04

Особенности цветовоспроизведения в изображениях, восстанавливаемых импульсными голограммами

© Н.Д. Ворзобова, П.П. Соколов, И.В. Кривощеков

Университет ИТМО,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: vorzobova@mail.ifmo.ru

Поступила в редакцию 20.01.2025 г.
В окончательной редакции 20.01.2025 г.
Принята к публикации 27.01.2025 г.

Проведена оценка цветовых характеристик изображений, восстанавливаемых пропускающими импульсными голограммами в монохроматическом свете при изменении длин волн и отношения интенсивностей восстанавливающего излучения. Использован метод расчета координат цветности с учетом отражательной способности цветных объектов, результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными результатами. Определены условия получения качества цветных изображений, удовлетворяющего требованиям практических задач.

Ключевые слова: импульсная голография, цветные голографические изображения, цветовоспроизведение.

DOI: 10.61011/OS.2025.02.59968.7551-24

Введение

Голографические методы, как наиболее перспективные для решения задач трехмерной визуализации и получения объемных цветных изображений, находят применение в технологиях цифровой и аналоговой голографии. Методы цифровой голографии основаны на расчете амплитуд и фаз волнового поля и их воспроизведении на дисплее с использованием пространственных модуляторов света [1–3], а также оптической печати на светочувствительных материалах [4–6]. Несмотря на ряд преимуществ, цифровые технологии сталкиваются с множеством проблем, связанных с обеспечением одновременно необходимого параллакса, глубины изображения и цветопередачи, требующих сложных вычислительных алгоритмов [7–9], и больших вычислительных мощностей. Кроме того, имеются проблемы, связанные с характеристиками технических устройств, в частности пространственных модуляторов света, а также достижения характеристик изображений, отображающих свойства реальных объектов [10–12]. Эти проблемы исключаются в аналоговых методах.

В аналоговой цветной голографии наибольшие успехи достигнуты с использованием лазеров непрерывного действия при записи на различных материалах [13–17]. На галогенсеребряных материалах получены отражательные голограммы, восстанавливающие „ультрареалистичные“ цветные изображения в белом свете [13,14]. Однако запись непрерывным излучением не позволяет регистрировать нестационарные объекты, а восстановление источниками белого цвета не обеспечивает большую протяженность изображений по глубине.

Преимущества для регистрации нестационарных и протяженных объектов дают применение импульсных лазеров и запись пропускающих голограмм. Пропускающие импульсные голограммы используются для реализации двухстадийного метода [18] получения отражательных копий, восстанавливаемых в белом свете. Однако технологии получения пропускающих импульсных голограмм [19–21] представляют самостоятельный интерес. Запись пропускающих голограмм за счет снижения требований к разрешающей способности регистрирующих сред позволяет использовать материалы с высокой чувствительностью к импульсному излучению, а при восстановлении современными монохроматическими источниками излучения получать изображения с большой протяженностью по глубине. В предыдущих работах [22,23] были рассмотрены особенности получения изображений протяженных объектов, восстанавливаемых монохромными и цветными пропускающими голограммами. В настоящей работе рассмотрим особенности цветовоспроизведения в восстановленных изображениях.

Применительно к импульсной записи обеспечение необходимого для полной цветопередачи числа длин волн записывающего излучения сопряжено с проблемами получения высоких энергетических параметров и когерентности лазерного излучения на различных длинах волн [24], увеличивающими стоимость импульсных лазеров. Тем не менее запись на двух длинах волн существенно улучшает зрительное восприятие изображений по сравнению с монохромными изображениями. Рассмотрим особенности цветовоспроизведения при записи на двух длинах волн.

1. Теоретические результаты

Для оценки цветовых характеристик использовался метод расчета координат цветности в восстановленных изображениях с учетом отражательной способности

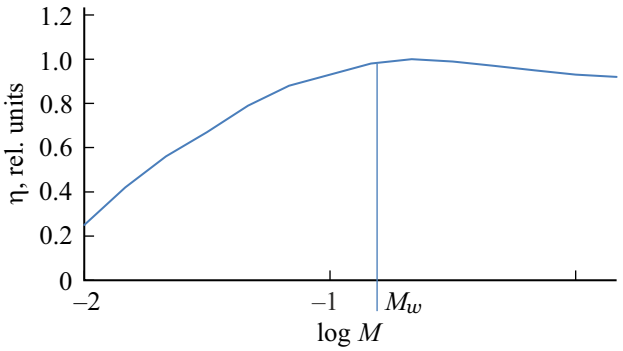


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности от отношения интенсивностей объектного и опорного пучков.

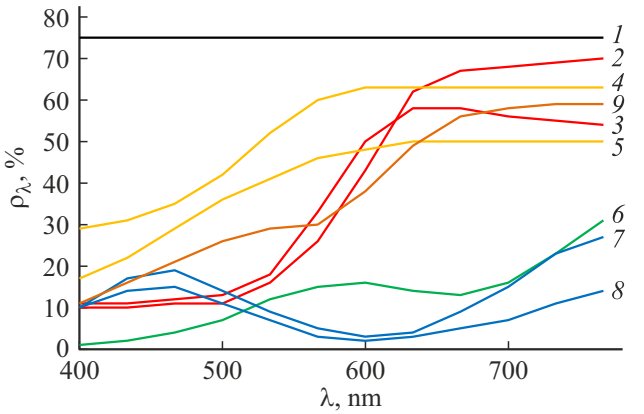


Рис. 2. Спектры отражения цветных объектов. Цвет объектов: *1* — белый (бумага), *2, 3* — красный (бумага, ткань), *4, 5* — желтый (бумага, цветок), *6* — зеленый (лист), *7, 8* — синий (цветок, пластик), *9* — кожа человека.

цветных объектов. Координаты цветности в соответствии с правилом сложения двух цветов [25] определяются выражением

$$\frac{X_2 - X_c}{X_c - X_1} = \frac{Y_c - Y_2}{Y_1 - Y_c} = \frac{I_1}{I_2}, \qquad (1)$$

где X_c, Y_c — координаты цветности восстановленного изображения, X_1, X_2, Y_1, Y_2 — координаты цветности восстанавливающего излучения, I_1, I_2 — интенсивности дифрагированных пучков.

Отношение интенсивностей дифрагированных пучков можно выразить через интенсивности восстанавливающих пучков и дифракционную эффективность монохромных компонент цветных изображений как:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_{r1}\eta_1}{I_{r2}\eta_2}, \qquad (2)$$

где I_{r1}, I_{r2} — интенсивности восстанавливающих пучков, η_1, η_2 — дифракционные эффективности монохромных компонент цветных изображений.

Для определения значений η_1 и η_2 использовалась экспериментальная зависимость дифракционной эффективности от отношения интенсивностей объектного и опорного пучков (рис. 1).

Отношение интенсивностей объектного и опорного пучков для объектов с заданным цветовым тоном определялось соотношением

$$M = M_w \frac{\rho_\lambda}{\rho_w}, \qquad (3)$$

где M_w — оптимальное отношение интенсивностей объектного и опорного пучков для белого объекта, ρ_w, ρ_λ — спектральные коэффициенты отражения для белого объекта и объекта с заданным цветовым тоном.

На рис. 2 приведены кривые спектральных коэффициентов отражения различных цветных объектов, полученные на спектрофотометре СФ18.

С использованием найденных значений дифракционной эффективности для цветных объектов, определяемых их отражательной способностью для каждой

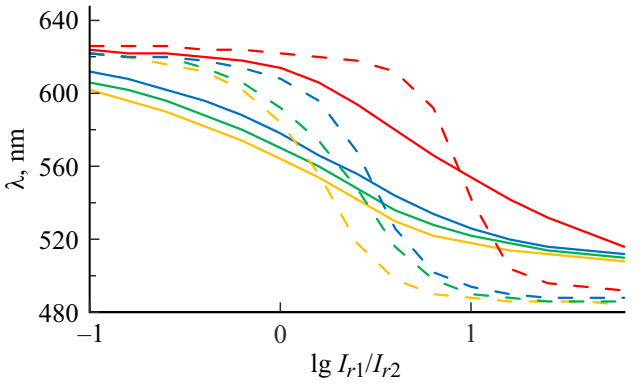


Рис. 3. Зависимость цветовых тонов изображений цветных объектов, восстановленных на длинах волн 633 и 514 nm (сплошные кривые) и 633 и 496 nm (штриховые линии), от отношения интенсивностей восстанавливающих пучков.

из двух длин волн записи, а также соотношений (1) и (2), рассчитывались координаты цветности в восстановленном изображении для заданных отношений интенсивностей восстанавливающих пучков. Цветовые тона восстановленных изображений определялись пересечением прямой, соединяющей точку белого цвета и точку, соответствующую рассчитанным координатам цветности, с линией локуса на цветовой диаграмме. Расчет проводился для длин волн записи 678 и 530 nm. Для восстановления рассмотрены пары линий в красной и зеленой областях спектра (633 и 514 nm), а также красной и голубой областях (633 и 496 nm). Выбор данных длин волн связан с условиями последующей экспериментальной проверки.

На рис. 3 приведены зависимости цветовых тонов восстановленных изображений различных цветных объектов (с цветовыми тонами 600, 575, 555 и 460 nm) от отношений интенсивностей восстанавливающих пучков.

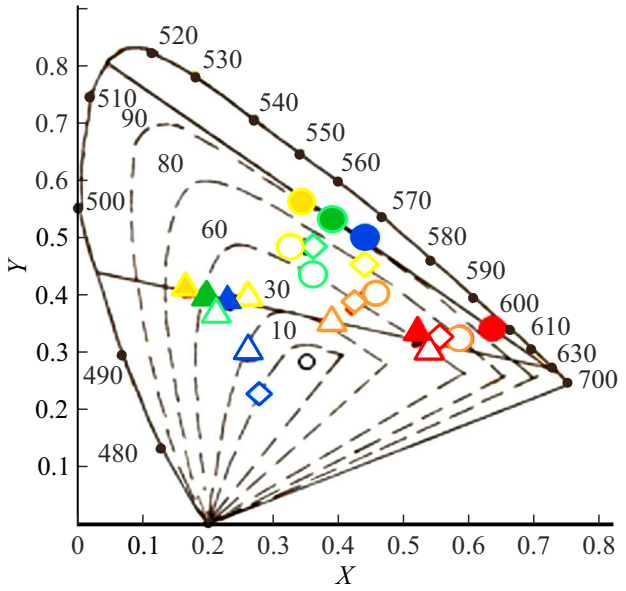


Рис. 4. Цветовые характеристики объектов и их изображений. Длины волн восстановления: (◯) — 633 и 514 nm, (△) — 633 и 496 nm, (◇) — характеристики объектов. Результаты расчетов показаны точками с заливкой, экспериментальные результаты — точками без заливки.

Приведенные зависимости позволяют проследить изменение цветовых тонов в восстановленных изображениях при изменении условий восстановления. Можно видеть, что наиболее устойчивым является красный цвет, который воспроизводится в широком диапазоне соотношений интенсивностей восстанавливающих пучков, особенно для длин волн 633 и 496 nm. Для пары длин волн в красной и зеленой областях (633 и 514 nm) характерно более плавное изменение цветовых тонов при изменении отношения интенсивностей. Передача цветовых оттенков обеспечивается в широком диапазоне отношений интенсивностей восстанавливающих пучков. Для другой пары линий в красной и синей областях (633 и 496 nm) передача тоновых градаций может обеспечиться в узком диапазоне отношений интенсивностей восстанавливающего излучения и зависит от заданной установки красного цветового тона. При установке красного цветового тона около 600 nm другие тона сдвигаются в синюю область.

2. Результаты экспериментов

При проведении экспериментов использовались пропускающие голограммы, записанные импульсным излучением с длительностью импульса 10–30 ns и длинами волн 678 и 530 nm — голографические портреты, голограммы цветов и других нестационарных цветных объектов. Для записи голограмм размером 30 × 40 cm использовался однослойный материал на основе эмульсии ВРП с введением оптических сенсибилизаторов, обеспечивающих спектральную чувствительность одновременно к излучению зеленой и красной областей спектра. Материал обеспечивал также равенство максимальных значений дифракционной эффективности в одинаковых диапазонах экспозиций. Изображения восстанавливались излучением гелий неонового лазера с длиной волны 633 nm и аргонового лазера с длинами волн 514 и 496 nm. Цветовые характеристики объектов и восстановленных изображений определялись по цветовым таблицам [26]. Результаты расчетов и экспериментальные результаты нанесены на цветовую диаграмму, представленную на рис. 4.

Можно видеть хорошее совпадение по цветовым тонам расчетных и экспериментальных данных. При восстановлении изображений излучением с длинами волн 633 и 514 nm цветовые тона „красных“ и „зеленых“ объектов передаются с точностью до 5 nm, а „желтых“ объектов около 20 nm. При восстановлении на длинах волн 633 и 496 nm хорошо воспроизводится красный цвет, однако другие тона сдвигаются в коротковолновую область. При этом чистота цвета меньше по сравнению с восстановлением на длинах волн 633 и 514 nm. Важно отметить достаточно хорошую передачу цвета лица человека, а также его деталей и оттенков. Цвет близок к естественному цвету и возможна его корректировка. С точки зрения зрительного восприятия предпочтительным является восстановление в красном и зеленом свете вследствие преобладания сочетания данных цветов в объектах изобразительной техники. Следует заметить, что использованные для восстановления длины волн доступны в современных источниках монохроматического излучения на основе LED и лазерных диодов.

На рис. 5 приведено изображение, восстановленное пропускающей голограммой, записанной импульсным излучением на двух длинах волн. Можно видеть доста-



Рис. 5. Пример изображения, восстановленного пропускающей голограммой.

точно хорошее отображение красного и белого цвета, оттенков зеленого цвета, цвета кожи.

Заключение

Результаты теоретических оценок и экспериментов показали, что для импульсных голограмм, записанных на двух длинах волн, обеспечивается достаточно хорошее качество цветных изображений, существенно превосходящее качество, достигаемое при монохромной записи. Обеспечивается передача основных цветов, характерных для объектов, используемых в изобразительной голографии. При этом исключается необходимость использования для записи дорогостоящих многоцветных импульсных лазеров. Воспроизведение изображений протяженных объектов возможно с применением современных дешевых источников монохроматического излучения. Запись цветных пропускающих голограмм в сочетании с восстановлением в монохроматическом свете представляет самостоятельный интерес для получения изображений протяженных объектов, кроме того, голограммы могут использоваться для последующего копирования с применением техники получения цветных отражательных голограмм непрерывным излучением.

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] D. Pi, J. Liu, Y. Wang. Light Sci. Appl. **11**, 231 (2022). DOI: 10.1038/s41377-022-00916-3

[3] Y. Takaki. Appl. Sci., **12**, 6495 (2022). DOI: 10.3390/app12136495

[4] A.F. Smyk, A.V. Shurygin, S.B. Odinokov, A.N. Putilin. J. Opt. Techn., **89** (3), 151 (2022). DOI: 10.1364/JOT.89.000151

[5] P. Gentet, M. Coffin, Y. Gentet, S.-H. Lee. Appl. Sci., **13**, 12289 (2023). DOI: 10.3390/app132212289

[6] A. Khuderchuluun, M.-U. Erdenebat, E. Dashdavaa, K.-C. Kwon, S.-H. Jeon, H. Kang, N. Kim. Opt. Laser Techn., **181**, 111966 (2025). DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111966

[7] P. Su, Q-X Gao, Z.-H He, J.-S. Ma. Optik, **200**, 163044 (2020). DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163044

[8] Y. Zhao, J.-W. Bu, W. Liu, J.-H.Uiji, Q.-H. Yang, S.-F. Lin. Opt. Express, **31** (2), 1641 (2023). DOI: 10.1364/OE.477666

[9] J. Zhao, Z. Gao, S. Wang, Yu. Niu, L. Deng, Y. Sa. Appl. Sci., **13**, 11430 (2023). DOI: 10.3390/app132011430

[10] Y.-L. Piao, M.-U. Erdenebat, Y. Zhao, K-C. Kwon, M.-L. Piao, H. Kang, N. Kim. Appl. Opt., **59** (17), 5179 (2020). DOI: 10.1364/AO.387377

[11] B. Lee, D. Kim, S. Lee, C. Chen, B. Lee. Sci. Reports., **12**, 2811 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-06405-2

[12] C.-J. Lee, H. Nishi, K. Matsushima. Opt. Express, **32** (10) 17012 (2024). DOI: 10.1364/OE.521431

[13] H. Bjelkhagen, D. Brotherton-Ratcliffe. *Ultra Realistic Imaging Advanced Techniques in Analogue and Digital Colour Holography* (Taylor & Francis Group, London, N.Y., 2013).

[14] P. Gentet, Y. Gentet, P.H. Choi, S.H. Lee. Open Physics, **17** (1), 449 (2019). DOI: 10.1515/phys-2019-0046

[15] V. Martın, J. Marın-Saez, M. Gomez-Climente, D. Chemisana, M.-V. Collados, J. Atencia. Opt. Laser Techn., **143**, 107303 (2021). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107303

[16] 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

[17] M. Yamaguchi, H. Saito, S. Ikezawa, K. Iwami. Nanophotonics, **13** (8), 1425 (2024). DOI: 10.1515/nanoph-2023-0756

[18] 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.

[19] N.D. Vorzobova, V.N. Sizov, R.V. Rjabova. Proc. SPIE, **1238**, 462 (1991). DOI: 10.1117/12.19387

[20] 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.

[21] N.D. Vorzobova, R.V. Ryabova. In: *Proceedings of 10th International Symposium on Display Holography* (ITMO University, St. Petersburg, 2015), p. 146.

[22] N.D. Vorzobova., P.P. Sokolov. Opt. Spectrosc., **129** (3), 309 (2021). DOI: 10.21883/OS.2021.03.50658.251-20

[23] Н.Д. Ворзобова, И.В. Кривощеков, П.П. Соколов. Опт. и спектр., **132** (6), 643 (2024). DOI: 10.61011/OS.2024.06.58641.6687-24

[24] V.G. Bespalov, V.N. Krylov, V.N. Mikhailov, V.A. Parfenov, D.I. Staselko. Opt. Spectrosc., **70** (2), 193 (1991).

[25] М.М. Гуревич. *Цвет и его измерение* (Издательство Академии Наук, М.-Л., 1950).

[26] Е.Б. Рабкин. *Атлас цветов* (Медгиз, М.,1956).