

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАЗНОСТИ ФАЗ В СПЕКЛ-МОДУЛИРОВАННОМ ПОЛЕ И МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРЕДМЕТА ПО СПЕКЛ-СТРУКТУРЕ ЕГО ДИФРАКЦИОННОГО ПОЛЯ

Горбатенко Б.Б., Максимова Л.А., Рябухо В.П.
Саратовский государственный технический университет,
Саратовский государственный университет,
Институт проблем точной механики и управления РАН

Аннотация

Экспериментально установлено, что случайная составляющая разности фаз развитого спекл-поля в двух его точках имеет неравномерную плотность распределения вероятности с максимумами для значений 0 и π рад. Описан и экспериментально реализован метод восстановления изображения объекта по зарегистрированной спекл-структуре рассеянного им когерентного поля. Для восстановления утерянной при записи информации о фазе дифракционного поля предложено фазы соседних спеклов считать отличающимися на π радиан. Данный метод применим к объектам, распределение средней интенсивности по которым описывается четной функцией координат.

Введение

Как известно, полная информация о рассеянном объектом когерентном световом поле записывается и восстанавливается голографическим способом с помощью когерентной опорной волны. При ее отсутствии регистрируется спекл-структура распределения интенсивности рассеянного поля, т.е. – спеклограмма [1]. Разработка методов восстановления в данных обстоятельствах изображения объекта представляет интерес в компьютерной и дифракционной оптике, в оптических измерениях и диагностике, при разработке устройств обработки информации и т.п. Решению данной задачи, некорректной с математической точки зрения [2], посвящено значительное количество работ, например [2-4].

С формальной точки зрения рассматриваемая проблема состоит в том, что при записи спеклограммы теряется информация о фазе объектного поля в плоскости ее регистрации, что и переводит задачу восстановления изображения в разряд некорректных [5]. Возникает так называемая «фазовая проблема оптики» [6-10]. Имея способ восстановления пространственных фазовых распределений поля наравне с амплитудными в плоскости спеклограммы, можно, так или иначе, восстановить изображение объекта по его дифракционному полю.

Исследование фазовых распределений

В работе [11] теоретически показано, что в том случае, когда распределение интенсивности по источнику диффузно-когерентного излучения описывается четной функцией координат, спекл-поле в дальней зоне дифракции описывается действительной функцией. Данная ситуация реализуется таким образом, что в пределах одного спекла фаза остается постоянной, а при переходе к соседнему меняется на π рад. В работе [12] данное теоретическое положение экспериментально проверялось прямым измерением сдвига фаз в спекл-полях. Для измерений использовалась интерференционная схема Юнга (рис. 1).

Исследуемое спекл-поле получали путем прохождения лазерного пучка 1 через рассеиватель 2 и экран с отверстием 3. В дальней области дифракции (расстояние z достаточно велико) устанавливался экран 4 с двумя точечными отверстиями, расстояние между которыми сравнимо с размерами спеклов. В плоскости изображения экрана 3, даваемого линзой 5, с помощью микроскопа 7 наблюдались интерференционные полосы и измерялись их смещения в долях периода при смене реализации спекл-поля. Изменение разности фаз $\Delta\varphi$ поля в отверстиях экрана 4 связано с величиной сдвига интерференционных полос Δx простым соотношением $\Delta\varphi = 2\pi\Delta x / \Lambda$, где Λ – период полос.

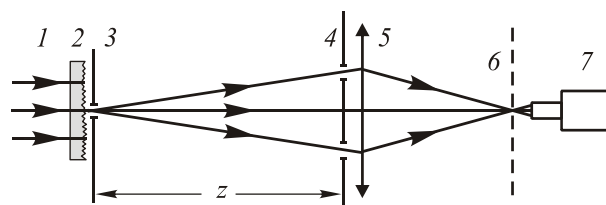


Рис. 1. Схема интерферометра Юнга для определения случайных фазовых соотношений в спекл-модулированном поле: 1 – лазерный пучок, 2 – рассеиватель, 3 – экран с отверстием, 4 – экран с двумя отверстиями, 5 – линза, 6 – плоскость наблюдения, 7 – микроскоп

Проводилось по 150 измерений разности фаз для трех характерных расстояний r_1 , r_2 и r_3 между отверстиями в экране 4. Эти расстояния соответствовали экстремальным значениям модуля автокорреляционной функции $B(r)$ спекл-поля (рис. 2), вид и параметры которой определялись с помощью теоремы Ван-Циттера-Цернике [13].

На рис. 3 гистограммами представлены результаты измерения разности фаз поля для трех, обозначенных на рис. 2, расстояний между исследуемыми точками.

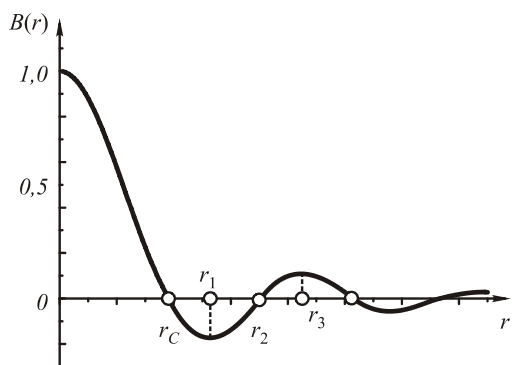


Рис. 2. Нормированная автокорреляционная функция спекл-поля кольцевого источника

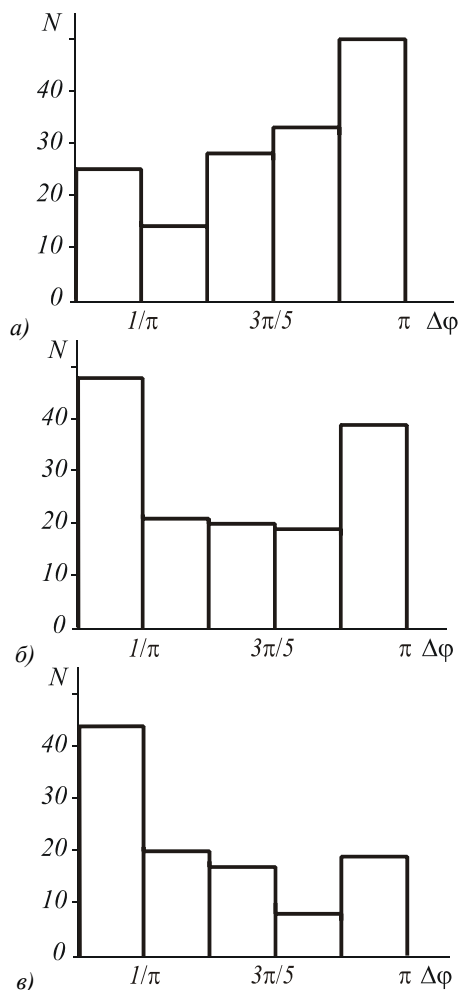


Рис. 3. Гистограммы результатов измерения разности фаз в двух точках спекл-модулированного поля:

а) – расстояние между точками $r = r_1$
(рис. 2); б) – $r = r_2$; в) – $r = r_3$

В наших экспериментах для формирования спекл-поля использовалось тонкое кольцевое отверстие в экране 3, при котором автокорреляционная функция приблизительно имеет вид функции Бесселя первого рода нулевого порядка [14]: $B(r) = J_0(2\pi Rr/\lambda z)$, где R – радиус кольца, r – расстояние между отверстиями. Расстояние $r = r_c$, при котором автокорреляционная функция $B(r)$ равна нулю, соответствует характерному размеру спеклов.

При $r = r_1$ наиболее вероятно, что отверстия попадают в соседние спеклы, но не исключается возможность попадания отверстий и в один спекл.

Соответствующая гистограмма на рис. 3,а показывает, что наиболее вероятны значения вблизи π радиан. При $r = r_2$ равновероятно попадание отверстий либо в соседние спеклы, либо в расположенные через один; на соответствующей гистограмме (рис. 3б) выравниваются вероятности значений разности фаз вблизи 0 и π радиан. При $r = r_3$ наиболее вероятно попадание отверстий в спеклы, расположенные через один, но возможно попадание и в соседние спеклы; гистограмма на рис. 3в показывает относительное увеличение вероятности разности фаз вблизи 0.

Таким образом, экспериментальные данные показывают отчетливую неравномерность плотности вероятности разности фаз в развитом спекл-поле. Важно отметить, что наиболее вероятными значениями являются 0 и π радиан, что и подтверждает теоретические выводы работы [11].

Восстановление фазовой информации об объектной волне без использования опорного пучка

Отмеченные выше свойства диффузно-рассеянных когерентных полей позволяют в ряде случаев восстанавливать утраченную при записи спеклограмм фазовую информацию об объекте, т.е. возникает возможность реализации нового подхода к решению так называемой «фазовой проблемы оптики» [6-10]. Другими словами, представляется возможным восстановить фазовую информацию о когерентной объектной волне без использования опорного пучка на стадии регистрации интенсивности объектного поля.

Для решения сформулированной в таком виде задачи можно предложить несколько подходов. Например, это можно сделать, используя следующую экспериментальную процедуру, схема реализации которой представлена на рис. 4. Лазерный пучок 1 освещает рассеиватель 2 и бинарный транспарант 3, представляющие в совокупности объект, изображение которого записывается. Рассеянное объектом излучение регистрируется на фоточувствительном материале 5 в дальней области дифракции. В качестве транспаранта 3 в нашем эксперименте использовался непрозрачный экран с отверстием в форме кольцевого квадрата 4. На рис. 4 представлен также увеличенный фрагмент спекл-картины б, формирующей в дальней области дифракции в плоскости регистрации 5.

Если полученную, например, на высококроссрезающей фотопластинке спеклограмму осветить монохроматической волной, то в дальней зоне дифракции формируется распределение средней интенсивности, определяемое автосверткой распределения средней освещенности по объекту [15]. На рис. 5 представлено экспериментально полученное

соответствующее распределение интенсивности для объекта в форме кольцевого квадрата. Как и следовало ожидать, наблюдается весьма отдаленное сходство полученной таким образом картины с исходным распределением интенсивности по объекту (рис. 4).

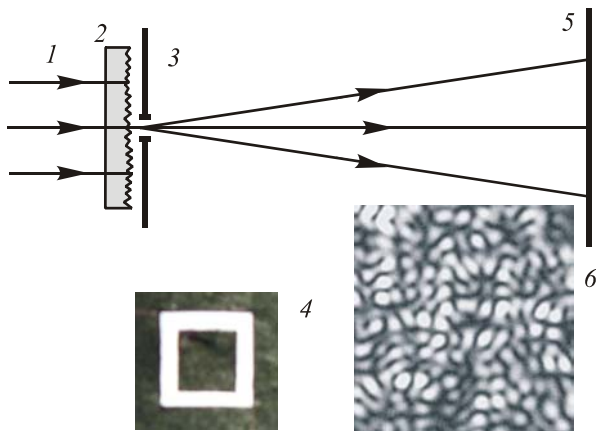


Рис. 4. Схема регистрации спеклограммы:
1 – лазерный пучок; 2 – рассеиватель;
3, 4 – транспарант, 5 – фоточувствительный материал;
6 – увеличенный фрагмент
спекл-картины, формирующейся
в дальней области дифракции

Вернемся к рассмотрению спекл-картины, наблюдаемой в плоскости регистрации (рис. 4). В соответствии с описанным выше замыслом, необходимо каждому из спеклов этой картины некоторым образом приписать определенное значение фазы и, тем самым, получить амплитудно-фазовое распределение объектного поля в плоскости регистрации.

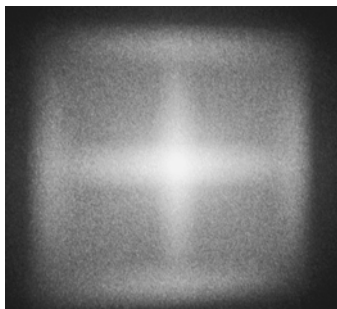


Рис. 5. Картина дифракции лазерного пучка на спеклограмме в дальней области

В голографии эта процедура выполняется с помощью когерентного опорного пучка и формирования системы несущих интерференционных полос внутри спеклов. Действительно, если на стадии регистрации на плоскость 5 (рис. 4) направить под некоторым углом θ плоскую опорную волну, то в пределах каждого спекла будет формироваться система эквидистантных квазипараллельных интерференционных полос с периодом $\Lambda = \lambda / \sin \theta$. В том случае, когда фазы соседних спеклов сдвинуты на π радиан [11, 12] эти интерференционные полосы будут сдвинутыми на полпериода при переходе от од-

ного спекла к соседнему. Фрагмент такой спекло-модулированной интерференционной картины, представляющей собой, по сути, голограмму, представлен на рис. 6а.

Аналогичную картину можно получить искусственным способом, используя запись только одной спеклограммы без опорного пучка. Для этого, например, методами компьютерной графики необходимо покрыть спеклограмму системой полос, имитирующих несущие интерференционные полосы голограммы. Фрагмент картины, полученной таким образом, приведен на рис. 6б. Вся эта картина имитирует голограмму, период квазирегулярных несущих полос которой определяет угол наклона виртуальной плоской опорной волны к плоскости записи спеклограммы.

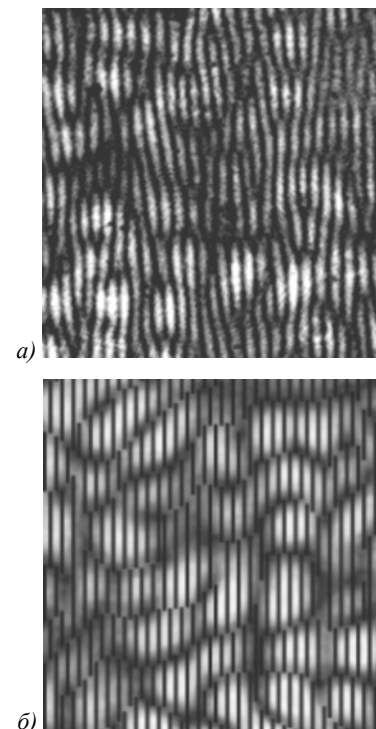


Рис. 6. Фрагменты реальной голограммы рассеивающего объекта (а) и спеклограммы того же объекта с искусственно нанесенной системой несущих полос (б)

Восстановление объектного светового поля и, соответственно, изображения объекта сводится к перенесению полученной картины на фотопластинку в масштабе, приемлемом для ее использования в качестве дифракционного оптического элемента, и затем освещению полученного дифракционного элемента плоской монохроматической волной. Сдвиг полос на полпериода на таком дифракционном элементе придает в дифрагированных волнах сдвиг по фазе между соседними спеклами на π рад. В целом, полное дифрагированное световое поле представляет собой когерентную суперпозицию элементарных световых полей, образовавшихся в результате дифракции на периодической системе полос в пределах отдельных спеклов дифракцион-

ного элемента, как это и происходит на обычной голограмме. Таким образом, восстанавливается объектная световая волна и в дальней области дифракции формируется изображение объекта.

В наших экспериментах для записи спеклограммы по схеме рис. 4 использовался цифровой фотоаппарат Nikon D'100 без объектива с ПЗС-матрицей размером $23,7 \times 15,6$ мм, содержащей 6,1 млн пикселей (3008×2000). Записанное в графический файл изображение спекл-картины подвергалось обработке с использованием программы CorelDRAW для формирования системы параллельных полос со сдвигом на полпериода в соседних спеклах (рис. 6б). Получаемая картина фотографическим способом в требуемом масштабе переносилась на фотопластинку для получения голографически подобного дифракционного оптического элемента.

Картина дальнего дифракционного поля, формирующегося при освещении полученного дифракционного элемента лазерным пучком с апертурой $D \approx 6$ мм, представлена на рис. 7а.

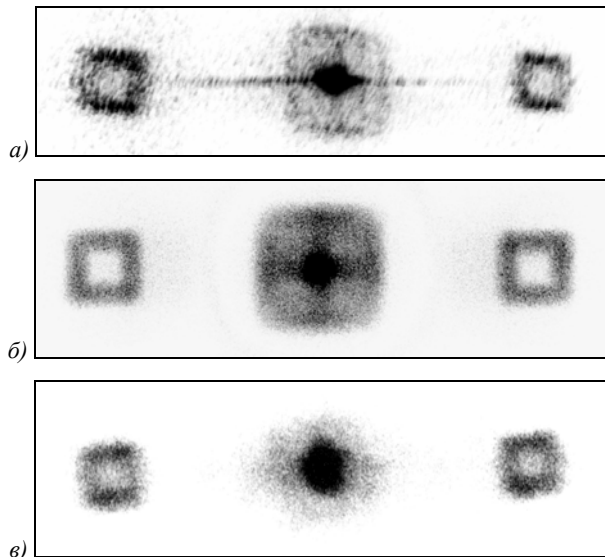


Рис. 7. Картина дальнего дифракционного поля, формирующегося при освещении лазерным пучком дифракционного элемента (а), реальной голограммы (б) и дифракционного элемента, содержащего только систему несущих полос (в)

В центре этой картины, в нулевом порядке дифракции наблюдается распределение интенсивности, аналогичное представленному на рис. 5, поскольку в этом направлении распространяется волна, дифрагированная только на спекл-структуре дифракционного оптического элемента. В ± 1 порядках дифракции на системе несущих полос формируются оптически сопряженные изображения объекта в форме кольцевого квадрата (рис. 4). Для сравнения на рис. 7б представлена картина дальнего дифракционного поля реальной голограммы того же объекта, записанная по схеме рис. 4 с опорной волной. Использовался восстанавливающий лазерный пучок с той же апертурой, что и при восстановлении изображения с дифракционного элемента.

Кроме того, был получен оптический дифракционный элемент, содержащий только систему несущих полос без первоначально зарегистрированной спекл-картины. С этой целью, после создания системы полос на зарегистрированной спекл-картине, эта картина удалялась, а оставшаяся система полос наносилась фотографическим способом на фотопластинку.

На рис. 8а и б представлены фрагменты различных участков такой системы полос; дифракционные элементы на рис. 8а и 8б различаются толщиной этих полос.

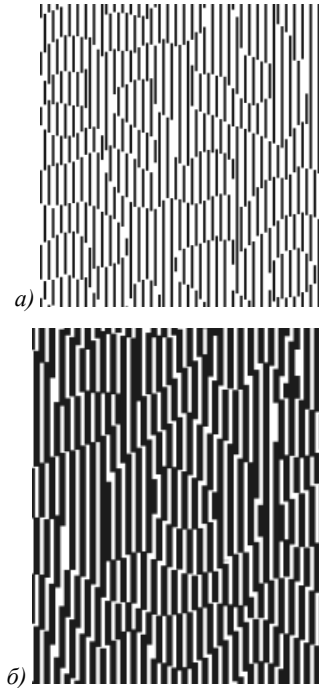


Рис. 8. Дифракционные элементы, содержащие только систему несущих полос

Таким образом, полученные дифракционные элементы содержат множество элементарных дифракционных решеток, размеры и пространственное положение которых определены размером и положением спеклов зарегистрированной спекл-картины. Такой дифракционный элемент также позволяет восстановить изображение объекта (рис. 7в). Однако в этом случае, как это отчетливо видно на рисунке, в нулевом порядке дифракции отсутствует дифракционное гало, определяемое автокорреляцией распределения освещенности по объекту.

Относительно низкое качество изображений объекта, восстановленных с имитированной голограммы, объясняется тем, что использованная в работе графическая обработка спеклограммы без применения специальных программных средств является довольно трудоемким процессом, сопровождаемым существенными ошибками при определении границ спеклов. Кроме того, помимо субъективного фактора, причиной ошибок является то обстоятельство, что сдвиг фаз соседних спеклов строго на π радиан реализуется только для δ -коррелированных источников диффузно-когерентного излучения [11]. В условиях реального эксперимента

данное условие в полной мере, естественно, не выполняется. Тем не менее, в ± 1 порядках дифракции отчетливо видны изображения двух кольцевых квадратов.

Заключение

Таким образом, в работе показана принципиальная возможность восстановления изображения объекта по спеклограмме его дифракционного поля. Продемонстрирована одна из возможных процедур такого восстановления, основанная на создании голографически подобного дифракционного оптического элемента с системой несущих полос. Аналогичную процедуру, начиная с момента регистрации спеклограммы, можно проводить исключительно вычислительными методами, не формируя реально-го дифракционного элемента, а получая восстановленное изображение на мониторе компьютера.

Представляет интерес распространение аналогичной методики на объекты с нарушением вращательной симметрии. Если даже в этом случае не удастся сразу получить изображение объекта требуемого качества, его можно использовать в качестве первого приближения для использования в одном из разработанных итерационных процессов [2, 16-18]. Удачный выбор первого приближения позволяет обеспечить сходимость процесса, уменьшить количество итерационных шагов и улучшить качество конечного изображения.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта научной программы «Университеты России» № УР.01.01.048, гранта Президента РФ № НШ-25.2003.2 поддержки ведущих научных школ РФ и гранта CRDF № REC-006.

Литература

1. Франсон М. Оптика спеклов // М.: Мир, 1980. 171 с.
2. Бельдюгин И.М., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. Восстановление изображения предмета по спекл-структуре его поля // Квантовая электроника, 2001. Т. 31. № 6. С. 539-542.
3. Fienap J.R. Phase retrieval algorithms: a comparison // Applied Optics, 1982. V. 21. P. 2758-2770.
4. Bates R.H.T., Tan D.G.H. Toward reconstructing phases of inverse-scattering signals // Journal of the Optical Society of America, 1985. V. 2. P. 2013-2019.
5. Обратные задачи в оптике. Под ред. Болтса Г.П. // М.: Машиностроение, 1984. 200 с.
6. Вахрушева М.В., Власов Н.Г. Сведение фазовой проблемы к расчету интерферограмм сдвига // Прикладная математика и техническая физика, 2003. Т. 2. № 4. С. 3-4.
7. Vlasov N.G., Sazhin A.V., Kalenkov S.G. Solution of phase problem // Laser Physics, 1996. Vol. 6(2). P. 401-404.
8. Гончарский А.В., Попов В.В., Степанов В.В. Введение в компьютерную оптику // М.: Издательство МГУ, 1991. 312 с.
9. Компьютеры в оптических исследованиях. Под ред. Фридена Б. // М.: Мир, 1983. 488 с.
10. Аксенов В.П., Банах В.А., Тихомирова О.В. Потенциальные и вихревые свойства оптических спекл-полей // Оптика атмосферы и океана, 1996. Т. 9. В. 11. С. 1450-1457.
11. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Максимова Л.А., Рябухо В.П. О некоторых статистических свойствах разности фаз в развитом спекл-модулированном поле // Оптика и спектроскопия, 1995. Т. 78. В. 2. С. 316-319.
12. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Максимова Л.А., Рябухо В.П. Статистические свойства пространственного распределения фазы развитого спекл-поля // Письма в ЖТФ, 1992. Т. 18. В. 2. С. 26-28.
13. Гудмен Дж. Статистическая оптика // М.: Мир, 1988. 527 с.
14. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике // М.: Мир, 1971. 495 с.
15. Кольер Р., Беркхарт К., Лиин Л. Оптическая голография // М.: Мир, 1973. 688 с.
16. Kotlyar V.V., Serafimovich P.G., Soifer V.A. Regularised iterative algorithm for the phase retrieval // Optik, 1993. V. 94. P. 96-99.
17. Gerchberg R.W., Saxton W.D. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // Optik, 1972. V. 35. P. 237-246.
18. Методы компьютерной оптики. Под ред. Сойфера В.А. // М.: Физматлит, 2000. 688 с.

Statistical properties of the phase difference in the developed speckle-modulated field and a method for reconstructing the image of an object from the speckle structure of its diffraction field

B.B. Gorbatenko^{1,2}, L.A. Maksimova³, V.P. Ryabukho^{1,2}

¹ Saratov State Technical University

² Saratov State University

³ Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS

Abstract

It has been shown experimentally in this work that the random component of the phase difference in two points of the developed speckle-field has a non-uniform probability density with maximums for the values of 0 and π rad. A method for reconstructing the image of an object from the recorded speckle structure of its coherent diffraction field is described and experimentally implemented. It is proposed to consider the phases of the neighboring speckles to differ by π radians for the purpose of restoring the information about the phase of the diffraction field lost during recording. Such a method can be applied to the objects with the intensity distribution described by the even function of the coordinates.

Keywords: speckle-modulated, image, speckle structure, diffraction field, reconstructing image.

Citation: Gorbatenko BB, Maksimova LA, Ryabukho VP. Statistical properties of the phase difference in the developed speckle-modulated field and a method for reconstructing the image of an object from the speckle structure of its diffraction field. *Computer Optics* 2004; 26: 48-52.

References

- [1] Françon M. La granularité laser (speckle) et ses applications en optique [In French]. Paris, New York, Barcelone, Milan: Masson; 1978.
- [2] Bel'dyugin IM, Zubarev IG, Mikhailov SI. The object image reconstruction from the speckle pattern of its field. *Quantum Electron* 2001; 31(6): 539-542.
- [3] Fienap JR. Phase retrieval algorithms: a comparison. *Appl Opt* 1982; 21(15): 2758-2769.
- [4] Bates RHT, Tan DGH. Toward reconstructing phases of inverse-scattering signals. *J Opt Soc Am A* 1985; 2(11): 2013-2018.
- [5] Baltés HP, ed. Inverse source problems in optics. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1978.
- [6] Vakhrusheva MV, Vlasov NG. Reduction of a phase problem to calculating shear interferograms [In Russian]. *Applied Mathematics and Physics* 2003; 2(4): 3-4.
- [7] Vlasov NG, Sazhin AV, Kalenkov SG. Solution of phase problem. *Laser Physics* 1996; 6(2): 401-404.
- [8] Goncharsky AV, Popov VV, Stepanov VV. Introduction to computer optics [In Russian]. Moscow: MSU Publisher; 1991.
- [9] Frieden BR, ed. The computer in optical research. Methods and applications. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag; 1980.
- [10] Aksenov VP, Banakh VA, Tikhomirova OV. Potential and vortex features of optical speckle-fields [In Russian]. *Optika Atmosfery i Okeana Journal* 1996; 9(11): 1450-1457.
- [11] Gorbatenko BB, Klimentov IS, Maksimova LA, Ryabukho VP. Some statistical properties of the phase difference in the developed speckle-modulated field. *Optics and Spectroscopy* 1995; 78(2): 283-286.
- [12] Gorbatenko BB, Klimentov IS, Maksimova LA, Ryabukho VP. Statistical properties of the spatial distribution of the phase of a developed speckle field [In Russian]. *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* 1992; 18(2): 26-28.
- [13] Goodman JW. *Statistical optics*. Wiley-Interscience; 1985.
- [14] Papoulis A. *Systems and transforms with applications in optics*. New York: Krieger Pub Co; 1981.
- [15] Collier RJ, Burckhardt CB, Lin LH. *Optical holography*. New York, London: Academic Press; 1971.
- [16] Kotlyar VV, Serafimovich PG, Soifer VA. Regularised iterative algorithm for the phase retrieval. *Optik* 1993; 94: 96-99.
- [17] Gerchberg RW, Saxton WD. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik* 1972; 35: 237-246.
- [18] Soifer VA, ed. *Methods for computer design of diffractive optical elements*. New York: John Wiley & Sons Inc; 2002.