

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ, РЕКОНСТРУИРОВАННОГО ПО ЗАРЕГИСТРИРОВАННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ДИФРАКЦИОННОГО СПЕКЛ-ПОЛЯ

Горбатенко Б.Б.¹, Максимова Л.А.², Мысина Н.Ю.³, Рябухо В.П.^{2,3}

¹ Саратовский государственный технический университет,

² Институт проблем точной механики и управления РАН,

³ Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Аннотация

Предложен и экспериментально реализован метод повышения качества изображения рассеивающего объекта, восстанавливаемого с искусственной Фурье-голограммы, созданной путём нанесения на спеклограмму квазиинтерференционных полос с пространственным сдвигом при переходе от одного спекла к соседнему. Метод основан на разделении спеклограммы на фрагменты, восстановлении изображения от каждого из фрагментов, некогерентном суммировании изображений и формировании усреднённого по интенсивности суммарного изображения.

Ключевые слова: спекл-структура, спеклограмма, дифракция, цифровое Фурье-преобразование, Фурье-голограмма, голограммная структура.

Введение

Восстановление изображения объекта по зарегистрированному распределению интенсивности рассеянного им дифракционного поля представляет интерес в различных областях современной оптики: голографии и дифракционной оптике, оптических измерениях и диагностике, методах оптической обработки информации, микроскопии и т.п. Разработаны разные подходы к решению задачи восстановления изображения [1 - 11]. В [5 - 10] предложены методы восстановления изображений по записи спекл-структуры дифракционного поля, работы [12, 13] посвящены задаче улучшения качества восстановленных изображений.

Методы восстановления изображений по интенсивности спекл-структуры дифракционного поля [5 - 9] основаны на представлениях о том, что в дальней области дифракции рассеянного когерентного оптического поля случайная составляющая разности фаз в двух точках поля может принимать с наибольшей вероятностью два значения – 0 и π радиан. Данное обстоятельство использовано в алгоритмах аналогового и численного восстановления изображения объектов [7 - 9], поскольку представляется возможным восстановить фазовую информацию о когерентном объектном поле без использования опорного пучка на стадии регистрации интенсивности объектного поля. Таким образом, возникает возможность реализации нового подхода к решению так называемой «фазовой проблемы оптики» [4, 14 - 16].

В данной работе анализируются причины, влияющие на качество изображений, восстанавливаемых путём реконструкции фазы рассеянного спекл-поля и последующего интегрального преобразования спеклограммы. Предложен метод улучшения качества изображений, основанный на разделении спеклограммы на фрагменты, восстановлении изображения от каждого из фрагментов, некогерентном суммировании изображений и формировании усреднённого по интенсивности суммарного изображения.

Метод усреднения восстановленного изображения по ансамблю реализаций объектного поля

Один из возможных алгоритмов восстановления изображений приведён в [9]. Он заключается в создании голограммной структуры путём нанесения с помощью компьютерной графики несущих полос с пространственным сдвигом на полпериода при переходе от одного спекла к соседнему. Таким образом восстанавливается информация о фазовом пространственном распределении в объектном поле и получается так называемая искусственная Фурье-голограмма. Аналоговое или цифровое Фурье-преобразование искусственной голограммы приводит к формированию изображения объекта. Фрагмент обработанной подобным образом спеклограммы приведён на рис. 1, где в качестве рассеивающего объекта – источника спекл-модулированного дифракционного поля – использовалось матовое стекло с кольцевой квадратной апертурой.

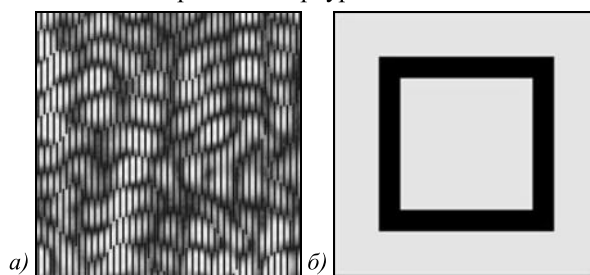


Рис. 1. Спеклограмма с системой несущих полос, нанесённых с помощью компьютерной обработки цифровой спеклограммы (а), и изображение апертуры рассеивающего объекта в форме кольцевого квадрата (б)

Можно предположить, что чем большее количество спеклов зарегистрировано на спеклограмме и обработано вышеописанным способом, тем выше будет качество восстановленного изображения. Данное предположение основано на том общеизвестном факте, что качество изображения, восстановленного с реальной голограммы, зарегистрированной

ной с использованием опорного пучка, ведёт себя именно таким образом.

Однако эксперименты показали, что, начиная с некоторого числа спеклов (размера спеклограммы), такое увеличение не только не приводит к положительному результату, но даже даёт обратный эффект. Это может быть объяснено со следующих позиций. Описанный выше алгоритм восстановления изображения включает в себя процесс реконструкции фазы рассеянного поля. Этот процесс не может быть реализован безошибочно. Один из возможных механизмов возникновения такой ошибки может выглядеть следующим образом.

Как установлено в [5], изменение фазы на π радиан при переходе к соседнему спеклу является наиболее вероятным, однако не строго детерминированным. Это связано, как мы полагаем, с конечными поперечными размерами неоднородностей рассеивающего объекта. Для того чтобы прояснить влияние данного обстоятельства на качество изображения, восстановленного с искусственной голограммы, целесообразно более подробно остановиться на процедуре её формирования. Вертикальная искусственная интерференционная полоса наносится на верхний спекл до её пересечения с предполагаемым нулём интенсивности, т. е. границей спекла. После её пересечения полоса сдвигается на половину периода. И так далее, до нижней границы фрагмента спеклограммы. При каждом акте пересечения полосой границы спекла возможна ошибка в определении пространственного положения полосы. В первую очередь, это связано с определением границы спекла. За нуль интенсивности может быть принят её локальный минимум.

Таким образом, реализация процедуры нанесения несущих полос со сдвигом на полпериода в соседних спеклах вносит некоторую ошибку придаваемому таким образом значению фазы поля спеклов. Поскольку фаза каждого спекла реконструируется относительно фазы предыдущего, то эта ошибка накапливается при увеличении числа обработанных спеклов и, в конечном итоге, может достигнуть величины π радиан. При этом дифрагированная на последнем обработанном спекле волна вступит в деструктивную с точки зрения формирования исходного изображения интерференцию с волной, дифрагированной на первом из обработанных спеклов. Дальнейшее увеличение размера спеклограммы и количества обработанных спеклов будет с неизбежностью приводить к ухудшению качества восстановленного изображения.

Для преодоления процесса накопления ошибки нами предлагается достаточно простой способ улучшения качества восстанавливаемого изображения. Спеклограмма разбивается на фрагменты такого размера, т.е. такого количества спеклов, при котором набег ошибки придаваемого значения фазы не будет так велик, чтобы заметно сказаться на качестве изображения. На данном этапе такая оценка производилась, как это продемонстрировано далее, эмпирическим путём. С помощью Фурье-преобразования восстанавли-

вается изображение от каждого из фрагментов, а затем производится сложение по интенсивности полученных изображений и формирование усреднённого суммарного изображения.

В наших экспериментах обработанная спеклограмма с приблизительным числом спеклов 3500-4000 разбивалась на 9 одинаковых прямоугольных участков. На рис. 2а представлено изображение, восстановленное одновременно со всех участков – с целой спеклограммы, а на рис. 2б – с использованием только одного из участков спеклограммы. На представленных рисунках визуально оценить качество изображений весьма затруднительно. Прежде всего, это связано с тем, что более мелкий фрагмент продуцирует модуляцию изображением более крупных спеклов [17], что, в свою очередь, ухудшает качество субъективного восприятия контура квадрата. Объективную оценку может дать только прямое измерение распределения интенсивности по изображению.

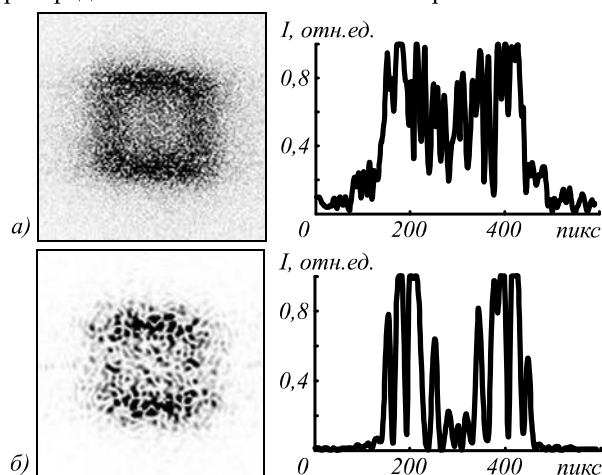


Рис. 2. Изображения рассеивающего объекта с кольцевой квадратной апертурой и распределения относительной интенсивности в центральных областях изображений (в вертикальных сечениях), восстановленных с одновременным использованием всех участков спеклограммы (а) и с использованием только одного участка спеклограммы (б)

На рис. 2а, б приведены соответствующие этим изображениям графики распределения интенсивности в центральных областях изображений. Достаточно отчётливо наблюдается, что провал средней интенсивности в центре квадрата увеличился. Данное обстоятельство указывает на то, что выбранный размер фрагмента удовлетворяет сформулированному выше качественному критерию.

На рис. 3 представлен результат использования предлагаемой процедуры обработки спеклограмм, повышающей качество восстанавливаемого изображения. Изображение, представленное на этом рисунке, получено в результате некогерентного суммирования (сложения по интенсивности) изображений, восстановленных со всех 9 фрагментов исходной спеклограммы. Сравнение распределений интенсивностей в сечениях изображений, приведённых на рис. 2, 3, показывает заметное повышение качества изображения, восстанавливаемого предлагаемым методом.

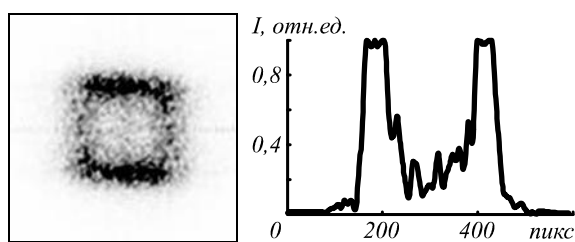


Рис. 3. Суммарное изображение рассеивающего объекта с кольцевой квадратной апертурой, усреднённое по 9 изображениям, восстановленным с отдельных участков спеклограммы, и относительное распределение интенсивности в центральной области (в вертикальном сечении) суммарного изображения

Дополнительным положительным эффектом предложенного подхода, значительно улучшающим визуально воспринимаемое качество получаемого изображения, является уменьшение контраста зернистости восстановленного изображения, т.е. контраста модулируемой изображением спекл-структуры, что также заметным образом проявляется на рис. 3.

Заключение

Восстановление пространственного фазового распределения в дифракционном поле может быть обеспечено созданием в записанной спекл-структуре высокочастотной квазипериодической модуляции, аналогичной модуляции несущими интерференционными полосами в голографической записи волнового поля. При этом требуемая фазовая модуляция обеспечивается сдвигом несущих полос на половину их периода при переходе от одного спекла к соседнему. Предложенный в работе метод улучшения качества изображения, восстановленного по интенсивности дифракционного поля рассеивающего объекта при его когерентном освещении, основан на использовании дополнительного численного преобразования, усреднения изображения по ансамблю реализаций объектного поля. Данная численная процедура позволяет преодолеть процесс накопления ошибки в восстановлении фазового распределения дифракционного поля зарегистрированной спекл-структуры и, следовательно, повысить качество восстановленного изображения рассеивающего объекта.

Качество изображения объекта, восстановленного по интенсивности его дифракционного поля с помощью предложенной методики, безусловно зависит от количества зарегистрированных спеклов. Однако прямое Фурье-преобразование обработанной спеклограммы не обязательно приводит к получению оптимального по качеству изображения. Установлено, что целесообразно разделить спеклограмму на фрагменты такого размера, который обеспечивает приемлемую ошибку в задании фазы поля каждого из спеклов. Затем необходимо восстановить изображение от каждого из фрагментов и провести некогерентное суммирование этих изображений с усреднением по интенсивности.

Оптимальные размеры фрагментов спеклограммы, связанные с параметрами неоднородностей рассеивающей поверхности объекта, могут определять-

ся экспериментально. Целесообразно, однако, сформулировать теоретические критерии такого разделения, что может служить одной из целей дальнейших исследований в этой области.

Результаты настоящей работы позволяют расширить представления о свойствах диффузно-когерентного поля и могут быть использованы для создания новых технологий и подходов в области оптической обработки информации.

Благодарности

Авторы благодарят к.ф.-м.н. В.В. Лычагова, к.ф.-м.н. О.А. Перепелицыну, к.ф.-м.н. Д.В. Лякина за помощь в экспериментальных исследованиях. Работа выполнена при поддержке программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009-2011 гг.).

Литература

1. **Bastiaans, M.J.** Phase reconstruction from intensity measurements in linear systems / M.J. Bastiaans, K.B. Wolf // J. Opt. Soc. Am. A. – 2003. – V. 20. – P. 1046-1049.
2. **Nitta, K.** Image reconstruction for thin observation module by bound optics by using the iterative back projection method / K. Nitta, R. Shogenji, S. Miyatake, J. Tanida // Applied Optics. – 2006. – V. 45. – Issue 13. – P. 2893-2901.
3. **Kolenovic, E.** Correlation between intensity and phase in monochromatic light / E. Kolenovic // J. Opt. Soc. Am. A. – 2005. – V. 22. – P. 899-906.
4. Дифракционная компьютерная оптика / под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
5. **Горбатенко, Б.Б.** Статистические свойства разности фаз в спекл-модулированном поле и метод восстановления изображения предмета по спекл-структуре его дифракционного поля / Б.Б. Горбатенко, В.П. Рябухо, Л.А. Максимова // Компьютерная оптика. – 2004. – В. 26. – С. 48-52. – ISSN 0134-2452.
6. **Горбатенко, Б.Б.** Реконструкция изображения по пространственному распределению интенсивности дифракционного спекл-модулированного поля / Б.Б. Горбатенко, Л.А. Максимова, В.П. Рябухо, Ю.В. Норов // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 2. – С. 26-33.
7. **Горбатенко, Б.Б.** Метод восстановления изображения предмета по спекл-структуре его дифракционного поля / Б.Б. Горбатенко, В.П. Рябухо, Л.А. Максимова // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, В. 17. – С. 68-75. – ISSN: 0320 – 0116.
8. **Горбатенко, Б.Б.** Реконструкция пространственного фазового распределения в дифракционном спекл-поле и восстановление изображения объекта по записи интенсивности / Б.Б. Горбатенко, В.П. Рябухо, Л.А. Максимова // Опт. и спектр. – 2006. – Т. 101, № 5. – С. 861-865. – ISSN 0030-4034.
9. **Горбатенко, Б.Б.** Восстановление голограммной структуры по цифровой записи фурье-спеклограммы / Б.Б. Горбатенко, Л.А. Максимова, В.П. Рябухо // Опт. и спектр. – 2009. – Т. 106, № 2. – С. 321-328. – ISSN 0030-4034.
10. **Hamed, M.** Numerical Speckle Images Formed by Diffrusers Using Modulated Conical and Linear Apertures / M. Hamed // Journal of Modern Optics. – 2009. – V. 56, N 10. – P. 1174-1181.
11. **Щерба, Е.В.** Анализ применимости методов интерполяции и экстраполяции для решения задачи восстановления изображения / Е.В. Щерба // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 3. – С. 336-339.

12. **Nagashima, K.** Improvement of Images Generated Reconstructed from Computer-Hologram Using an Iterative Method / K. Nagashima // *Optics & Laser Technology*. – 1986. – V. 18, N 3. – P. 157-162.
13. **Takanori, N.** Image Quality Improvement of Digital Holography by Superposition of Reconstructed Images Obtained by Multiple Wave-lengths / N. Takanori, O. Mitsukiyo // *Applied Optics*. – 2008. – V. 47, N 19. – P. D38-D43.
14. **McBride, W.** Phase imaging with a half-plane aperture / W. McBride, L.J. Allen // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2004 – V. 21. – P. 1172-1178.
15. **Rondeau, X.** Phase retrieval from speckle images / X. Rondeau, E. Thiébaud, M. Tallon, R. Foy // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2007 – V. 24. – P. 3354-3365.
16. **Quiney, H.M.** Non-iterative solution of the phase retrieval problem using a single diffraction measurement / H.M. Quiney, G.J. Williams, K.A. Nugent // *Opt. Express*. – 2008 – V. 16. – P. 6896-6903.
17. **Goodman, J.W.** *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* / J.W. Goodman. – Englewood, CO: Roberts & Company Publishers, 2006. – 387 p.

References

1. **Bastiaans, M.J.** B. Phase reconstruction from intensity measurements in linear systems / M.J. Bastiaans, K.B. Wolf // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2003. – V. 20. – P. 1046-1049.
2. **Nitta, K.** Image reconstruction for thin observation module by bound optics by using the iterative back projection method / K. Nitta, R. Shogenji, S. Miyatake, J. Tanida // *Applied Optics*. – 2006. – V. 45. – Issue 13. – P. 2893-2901.
3. **Kolenovic, E.** Correlation between intensity and phase in monochromatic light / E. Kolenovic // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2005. – V. 22. – P. 899-906.
4. *Diffraction computer optics* / edited by V.A. Soifer – Moscow: “Fizmatlit” Publisher, 2007. – 736 p. – (In Russian).
5. **Gorbatenko, B.B.** Statistical properties of phase difference in speckle-modulated field and method of reconstructing of object image on speckle-structure of diffraction field / B.B. Gorbatenko, V.P. Ryabukho, L.A. Maksimova // *Computer Optics*. – 2004. – V. 26. – P. 48-52. – (In Russian).
6. **Gorbatenko, B.B.** Reconstruction of image from spatial distribution of intensity of diffraction speckle-modulated field / B.B. Gorbatenko, L.A. Maksimova, V.P. Ryabukho, Yu.V. Norov // *Computer Optics*. – 2007. – V. 31, N 2. – P. 26-33. – ISSN 0134-2452. – (in Russian).
7. **Gorbatenko, B.B.** Reconstructing an Object Image Using the Laser Speckle Pattern of the Diffraction Field / B.B. Gorbatenko, V.P. Ryabukho, L.A. Maksimova // *Technical Physics Letters*. – 2004. – V. 30, N 9. – P. 741-744. – ISSN 1063-7850. – (In Russian).
8. **Gorbatenko, B.B.** Reconstructing of spatial phase distributions and object images from speckle intensity patterns of the diffraction field / B.B. Gorbatenko, V.P. Ryabukho, L.A. Maksimova // *Optics and Spectroscopy*. – 2006. – V. 101, N 5. – P. 811-815. – ISSN 0030-400X. – (In Russian).
9. **Gorbatenko, B.B.** Reconstruction of the Hologram Structure from a Digitally Recorded Fourier Specklegram / B.B. Gorbatenko, L.A. Maksimova, V.P. Ryabukho // *Optics and Spectroscopy*. – 2009. – V. 106, N 2. – P. 281-287. – ISSN 0030-400X. – (In Russian).
10. **Hamed, M.** Numerical Speckle Images Formed by Diffusers Using Modulated Conical and Linear Apertures / M. Hamed // *Journal of Modern Optics*. – 2009. – V. 56, N 10. – P. 1174-1181.
11. **Shcherba, E.V.** Application analysis of interpolation and extrapolation methods as used for image restoration / E.V. Shcherba // *Computer Optics*. – 2009. – V. 33, N 3. – P. 336-339. – (In Russian).
12. **Nagashima, K.** Improvement of Images Generated Reconstructed from Computer-Hologram Using an Iterative Method / K. Nagashima // *Optics & Laser Technology*. – 1986. – V. 18, N 3. – P. 157-162.
13. **Takanori, N.** Image Quality Improvement of Digital Holography by Superposition of Reconstructed Images Obtained by Multiple Wave-lengths / N. Takanori, O. Mitsukiyo // *Applied Optics*. – 2008. – V. 47, N 19. – P. D38-D43.
14. **McBride, W.** Phase imaging with a half-plane aperture / W. McBride, L.J. Allen // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2004 – V. 21. – P. 1172-1178.
15. **Rondeau, X.** Phase retrieval from speckle images / X. Rondeau, E. Thiébaud, M. Tallon, R. Foy // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2007 – V. 24. – P. 3354-3365.
16. **Quiney, H.M.** Non-iterative solution of the phase retrieval problem using a single diffraction measurement / H.M. Quiney, G.J. Williams, K.A. Nugent // *Opt. Express*. – 2008 – V. 16. – P. 6896-6903.
17. **Goodman, J.W.** *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* / J.W. Goodman. – Englewood, CO: Roberts & Company Publishers, 2006. – 387 p.

TECHNIQUE OF IMPROVEMENT OF IMAGE RECONSTRUCTING FROM REGISTERED INTENSITY OF DIFFRACTION SPECKLE-FIELDS

B.B. Gorbatenko¹, L.A. Maksimova², N.Yu. Mysina³, V.P. Ryabukho^{2,3}

¹ *Saratov State Technical University,*

² *Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences,*

³ *Saratov State University*

Abstract

Technique of improvement of image of scattering object reconstructing with artificial Fourier-hologram is proposed and experimentally implemented. Artificial Fourier-hologram is created by applying on specklegram a system of quasi interference fringes with spatial shift at transition from one speckle to adjacent. The method is based on division of specklegram on fragments. Images from each fragments are reconstructing and then accumulating non-coherent. Image averaged on intensity is forming.

Key words: speckle-structure, specklegram, diffraction, digital Fourier-transformation; Fourier-hologram, hologram structure.

Сведения об авторах

Горбатенко Борис Борисович, 1948 года рождения. Окончил Саратовский государственный университет в 1971 году. В 1984 г. окончил спецфакультет Московского физико-технического института (МФТИ). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук в СГУ (1989) и доктора физико-математических наук в СГУ (2010). Профессор кафедры физики Саратовского государственного технического университета. Область научных интересов: голография, теория интерференции оптических полей, голографическая и спекл-интерферометрия. Опубликовал 50 научных работ. E-mail: gorbtor@pochta.ru.

Boris Borisovich Gorbatenko (b. 1948) graduated from Saratov State University (SSU) in 1971 and from Moscow Institute of Physics and Technology State University (MIPT) in 1984, received Candidate in Physics & Maths degree (1989) from MIPT and Doctor in Physics & Maths degree (2010) from SSU. He is Professor of Physics department of Saratov State Technical University. Area of interest: holography, theory of interference, holographic and speckle interference. He is author of 50 scientific papers.

Максимова Людмила Александровна, 1965 года рождения. В 1991 году окончила Саратовский государственный университет. Кандидат физико-математических наук (2007 год), работает старшим научным сотрудником в лаборатории проблем когерентно-оптических измерений в точной механике Института проблем точной механики и управления РАН. Область научных интересов: обработка цифровых изображений, интерференционные измерения. Автор и соавтор 30 научных работ.

E-mail: MaksimovaLA@yandex.ru.

Ludmila Aleksandrovna Maksimova (b. 1965) graduated from Saratov State University in 1991, received Candidate in Physics & Maths degree in 2007. Now Maksimova L.A. is senior scientist of Coherence-Domain Measurements for Precision Mechanics laboratory of Institute of Precision Mechanics and Control of RAS. Area of interests lies in the fields of digital image processing, optical interference measurements. She is author and co-author of 30 scientific papers.



Мысина Наталья Юрьевна, 1988 года рождения. В 2010 окончила Саратовский государственный университет и поступила в заочную аспирантуру. С 2011 года работает младшим научным сотрудником в СГУ. Область научных интересов: обработка цифровых изображений, когерентно-оптические измерения.

E-mail: nataliamysina@yandex.ru.

Natalya Yuryevna Mysina (b. 1988) graduated from Saratov State University in 2010 and then entered in to postgraduate course. Currently Mysina N.Yu. is postgraduate student and junior researcher of SSU. Research interests: digital image processing and coherent optical measurements.

Рябухо Владимир Петрович, 1951 года рождения. Окончил Саратовский государственный университет в 1976 году. В 1980 г. окончил спецфакультет Московского физико-технического института (МФТИ). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук в МФТИ (1985) и доктора физико-математических наук в СГУ (1996). Профессор кафедры оптики и биофотоники СГУ и заведующий лабораторией проблем когерентно-оптических измерений в точной механике Института проблем точной механики и управления РАН. Область научных интересов: голография, теория когерентности и интерференции оптических полей. Опубликовал 190 научных статей.

E-mail: ryp-optics@yandex.ru.

Vladimir Petrovich Ryabukho (b. 1951) graduated from Saratov State University (SSU) in 1976 and from Moscow Institute of Physics and Technology State University (MIPT) in 1980, received Candidate in Physics & Maths degree (1985) from MIPT and Doctor in Physics & Maths degree (1996) from SSU. He is Professor of Optics and Biophotonics department of SSU and head of Coherence-Domain Measurements for Precision Mechanics laboratory of Institute of Precision Mechanics and Control of RAS. Area of interest: holography, theory of coherence and interference. He is author of 190 scientific papers.



Поступила в редакцию 11 ноября 2011 г.