



УДК 535.417; 535.317; 778.38

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ БИНАРИЗАЦИИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ

С.Н. Корешев^a, О.В. Никаноров^a, Д.С. Смородинов^b, Нгуен Зуи Хынг^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b ООО «ИнТех Консалтинг», Москва, 115114, Российская Федерация

Адрес для переписки: smorodinov.denis@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.09.17, принята к печати 24.10.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-997-1003

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С., Нгуен Зуи Хынг. Автоматизация поиска оптимального уровня бинаризации синтезированных голограмм // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 997–1003. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-997-1003

Аннотация

Рассмотрены особенности формирования пригодных для практического использования синтезированных голограмм. Установлено, что для успешного применения на практике подходят в первую очередь бинарные голограммы. С целью выбора наиболее подходящего (оптимального) уровня бинаризации голограммы предложен критерий оценки качества изображения, восстановленного с помощью бинарной голограммы. Разработан алгоритм для поиска оптимального уровня бинаризации синтезированной голограммы. На основании проведенных экспериментов установлено, что внедрение программного модуля, использующего разработанный алгоритм, позволяет сократить время поиска оптимального уровня бинаризации голограммы.

Ключевые слова

голограмма, синтезированная голограмма, восстановление голограммы, бинаризация, пороговая обработка, автоматизация

SEARCH AUTOMATION OF BINARIZATION OPTIMUM LEVEL FOR SYNTHESIZED HOLOGRAMS

S.N. Koreshev^a, O.V. Nikanorov^a, D.S. Smorodinov^b, Nguyen Duy Hung^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Company with limited liability “Innovations, technologies and consulting” (LLC “InTechConsult”), Moscow, 115516, Russian Federation

Corresponding author: smorodinov.denis@gmail.com

Article info

Received 02.09.17, accepted 24.10.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-997-1003

Article in Russian

For citation: Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Smorodinov D.S., Nguyen Duy Hung. Search automation of binarization optimum level for synthesized holograms. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 997–1003 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-997-1003

Abstract

The paper considers the features of synthesized holograms suitable for practical use. It is established that binary holograms are the first of all suitable ones for successful application in practice. In order to select the most suitable (optimal) level of hologram binarization, we propose a criterion for estimating the quality of an image reconstructed with a binary hologram. An algorithm is developed to find the optimal level. On the basis of the conducted experiments it is established that the introduction of the developed module gives the possibility to reduce the search time of the optimal binarization level of the hologram by eleven times in comparison with manual search.

Keywords

hologram, synthesized hologram, hologram reconstruction, binarization, threshold processing, automation

Введение

Активное развитие компьютерной и цифровой техники, наблюдаемое в настоящее время, приводит к росту интереса исследователей и разработчиков оптико-электронных приборов к синтезированным

голограммам, а также к программным комплексам для работы с ними [1–4]. Среди областей применения синтезированных голограмм можно назвать пространственную фильтрацию и оценку качества поверхностей, [5] а также фотолитографию [6], где применение синтезированных голограмм представляется особенно перспективным в силу использования достаточно простых объектов, как правило, представляющих собой бинарные двумерные транспаранты.

Синтезированные голограммы отличаются от аналоговых, т.е. голограмм, записываемых традиционными методами, тем, что в процессе их синтеза фактически не требуется источников света и проекционных систем. Голограммная структура сначала рассчитывается при помощи компьютера, после чего отображается на специальном носителе. В памяти вычислительной машины синтезированная голограмма может храниться в виде двумерного массива, в ячейках которого записываются различные значения интенсивности в каждой из точек голограммы.

Другая особенность синтезированных голограмм состоит в наличии дискретной структуры, которая оказывает влияние на восстанавливаемое с помощью синтезированной голограммы изображение [7–9]. Проведенные ранее исследования позволили установить определенные требования к параметрам синтеза (периодам дискретизации объекта и голограммы, рабочей длине волны, углу падения опорной волны), а также выявить ряд эффектов [10, 11]. Так, например, установлено, что вследствие необходимости пространственного разделения порядков дифракции размер пиксела синтезированной голограммы не может составлять более $\frac{1}{4}$ от минимального размера элемента структуры исходного объекта, который, в свою очередь, не может быть менее $1,5\lambda$, где λ – рабочая длина волны излучения, используемого при записи или восстановлении голограммы. Знание этих требований позволяет оптимизировать процессы синтеза и восстановления голограмм с точки зрения затрачиваемых на эти процессы временных и вычислительных ресурсов.

Однако на сегодняшний день все еще сложно говорить о полной автоматизации процесса синтеза голограмм, пригодных для массового применения на практике. Это вызвано не только особенностями структуры самих синтезированных голограмм, но и технологиями их формирования. В частности, пригодные для практического использования голограммы обычно имеют бинарную структуру, исследованиям особенностей которой и посвящена данная работа.

Особенности бинарных синтезированных голограмм

Говоря об особенностях синтезированных голограмм, следует отметить, что синтезированная голограмма, как правило, представляет собой полутоновой транспарант, состоящий из оттенков серого цвета, чаще всего их 256, в соответствии с так называемой «серой шкалой» [12]. Однако известные на сегодняшний день лазерные генераторы изображений обеспечивают точную передачу только двух градаций высоты рельефа для случая рельефно фазовой отражательной голограммы [13]. Из этого следует, что для получения пригодной для применения на практике синтезированной голограммы следует ее бинаризовать.

Обычно полутоновая голограмма бинаризуется по верхнему порогу, в соответствии с выбранным уровнем бинаризации t от 0 до 255. В процессе бинаризации происходит последовательный перебор всех ячеек массива, в котором хранится информация о распределении интенсивности голографического поля синтезированной голограммы, и в зависимости от установленного пользователем уровня бинаризации t значение интенсивности I для каждой из точек изменяется либо на максимальное значение (255 в данном случае), если $I > t$, либо на 0, если $I < t$ (рис. 1).

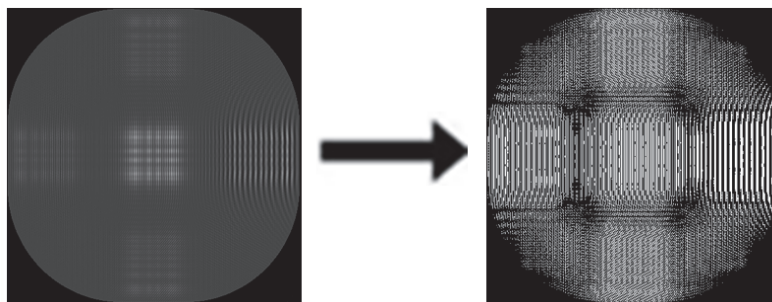


Рис. 1. Бинаризация синтезированной голограммы. 1 пиксель = 20 нм

Бинаризация, очевидно, приводит к определенным изменениям в структуре голограммы, а следовательно – и к изменениям в восстановленном изображении. Влияние фактора бинаризации голограммы на распределение интенсивности в восстановленном с ее помощью изображении было подробно рассмотрено в работе [14]. В общем случае восстановленное изображение можно считать соответствующим исходному объекту, если интенсивность всех элементов, составляющих изображение, примерно одинакова. Она не обязательно должна быть равна интенсивности соответствующих элементов, составляющих

объект, поскольку для получения полностью идентичного изображения возможно применение к восстановленному изображению пороговой обработки, но выбор уровня бинаризации не должен влиять на распределение интенсивности в восстановленном изображении.

В рамках работы [14] рассмотрено сравнение интенсивностей восстановленных изображений двух объектов – элементарной точки и прямоугольника размером $m \times n$ точек. Интенсивность изображения прямоугольника i_{mn} в этом случае будет зависеть от соотношения площадей исходного объекта S_o и участка апертуры голограммы S_{mn} , а также дифракционной эффективности данного участка η_{mn} , и может быть определена следующим образом:

$$i_{mn} = \frac{S_{mn}}{S_o} \eta_{mn}.$$

Величина интенсивности точечного изображения i_p будет определяться аналогично. Поскольку площади участков апертуры зависят от параметров записи или синтеза голограммы, общих для всей голограммы, то основными факторами, влияющими на значение интенсивности, остаются величины дифракционных интенсивностей различных участков голограммы.

Из доступной литературы известно, что дифракционная эффективность дискретной бинарной рельефно-фазовой голограммы определяется величинами высоты рельефа поверхности голограммы h , рабочей длины волны λ и скважности ее поверхности S , связанными следующим выражением [15]:

$$\eta = \frac{4}{\pi^2} \sin^2(\pi S) \cdot \sin^2\left(\frac{2}{\lambda} \pi h\right).$$

Если высота рельефа выбрана оптимальной с точки зрения достижения максимальной дифракционной эффективности и равна $\lambda/4$ [16], то приведенная формула приобретет следующий вид:

$$\eta = \frac{4}{\pi^2} \sin^2(\pi S).$$

Таким образом, если значения высоты рельефа и длины волны считать заданными, то скважность бинарной голограммы S остается единственным параметром, влияющим на значение ее дифракционной эффективности. При этом на саму скважность непосредственно влияет выбор уровня бинаризации голограммы.

Проиллюстрируем этот факт, продемонстрировав распределение интенсивности голографического поля голограммы вдоль координатной оси x двух различных объектов до ее бинаризации (рис. 2).

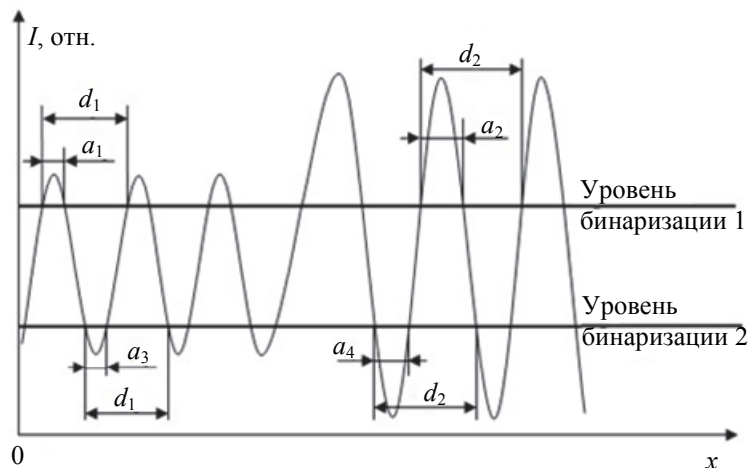


Рис. 2. Распределение интенсивности голографического поля двух объектов разной площади. Показана зависимость скважности от уровня бинаризации

Если такую голограмму бинаризовать по уровню, отмеченному на рисунке верхней чертой, то скважности двух участков апертуры полученной бинарной голограммы, S_1 и S_2 , будут равны соответственно

$$S_1 = \frac{a_1}{d_1} \quad \text{и} \quad S_2 = \frac{a_2}{d_2},$$

где d_1 и d_2 – пространственные периоды соответствующих участков голограммы; a_1, a_2, a_3, a_4 – размеры участков голограммы после бинаризации в формуле и на рис. 2.

Исходя из проведенного исследования, с учетом того, что скважность S_2 по сравнению с S_1 зависит от выбранного уровня бинаризации голограммы относительно слабо, можно сделать вывод о влиянии выбора уровня бинаризации голограммы на относительную интенсивность восстановленных с ее помощью изображений. В соответствии с этим, чтобы получить изображение, наиболее близкое по распре-

лению интенсивности к исходному тестовому объекту (рис. 3, а, б), следует подобрать оптимальный с этой точки зрения уровень бинаризации голограммы. Как видно из рис. 2, таких уровней в общем случае будет два. Выбор других уровней приводит к заметному искажению восстановленного изображения, вплоть до полного разрушения его структуры (рис. 3, в).

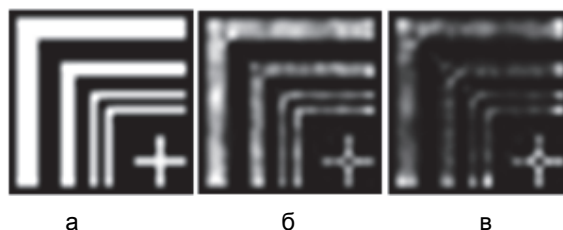


Рис. 3. Тестовый объект (а) и его восстановленное с помощью бинарной голограммы изображение (б, в).
Ширина линии креста – 1 пиксель = 80 нм

В качестве количественного критерия оценки качества восстановленного с помощью голограммы изображения хорошо подходит количество градаций при пороговой обработке полученного изображения, при котором обеспечивается необходимое соответствие восстановленного изображения и исходного объекта [16] (рис. 4).

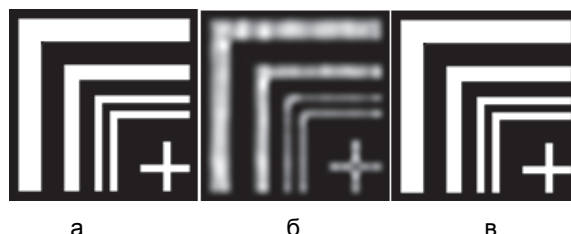


Рис. 4. Тестовый объект (а) и его изображение до (б) и после (в) пороговой обработки.
Ширина линии креста – 1 пиксель = 80 нм

Тогда оптимальным будет считаться такой уровень бинаризации голограммы, который обеспечивает максимальное количество градаций пороговой обработки, удовлетворяющих указанному выше условию. В целом зависимость качества восстановленного изображения от уровня бинаризации голограммы можно изобразить в виде графика (рис. 5).

На графике вдоль оси абсцисс отложены значения допустимых уровней бинаризации голограммы от 0 до 255, а вдоль оси ординат – найденные допустимые интервалы градаций восстановленного изображения, при которых структура восстановленного изображения в точности соответствовала структуре исходного объекта.

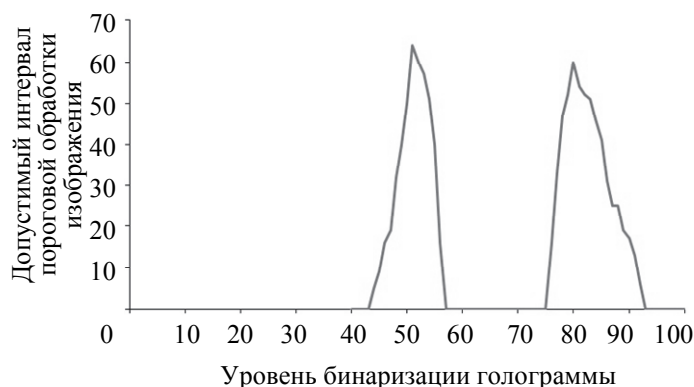


Рис. 5. Зависимость допустимого интервала пороговой обработки восстановленного изображения от уровня бинаризации голограммы

Как было сказано выше, оптимальных уровней бинаризации – всего два, причем после бинаризации голограммы по одному из них бинарная голограмма фактически представляет собой белый рисунок на черном фоне, а после бинаризации по второму оптимальному уровню – напротив, черный рисунок на белом фоне. Между ними посередине расположен особый, «пограничный» уровень бинаризации, при выборе которого количество черных и белых пикселей на бинарной голограмме примерно совпадает. В качестве примера на рис. 6 представлены голограммы одного и того же тестового объекта (рис. 3, а) – полутоновая и бинаризованные при разных уровнях: двух оптимальных – 51 и 80, и «пограничном» – 65.

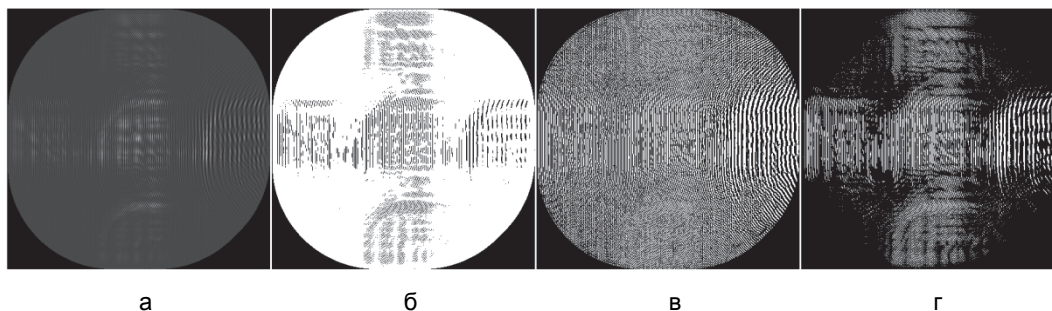


Рис. 6. Голограммы тестового объекта: полутоновая (а) и бинаризованные при различных уровнях бинаризации – 51 (б), 65 (в), 80 (г). 1 пиксель = 20 нм

Алгоритм поиска оптимального уровня бинаризации

Как уже было сказано выше, синтезированные голограммы в компьютерном виде, по сути, представляют собой двумерный массив, в ячейках которого хранятся значения интенсивности в соответствующей точке. Для бинарной голограммы это значение может быть равно 255 (белый пиксель на рисунке) либо 0 (черный пиксель). Таким образом, имея набор голограмм одного объекта, бинаризованных по всем возможным уровням, несложно путем сравнения количества черных и белых пикселей определить «пограничный» уровень бинаризации. Обозначим буквой K соотношение между количеством белых пикселей N_{255} и общим количеством пикселей, составляющих синтезированную голограмму:

$$K = \frac{N_{255}}{N_{255} + N_0}.$$

Тогда «пограничным» будет считаться такой уровень бинаризации, при котором $K \approx 0,5$.

Поскольку «пограничный» уровень расположен между двумя оптимальными, то после его определения можно начать последовательный перебор соседних уровней бинаризации. При этом происходит восстановление изображения с помощью каждой из бинарных голограмм, после чего оценивается его качество в соответствии с определенным выше критерием – величиной интервала градаций при пороговой обработке. Оценка качества при этом может производиться автоматически внутри программы обработки – путем сравнения интенсивности всех пикселей восстановленного изображения после его пороговой обработки с соответствующими пикселями исходного объекта. Изображение и объект считаются идентичными в случае, если интенсивности всех соответствующих пикселей либо совпадают, либо отличаются не более чем в заданном допустимом количестве пикселей. Последнее требование установлено в связи с необходимостью устранения чисто вычислительных ошибок, практически не влияющих на качество изображений и связанных, например, с округлением значений при расчетах.

Как видно из графика на рис. 5, в процессе поиска при последовательном переборе уровней бинаризации в любую сторону от «пограничного» первоначально допустимых градаций не наблюдается. После того, как градации появятся, по мере дальнейшего «продвижения» их количество довольно быстро увеличивается. После достижения оптимального уровня количество градаций начинает постепенно уменьшаться, пока они снова не исчезнут.

Если проверка трех соседних уровней бинаризации голограммы не выявит допустимых градаций, дальнейший поиск прекращается. Результатом поиска с использованием данного алгоритма являются два интервала уровней бинаризации, в интервале между которыми наблюдаются градации пороговой обработки. Два уровня бинаризации, при которых это количество максимально в пределах каждого из интервалов, считаются оптимальными.

Алгоритм реализован в форме программного модуля, предназначенного для работы с комплексом синтеза и восстановления голограмм-проекторов, разработанного на кафедре прикладной и компьютерной оптики Университета ИТМО [17, 18]. Ввод исходных данных в программный модуль осуществляется с помощью файла в формате JSON.

Оценка работы алгоритма

Производительность реализованного модуля была протестирована при помощи ряда экспериментов. Прежде всего следовало достоверно оценить временные затраты на ручной поиск оптимальных уровней бинаризации голограммы. В ручном режиме оператор, основываясь на собственной оценке, выбирает среди изображений, восстановленных с помощью голограмм, бинаризованных при различных уровнях, наиболее подходящие, после чего следует количественная оценка. Бинаризация и восстановление голограмм-проекторов осуществляется с помощью упомянутого выше программного комплекса, оценка качества – в графическом редакторе Adobe Photoshop при помощи инструмента обработки «Порог» (Threshold). Количество градаций подсчитывается вручную.

При этом, чтобы определить оптимальный уровень бинаризации среди всех прочих, вышеописанную операцию следует повторить как минимум два раза – поскольку для подтверждения того факта, что найденные уровни бинаризации являются оптимальными, необходимо убедиться, что выбор соседних уровней дает меньшее количество допустимых градаций. В идеальном случае, если оператор сразу находит оба оптимума, поиск занимает около 5 минут. В общем случае такой поиск в зависимости от опыта оператора требовал до 40 минут.

Если в программном комплексе синтеза и восстановления голограмм автоматизирована оценка качества изображений, то определение оптимальных уровней бинаризации возможно путем перебора всех допустимых уровней. В этом случае для каждого из уровней с помощью соответствующей голограммы будет восстановлено изображение, после чего производится оценка его качества.

Полный перебор всех допустимых уровней от 0 до 255 может требовать больше времени, чем требуется опытному оператору для поиска оптимального уровня бинаризации эмпирическим путем – до 50 минут. При этом из поиска можно исключить некоторые уровни – например, уровни, для которых отношение между количеством белых пикселей и общим количеством пикселей K равно или меньше 0,03, а также уровни, при которых K превышает 0,97. Вероятность того, что при таких соотношениях уровень окажется оптимальным, крайне мала, а исключение уровней из поиска позволяет сократить требуемое время до 25 минут.

Наконец, поиск оптимального уровня бинаризации по описанному выше алгоритму, т.е. с началом поиска относительно «пограничного» уровня и условия $0,03 \leq K \leq 0,97$, позволяет сократить время поиска до 3,8 минут.

Краткие результаты тестирования различных режимов поиска представлены в таблице. Из таблицы видно, что использование автоматического поиска с учетом наличия «пограничного» уровня позволяет сократить временные затраты относительно ручного режима поиска приблизительно в 11 раз.

Номер	Режим поиска	Время поиска, мин
1	Ручной поиск (общий случай)	до 40 мин
2	Ручной поиск (идеальный случай)	около 5 мин
3	Автоматический поиск (полный перебор)	до 50 мин
4	Автоматический поиск с учетом условия $0,03 \leq K \leq 0,97$	до 25 мин
5	Автоматический поиск относительно «пограничного» уровня и с учетом условия $0,03 \leq K \leq 0,97$	около 3,8 мин

Таблица. Результаты тестирования различных режимов поиска оптимального уровня бинаризации голограмм-проекторов

Заключение

Таким образом, в рамках работы проведен анализ особенностей формирования бинарных синтезированных голограмм. Установлен критерий оптимального уровня бинаризации, основанный на оценке качества восстановленного с помощью голограммы изображения, что позволило создать алгоритм автоматизации поиска оптимального уровня бинаризации синтезированных голограмм. Оценки скорости работы показали, что использование данного алгоритма позволяет значительно ускорить процесс поиска оптимального уровня бинаризации. Предложен один из вариантов практического применения разработанного алгоритма в качестве программного модуля для комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов.

Литература

1. Narayanamurthy C.S., Pedrini G., Osten W. Digital holographic photoelasticity // *Applied Optics*. 2017. V. 56. N 13. P. F213–F217. doi: 10.1364/AO.56.00F213
2. Zhou W., Yu Y., Duan Y., Asundi A. Phase reconstruction of live Human Embryonic Kidney 293 cells based on two off-axis holograms // *Proceedings of SPIE*. 2009. V. 7375. Art. 737502. doi: 10.1117/12.838970
3. Kim M.K. Principles and techniques of digital holographic microscopy // *SPIE Reviews*. 2010. V. 1. Art. 018005. doi: 10.1117/6.0000006
4. Кузяков Б.А., Тихонов Р.В., Шмелев В.А., Цапенко С.В., Ушаков А.В., Марков И.Ю. Повышение доступности оптической комбинированной системы связи // *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий*. 2014. № 1. С. 528–530.
5. Морозов А.М., Кононов И.В. Оптические голографические приборы. М.: Машиностроение, 1988. 128 с.
6. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.

References

1. Narayanamurthy C.S., Pedrini G., Osten W. Digital holographic photoelasticity. *Applied Optics*, 2017, vol. 56, no. 13, pp. F213–F217. doi: 10.1364/AO.56.00F213
2. Zhou W., Yu Y., Duan Y., Asundi A. Phase reconstruction of live Human Embryonic Kidney 293 cells based on two off-axis holograms. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7375, art. 737502. doi: 10.1117/12.838970
3. Kim M.K. Principles and techniques of digital holographic microscopy. *SPIE Reviews*, 2010, vol. 1, art. 018005. doi: 10.1117/6.0000006
4. Kuzyakov B.A., Tikhonov R.V., Shmelev V.A., Tsapenko S.V., Ushakov A.V., Markov I.Yu. Increase of accessibility of optical combined communication system. *Innovatsii na Osnove Informatsionnykh i Kommunikatsionnykh Tekhnologii*, 2014, no. 1, pp. 528–530. (In Russian)
5. Morozov A.M., Kononov I.V. *Optical Holographic Devices*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 128 p. (In Russian)
6. Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 416 p. (In Russian)

7. Балтийский С.А., Гуров И.П., Де Никола С., Коппола Д., Ферраро П. Современные методы цифровой голографии / В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики. Под ред. И.П. Гурова, С.А. Козлова. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 91–117.
8. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С. Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 793–801.
9. Zhang Y., Lu Q., Ge B. Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography // Optics Communications. 2004. V. 240. N 4-6. P. 261–267. doi: 10.1016/j.optcom.2004.06.040
10. Chen G.L., Lin C.Y., Kuo M.K., Chang C.C. Numerical suppression of zero-order image in digital holography // Optics Express. 2007. V. 15. N 14. P. 8851–8856. doi: 10.1364/OE.15.008851
11. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Никаноров О.В. Изображающие свойства дискретных голограмм. II. Влияние модификации структуры голограммы и высокой, превышающей частоту Найквиста, несущей пространственной частоты голограммной структуры на восстановленное изображение // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 4. С. 48–53.
12. Johnson S. Stephen Johnson on Digital Photography. O'Reilly Media, 2006. 305 p.
13. Slinger C., Cameron C., Coomber S. et al. Recent developments in computer-generated holography: Toward a practical electroshock system for interactive 3D visualisation // Proceedings of SPIE. 2004. V. 5209. P. 27–41. doi: 10.1117/12.526690
14. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Никаноров О.В., Громов А.Д. Обеспечение равной интенсивности элементов изображений бинарных объектов, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. № 2. С. 318–323. doi: 10.7868/S003040341302013X
15. Корешев С.Н. Дифракционная эффективность дискретных бинарных фазовых голограмм // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 44 (1). С. 39–42.
16. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Громов А.Д. Метод синтеза голограмм-проекторов, основанный на разбиении структуры объекта на типовые элементы и программный комплекс для его реализации // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 12. С. 30–37.
17. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Иванов Ю.А., Козулин И.А. Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов: влияние параметров синтеза на качество восстановленного изображения // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 1. С. 42–48.
18. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Громов А.Д. Модернизированный комплекс синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 12–17.
7. Baltiiskii S.A., Gurov I.P., De Nikola S., Koppola D., Ferraro P. Modern methods of digital holography. In *Problems of Coherent and Nonlinear Optics*. St. Petersburg, SPbSU ITMO Publ., 2004, pp. 91–117. (In Russian)
8. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Smorodinov D.S. Influence of the discreteness of synthetic and digital holograms on their imaging properties. *Computer Optics*, 2016, vol. 40, no. 6, pp. 793–801. doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801
9. Zhang Y., Lu Q., Ge B. Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography. *Optics Communications*, 2004, vol. 240, no. 4-6, pp. 261–267. doi: 10.1016/j.optcom.2004.06.040
10. Chen G.L., Lin C.Y., Kuo M.K., Chang C.C. Numerical suppression of zero-order image in digital holography. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 14, pp. 8851–8856. doi: 10.1364/OE.15.008851
11. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Smorodinov D.S. Imaging properties of discrete holograms. II. How structural modification of the hologram and a high spatial carrier frequency of the hologram structure that exceeds the Nyquist frequency affects the image reconstruction. *Journal of Optical Technology*, 2014, vol. 81, no. 4, pp. 204–208. doi: 10.1364/JOT.81.000204
12. Johnson S. *Stephen Johnson on Digital Photography*. O'Reilly Media, 2006, 305 p.
13. Slinger C., Cameron C., Coomber S. et al. Recent developments in computer-generated holography: Toward a practical electroshock system for interactive 3D visualization. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5209, pp. 27–41. doi: 10.1117/12.526690
14. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Nikanorov O.V., Gromov A.D. Intensity equalization for elements for binary-object images reconstructed using synthesized hologram projectors. *Optics and Spectroscopy*, 2013, vol. 114, no. 2, pp. 288–292. doi: 10.1134/S0030400X13020136
15. Koreshev S.N. Diffraction efficiency of discrete binary phase holograms. *Optics and Spectroscopy*, 1978, vol. 44, pp. 39–42. (In Russian)
16. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Gromov A.D. Method of synthesizing hologram projectors based on breaking down the structure of an object into typical elements, and a software package for implementing it. *Journal of Optical Technology*, 2012, vol. 79, no. 12, pp. 769–774.
17. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Ivanov Yu.A., Kozulin I.A. Program system for synthesis and digital reconstruction of holograms-projectors: synthesis parameters effect on image reconstruction quality. *Journal of Optical Technology*, 2010, vol. 77, no. 1, pp. 33–37.
18. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Gromov A.D. Modernized software complex for synthesis and reconstruction of Fresnel holograms-projectors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 6, pp. 12–17. (In Russian)

Авторы

Корешев Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, koreshev@list.ru

Никаноров Олег Викторович – кандидат технических наук, тьютор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, nikanorovov@gmail.com

Смородинов Денис Сергеевич – кандидат технических наук, программист, ООО «ИнТех Консалтинг», Москва, 115114, Российская Федерация, smorodinov.denis@gmail.com

Нгуен Зуи Хынг – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, duyhung121093@gmail.com

Authors

Sergey N. Koreshev – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, koreshev@list.ru

Oleg V. Nikanorov – PhD, tutor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, nikanorovov@gmail.com

Denis S. Smorodinov – PhD, programmer, Company with limited liability “Innovations, technologies and consulting” (LLC “InTechConsult”), Moscow, 115114, Russian Federation, smorodinov.denis@gmail.com

Nguyen Duy Hung – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, duyhung121093@gmail.com