

## 63. Безлинзовое оптическое кодирование изображений в пространственно-некогерентном свете

*В. В. Краснов, И. П. Рябцев, А. В. Шифрина*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Предложена и экспериментально реализована компактная безлинзовая схема оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением на базе двух жидкокристаллических модуляторов света. Кодированный фазовый дифракционный оптический элемент спроектирован так чтобы формировать желаемое световое распределение в плоскости фотосенсора при освещении его сферически-расходящейся волной, выполняя одновременно функции фокусирующего и кодирующего элементов. Результаты оптических экспериментов демонстрируют высокое отношение сигнал/шум в декодированных изображениях.

*Ключевые слова:* Оптическое кодирование, Пространственно-некогерентное освещение, Дифракционные оптические элементы, Безлинзовая схема.

*Цитирование:* Краснов, В. В. Безлинзовое оптическое кодирование изображений в пространственно-некогерентном свете / В. В. Краснов, И. П. Рябцев, А. В. Шифрина // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 352–355.

### Введение

Оптическое кодирование является активно развивающейся областью науки. Большинство оптических схем кодирования использует широко распространенную 4F архитектуру [1–6]. Существенным недостатком этой архитектуры является формирование сфокусированного нежелательного нулевого дифракционного порядка. Это приводит к необходимости пространственного разделения порядков дифракции не только в случае использования амплитудных дифракционных оптических элементов (ДОЭ), но и фазовых, так как наличие флуктуаций фазы [7] и нелинейность отклика фазовых пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) приводит к формированию нулевого порядка дифракции и в этом случае.

Для решения этой проблемы, предлагается новая безлинзовая схема оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. Ключевым компонентом предложенной схемы является специально разработанный ДОЭ, выполняющий две функции: формирование кодирующей функции рассеяния точки (ФРТ) и фокусировка. В случае точечного источника во входной плоскости, ДОЭ формирует требуемое световое распределение в плоскости фотосенсора. В случае наличия изображения во входной плоскости, происходит формирование оптической свертки этого изображения с ФРТ ДОЭ. ДОЭ синтезировался с помощью модифицированного метода Герчберга — Сэкстона [8]. Отличие от стандартного метода заключается в замене плоского входного волнового фронта расходящимся сферическим. Это

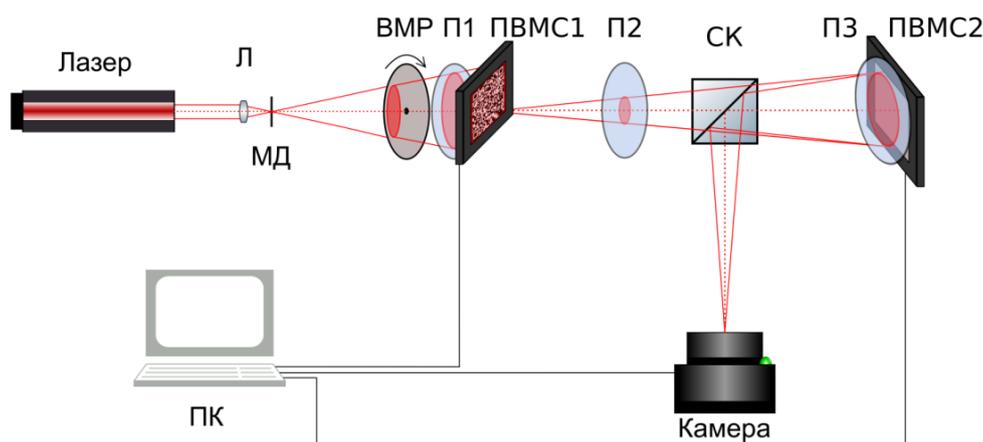


Рис. 1. Схема экспериментальной установки безлинзового оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением

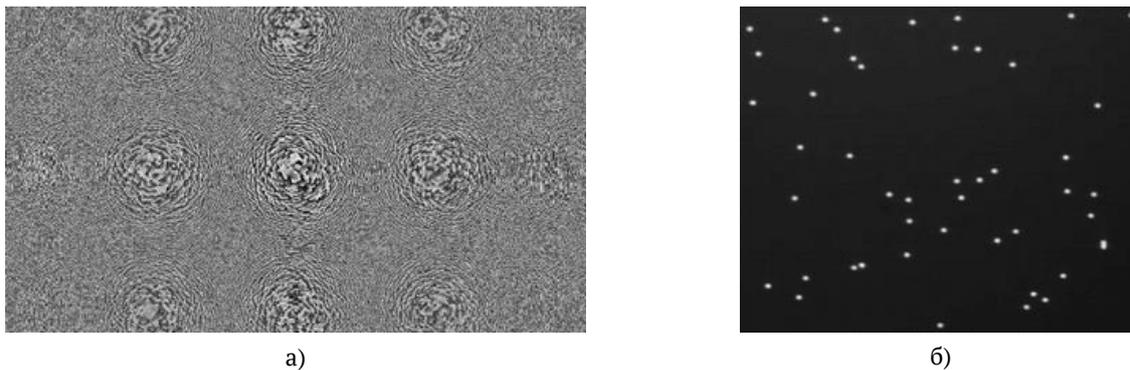
обеспечивает необходимую сходимости излучения для создания схемы кодирования обладающей низкими потерями светового излучения без использования дополнительной фокусирующей оптики.

### 1. Безлинзовая схема оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением и результаты эксперимента

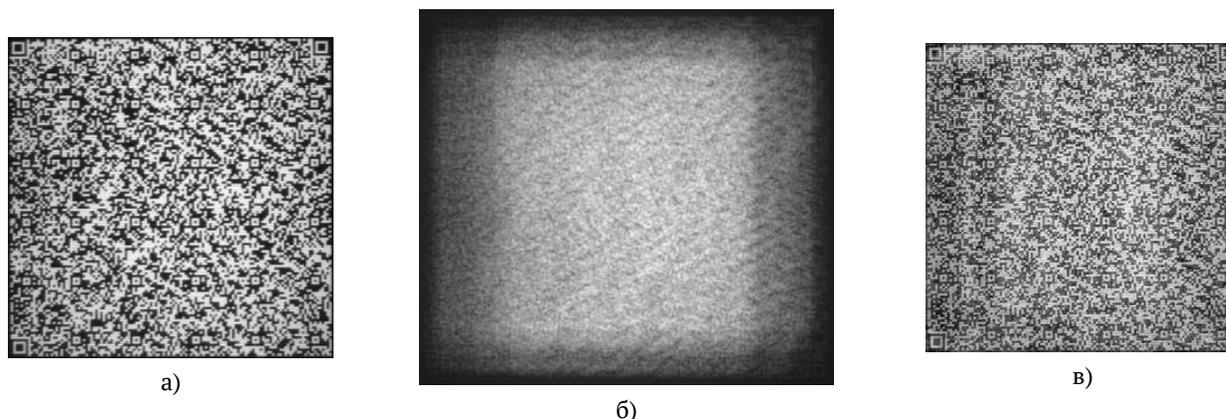
Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Комбинация линзы и микродиафрагмы формирует расходящуюся сферическую волну. Амплитудный ЖК ПВМС HoloEye LC2002 (ПВМС1) использовался для ввода информации. Вращающийся матовый рассеиватель разрушает пространственную когерентность в плоскости SLM1 для подавления спекл-шума. Поляризаторы необходимы для правильной работы модуляторов света. Фазовый ЖК ПВМС HoloEye PLUTO VIS (ПВМС2) использовался для отображения кодирующего ДОЭ. Светоделительный куб расположен так, чтобы в плоскости фотосенсора камеры формировалась оптическая свертка изображения ПВМС1 и ФРТ кодирующего ДОЭ.

Синтезированный кодирующий ДОЭ размером  $1920 \times 1080$  отсчетов с 64 градациями фазы представлен на рисунке 2а. Для регистрации его ФРТ на ПВМС1 выводилась единственная белая точка на черном фоне. Результат съемки представлен на рисунке 2б. Это изображение использовалось далее в качестве ключа для декодирования кодированных изображений.

Пример кодирования на реализованной установке продемонстрирован на рисунке 3. Исходное изображение QR-кода размером  $129 \times 129$  отсчетов (рисунок 3а) сворачивается с ФРТ ДОЭ (рисунок 2б), формируя кодированное изображение (рисунок 3б). Декодирование проводилось численно с использованием инверсной фильтрации с регуляризацией Тихонова [9]. Результат декодирования представлен на рисунке 3в. Нормированное среднеквадратическое отклонение декодированного изображения от исходного составило 0,23.



а) б)  
 Черный соответствует нулевому фазовому сдвигу, белый —  $2\pi$   
 Рис. 2. Кодированный ДОЭ (а) и его ФРТ (б)



а) б) в)  
 Рис. 3. Исходное изображение — QR-код (а), оптически кодированное изображение (б) и численно декодированное изображение (в)

### Заключение

Предложена и экспериментально реализована компактная безлинзовая схема оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. Проведены оптические эксперименты, продемонстрировано высокое качество декодирования. Ошибка декодирования в проведенных экспериментах не превышала значения 0,23.

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 19-19-00498.

### Список источников

- [1] **Rajput, S. K.** Optical double image security using random phase fractional Fourier domain encoding and phase-retrieval algorithm / S. K. Rajput and N. K. Nishchal // *Opt. Commun.* — 2017. — Vol. 388. — P. 38–46.
- [2] **Cheremkhin, P. A.** QR code optical encryption using spatially incoherent illumination / P. A. Cheremkhin, V. V. Krasnov, V. G. Rodin and R. S. Starikov // *Laser Phys. Lett.* — 2017. — Vol. 14. — P. 026202.

- [3] **Javidi, B.** Roadmap on optical security / B. Javidi, A. Carnicer, M. Yamaguchi, T. Nomura, E. Pérez-Cabré, M. S. Millán, N. K. Nishchal, R. Torroba, J. F. Barrera, W. He, X. Peng, A. Stern, Y. Rivenson, A. Alfalou, C. Brosseau, C. Guo, J. T. Sheridan, G. Situ, M. Naruse, T. Matsumoto, I. Juvells, E. Tajahuerce, J. Lancis, W. Chen, X. Chen, P. W. H. Pinkse, A. P. Mosk and A. Markman // *J. Opt.* — 2016. — Vol. 18. — P. 083001.
- [4] **Wang, Z.** Single-intensity-recording optical encryption technique based on phase retrieval algorithm and QR code / Z. Wang, S. Zhang, H. Liu and Y. Qin // *Opt. Commun.* — 2014. — Vol. 332. — P. 36–41.
- [5] **Barrera, J. F.** Optical encryption and QR codes: secure and noise-free information retrieval / J. F. Barrera, A. Mira, R. Torroba // *Optics express.* — 2013. — Vol. 5. — № 21. — P. 5373–8.
- [6] **Refregier, P.** Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding / P. Refregier and B. Javidi // *Opt. Lett.* — 1995. — Vol. 20. — P. 767–9.
- [7] **Cheremkhin, P. A.** Reduction of phase temporal fluctuations caused by digital voltage addressing in LC SLM “HoloEye PLUTO VIS” for holographic applications / Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V., Rodin V. G. and Starikov S. N. // *Proc. of SPIE.* — 2014. — Vol. 9006. — P. 900615.
- [8] **Gerchberg, R. W.** A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Pictures / Gerchberg R. W. and Saxton W. O. // *Optik.* — 1969. — Vol. 2. — P. 237–46.
- [9] **Arsenin, V.** Solutions of Ill-Posed Problems / V. Arsenin, A. Tikhonov. — New-York: Winston, 1977.