

## Особенности восстановления цветных изображений протяженных объектов импульсными голограммами

© Н.Д. Ворзובה, И.В. Кривошеков, П.П. Соколов

Университет ИТМО,  
Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: vorzobova@mail.ifmo.ru

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.  
В окончательной редакции 15.05.2024 г.  
Принята к публикации 29.05.2024 г.

Рассмотрены особенности совмещения монохромных компонент цветных изображений протяженных по глубине объектов, восстанавливаемых пропускающими импульсными голограммами в монохроматическом свете, при различии условий записи голограмм и восстановления изображений. Приведены аналитические выражения, позволяющие оценивать степень совмещения по размерам и глубине и численные оценки рассогласований. Показано преимущество совмещения монохромных компонент по глубине.

**Ключевые слова:** импульсная голография, цветные голографические изображения протяженных объектов.

DOI: 10.61011/OS.2024.06.58641.6687-24

### 1. Введение

Одним из наиболее привлекательных применений голографии является получение трехмерных цветных изображений. В последние годы интенсивно развиваются цифровые технологии получения цветных изображений, основанные на расчете амплитуд и фаз восстановленного поля с последующим их воспроизведением с использованием пространственных модуляторов света на дисплее [1,2] или печати на регистрирующих материалах [3,4].

В цифровой голографии обеспечение цветовых характеристик, необходимого горизонтального и вертикального параллакса в сочетании с глубиной изображения требует большого объема вычислений. Несмотря на постоянное совершенствование вычислительных алгоритмов, существует проблема восстановления протяженных по глубине объектов [5–9]. В связи с этим актуальной представляется ориентация на аналоговые технологии, обеспечивающие возможность получения изображений протяженных объектов.

В аналоговой цветной голографии наибольшие успехи достигнуты в получении отражательных голограмм, восстанавливаемых в белом свете, с использованием лазеров непрерывного действия [10–14]. Однако использование непрерывного излучения требует стабильности условий записи и позволяет получать голограммы неподвижных объектов.

Существенное преимущество дает использование импульсных лазеров. Импульсная голография развивалась в направлении получения голограмм, восстанавливаемых в белом свете, по двухстадийной технологии [15,16], что связано с проблемами чувствительности высокопропускающих материалов к импульсному излучению. Данная технология основана на получении на первом

этапе пропускающих голограмм, а на втором этапе отражательных голограмм, восстанавливаемых в белом свете. Однако восстановление источниками белого света накладывает ограничение на глубину изображений.

Интенсивное развитие полупроводниковой техники и появление высокоинтенсивных источников излучения в широкой видимой области спектра определяет возможность получения цветных изображений с большой глубиной при их воспроизведении в монохроматическом свете пропускающими импульсными голограммами. Преимуществом записи пропускающих голограмм является возможность снижения требований к разрешающей способности и использования материалов, чувствительных к импульсному излучению.

В нашей предыдущей работе [17] были рассмотрены особенности получения изображений протяженных объектов, восстанавливаемых монохромными пропускающими импульсными голограммами, а также показана возможность снижения требований к выходной энергии импульсных лазеров. В настоящей работе мы рассмотрим особенности восстановления цветных изображений протяженных объектов импульсными голограммами.

### 2. Условия записи пропускающих цветных импульсных голограмм

Для записи пропускающих голограмм использовались однослойные материалы на основе эмульсий ВРП и НИЦ „Курчатовский институт“ с введением оптических сенсibilизаторов, обеспечивающих спектральную чувствительность в широкой видимой области спектра, а также сочетание промышленных материалов ВРП и ПФГ-01 (АО „Компания Славич“).

В качестве источников импульсного излучения использовались лазеры на рубине и неодимовом стекле

с удвоением частоты с длинами волн 693 и 530 nm, а также импульсный лазер на вынужденном комбинационном рассеянии [18] с длинами волн 678 и 530 nm, с длительностью импульсов около 10 ns и выходной энергией 0.2–1 J.

Для устранения „лишних“ изображений опорные пучки в схеме записи пространственно разделялись. Несложные вычисления, проведенные для длин волн записи 678 и 530 nm, длин волн восстановления 633, 650 nm и 530, 532 nm, углового размера объекта 40°, угла падения опорного пучка с длиной волны 678 nm 30° и угловой селективности, определяемой крайней точкой объекта, дают угол между опорными пучками 23–25°.

При записи на двух длинах волн были получены пропускающие голограммы размером 405 × 280 mm, с том числе голографические портреты [19,20].

### 3. Особенности получения цветных изображений протяженных объектов

Наибольший интерес представляет проблема совмещения монохромных компонент цветных изображений протяженных объектов при различии длин волн и геометрических параметров схем записи и восстановления. Возможные различия связаны, в частности, со стремлением уменьшения габаритов монохроматических светильников. Рассмотрим два частных случая — обеспечения равенства размеров монохромных компонент или их совмещения по глубине. Для анализа будем использовать следующие выражения [21]:

$$V = \left( 1 + \frac{z_1}{\mu z_c} - \frac{z_1}{z_r} \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$z_3 = \left( \frac{1}{z_c} + \frac{\mu}{z_1} - \frac{\mu}{z_r} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $V$  — поперечное увеличение изображения,  $z_1$  — расстояние от объекта до голограммы,  $\mu$  — отношение длин волн восстанавливающего и записывающего излучений,  $z_c$  — расстояние от восстанавливающего источника до голограммы,  $z_r$  — расстояние от опорного источника до голограммы,  $z_3$  — расстояние от изображения до голограммы.

#### 3.1. Равенство увеличений монохромных компонент цветного изображения

Рассмотрим сначала условия обеспечения равенства увеличений (размеров) монохромных компонент при размерах изображений, равных размерам объектов:

$$V_1 = V_2 = 1. \quad (3)$$

В этом случае для положений восстанавливающих источников в соответствии с выражением (1) должны

обеспечиваться следующие условия:

$$z_{c1} = \frac{z_{r1}}{\mu_1}, \quad (4)$$

$$z_{c2} = \frac{z_{r2}}{\mu_2}. \quad (5)$$

Индексы 1 и 2 соответствуют „красной“ и „зеленой“ компонентам соответственно. Рассогласование компонент по глубине определяется как:

$$\Delta z_3 = z_{31} - z_{32}. \quad (6)$$

Используя (2) и подставляя (4) и (5) в (6), находим

$$\Delta z_3 = z_1 \left( \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2} \right). \quad (7)$$

Рассмотрим теперь случай равенства увеличений при неравенстве размеров изображений размерам объекта:

$$V_1 = V_2 \neq 1. \quad (8)$$

Введем при этом упрощающее условие и будем считать, что опорные источники находятся на одинаковом расстоянии от плоскости голограммы (что обычно соответствует условиям записи):

$$z_{r1} = z_{r2} = z_r. \quad (9)$$

Используя (1), получим соотношение положений восстанавливающих источников:

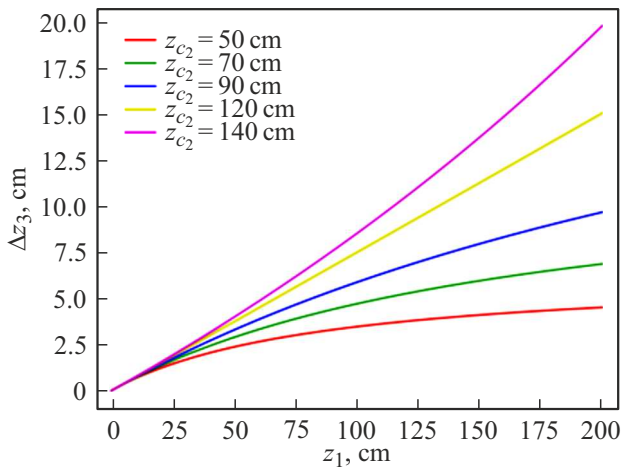
$$z_{c1} = \frac{\mu_2}{\mu_1} z_{c2}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (6), получим выражение для рассогласования по глубине:

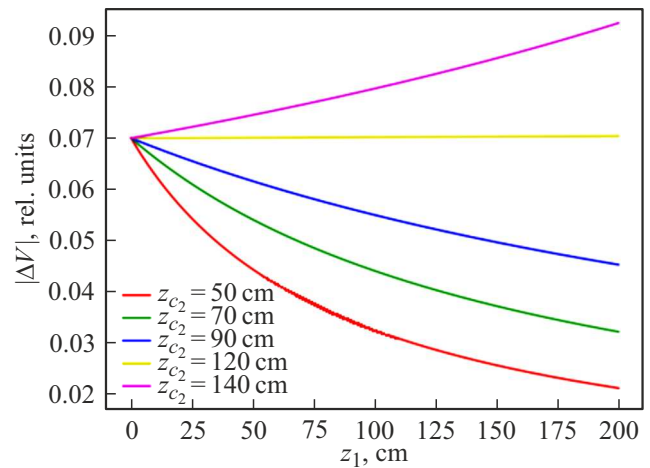
$$\Delta z_3 = \frac{z_{c2} z_1 z_r}{z_1 z_r + \mu_2 z_{c2} (z_r - z_1)} \left( \frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right). \quad (11)$$

На рис. 1 приведены графики зависимости рассогласования по глубине от протяженности объекта для различных  $z_{c2}$ . Графики построены для значений  $z_r = 120$  cm,  $\mu_1 = 633/678$ ,  $\mu_2 = 532/530$ . Можно видеть, что рассогласование монохромных составляющих по глубине увеличивается с увеличением расстояния до фрагментов протяженного объекта. Увеличение расстояния до восстанавливающих источников также приводит к росту рассогласования, при этом различия в несовпадении для ближних и дальних фрагментов уменьшаются с уменьшением расстояния до восстанавливающих источников.

Приведем численные оценки для  $z_{c2} = 50$  cm. Для ближних фрагментов ( $z_1 = 40$  cm) рассогласование компонент по глубине составляет 2 cm, а для дальних фрагментов ( $z_1 = 200$  cm) — 4.5 cm, что заметно при наблюдении изображений с типичного расстояния 50 cm от голограммы.



**Рис. 1.** Зависимости рассогласования монохромных компонент по глубине ( $\Delta z_3$ ) от расстояния до фрагментов протяженного объекта ( $z_1$ ) для различных значений  $z_{c_2}$ . Длины волн записи 678 и 530 nm, длины волн восстановления 633 и 532 nm,  $z_r = 120$  cm.



**Рис. 2.** Зависимости модуля рассогласования монохромных компонент по увеличению ( $\Delta V$ ) от расстояния до фрагментов протяженного объекта ( $z_1$ ) для различных  $z_{c_2}$ . Длины волн записи 678 и 530 nm, длины волн восстановления 633 и 532 nm,  $z_r = 120$  cm.

### 3.2. Совмещение монохромных компонент по глубине

Совмещение монохромных компонент по глубине определяется условием

$$z_{3_1} = z_{3_2}. \quad (12)$$

Так же как в разд. 3.1, при равенстве расстояний до опорных источников и использовании выражения (2) находим, что для выполнения условия (12) соотношение расстояний до восстанавливающих источников должно удовлетворять условию

$$z_{c_1} = z_{c_2} \frac{z_1}{z_1 + z_{c_2} [\mu_2 (1 - \frac{z_1}{z_r}) - \mu_1 (1 - \frac{z_1}{z_r})]}. \quad (13)$$

Рассогласование по увеличению определим как разность

$$\Delta V = V_1 - V_2. \quad (14)$$

Используя (1) и подставляя (13) в (14), получим

$$\Delta V = \frac{z_r z_{c_2} (\mu_1 - \mu_2)}{z_1 z_r - \mu_2 z_1 z_{c_2} + \mu_2 z_r z_{c_2}}. \quad (15)$$

С использованием выражения (15) построены графики зависимости модуля величины рассогласования по увеличению от протяженности объекта (рис. 2) для значений  $z_r = 120$  cm,  $\mu_1 = 633/678$ ,  $\mu_2 = 532/530$ .

Для наглядности графики приведены для модуля разности увеличений, так как значение разности (14) будет отрицательным, т.е. размер „зеленой“ компоненты всегда будет больше размера „красной“ компоненты. Приведенные зависимости показывают, что при  $z_c < z_r$  различия в увеличениях (размерах) монохромных компонент для дальних фрагментов протяженного объекта

меньше, чем для ближних фрагментов, т.е. дальние фрагменты будут лучше совмещены. При  $z_c > z_r$ , наоборот, эти различия будут больше.

Приведем численные оценки для  $z_{c_2} = 50$  cm. Для ближних фрагментов ( $z_1 = 40$  cm)  $|\Delta V| = 0.05$ , что при размерах изображений  $L_1 = 20$  cm и  $L_2 = 4$  cm соответствует различию размеров  $\Delta L_1 = 1$  cm и  $\Delta L_2 = 2$  mm. Для дальних фрагментов ( $z_1 = 200$  cm)  $|\Delta V| = 0.02$ , что для тех же размеров изображений соответствует  $\Delta L_1 = 4$  mm,  $\Delta L_2 = 0.8$  mm, т.е. различия существенно меньше, чем для ближних фрагментов.

Сравнение полученных рассогласований монохромных компонент цветных изображений по размерам при их совмещении по глубине с результатами, полученными в разделе 3.1 при равенстве размеров изображений и рассогласованием по глубине, а также их сопоставление с разрешающей способностью глаза показывает преимущество для визуального восприятия совмещения по глубине.

### 4. Результаты экспериментов

Для проведения экспериментов по совмещению монохромных компонент цветного изображения использовалась голограмма размером 405 × 280 mm, записанная на длинах волн 678 и 530 nm. Для восстановления изображений использовалось излучение с длиной волны 633 nm (гелий-неоновый лазер), 650 nm (полупроводниковый лазерный модуль) и 532 nm (лазерная указка SDL 303).

На рис. 3 приведена фотография фрагмента цветного изображения, восстановленного на длинах волн 633 и 532 nm. В восстановленном изображении обеспечено совмещение монохромных компонент по глубине. Можно видеть несовпадение по размерам (красная

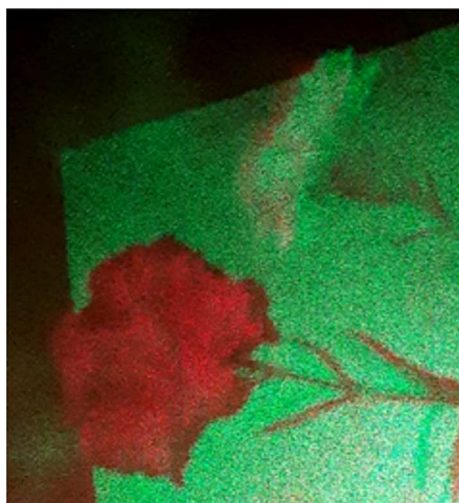


Рис. 3. Фрагмент восстановленного цветного изображения.

гвоздика) около 2 mm при большем размере „зеленой“ компоненты, что согласуется с результатами расчетов, приведенными в разд. 3.2.

Для наблюдения с расстояния 50 cm от голограммы эта величина соизмерима с разрешающей способностью глаза. Кроме того, можно видеть, что для более удаленного объекта (белая гвоздика) несовпадение по размерам меньше.

Для полного совмещения монохромных компонент необходимо, как следует из выражений (11) и (15), обеспечить условие

$$\mu_1 = \mu_2. \quad (16)$$

Выполнение условия (16) принципиально возможно с учетом широкой номенклатуры источников монохроматического излучения на основе LED и лазерных диодов. Тем не менее использованные в настоящей работе источники излучения при совмещении по глубине позволяют получить изображения цветных объектов и людей с характеристиками, достаточно хорошими для зрительного восприятия.

## 5. Заключение

Рассмотрены особенности совмещения монохромных компонент цветных изображений протяженных по глубине объектов, восстанавливаемых пропускающими голограммами, при различии условий записи голограмм и восстановления изображений. Получены аналитические выражения для двух случаев — рассогласования по глубине при обеспечении равенства размеров изображений и обеспечения совмещения по глубине при рассогласовании по размерам изображений. Даны количественные оценки рассогласований для случая записи импульсным излучением на двух длинах волн и показано преимуще-

ство совмещения по глубине. Результаты могут быть распространены и на запись на трех длинах волн.

Результаты представляют интерес для получения пропускающих голограмм при записи импульсным, а также непрерывным излучением и восстановления изображений в монохроматическом свете с использованием как аналоговых, так и аналого-цифровых технологий. Результаты могут быть также полезны при разработке компактных осветителей на базе современных монохроматических источников излучения.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] S.-F. Lin, H.-K. Cao, E.-S. Kim. *Opt. Express*, **27** (11), 15926 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.015926
- [2] H.-G. Choo, T. Kozacki, W. Zaperty, M. Chlipala, Y. Lim, J. Kim. *Appl. Opt.*, **58** (34), G96 (2019). DOI: 10.1364/AO.58.000G96
- [3] P. Gentet, M. Coffin, Y. Gentet, S.-H. Lee. *Appl. Sci.*, **13**, 12289 (2023). DOI: 10.3390/app132212289
- [4] A.F. Smyk, A.V. Shurygin, S.B. Odinov, A.N. Putilin. *J. Opt. Techn.*, **89** (3), 151 (2022). DOI: 10.1364/JOT.89.000151
- [5] Y. Zhao, J.-W. Bu, W. Liu, J.-H. Uji, Q.-H. Yang, S.-F. Lin. *Opt. Express*, **31** (2), 1641 (2023). DOI: 10.1364/OE.477666
- [6] J. Zhao, Z. Gao, S. Wang, Yu. Niu, L. Deng, Y. Sa. *Appl. Sci.*, **13**, 11430 (2023). DOI: 10.3390/app132011430
- [7] K. Matsushima, N. Sonobe. *Appl. Opt.*, **57** (1), A150 (2018). DOI: 10.1364/AO.57.00A150
- [8] P. Su, Q.-X. Gao, Z.-H. He, J.-S. Ma. *Optik*, **200**, 163044 (2020). DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163044
- [9] J. Behal, P. Memmolo, L. Miccio, V. Bianco, P. Ferraro. *Opt. Laser Techn.*, **170**, 110286 (2024). DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105590
- [10] H. Bjelkhagen, D. Brotherton-Ratcliffe. *Ultra Realistic Imaging Advanced Techniques in Analogue and Digital Colour Holography* (Taylor & Francis Group, London, N.Y., 2013).
- [11] V. Martín, Ju. Marín-Saez, M. Gomez-Climente, D. Chemisana, M.-V. Collados, J. Atencia. *Opt. Laser Techn.*, **143**, 107303 (2021). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107303
- [12] H.I. Bjelkhagen, E. Mirlis. *Appl. Opt.*, **47** (4), A123 (2008). DOI: 10.1364/ao.47.00a123
- [13] P. Gentet, Y. Gentet, P.H. Choi, S.H. Lee. *Open Physics*, **17** (1), 449 (2019). DOI: 10.1515/phys-2019-0046
- [14] В.В. Шелковников, Д.И. Деревянко, Е.Ф. Пен. *Опт. и спектр.*, **130** (10), 1559 (2022). DOI: 10.21883/os.2022.10.53626.3795-22
- [15] Е.Ф. Артемьев, В.Г. Беспалов, В.З. Брыскин, Н.Д. Ворзобова, М.М. Ермолаев, Д.И. Стаселько. В сб.: *Оптическая голография. Практические применения* (Наука, Л., 1985), с. 107.
- [16] Н.Д. Ворзобова. В сб.: *Голография: фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии. Материалы XXVI школы по когерентной оптике и голографии* (Папирус, Иркутск, 2008), с. 175.

- [17] N.D. Vorzobova., P.P. Sokolov. *Opt. Spectrosc.*, **129** (3), 309 (2021). DOI: 10.21883/OS.2021.03.50658.251-20
- [18] V.G. Bespalov, V.N. Krylov, V.N. Mikhailov, V.A. Parfenov, D.I. Staselko. *Opt. Spectrosc.*, **70** (2), 193 (1991).
- [19] N.D. Vorzobova, R.V. Ryabova. In: *Proceedings of 10th International Symposium on Display Holography*, 2015, p. 146.
- [20] N.D. Vorzobova, V.N. Sizov, R.V. Rjabova. In: *Three-Dimensional Holography: Science, Culture, Education*, 1991, vol. 1238, p. 462. DOI: 10.1117/12.19387
- [21] Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. *Оптическая голография*. Пер. с англ. под ред. Ю.И. Островского (Мир, М., 1973), с. 88. [R.I. Collier, C.B. Burckhart. L.H. Lin. *Optical Holography* (Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey; Academic Press, New York and London, 1971), 605 p.