

М. И. Дзюбенко, С. Н. Колпаков, И. В. Попов, А. А. Приемко

Институт радиофизики и электроники НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: igpo@ukr.net

ДИФРАКЦИЯ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ С НЕГАУССОВОЙ СТАТИСТИКОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ

Распределение дифракционных максимумов полученных в результате взаимодействия дифракционного поля или спекл-поля с плоскостью приемника определяет характер отражающей поверхности. Однако вопрос формирования спекл-полей, наблюдаемых в результате взаимодействия когерентного излучения с диффузно рассеивающими поверхностями, описываемыми негауссовым распределением шероховатостей, является недостаточно изученным. В работе теоретически и экспериментально исследовано распределение амплитуды спекл-полей возникающих в результате дифракции лазерного излучения на поверхностях подвергшихся механической обработке. Проведено математическое моделирование спекл-полей, распределение амплитуды которых не подчиняется гауссовой статистике. Доказано, что спекл-поля, образованные в результате взаимодействия когерентного излучения с шероховатыми поверхностями, не являются абсолютно случайными, а содержат в себе информацию о той степени упорядочения, которая характеризует объект.

Ключевые слова: спекл-поле, когерентное излучение, статистическая оптика.

Вслед за созданием источников излучения оптического диапазона длин волн, обладающих высокой степенью монохроматичности и пространственной когерентности, многие исследователи одновременно обнаружили новый эффект: если лазерное излучение рассеивается на шероховатой поверхности, то дифракционная картина приобретает пятнистый характер. Обнаруженные пятнистые световые поля стали называть спекл-структурами (от англ. *speckle* – пятнышко, крапинка). До изобретения лазеров подобное явление не наблюдалось, поскольку естественных аналогов лазерного излучения в природе нет. Лазерное излучение, попадая на шероховатый объект или проходя через неоднородную среду, претерпевает случайную модуляцию. Затем эта модуляция проявляется в структуре рассеянного излучения, делая его пространственно неоднородным. Поскольку поверхность объекта обладает случайным распределением шероховатостей, то образующиеся световые пятна будут расположены случайным образом в плоскости наблюдения, имея при этом случайную форму и размеры. Изучением закономерностей формирования спекл-полей и исследованием их статистических характеристик занимается область оптики – оптика спеклов. Это явление не является новым, случайные поля могут образовываться при рассеянии радиоизлучения и при дифракции акустических полей. Первые работы по исследованию случайных полей, рассеянных шероховатыми поверхностями, относятся еще ко временам Рэлея. Статистическая радиофизика изучает рассеяние электромагнитных волн в случайных средах. Однако в оптическом диапазоне есть возможность наблюдать спекл-поле непосредственно органами зрения на экране, а также регистрировать с помощью ПЗС (сокр. от «прибор с зарядовой связью») мат-

риц. Изначально спеклы рассматривались как помехи, ухудшающие качество изображений, поэтому основной задачей было выделение и фильтрация этих помех без потери полезной информации. Дальнейшие исследования показали, что спеклы также могут быть использованы для изучения свойств рассеивающих поверхностей, измерения шероховатости, задач метрологии, измерения конфигурации объектов, методами звездной спекл-интерферометрии удается во много раз повысить угловое разрешение телескопов, ограниченное турбулентной рефракцией в атмосфере.

Классически предполагается, что спекл-поле – это случайная структура [1]. Общепринято, что амплитуда спекл-поля в каждой точке пространства определяется суперпозицией большого числа независимых рассеивателей, расположенных на отражающей поверхности. В этом случае к спекл-эффекту применима центральная предельная теорема теории вероятностей, согласно которой амплитуда суммарного поля будет иметь случайный характер и подчиняться гауссовой статистике [2]. Несмотря на значительный успех, достигнутый в описании спекл-эффекта с помощью методов математической статистики и теории фракталов [3], ряд вопросов, имеющих принципиальное значение с точки зрения практического применения, остается открытым. К подобным вопросам прежде всего относится изучение спекл-полей, полученных в результате взаимодействия когерентного излучения с диффузно рассеивающими поверхностями, описываемыми негауссовым распределением шероховатостей. К таким поверхностям относятся, например, поверхности, подвергшиеся механической обработке (шлифовке, полировке и т. п.). В связи с этим становится актуальным развитие новых подходов

к математическому моделированию спекл-полей с целью использования их для решения прикладных задач, в частности, метрологического обеспечения металлообрабатывающего производства.

Цель данной работы заключается в изучении спекл-полей, полученных в результате взаимодействия когерентного излучения с диффузными поверхностями, описываемыми негауссовым распределением шероховатостей, математическом моделировании и экспериментальном исследовании спекл-полей, распределение амплитуды которых не подчиняется гауссовой статистике.

Статистическая теория позволяет связать статистические свойства спеклов с аналогичными свойствами шероховатой поверхности [4]. При нарушении центральной предельной теоремы статистика комплексной амплитуды рассеянного поля может отличаться от гауссовой. Это происходит, например, при дифракции сильно сфокусированных пучков в случайной среде. В этом случае наблюдаются спеклы при малом числе рассеивателей. Если при случайной дифракции волн с широким фронтом наблюдаются тысячи спеклов, то при рассеянии сфокусированных лазерных пучков дифракционная картина состоит всего из нескольких пятен. Спекл-поля, формирующиеся при малом числе рассеивателей, являются статистически неоднородными. Это означает, что все статистические характеристики таких полей зависят от координаты точки наблюдения. Спеклы, характеризующиеся негауссовой статистикой, могут формироваться при рассеянии широких лазерных пучков на некоторых специфических поверхностях (например, высоты шероховатостей которых подчиняются K -распределению). Как правило, негауссовыми являются спекл-модулированные спеклы (*speckled speckles*) [5]. Такие спеклы образуются при прохождении когерентного излучения через слоистую среду со случайно-неоднородными границами разделов. Так же негауссовой статистикой обладают спеклы при рассеянии лазерного луча на поверхности подвергшейся механической обработке, полировке, шлифовке, и т. д. Такие поверхности следует рассматривать как поверхности с детерминированной шероховатостью, вследствие воздействия на объект детерминированного процесса и эти поверхности могут быть аппроксимированы набором дифракционных решеток.

При аппроксимации поверхности несколькими дифракционными решетками возникают варианты расположения их между собой, что приводит к необходимости введения понятия сопряжения решеток [6]. Сопряжение описывает механические способы их наложения друг на друга. Варианты таких сопряжений показаны на рис. 1 и 2.

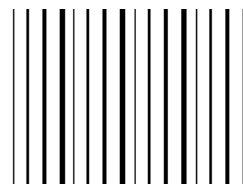


Рис. 1. Сопряжение параллельных решеток

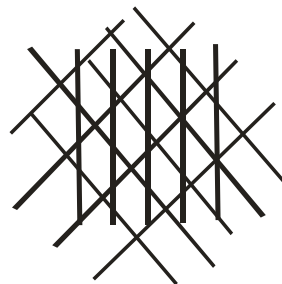


Рис. 2. Сопряжение непараллельных решеток

Периоды решеток могут быть как линейно зависимы, так и линейно независимы. В случае на рис. 2 учитываются и относительные углы между решетками. При отражении когерентного излучения от подобной поверхности дифракционная картина содержит информацию обо всех дифракционных решетках, участвующих в образовании поверхности.

Рассмотрим дифракцию когерентного излучения на одномерной отражающей решетке для наклонного падения луча, причем луч ориентирован произвольным образом по отношению к штрихам решетки (рис. 3).

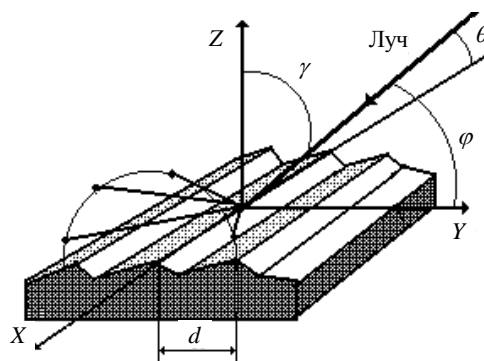


Рис. 3. Дифракция на решетке

На решетку падает плоская волна, направление распространения которой определяется углами θ и φ . Угловой спектр дифрагировавшего света описывается следующим выражением [7]:

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{(2p)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y, 0) \exp[-i(k_x x + k_y y)] dx dy,$$

где $u(x, y, 0)$ – напряженность электрического поля в точке $(x, y, 0)$; $k_x = k \cos \theta$, $k_y = k \cos \varphi$, $k = 2\pi/\lambda$; λ – длина волны используемого излучения.

Угловой спектр падающей плоской волны единичной амплитуды определяется δ -функцией

$$F_1(k_x, k_y) = \delta(k_x) \delta(k_y). \quad (1)$$

Угловой спектр поля после дифракции на решетке равен свертке углового спектра падающей волны F_1 и функции амплитудного коэффициента отражения решетки $\Phi(x)$

$$F(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_1(\xi, \eta) \Phi(k_x - \xi, k_y - \eta) d\xi d\eta. \quad (2)$$

Для бесконечной однородной периодической структуры спектр коэффициента отражения имеет вид

$$\Phi(k_x, k_y) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} a_n \delta(k_y) \delta\left(k_x - \frac{2\pi n}{d}\right), \quad (3)$$

где n – номер дифракционного порядка; d – период решетки; a_n – коэффициент ряда Фурье амплитудного коэффициента отражения решетки:

$$a_n = \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} R(x) \exp\left[-i \frac{2\pi n x}{d}\right] dx.$$

$R(x)$ определяется конкретной моделью дифракционной структуры поверхности и направлением падения луча на нее. Подставляя выражения (1) и (3) в (2) и проводя интегрирование, получим угловой спектр поля после дифракции на решетке

$$F(k_x, k_y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \delta\left(k_y - k\left(\cos\varphi - \frac{2\pi n}{d}\right)\right) \times \cos(k_x - k \cos\theta). \quad (4)$$

Из выражения (4) определяем направляющие косинусы дифракционных порядков

$$\cos\theta_n = \cos\theta, \quad \cos\varphi_n = \cos\varphi - \frac{n\lambda}{d}, \quad (5)$$

$$\cos\eta_n = \sqrt{\sin^2\theta - \left(\cos\varphi - \frac{n\lambda}{d}\right)^2}.$$

Как видно из (5), для любых порядков верно соотношение

$$\cos(k_n i) = \cos\theta,$$

где k_n – единичный вектор в направлении распространения n -го порядка дифракции, $i(1,0,0)$ – орт в направлении оси OX (рис. 3).

Таким образом, все дифракционные порядки лежат на поверхности кругового конуса, ось которого совпадает с осью OX , а угол при вершине равен 2θ . Третья формула в (5) определяет количество дифракционных порядков при заданном положении луча относительно штрихов решетки. Исходя из того что подкоренное выражение не должно быть отрицательным, максимальное число дифракционных порядков определяется следующим выражением:

$$N = \frac{d}{\lambda} (\sin\mu + \cos\phi).$$

При дифракции произвольно ориентированного луча на решетке все порядки дифракции являются образующими конической поверхности, вершина которой совпадает с точкой падения луча на решетку. Сечение плоскостью экрана подобной поверхности приводит к тому, что дифракционные порядки на плоскости приемника образуют дифракционные максимумы в виде одной из кривых второго порядка. Изменение угла наклона излучателя по отношению к элементам решетки позволяет управлять пространственным распределением дифракционных максимумов [8]. При нормальном падении дифракционные максимумы лежат на прямой линии. В этом случае образование дифракционных порядков описывается классическими законами дифракции луча на решетке [9].

Для численного моделирования распределения дифракционных максимумов на экране необходимо найти уравнение дифракционных порядков, полученных от заданных точек на поверхности. Направляющие векторы дифракционных порядков вычисляются на основании уравнений (5). При этом возьмем $d = 5$ мкм, $\lambda = 0,6328$ мкм, $\varphi = \pi/2$. Далее производится преобразование координат направляющих векторов из системы координат решетки в систему координат экрана. Для данных значений количество дифракционных максимумов N равно 11. Вертикальная пунктирная линия соответствует линии пересечения касательной плоскости с плоскостью экрана. Те дифракционные максимумы, которые расположены правее от этой линии в реальной спекл-картине отсутствуют.

Представленные на рис. 4 спекл-поля соответствуют одной дифракционной решетке для разных положений последней относительно источника излучения и экрана.

Для экспериментальной проверки результатов математического моделирования были проведены эксперименты с дифракционной решеткой и поверхностью, подвергшейся механической обработке. Источник излучения He-Ne лазер ЛГ-208, формирующий луч диаметром 1,5 мм и расходимостью 1,2 мрад. Длина волны лазерного излучения 0,6328 мкм. Спекл-поле, которое формируется в результате взаимодействия луча с поверхностью, проецируется на экран. В качестве объекта использовалась отражательная дифракционная решетка с периодом 5 мкм. Луч лазера падал перпендикулярно экрану, что позволило создать в пространстве трехмерную систему координат, в которой и проводились все измерения. Точка падения луча на экран соответствовала началу координат. Схема эксперимента показана на рис. 5.

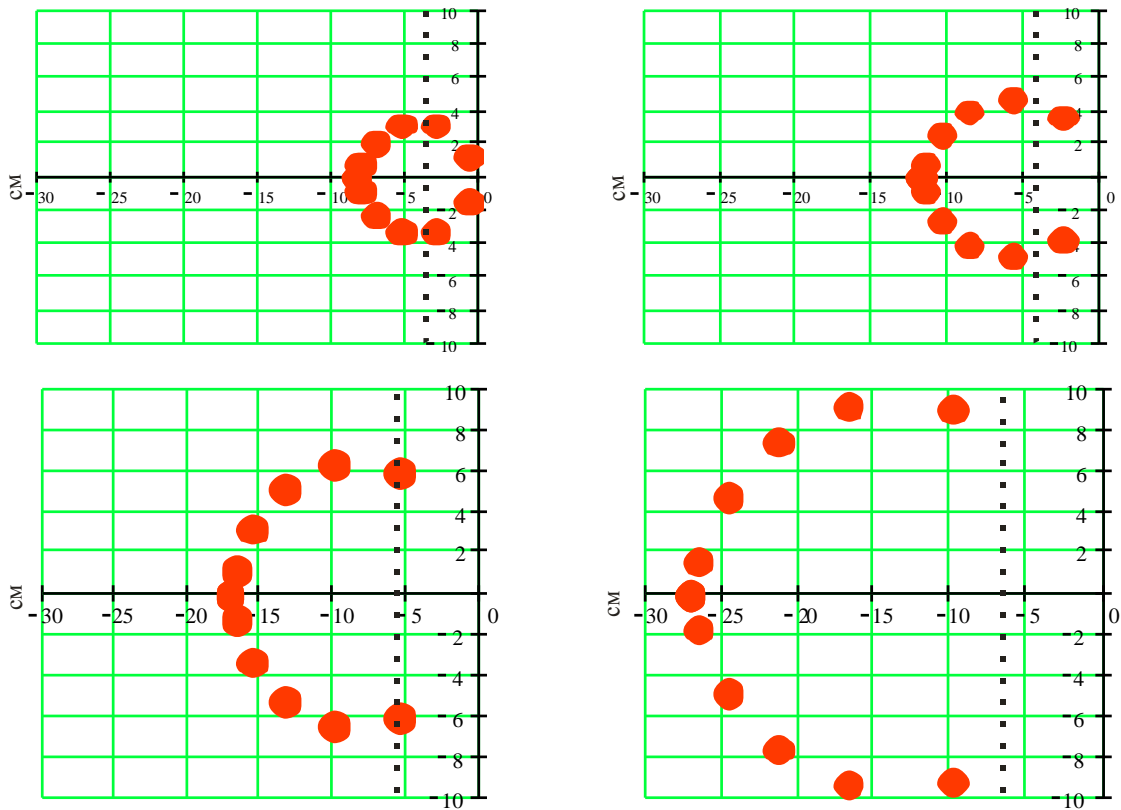


Рис. 4. Синтезированные спекл-поля для различных положений дифракционной решетки относительно источника излучения и экрана

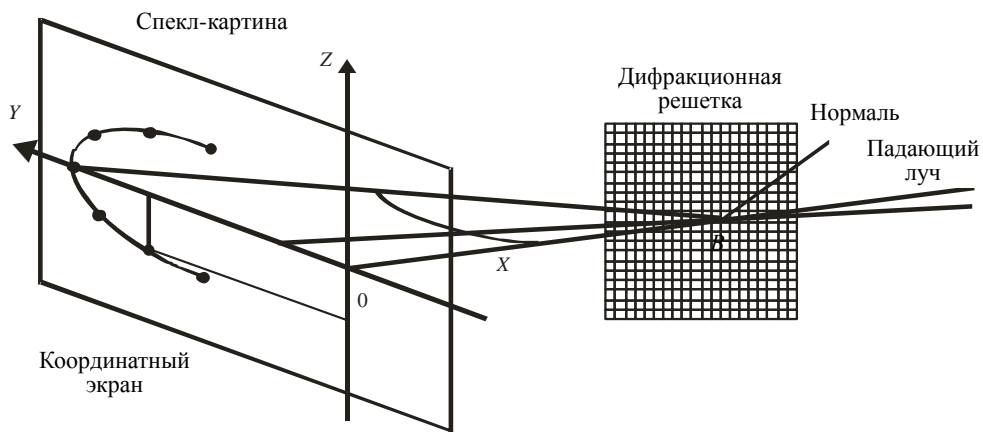


Рис. 5. Схема эксперимента

Дифракционная решетка была расположена на поворотном столике перпендикулярно плоскости XOY . Угол γ устанавливался с помощью отсчета поворотного столика. Это позволило точно определить пространственные параметры решетки. При данном взаимном расположении луча и экрана положение точки освещения в пространстве полностью определяется расстоянием l до нее от начала координат. Таким образом, точка освещения имеет координаты $(l, 0, 0)$.

Положение плоскости решетки в пространстве задается уравнением

$$-0,0071x - 0,0133y + 1 = 0.$$

Координаты точки освещения поверхности решетки $B(141,5; 0; 0)$.

В результате дифракции излучения на экране образуются дифракционные максимумы. В таблице приведены измеренные координаты дифракционных максимумов.

Координаты дифракционных максимумов

Y, мм	144,5	203,7	210	142,5
Z, мм	82,5	31,5	0	-82,5

Для координат этих точек и точки пересечения луча с экраном записано уравнение эллипса, аппроксимирующего расположение дифракционных максимумов:

$$-0,444y^2 + 0,018yz - 0,623z^2 + 93,32y - 2,236z = 0.$$

На следующем этапе эксперимента в качестве отражающей поверхности использовались плоские поверхности с гауссовым распределени-

ем шероховатости. На одной из поверхностей шлифовка производилась вдоль одной линии (рис. 6, а), на другой – вдоль линии под некоторым углом по отношению к первой (рис. 7, а).

На рис. 6, б показаны дифракционные максимумы, расположенные вдоль одной кривой второго порядка. Результирующее поле состоит из пространственно модулированного сигнала на фоне гауссовой помехи. Пространственная модуляция происходит вследствие дифракции на наборе параллельных одномерных дифракционных решеток (рис. 6, а).

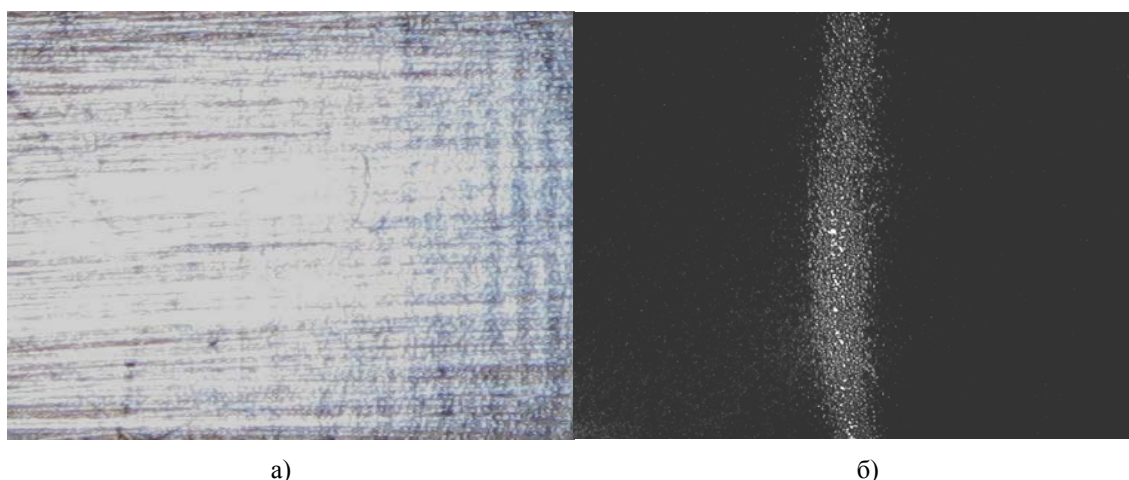


Рис. 6. Отражающая поверхность, где шлифовка производилась вдоль одной линии и распределение дифракционных максимумов на плоском экране: а) – отражающая поверхность; б) – распределение дифракционных максимумов

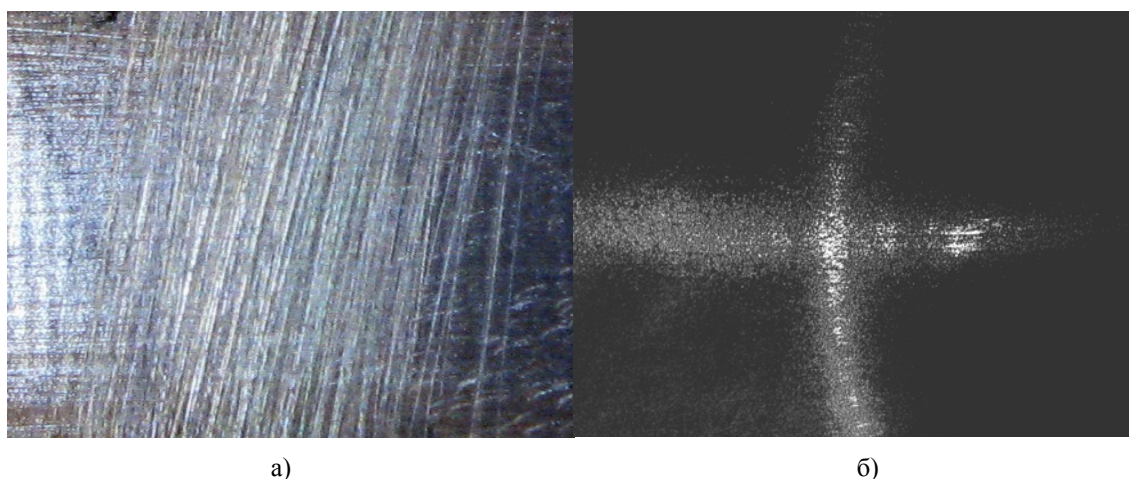


Рис. 7. Отражающая поверхность, где шлифовка производилась вдоль линии, расположенных под углом друг к другу и распределение дифракционных максимумов на плоском экране: а) – отражающая поверхность; б) – распределение дифракционных максимумов

На рис. 7, б на фоне гауссовой составляющей рассеянного поля наблюдается наличие пространственной модуляции, где дифракционные максимумы расположены вдоль двух кривых второго порядка, вследствие рассеяния на двух наборах параллельных одномерных дифракционных решеток, расположенных под углом друг к

другу (рис. 7, а). Угол между линиями, вдоль которых вытянуты дифракционные максимумы, соответствует углу между направлениями шлифовки.

Выводы. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что статистика амплитуды спекл-поля, которое возникло в ре-

зультате дифракции лазерного излучения на поверхностях, подвергшихся механической обработке, отличается от гауссовой. Спекл-поля носят пространственно модулированный характер. Результирующее спекл-поле, полученное от такой поверхности, следует рассматривать как сумму гауссовой составляющей рассеянного поля и не-гауссовой составляющей, связанной с механической обработкой. При этом различные типы механической обработки, примененные к поверхности, вносят свой независимый вклад в результирующее рассеянное поле. Все это позволяет утверждать, что спекл-поля, образованные в результате взаимодействия когерентного излучения с шероховатыми поверхностями не являются абсолютно случайными, а содержат в себе информацию о той степени упорядочения, которая характеризует объект.

Библиографический список

1. Гудмен Дж. Статистическая оптика / Дж. Гудмен; пер. с англ., под. ред. Г. В. Скродко. – М.: Мир, 1988. – 528 с
2. Зельдович Б. Я. Голограммы спекл-полей / Б. Я. Зельдович, В. В. Шкунов, Т. В. Яковлева // Успехи физ. наук. – 1986. – 149, вып. 3. – С. 549.
3. *Spatial Behaviour of Singularities in Fractal- and Gaussian Speckle Fields* / O. V. Angelsky, A. P. Maksimyak, P. P. Maksimyak, S. G. Hanson // *The Open Optics J.* – 2009. – 3. – P. 29–43.
4. Басс Ф. Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф. Г. Басс, И. М. Фукс. – М., Наука, 1972. – 424 с.
5. Ulyanov S. Speckled Speckle Statistics with a Small Number of Scatterers: Implication for Blood Flow Measurement / S. Ulyanov // *J. Biomedical Optics.* – 1998. – 3, iss. 3. – P. 237–245.
6. Приемко А. А. Пространственные параметры спекл-поля в восстановлении конфигурации / А. А. Приемко // *Технология приборостроения.* – 2001. – № 1–2. – С. 56–61.
7. Виноградова М. Б. Теория волн / М. Б. Виноградова, О. В. Руденко, А. П. Сухоруков. – М., Наука, 1979. – 384 с.
8. Андренко С. Д. Особенности рассеяния волн скошенной решеткой / С. Д. Андренко, А. П. Евдокимов, Ю. Б. Сидоренко, В. П. Шестопапов. – Х.: ИРЭ, 1984. – 40 с. (Препр. / АН УССР, Ин-т радиофизики и электрон.; № 244).
9. Резонансное рассеяние волн: в 2 т. Т. 1. Дифракционные решетки / В. П. Шестопапов, А. А. Кириленко, С. А. Масалов, Ю. К. Сиренко. – К.: Наук. думка, 1986. – 232 с.

Рукопись поступила 03.07.2012.

M. I. Dzubenko, S. N. Kolpakov,
I. V. Popov, A. A. Priemko

DIFFRACTION OF COHERENT RADIATION ON SURFACES HAVING NON-GAUSSIAN STATISTICS OF ROUGHNESS

The character of scattering surface depends on distribution of diffraction maximums obtained by interaction of diffraction field and a receiver plane. However, the question of forming of the speckle-fields observed as a result of interaction of coherent radiation with the diffusely scattering surfaces described by non-Gaussian distribution of roughness is not enough studied. In this paper the distribution of amplitude of speckle-fields appearing as a result of diffraction of laser radiation on the surfaces after machining is experimentally and theoretically investigated. The mathematical simulation of speckle-field the amplitude distribution of which are not subjected to a Gaussian statistics has been carried out. It is proven that speckle-fields formed as a result of interaction between coherent radiation and rough surfaces are not absolutely random and contain information about the degree of organization that characterizes the object.

Key words: speckle-field, coherent radiation, statistic optics.

М. І. Дзюбенко, С. Н. Колпаков,
І. В. Попов, А. А. Приемко

ДИФРАКЦІЯ КОГЕРЕНТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПОВЕРХНІ С НЕГАУСОВОЮ СТАТИСТИКОЮ ШОРСТКОСТІ

Розподіл дифракційних максимумів отриманих в результаті взаємодії дифракційного поля або спекл-поля с площиною приймача визначає характер поверхні, що відбиває. Проте питання формування спекл-полів, які спостерігаються в результаті взаємодії когерентного випромінювання з дифузно розсіювальними поверхнями, що описуються негаусовим розподілом шорсткості, є недостатньо вивченим. У роботі теоретично і експериментально досліджено розподіл амплітуди спекл-полів, що виникають в результаті дифракції лазерного випромінювання на поверхнях, які піддалися механічній обробці. Проведено математичне моделювання спекл-полів, розподіл амплітуди яких не підкоряється статистиці Гауса. Доведено, що спекл-поля, що утворені в результаті взаємодії когерентного випромінювання з шорсткими поверхнями не є абсолютно випадковими, а містять в собі інформацію про ту міру впорядкування, яка характеризує об'єкт.

Ключові слова: спекл-поле, когерентне випромінювання, статистична оптика.