

Лазерная дистанционная спекл-интерферометрия. Модель формирования спекл-структуры

Н.П.Бадалян, В.В.Кийко, В.И.Кислов, А.Б.Козлов

Представлена математическая модель рассеяния лазерного излучения от удаленной шероховатой поверхности при освещении ее сфокусированным лазерным пучком. Модель позволяет оценивать основные параметры возникающей спекл-структуры – среднее число и размер спеклов, среднюю и максимальную их интенсивности. Экспериментально обнаружено, что при фокусировке излучения в плоскость объекта могут наблюдаться флуктуации интенсивности спекла. Величина флуктуаций достигает 50 % – 70 % и зависит как от характеристик шероховатости объекта, так и от параметров освещающего лазерного пучка.

Ключевые слова: зондирование, спекл-интерферометрия, лазерное излучение, дистанционное зондирование.

1. Введение

В последнее время всё большее распространение получают методы дистанционной лазерной диагностики, использующие спекл-интерферометрию: доплеровская анемометрия, распознавание удаленных объектов, бесконтактная дефектоскопия. Такие методы уже нашли широкое применение в промышленности [1–3].

Основой подобных устройств служит стандартный интерферометр, одно из зеркал которого заменено исследуемой диффузно отражающей поверхностью [3]. Отраженное поле представляет собой множество [4] независимых волн, направление распространения и фаза которых различны. В результате интерференции этих волн в плоскости приемника создается так называемая спекл-структура.

Для повышения чувствительности спекл-интерферометров обычно применяется гетеродинный метод. При использовании гетеродинного метода для получения информации о поверхности необходимо регистрировать изменения интерференционной картины в области одного спекла. При этом для обеспечения максимальных чувствительности и отношения сигнал/шум необходимо согласование размера отдельного спекла с размером площадки фотоприемника с учетом интенсивности спекла. Характеристики спекла зависят от параметров лазерного зондирующего пучка, характеристик отражающей поверхности и особенностей оптической схемы подсветки – регистрации. Для оптимизации параметров лазерного пучка, фокусирующей системы и характеристик фотоприемника необходимо иметь информацию об основных параметрах спекл-структуры.

При проведении экспериментальных исследований спекл-структуры, получаемой от различных диффузных поверхностей при различных условиях освещения, нами были обнаружены особенности ее поведения, не отмеченные в литературе. Это потребовало построения новой математической модели, адекватно описывающей процессы формирования спекл-картины при диффузном отражении излучения. В известных теоретических моделях не учитываются расходимость лазерного пучка [5–8], отличие его степени когерентности от единицы [5–13], возможность его неточной фокусировки на объект [9–13]. В настоящей работе представлена теоретическая модель, учитывающая эти характеристики излучения в дифракционном приближении. Определены зависимости параметров спекл-структуры от характеристик лазерного пучка, фокусирующей системы и объекта, согласующиеся с экспериментальными данными.

2. Модель рассеяния света шероховатой поверхностью

Рассмотрим формирование и измерение спекл-структуры излучения в схеме, представленной на рис.1. При распространении излучения от выхода оптического передатчика до приемника, основной характеристикой поля в рамках статистического подхода является его корреляционная функция. Она определяет основные характеристики спекл-структуры – размер, число и интенсивность спеклов [14].

Рассмотрим процесс распространения излучения в два этапа: найдем характеристики поля u_z на исследуемой поверхности в дифракционном приближении, а затем проведем расчет этих характеристик для отраженной волны на входном окне приемника. На первом этапе корреляционная функция поля будет определяться выражением

$$\langle u_z(\boldsymbol{\rho})u_z^*(\mathbf{r}) \rangle \approx \langle u_i(\boldsymbol{\rho}_1)u_i^*(\mathbf{r}_1) \rangle \times \exp \left\{ i \frac{k}{2z} [(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho})^2 - (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r})^2] \right\} d\boldsymbol{\rho}_1 d\mathbf{r}_1, \quad (1)$$

Н.П.Бадалян, А.Б.Козлов. ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф.Стеклова», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: polus50@mail.ru

В.В.Кийко, В.И.Кислов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: hkww@ran.gpi.ru

Поступила в редакцию 10 апреля 2007 г., после доработки – 1 августа 2007 г.

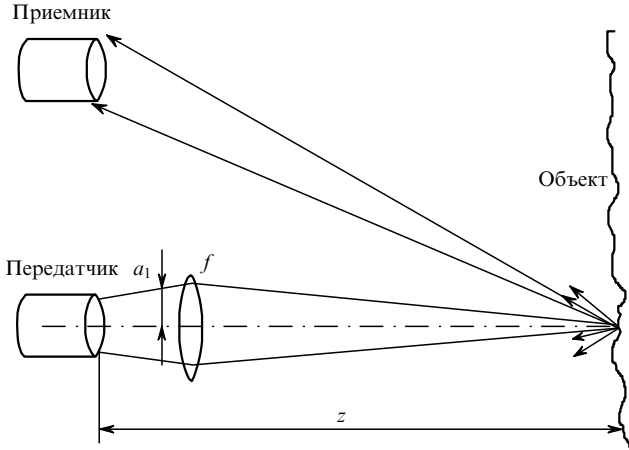


Рис. 1. Оптическая схема формирования и регистрации спекл-структуры (a_1 – радиус пучка на выходе передатчика; f – фокусное расстояние оптической системы передатчика; z – расстояние между передатчиком/приемником и объектом).

где $\langle u_t(\rho_1)u_t^*(r_1) \rangle$ – корреляционная функция поля $u_t(\rho)$ на выходе из передатчика; угловые скобки означают статистическое усреднение по реализациям; z – расстояние между передатчиком/приемником и объектом (вдоль оптической оси системы); $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны излучения; ρ_1, r_1 и ρ, r – координаты в плоскости передатчика и объекта соответственно.

Уточним вид корреляционных функций в выражении (1). Поле на выходе из передатчика представим в виде

$$u_t(\rho) = \exp[i\varphi_t(\rho)] \exp\left(-i\frac{k\rho^2}{2f}\right) \exp\left(-\frac{2\rho^2}{a_1^2}\right), \quad (2)$$

где a_1 – радиус пучка на выходе передатчика; $\varphi_t(\rho)$ – фаза поля; f – фокусное расстояние оптической системы передатчика. В этом случае корреляционная функция поля на выходе передатчика описывается выражением

$$\langle u_t(\rho_1)u_t^*(r_1) \rangle = \langle \exp\{i[\varphi_t(\rho_1) - \varphi_t(r_1)]\} \rangle \times \exp\left[-i\frac{k(\rho_1^2 - r_1^2)}{2f}\right] \exp\left[-\frac{2(\rho_1^2 + r_1^2)}{a_1^2}\right]. \quad (3)$$

Примем, что случайное поле фазовых искажений распределено по нормальному закону и стационарно. Для корреляционной функции используем гауссову форму [4]:

$$\langle \exp\{i[\varphi_t(\rho_1) - \varphi_t(r_1)]\} \rangle \approx \exp\left[-\frac{(\rho_1 - r_1)^2}{c_1^2}\right], \quad (4)$$

где c_1 – радиус корреляции фазовых искажений поля. Подставляя (2)–(4) в (1) и выполняя интегрирование, получаем

$$|\langle u_z(\rho)u_z^*(r) \rangle| \approx \exp\left[-\frac{(\rho - r)^2}{c_z^2}\right] \exp\left[-\frac{2(\rho^2 + r^2)}{a_z^2}\right], \quad (5)$$

где

$$c_z = \frac{c_1}{N_0} \sqrt{\gamma(z)} \quad (6)$$

– радиус корреляции лазерного пучка в плоскости объекта; $N_0 = ka_1^2/(4z)$ – число Френеля;

$$\gamma(z) = 1 + \frac{a_1}{c_1^2} + N_0^2 \left(1 - \frac{z}{f}\right)^2$$

– коэффициент, учитывающий дифракционное и геометрическое уширение лазерного пучка;

$$a_z = \frac{a_1}{N_0} \sqrt{\gamma(z)} \quad (7)$$

– радиус лазерного пучка на поверхности объекта.

Рассмотрим на втором этапе отражение оптической волны от объекта и ее распространение до приемника. Корреляционная функция поля u_r в плоскости приемника может быть записана в виде

$$\langle u_r(\rho)u_r^*(r) \rangle \approx \int \langle u_z(\rho_2)u_z^*(r_2) \rangle \Gamma(\rho_2, r_2) \times \exp\left\{i\frac{k}{2z}[(\rho - \rho_2)^2 - (r - r_2)^2]\right\} d\rho_2 dr_2, \quad (8)$$

где $\Gamma(\rho_2, r_2)$ функция, описывающая искажения поля, возникающие при отражении от поверхности объекта.

При описании распространения излучения от объекта до приемника используем следующие предположения:

- 1) высота шероховатостей много больше длины волны λ лазерного излучения;
- 2) радиус корреляции (характерный масштаб) шероховатостей гораздо больше длины волны λ ;
- 3) затенение одних элементов поверхности другими отсутствует;
- 4) рассеяное поле исследуется в зоне дифракции Френеля;
- 5) многократное отражение отсутствует;
- 6) фазовые искажения, вносимые шероховатостями, статистически независимы от искажений пучка.

Топография шероховатостей может оказаться достаточно сложной. Примем, что поверхность изотропна и ее рельеф описывается случайной стационарной функцией. При отражении от шероховатой поверхности функция

$$\Gamma(\rho_2, r_2) = \langle \exp[i\varphi(\rho_2)] \exp[-i\varphi(r_2)] \rangle,$$

где $\varphi(x) = 2kh(x)$; $h(x)$ – высота шероховатостей поверхности. В дальнейшем будем считать, что функция $\varphi(x)$ описывает нормально распределенные стационарные фазовые искажения с дисперсией σ^2 . Для типичных шероховатостей $\sigma^2 \gg 1$, поэтому может использоваться приближение «большой» дисперсии [15], в котором корреляционные функции представляются в гауссовой форме:

$$\langle \exp\{i[\varphi(\rho_2) - \varphi(r_2)]\} \rangle \approx \exp[-(\rho_2 - r_2)^2/c_w^2], \quad (9)$$

где c_w – эффективный радиус корреляции шероховатостей. Тогда радиус корреляции фазовых искажений отраженного от шероховатой поверхности пучка в плоскости приемника рассчитывается по формуле

$$c_{zz} = \left(\frac{1}{1/c_z^2 + 1/c_w^2}\right)^2. \quad (10)$$

С учетом (9) соотношение (8) может быть проинтегрировано, при этом радиус пучка на приемнике

$$a_{2z} = \frac{a_z}{N_z} \sqrt{\gamma_z}, \quad (11)$$

где

$$\gamma_z = 1 + \left(\frac{a_z}{c_{2z}}\right)^2 + N_z^2 \left(1 - \frac{z}{f}\right)^2$$

– коэффициент, учитывающий геометрическое уширение и уширение из-за неполной когерентности лазерного пучка; $N_z = ka_z^2/(4z)$ – число Френеля для пучка на поверхности; $c_{2z} = (c_{zz}/N_z)\sqrt{\gamma_z}$ – средний размер спекла.

Как уже отмечалось ранее, основными измеряемыми характеристиками рассеянного излучения являются средний размер спекла и его средняя интенсивность I_{sp} , нормированная на исходную среднюю интенсивность пучка \bar{I} . С учетом (10), (11) получаем $I_{sp}/\bar{I} = (a_1/a_{2z})^2$. При этом максимальная интенсивность спекла приблизительно в два раза превышает среднюю. Число спеклов на приемнике определяется выражением

$$N_{sp} = 1 + \frac{a_{2z}^2}{c_{2z}^2} = 1 + \frac{a_z^2}{c_{zz}^2}.$$

При этом среднеквадратичная флуктуация интенсивности

$$\sigma_I \approx \frac{I_{sp}}{\sqrt{N_{sp}}}.$$

Предложенная модель позволяет вычислить основные характеристики спекл-картины при отражении пучка от шероховатой поверхности (число спеклов и их средний размер, среднюю и максимальную интенсивности одиночного спекла) с учетом как характеристик источника излучения, так и характеристик объекта.

При проведении численных исследований была выявлена важная особенность в зависимости максимальной интенсивности I_{max} одиночного спекла от фокусного расстояния f : если размер пучка на мишени сравним с радиусом корреляции шероховатостей, монотонность этой зависимости нарушается (рис.2). При точной фокусировке на мишень ($z = f$) наблюдается снижение интенсивности I_{max} , которое может составлять 70 % от максимально достижимой (оптимальной) интенсивности. В этом случае оптимальное фокусное расстояние может отличаться от расстояния z до мишени на 20 % – 30 %. Глубина модуляции интенсивности существенно зависит от величины aberrаций пучка на выходе фокусирующей системы (рис.2). При этом чем выше качество пучка, тем сильнее уменьшается интенсивность. Вследствие высокой чувствительности интенсивности спекла к фокусному расстоянию возможен переход регистрирующей системы в неустойчивый режим. Устойчивость работы системы в целом может быть повышена за счет возрастания величины aberrаций пучка на выходе излучателя или с помощью адаптивной оптической системы, осуществляющей удержание сигнала на абсолютном максимуме.

Наличие минимума интенсивности I_{max} спекла при изменении фокусного расстояния f в случае точной фокусировки на мишень связано с изменением размера отраженного от мишени пучка в плоскости приемника

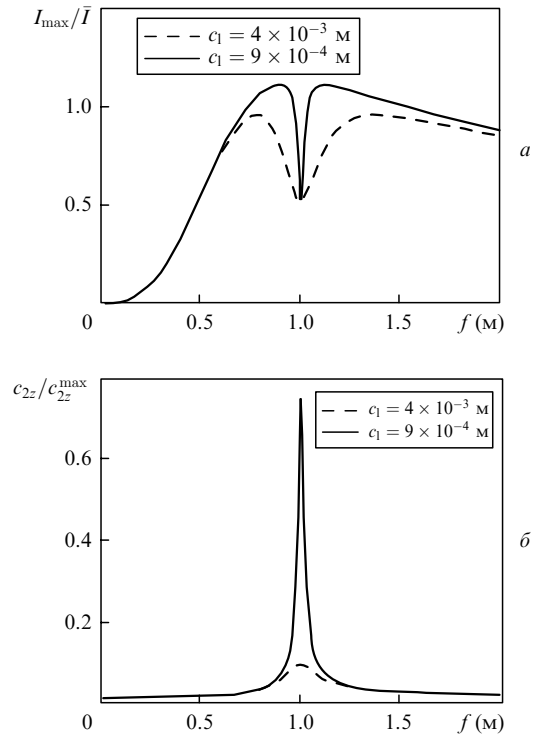


Рис.2. Зависимости максимальной интенсивности I_{max} спекла, нормированной на среднюю интенсивность излучения \bar{I} на выходе передатчика, и среднего размера спекла c_{2z} от фокусного расстояния f для освещающих пучков с разными величинами aberrаций. Расстояние от телескопа до мишени $d = 1$ м.

вследствие конкуренции геометрической и дифракционной расходимостей отраженного от объекта пучка. Локальный минимум в зависимости $I_{max}(f)$ возникает при условии, что дифракционная расходимость начинает превышать геометрическую.

3. Экспериментальные результаты

Проверка расчетов проводилась на оптическом стенде (рис.3). В качестве источника излучения использовался лазер 1 на алюмоиттриевом гранате, активированном ионами Nd^{3+} , с полупроводниковой накачкой и выходной мощностью 300 мВт. Лазер работал в непрерывном режиме, близком к одномодовому, диаметр пучка на выходном зеркале составлял 1.5 мм. Диаметр пучка лазера 1 увеличивался телескопом 2 до 9 мм, и с помощью зеркал 3, 4 пучок направлялся на поверхность объекта 5. Рассеянное излучение регистрировалось камерой 6 (DALSA 1M-28, размер чувствительной области 10.9×10.9 мм, разрешение 1024×1024) и передавалось на ЭВМ 7 для дальнейшей обработки. Все оптические элементы распо-

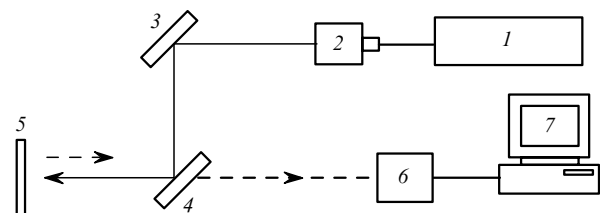


Рис.3. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – телескоп; 3, 4 – зеркала; 5 – объект; 6 – измерительная камера; 7 – ЭВМ.

лагались на оптическом стенде, снабженном виброизоляцией.

В качестве объектов 5 использовались четыре специально подготовленные алюминиевые пластины (образцы 1–4), различающиеся качеством поверхности. Рельеф поверхности каждой пластины был измерен на механическом профилографе и по полученным данным были рассчитаны автокорреляционные функции шероховатостей их поверхностей (рис.4).

Эксперимент проводился по следующей методике. При фиксированном расстоянии $d = 1$ м от телескопа до исследуемой поверхности фокусное расстояние f телескопа изменялось от $0.5d$ до $1.5d$ с шагом $\Delta f = 1 - 5$ см. Для каждого фокусного расстояния изображение спекл-картины записывалось на компьютер и обрабатывалось. Камера работала в линейном режиме для исключения ошибок, связанных с насыщением ПЗС.

На изображениях, соответствующих разным фокусным расстояниям, число спеклов было различным. Для получения равномерной статистической выборки число обрабатываемых кадров варьировалось от 1 до 15 в зависимости от фокусного расстояния. При этом параметры спекл-структуры при заданном f рассчитывались усреднением по ансамблю кадров. Для исключения внешних факторов, таких, например, как изменение общей освещенности поверхности, эксперимент для каждой исследуемой пластины проводился несколько раз, затем данные усреднялись.

Для получения зависимости среднего размера спекл-структуры от фокусного расстояния телескопа исследуемый кадр обрабатывался на ПЭВМ вручную. На каждом кадре выделялся набор спеклов, а затем строилась зависимость усредненного по кадрам и по выделенным в кадре спеклам среднего размера спекла от фокусного расстояния f . Пример такой зависимости для поверхности образца 1 приведена на рис.5.

Для получения зависимости средней интенсивности спекла от фокусного расстояния была использована следующая методика. Каждый кадр содержал изображение спекл-картины в 256 градациях серого цвета. В качестве интенсивности выбиралось максимальное значение в градациях серого цвета для данного кадра. При этом числу 255 соответствовало максимально возможное значение интенсивности. В каждом кадре находилось максималь-

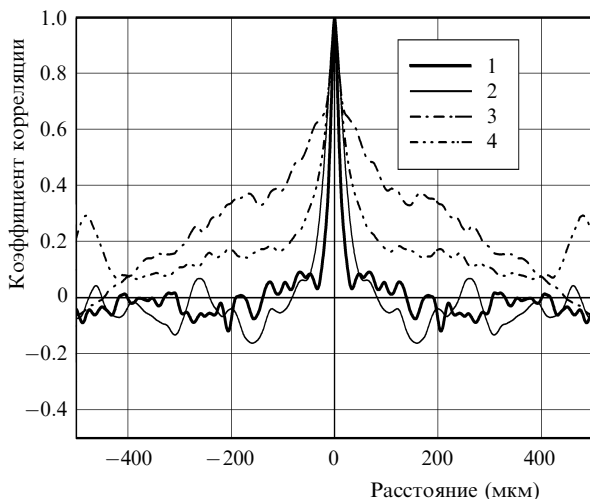


Рис.4. Автокорреляционные функции шероховатостей поверхностей экспериментальных образцов 1–4.

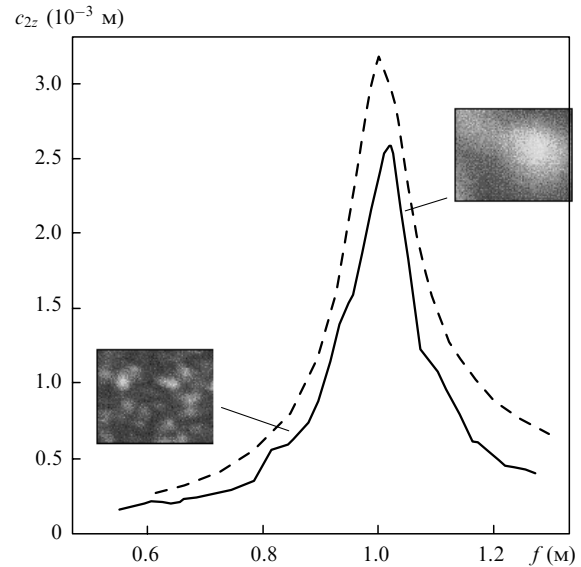


Рис.5. Экспериментальная (штриховая кривая) и расчетная (сплошная кривая) зависимости среднего размера спекла c_{2z} от фокусного расстояния f для образца 1. Расстояние от телескопа до мишени $d = 1$ м. На вставках приведены характерные изображения спекл-структуры для двух различных значений f .

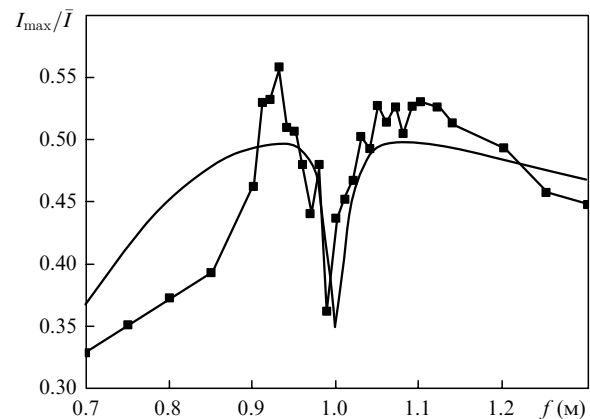


Рис.6. Экспериментальная (точки) и расчетная (сплошная кривая) зависимости максимальной интенсивности I_{\max} спекла, нормированной на среднюю интенсивность излучения \bar{I} на выходе передатчика, от фокусного расстояния f . Расстояние от телескопа до мишени $d = 1$ м.

ное значение интенсивности, далее оно нормировалось на число 255, затем для получения средней интенсивности значения нормированной интенсивности на разных кадрах усреднялись по числу кадров. Рассчитанная таким образом величина считалась максимальной средней интенсивностью спекл-структуры при заданном f . Данная методика позволяла обработать всю спекл-картину и исключить при этом влияние человеческого фактора.

На рис.6 представлены экспериментальные и расчетные зависимости интенсивности спекл-картины от фокусного расстояния для образца 1, хорошо совпадающие между собой.

4. Заключение

Таким образом, разработана новая математическая модель, описывающая параметры спекл-структуры, получаемой при освещении удаленной шероховатой поверхности сфокусированным пучком лазерного излуче-

ния: среднюю и максимальную интенсивность, число и средний размер спеклов. Модель учитывает в дифракционном приближении такие характеристики освещающего пучка, как размер на объекте, расходимость, когерентность. Численно исследованы основные закономерности изменения параметров спекл-структуры в зависимости от фокусного расстояния оптической системы передатчика излучения, характеристик освещающего пучка и шероховатой поверхности. Экспериментальная проверка подтвердила правильность теоретического анализа.

При решении задачи получения спекл-структур с максимальной интенсивностью было обнаружено, что максимальная интенсивность спекла достигается при отстройке от положения точной фокусировки освещающего пучка на поверхность. При малых величинах aberrаций пучка и небольших фокусных расстояниях число шероховатостей в пределах фокусного пятна не превышает 100 и наблюдаются значительные флуктуации интенсивности отдельно взятого спекла, которые могут достигать 50 % – 70 %.

1. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. *Методы лазерной доплеровской анемометрии* (М.: Наука, 1982).
2. Устинов Н.Д., Матвеев И.Н., Протопопов В.В. *Методы обработки оптических полей в лазерной локации* (М.: Наука, 1983).
3. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. *Лазерное гетеродинирование* (М.: Наука, 1985).
4. Перина Я. *Когерентность света* (М.: Мир, 1974).
5. Franta D., Ohl'idal I. *Opt. Commun.*, **147**, 349 (1998).
6. Goodman J.W., in *Laser Speckle and Related Phenomena*. Ed. by J.C.Dainty (Berlin: Springer, 1975, p. 9).
7. Hrabovský M., Vača Z., Horváth P. *Czechoslovak J. Phys.*, **51** (2), 129 (2001).
8. Krishnaswamy S., Pouet B.F., Chatters T.C. *Opt. Lasers Eng.*, **26**, 179 (1997).
9. Gregory D.A. *Opt. Laser Technol.*, **8**, 201 (1976).
10. Jones R., Wykes C. *Opt. Acta*, **24**, 533 (1977).
11. Owner-Petersen M. *J. Opt. Soc. Am. A*, **8**, 1082 (1991).
12. Yura H.T., Hanson S.G. *Opt. Commun.*, **228**, 263 (2003).
13. Yura H.T., Hanson S.G. *J. Opt. Soc. Am. A*, **14**, 3093 (1997).
14. Гудмен Дж. *Статистическая оптика* (М.: Мир, 1998).
15. Зуев В.Е. *Распространение лазерного излучения в атмосфере* (М.: Радио, 1981).