \Delta Z, \quad (2)$$

где $n_{pq} = \beta_{pq}/k$ – эффективный показатель преломления для моды LP_{pq}; l – длина световода; β_{pq} – постоянная распространения этой моды; ΔZ – амплитуда внешнего деформационного воздействия; $k = 2\pi/\lambda$; λ – длина волны излучения. В настоящей работе предполагается, что вариация эффективного показателя преломления LP-моды вследствие деформации ВС может быть обусловлена аксиальным растяжением световода и его малыми макроскопическими изгибами. При этом возможность возникновения микроизгибов, равно как и других факторов, влияющих на амплитуду мод, не рассматривается. В данном случае в рамках теории возмущений [5] выражение (2) можно преобразовать к виду

Ю.Н.Кульчин, Президиум ДВО РАН, Россия, 690014 Владивосток, ул. Светланская, 50; тел.: (4232) 26 88 90

О.Б.Витрик, А.Д.Ланцов, Дальневосточный государственный технический университет (Дальневосточный политехнический институт им. В.В.Куйбышева), кафедра физики, Россия, 690010 Владивосток, Аксаковский пер., 3А; e-mail: vitrik@mail.primorye.ru, alexeyla@mail.ru

Поступила в редакцию 20 октября 2005 г., после доработки – 12 января 2006 г.

$$\Delta\Psi_{pq} = kn_{pq} \frac{dl}{dZ} \Delta Z + k\Delta n \zeta_{pq} \frac{l}{r_0} \frac{dr_0}{dZ} \Delta Z + kl \frac{d\tilde{n}}{dZ} \Delta Z, \quad (3)$$

где

$$\zeta_{pq} = \frac{2U_{pq}^2}{V^2} \frac{K_p^2(W_i)}{K_{p+1}(W_i)K_{p-1}(W_i)}; \quad U_{pq} = r_0(k^2n_1^2 - \beta_{pq}^2)^{1/2};$$

$$W_{pq} = (V^2 - U_{pq}^2)^{1/2}; \quad V = kr_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2};$$

\tilde{n} – показатель преломления материала; n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевинки и оболочки световода соответственно; $\Delta n = n_1 - n_2$; r_0 – радиус сердцевинки световода; K_p – функция Макдональда p -го порядка. Поскольку третье слагаемое в (3), определяемое изменением \tilde{n} , одинаково для всех мод, то оно не влияет на максимальную разность фаз между ними. По этой причине температурные изменения показателя преломления материала ВС не должны сказываться на результатах измерения коэффициента корреляции. Учитывая, что удлинение ВС приводит к изменению радиуса его сердцевинки, на основании выражения (3) и приближенных соотношений для параметров мод [5] получаем, что

$$\Delta\Psi_{\max} = k\Delta n(1 - \mu\tilde{\zeta})\Delta l, \quad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона; $\tilde{\zeta} = 2 - \pi/V$; Δl – изменение длины ВС. Комбинируя выражения (1) и (4), получаем следующее соотношение для коэффициента корреляции:

$$\rho_{12} = \frac{\sin^2(\pi\Delta l/\Delta l_0)}{(\pi\Delta l/\Delta l_0)^2}, \quad (5)$$

где

$$\Delta l_0 = \frac{\lambda}{\Delta n(1 - \mu\tilde{\zeta})}.$$

В рамках рассматриваемой модели коэффициент корреляции определяется изменением длины ВС, входящего в состав ОМИ, и не зависит от других факторов. Зависимость $\rho_{12}(\Delta l)$, рассчитанная в соответствии с выражением (5) для кварцевого световода при $NA = 0.2$, $\Delta n = 0.013$ и диаметре сердцевинки 50 мкм, приведена на рис.1 (кривая 1).

Из представленных результатов следует, что существует такое характерное увеличение базы чувствительного световода в ОМИ Δl_0 (для используемого ВС равное 80 мкм), по достижении которого наблюдается полная декорреляция сигнала межмодовой интерференции и опорного изображения. В этом случае дальнейшая корреляционная обработка невозможна. Если $\Delta l < \Delta l_0$, коэффициент корреляции может быть достаточно высоким, чтобы по его измеренному значению можно было рассчитать изменение длины ВС. В случае, когда $\rho_{12}(\Delta l) > 0.3$, выражение (5) хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью $\rho_{12} = \exp\{-[\Delta l/(0.42\Delta l_0)]^2\}$. Тогда для вычисления Δl можно воспользоваться соотношением

$$\Delta l = 0.42\Delta l_0(-\ln \rho_{12})^{1/2}, \quad (6)$$

которое дает погрешность вычисления не более 0.1 %.

Для экспериментальной проверки полученных результатов применялась установка, показанная на рис.2.

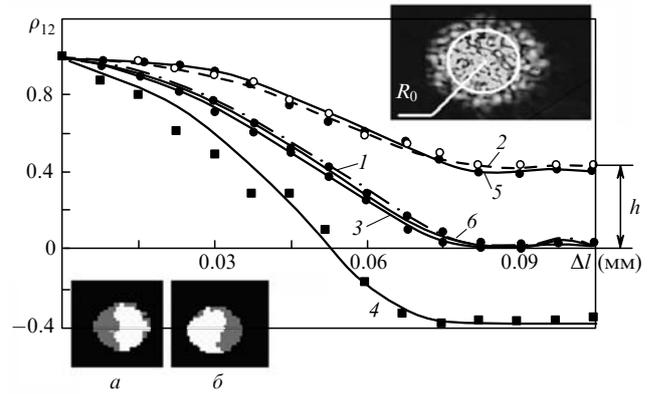


Рис.1. Теоретическая (1) и экспериментальные (2–6) зависимости коэффициента корреляции ρ_{12} от удлинения световода Δl при радиусе границы исследуемой картины $R = 1.3R_0$ (2), $0.44R_0$ (3) и $0.11R_0$ (4) (R_0 – радиус освещенного участка, в пределах которого ПЗС-матрица регистрирует 80 % световой мощности), а также при параметре распределения (см. ниже) $\langle X \rangle/X_{\max} = 0.8$ (5) и 0.15 (6). На вставке вверху – распределение сигнала межмодовой интерференции в плоскости регистрации, внизу – выделенные фрагменты (а – конечный, б – начальный) этого сигнала.

Деформация чувствительного световода в ОМИ, достигается перемещением опоры b вдоль оси x либо перемещением винта 5 вдоль оси y . Оптический сигнал, формируемый ОМИ, регистрируется ПЗС-матрицей видеокамеры, сопрягаемой с ЭВМ.

В ходе экспериментов выяснилось, что условия освещения ПЗС-матрицы световым излучением ОМИ оказывают значительное влияние на результаты корреляционной обработки. Регистрируемое видеоизображение, как показано на рис.1 (верхняя вставка), представляет собой подобие круга с неявными центром и границей. Поэтому в процессе обработки требуется искусственно выбрать положение центра и границ и выяснить влияние этого выбора на результаты измерений. Для нахождения координат центра изображения использовалось выражение, аналогичное соотношению для определения координат центра тяжести x_{cg}, y_{cg} материальных тел, в котором плотность материального тела в некоторой точке заменяется интенсивностью I_i :

$$x_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i I_i(x, y)}{\sum_{i=1}^n I_i(x, y)}, \quad y_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i I_i(x, y)}{\sum_{i=1}^n I_i(x, y)}.$$

Затем при различных радиусах границы картины R проводились измерения зависимостей $\rho_{12}(\Delta l)$, результаты которых представлены на рис.1 (кривые 2–4).

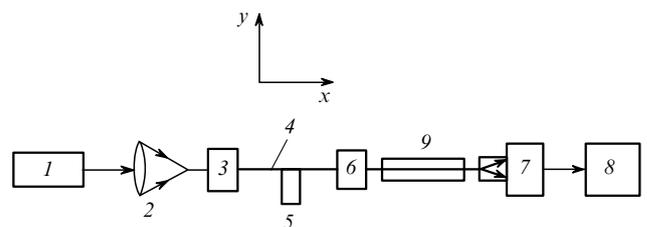


Рис.2. Схема экспериментальной установки: 1 – He – Ne-лазер; 2 – микрообъектив; 3, 6 – опоры; 4 – ОМИ; 5 – винт; 7 – ПЗС-матрица видеокамеры (разрешение 320×240 пикселей); 8 – ЭВМ; 9 – нагреваемая кювета с водой.

Из полученных результатов следует, что существует оптимальный радиус картины, лежащий в диапазоне $R_0/3 - R_0$ (где R_0 – радиус участка, в пределах которого ПЗС-матрицей регистрируется 80 % световой мощности). При любом R , находящемся в оптимальном диапазоне, зависимость $\rho_{12}(\Delta l)$ (рис.1, кривая 3) близка к расчетной. В случае $R < R_0/3$ коэффициент корреляции принимает отрицательные значения (кривая 4). Это может быть объяснено коррелированной перестройкой отдельных спеклов при малых размерах выделенного для обработки участка интерференционной картины [6]. Действительно, если в пределах такого участка регистрируется единственное световое пятно, которое вследствие коррелированной перестройки постепенно перемещается из правой части участка в левую, то конечное изображение участка будет антикоррелировать с начальным (рис.1, соответственно фотографии *a* и *b* на вставке внизу). Когда $R_0/3 \leq R \leq R_0$, регистрируется достаточно большое число спеклов, взаимное перемещение которых не согласовано. В этом случае в процессе растяжения световода коэффициент корреляции снижается до нуля. Если же $R \geq R_0$, то ПЗС-матрица регистрирует внешние по отношению к спекл-картине участки, яркость которых не зависит от длины ОМИ. Вследствие этого коэффициент корреляции уменьшается до некоторого положительного значения h , как это иллюстрирует кривая 2 на рис.1. Результаты измерения параметра h в зависимости от R представлены на рис.3.

Интенсивность света в различных точках картины межмодовой интерференции является случайной величиной и может для некоторых участков значительно превышать средний уровень. Поэтому некоторые из элементов ПЗС-матрицы могут находиться в нелинейном режиме регистрации, что, в свою очередь, влияет на результаты корреляционных вычислений. Для выяснения вклада таких элементов в настоящей работе измерялись статистические характеристики распределения интенсивности света в зарегистрированном ПЗС-матрицей изображении. Как выяснилось, с ростом мощности вводимого в ОМИ светового потока параметр распределения $\langle X \rangle / X_{\max}$ монотонно возрастает от 0 до 1 (где X – зарегистрированное значение интенсивности, которое в силу нелинейных свойств ПЗС-матрицы может не быть прямо пропорциональным собственно интенсивности падающего света, X_{\max} – максимальное значение зарегистрированной интенсивности, угловые скобки означают среднее значение случайной величины). При регистрации доста-

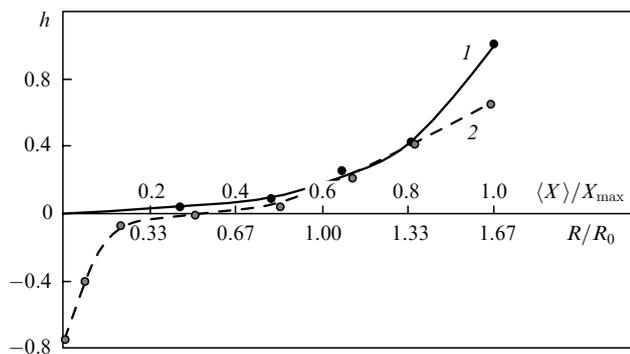


Рис.3. Зависимости параметра рассогласования экспериментальной и расчетной кривых h от параметра распределения $\langle X \rangle / X_{\max}$ (1) и выбранного радиуса границы картины R/R_0 (2).

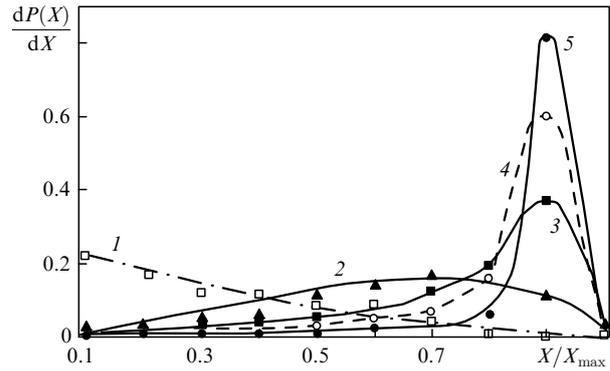


Рис.4. Плотности распределения интенсивности света $dP(X)/dX$ при $\langle X \rangle / X_{\max} = 0.15$ (1), 0.18 (2), 0.4 (3), 0.48 (4) и 0.84 (5).

точно слабых световых потоков из ОМИ, когда $\langle X \rangle / X_{\max} \leq 0.15$, измеряемая плотность распределения световой интенсивности $dP(X)/dX$ в спекл-картине оказывается подчиненной экспоненциальному закону (рис.4, кривая 1). Поскольку плотность вероятности для распределения интенсивности света в случайно-неоднородном когерентном поле должна иметь именно такой характер [7], это свидетельствует о линейном режиме регистрации. В данном случае коэффициент корреляции ведет себя в соответствии с расчетным выражением (5), что иллюстрируется кривой 6 на рис.1.

При $\langle X \rangle / X_{\max} > 0.15$, максимум плотности распределения интенсивности на рис.4 (кривые 2–5) смещается вправо по направлению к $X = X_{\max}$. Это происходит из-за того, что при больших интенсивностях засветки увеличивается вероятность найти ячейку ПЗС-матрицы в состоянии, близком к насыщению, и свидетельствует о нелинейном режиме регистрации. При этом характер зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$ также изменяется, что иллюстрирует кривая 5 на рис.1. Видно, что ρ_{12} уменьшается до постоянной величины $h > 0$, а это может исказить результаты измерений удлинения световода. В данном случае требуется использование светофильтров для ослабления светового потока, вводимого в ОМИ, до тех пор, пока не будет получено приемлемое отношение $\langle X \rangle / X_{\max}$. Следовательно, статистический подход позволяет выбирать линейный режим работы ПЗС-матрицы, не прибегая к прямым измерениям параметров нелинейности ее элементов и интенсивности падающего на них светового потока. Измеренная зависимость h от отношения $\langle X \rangle / X_{\max}$ представлена на рис.3 (кривая 1).

Для проверки сделанного выше вывода о независимости результата измерения коэффициента корреляции от начального распределения интенсивности света в формируемой ОМИ картине в настоящей работе проводились измерения зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$ при использовании различных опорных изображений картин. Соответствующие результаты представлены на рис.5 (кривые 1–4). Видно, что полученные зависимости в целом совпадают. Имеющийся разброс объясняется статистическим характером измеряемого параметра и является источником погрешности при определении Δl . Эта погрешность для выбранного типа ВС может достигать ± 3 мкм. При усреднении данных об удлинении, получаемых при одновременном использовании нескольких опорных изображений, погрешность удается значительно снизить. Для этого в настоящей работе текущее состояние спекл-картины сравнивалось с набором опорных изображений,

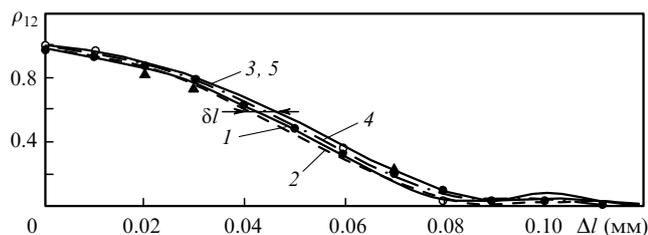


Рис.5. Зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$, полученные при использовании различных опорных изображений: непосредственно при аксиальном растяжении ВС (1–4) и при растяжении, вызываемом прогибом натянутого ВС (5).

зарегистрированных при трех фиксированных, измеряемых с высокой точностью положениях опоры *b* (рис.2). Как показали эксперименты, среднеквадратичное отклонение результата усреднения не превышает 0.35 мкм. Однако соответствующие расчеты потребовали увеличения затрат машинного времени (до 380 мс на обработку одного кадра против 95 мс при использовании единственного опорного изображения).

Для выяснения влияния температуры на результаты измерений удлинения ОМИ отрезок последнего длиной 0.1 м помещался в кювету с водой (как это показано на рис.2), нагреваемой от 15 до 60 °С. В результате было экспериментально установлено, что в указанном диапазоне температур для используемого ВС температурная погрешность измерения относительного удлинения ОМИ составляет $7.3 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Полученное значение почти совпадает с коэффициентом температурного расширения чистого кварца, равным $5.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (различие, по-видимому, объясняется влиянием полимерной оболочки световода). Это подтверждает вывод о том, что на результаты корреляционной обработки влияет только температурное изменение длины ВС, а не температурное изменение показателя преломления материала световода.

Для выяснения степени влияния изгибов ВС на результаты измерений коэффициента корреляции световод в ОМИ 4 (рис.2) подвергался одновременно деформациям изгиба и растяжения, что достигалось за счет поперечного перемещения винта 5. Полученная при этом зависимость $\rho_{12}(\Delta l)$ приведена на рис.5 (кривая 5). Видно, что данная кривая в пределах погрешности измерений совпадает с зависимостью, измеренной непосредственно при аксиальном растяжении ВС (рис.5, кривая 1). Это означает, что изгиб не оказывает дополнительного влияния на результаты измерений коэффициента корреляции.

Как отмечалось выше, проводить количественные измерения удлинения ОМИ можно при условии, что коэффициент корреляции будет достаточно высоким. Для выполнения этого условия при измерениях больших удлинений можно перезаписывать в памяти компьютера опорный сигнал всякий раз, когда коэффициент корреляции уменьшается до определенного порогового значения (например, в нашем случае – до $\rho_{12} = 0.6$). Квадратичный характер зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$ оставляет неопределенность в знаке при нахождении удлинения. Для определения знака Δl в настоящей работе используется алгоритм «двойного отсчета», когда текущее распределение интен-

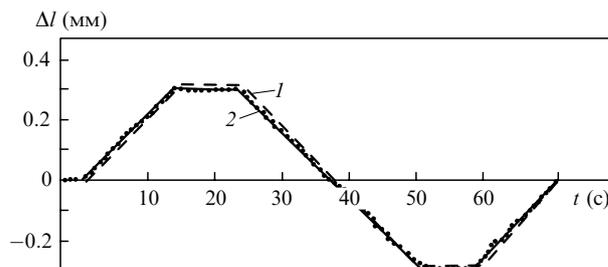


Рис.6. Зависимости изменения длины световода, полученные при измерении микрометром (1) и корреляционным методом (2).

сивности в спекл-картине $I_2(x, y)$ сравнивается не менее чем с двумя опорными изображениями, второе из которых остается в памяти ЭВМ после последнего цикла перезаписи. Пусть $I_1(x, y)$ – текущее опорное распределение, сменившее предыдущее распределение $I_0(x, y)$ в момент, когда коэффициент корреляции достиг порогового значения 0.6, ρ_{12} – коэффициент корреляции распределений $I_2(x, y)$ и $I_1(x, y)$, а ρ_{20} – коэффициент корреляции распределений $I_2(x, y)$ и $I_0(x, y)$. Будем использовать коэффициент корреляции ρ_{21} для вычисления Δl в соответствии с (6), а ρ_{20} – для определения знака удлинения: если $\rho_{20} < 0.6$, то отстройка распределения $I_2(x, y)$ от $I_0(x, y)$ продолжает увеличиваться и $\Delta l > 0$, если же $\rho_{20} > 0.6$, то $\Delta l < 0$.

Пользуясь данным подходом, можно измерять сколько угодно большие удлинения ОМИ (вплоть до момента разрыва световода) и определять знак удлинения (растяжение или сжатие). Результаты этих измерений представлены на рис.6, где кривая 1 соответствует изменениям длины световода в ОМИ вследствие возвратно-поступательного движения подвижной опоры *b* (рис.2), контролируемым микрометром, а кривая 2 – результатам измерения удлинения, полученным при корреляционной обработке. Видно, что обе кривые согласуются друг с другом в пределах погрешности измерений.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет с высокой точностью отслеживать абсолютное изменение длины ВС в диапазоне, ограниченном механической прочностью световода. Метод обеспечивает высокую температурную стабильность и может быть использован для построения на его основе высокоэффективных систем мониторинга линейных деформаций техногенных объектов.

1. Бусурин Б.И., Носов Ю.Р. *Волоконно-оптические датчики* (М.: Энергоатомиздат, 1990).
2. Кульчин Ю.Н., Быковский Ю.А., Витрик О.Б., Ларкин А.И. *Квантовая электроника*, 17, 95 (1990).
3. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Максаев О.Г., Кириченко О.В., Каменев О.Т. *ЖТФ*, 66, 137 (1996).
4. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Kirichenko O.V., Kamenev O.T., Petrov Yu.S., Maksaev O.V. *Opt. Eng.*, 36, 1494 (1997).
5. Снайдер А., Лав Дж. *Теория оптических волокон* (М.: Радио и связь, 1987).
6. Кульчин Ю.Н., Быковский Ю.А., Обух В.Ф., Смирнов В.Л. *Квантовая электроника*, 17, 1080 (1990).
7. Гудмен Дж. *Статистическая оптика* (М.: Мир, 1988).