

## СХЕМА ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ СМЕНЫ КОДИРУЮЩЕГО КЛЮЧА

© 2015 А.П. Бондарева, В.В. Краснов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Поступила в редакцию 05.02.2015

Предложена схема оптического кодирования изображений с пространственно-некогерентным освещением с возможностью динамической смены кодирующего ключа. В предложенной схеме в качестве динамически сменяемых кодирующих элементов используются киноформы, которые выводятся на жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света, что позволяет кодировать изображения в процессе регистрации со скоростью в десятки изображений в секунду. Приведены результаты оптического кодирования и численного декодирования кодированных изображений.

*Ключевые слова:* оптическое кодирование изображений, оптическая свертка, пространственно-некогерентное излучение, пространственно-временной модулятор света.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Оптическое кодирование изображений — процесс кодирования, реализуемый при помощи оптических систем, в котором происходит оптическая свертка кодируемого изображения и функции рассеяния точки системы, которая является кодирующим ключом. Оптическое кодирование информации имеет преимущества перед цифровым, так как выполняемые процессы не сопровождаются побочными сигналами в радиодиапазоне, нет влияния помех, процесс кодирования закрыт и безопасен. Кроме того, использование оптических систем позволяет добиться высокого быстродействия при кодировании.

Как правило, для оптического кодирования в качестве кодирующих элементов используют дифракционные оптические элементы (ДОЭ). В результате прохождения излучения через кодирующий ДОЭ осуществляется свертка изображения объекта, формируемого в плоскости фотосенсора, с импульсным откликом ДОЭ.

Динамическую смену кодирующего ключа можно реализовать посредством использования пространственно-временных модуляторов света (ПВМС). Развитие технологий производства и роста количества пикселей ПВМС привело к активному развитию методов оптического кодирования [1-7].

В качестве ДОЭ нередко используют Фурье-голограммы. Однако наличие у голограмм нескольких дифракционных порядков затрудняет их использование в оптико-цифровых системах

и приводит к дополнительным потерям излучения. Регистрация протяжённого сигнала фотосенсором представляет техническую трудность. Альтернативой применения голограмм может стать использование таких синтезируемых фазовых дифракционных элементов как киноформы.

### 2. ОПТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО- НЕКОГЕРЕНТНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Оптическое кодирование, как правило, осуществляется в пространственно-когерентном монохроматическом свете. Наиболее известный метод — метод кодирования с двойной случайной фазой [8-12]. Суть метода заключается в применении двумерных кодирующих ключей, в качестве которых используются случайные фазовые маски, из-за чего такие системы обладают высокой криптостойкостью. Однако, ввиду необходимости регистрации фазы, такие системы требуют голографических методов регистрации и, соответственно сложных оптических схем. Также, протяженность импульсных откликов случайных фазовых масок приводит к низкому качеству декодирования изображений.

Для упрощения схемы кодирования и повышения устойчивости к шумам возможен переход от пространственно-когерентного монохроматического излучения к пространственно-некогерентному. При этом уже не требуется регистрация фазы, что позволяет отказаться от голографической схемы записи. Процесс кодирования осуществляется прохождением монохроматического пространственно-некогерентного излучения от кодируемой сцены через ДОЭ, в результате чего образуется свертка изображения сцены с импульсным откликом ДОЭ [13], являющимся кодирующим ключом. Полученное таким образом

*Бондарева Алёна Павловна, студентка первого курса магистратуры кафедры лазерной физики.*

*E-mail: ymkaaleyna@mail.ru*

*Краснов Виталий Вячеславович, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры лазерной физики.*

*E-mail: vitaly.krasnov@mail.ru*

изображение фиксируется матричным фотосенсором (фотоприемником). Модель оптического кодирования описывается уравнением:

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

где  $g(x, y)$  – кодированное изображение,  $f(x, y)$  – исходное изображение,  $h(x, y)$  – функция рассеяния точки (ФРТ) и  $n(x, y)$  – аддитивный шум.

Принципиальная схема кодирования приведена на рис. 1. Такие системы применяются не только в криптографических целях, но и для задач увеличения глубины резкости [14], устранения хроматических aberrаций [15], снижения массы и габаритов оптических систем [16].

В качестве ДОЭ вместо голограмм целесообразно использование киноформов. Киноформ – фазовый дифракционный оптический элемент, который несёт информацию только о фазовой составляющей объектной волны и позволяет восстанавливать её при освещении опорной волной. Практически весь падающий на киноформ свет собирается в один дифракционный порядок. Применение жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ЖК ПВМС) для отображения киноформов [17] позволяет реализовать схему кодирования с динамически меняющимся кодирующим ключом.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ НА БАЗЕ ФАЗОВОГО ЖК ПВМС

Экспериментальная установка для оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением [18] на базе фазового ЖК ПВМС “HoloEye PLUTO VIS” [19-21] приведена на рис. 2.

Монохроматический свет коллимируется линзами Л1, Л2, вращающийся матовый рассеиватель ВМР разрушает пространственную когерентность. Кодируемая сцена размещена в передней фокальной плоскости линзы Л3. Поляризатор П и анализатор А выделяют требуемое ПВМС направление поляризации. Фазовый ЖК ПВМС расположен в задней фокальной плоскости линзы Л3. Линза Л4 формирует изображение кодируемой сцены на фотосенсоре камеры. Фазовый ЖК ПВМС используется для отображения киноформов. В результате, камерой фиксируется свертка изображения объекта и импульсного отклика киноформа.

К достоинствам схемы оптического кодирования изображений в пространственно-некогерентном свете на базе фазового ЖК ПВМС можно отнести возможность оперативного изменения

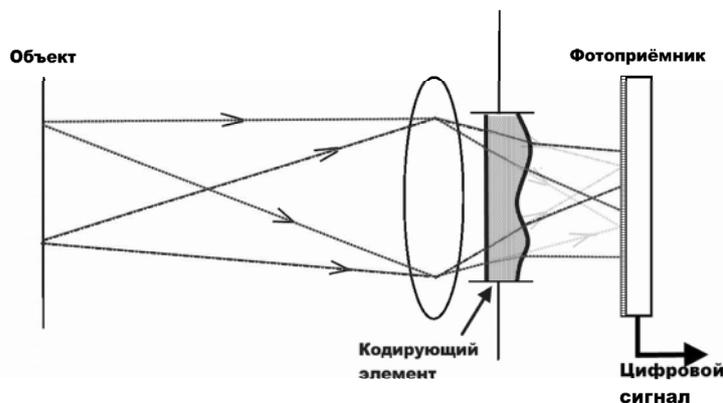


Рис. 1. Принципиальная схема оптического кодирования с использованием ДОЭ

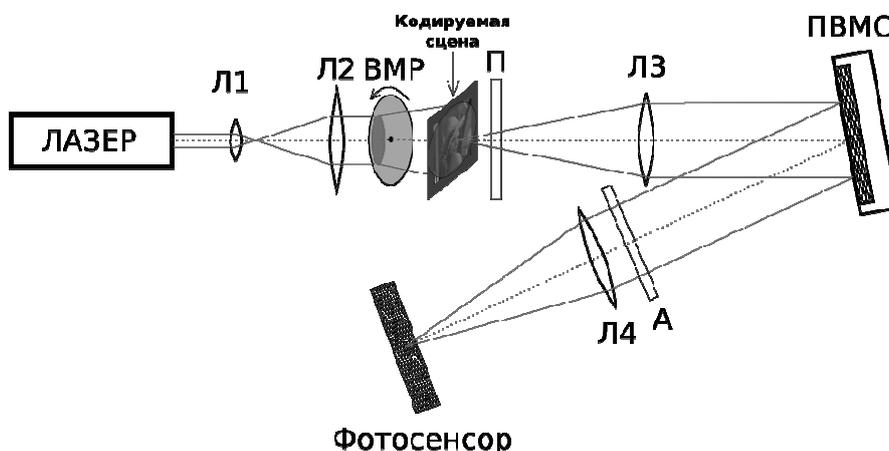


Рис. 2. Схема экспериментальной установки оптического кодирования изображений в пространственно-некогерентном свете на базе фазового ЖК ПВМС

кодирующего ключа и реализации, как в когерентном, так и в некогерентном свете. Другим применением является устранение спеклов при регистрации изображений в системах, использующих пространственно-когерентное лазерное излучение.

#### 4. ПОЛУЧЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

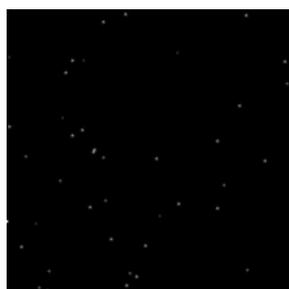
Пример оптического кодирования простой сцены на реализованной установке приведен на рисунках 3-5. Для эксперимента в качестве кодируемого изображения было использовано контурное изображение, представленное на рис. 4а. Кодированный киноформ, полученный методом Герцберга-Сэкстона [22-24] изображен на рис. 3б и имеет размер 1080x1080 отсчетов. Импульсный отклик киноформа представлен на рис. 3а. Кодированное изображение приведено на рисунке 4б.

Декодирование осуществлялось численно с использованием метода регуляризации Тихонова [25]. Оценка качества декодированных изображений производилась путём расчёта нормированного среднеквадратичного отклонения (НСКО) [26] декодированных изображений от оригинальных.

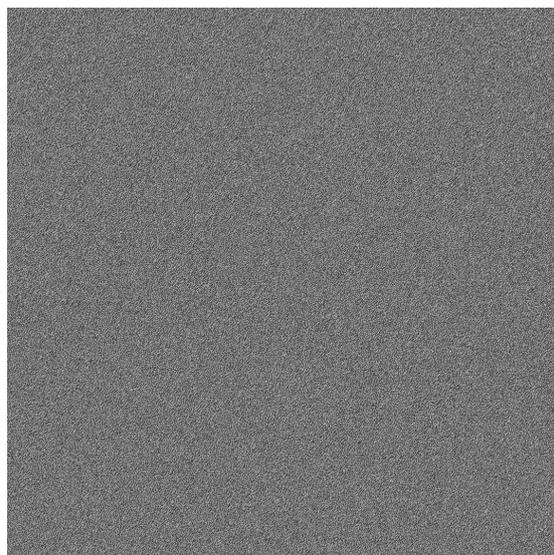
Результат численного декодирования кодированного изображения приведен на рис. 5: восстановленное изображение с минимальным НСКО от оригинала равным 0,42 (рис. 5 (а)) и зависимость НСКО от параметра регуляризации Тихонова (рис. 5 (б)).

Рис. 5. Декодированное изображение с минимальным НСКО от оригинала (а) и зависимость НСКО от параметра регуляризации Тихонова (б)

Зашумленность декодированного изображения, приведшая к высокому значению НСКО, обусловлена преимущественно паразитной фоновой засветкой кодированного изображения,

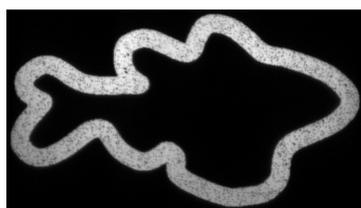


а

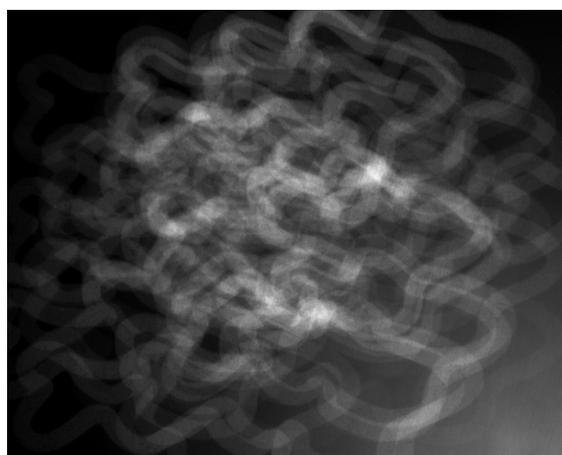


б

Рис. 3. Импульсный отклик киноформа (а), кодирующий киноформ (б)

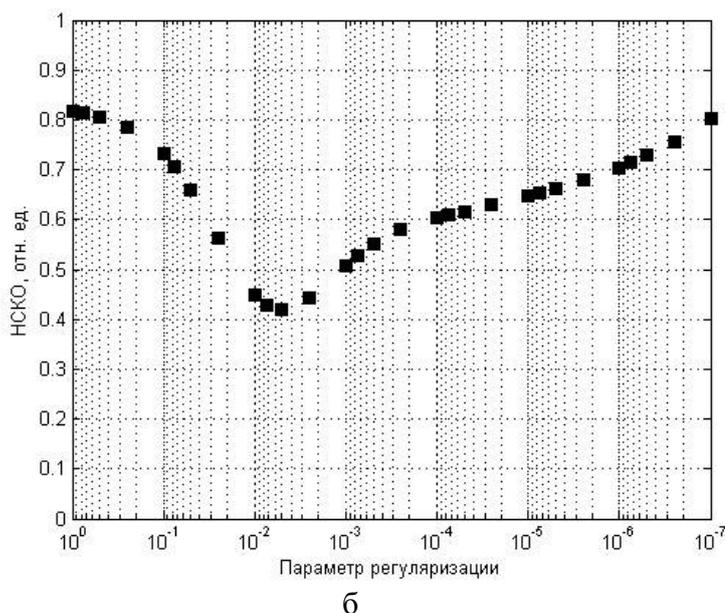
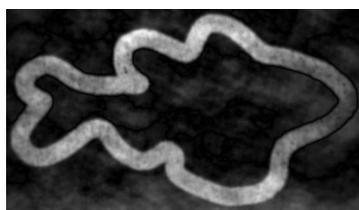


а



б

Рис. 4. Кодированное изображение (а), кодированное изображение (б)



а  
 б  
**Рис. 3.** Импульсный отклик киноформа (а), кодирующий киноформ (б)

возникшей в первую очередь из-за флуктуаций фазового сдвига в ПВМС [20, 21]. Для повышения качества декодирования целесообразно использовать ПВМС в режиме синхронизации с лазером или камерой для устранения негативного эффекта флуктуаций фазового сдвига.

Полученные результаты подтверждают работоспособность реализованной схемы оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением на базе фазового ЖК ПВМС.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально реализована схема оптического кодирования изображений в пространственно-некогерентном свете на базе фазового жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света с возможностью динамической смены кодирующего ключа. Проведены эксперименты и продемонстрирована работоспособность схемы. Невысокое качество декодированного изображения обусловлено преимущественно паразитной фоновой засветкой кодированного изображения, возникшей в первую очередь из-за флуктуаций фазового сдвига в пространственно-временном модуляторе света. Предложенная схема на современной аппаратной базе позволит осуществлять кодирование со скоростью в десятки изображений в секунду, достаточной для кодирования видеопотока в режиме реального времени.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optical image encryption and hiding based on a modified Mach-Zehnder interferometer/ *J. Li, L. Shen, Y. Pan, R. Li* // *Opt. Express*. 2014. Vol. 22. № 4. P. 4849-4860.
2. *Rajput S.K., Nishchal N.K.* Fresnel domain nonlinear optical image encryption scheme based on Gerchberg-Saxton phase-retrieval algorithm // *Appl. Opt.* 2014. Vol. 53. № 3. P. 418-425.
3. Method of optical image coding by time integration/ *N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, P.A. Cheryomkhin, V.V. Krasnov, V.G. Rodin* // *Proc. SPIE*. 2012. Vol. 84291, P. 8429P.
4. Optical stream-cipher-like system for image encryption based on Michelson interferometer/ *B. Yang, Z. Liu, B. Wang, Y. Zhang, S. Liu* // *Opt. Express*. 2011. Vol. 19. № 3. P. 2634-2642.
5. Optical image encryption based on diffractive imaging/ *W. Chen, X. Chen, C. J. R. Sheppard* // *Opt. Lett.* 2010. Vol. 35. № 22. P. 3817-3819.
6. *Qin Y., Gong Q.* Optical information encryption based on incoherent superposition with the help of the QR code // *Opt. Comm.* 2014. Vol. 310. P. 69-74.
7. Optical image encryption with spatially incoherent illumination/ *J. Zang, Z. Xie, Y. Zhang* // *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38. № 8. P. 1289-1291.
8. *Javidi B., Réfrégier P.* Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding // *Opt. Lett.* 1995. Vol. 20. № 7. P. 767-769.
9. Fault tolerance properties of a double random phase encoding encryption techniques / *B. Javidi, A. Sergent, G.S. Zhang, L. Guibert* // *Opt. Eng.* 1997. Vol. 36. № 4. P. 992-998.
10. Optical encryption by double-random phase encoding in the fractional Fourier domain/ *G. Unnikrishnan, J. Joseph, K. Singh* // *Opt. Lett.* 2000. Vol. 25, № 12. P. 887-889.
11. Error-reduction techniques and error analysis for fully phase- and amplitude-based encryption/ *B. Javidi, N. Towghi, N. Maghzi, S.C. Verall* // *Appl. Opt.* 2000. Vol. 39. № 23. P. 4117-4130.
12. *Hennelly B.M., Sheridan J.T.* Random phase and jigsaw encryption in the Fresnel domain // *Opt. Eng.* 2004. Vol. 43. № 10. P. 2239-2249.
13. *Cathey W., Dowski E.* New paradigm for imaging systems // *Appl. Opt.* 2002. Vol. 41. № 29. P. 6080-6092.
14. High-Resolution Imaging Using Integrated Optical Systems/ *P. Pauca, R. Plemmons, S. Prasad, J. van der*

- Gracht*//International Journal on Imaging Systems and Technology. 2004. Vol. 14. №. 2. P. 67-75.
15. Control of Chromatic Focal Shift Through Wave-Front Coding / H. Wach, E. Dowski, W. Cathey//Appl. Opt. 1998. Vol. 37. № 23. P. 5359-5367.
  16. Reducing complexity in computational imaging systems / K. Kubala, E. Dowski, W. Cathey// Opt. Express. 2003. Vol. 11. № 18. P. 2102-2108.
  17. Повышение точности модуляции фазы в ЖК ПВМС HoloEye PLUTO VIS / А.П. Бондарева, В.В. Краснов, П.А. Черёмхин //Сборник трудов VIII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика - 2013». Москва. 2013. С. 207-209.
  18. Бондарева А.П., Краснов В.В. Применение фазового ЖК ПВМС в качестве кодирующего элемента в схеме оптического кодирования изображений с пространственно-некогерентным освещением //Сборник трудов XXVIII Школы-симпозиума по голографии и когерентной оптике. Нижний Новгород. 2013, С. 20-21.
  19. HoloEye Photonics Ag. PLUTO: High-Resolution LCOS Phase Only Spatial Light Modulators. URL: <http://holoeeye.com/spatial-light-modulators/slm-pluto-phase-only/> (дата обращения 15.01.2015)ю
  20. Reduction of phase temporal fluctuations caused by digital voltage addressing in LC SLM "HoloEye PLUTO VIS" for holographic applications/ P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev, V.V. Krasnov, V.G. Rodin, S.N. Starikov // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9006. P. 900615.
  21. Time fluctuations of the phase modulation in a liquid crystal on silicon display: characterization and effects in diffractive optics/ A. Lizana, I. Moreno, A. Marquez, C. Iemmi, E. Fernández, J. Campos, M. J. Yzuel // Opt. Express. 2008. Vol. 16. № 21. P. 16711-16722.
  22. Gerchberg, R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures// Optik. 1972. Vol. 75. № 2. P. 237-246.
  23. Fienup J. R. Phase retrieval algorithms: a comparison // Appl. Opt. 1982. Vol. 21. № 15. P. 2758-2769.
  24. Comparison of kinoform synthesis methods for image reconstruction in Fourier plane / P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev, V.V. Krasnov, L.A. Porshneva, V.G. Rodin, S.N. Starikov // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9131. P. 913124.
  25. Арсенин, В.Я., Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач // М.: Наука, 1986. 288 с.
  26. Fienup J.R. Invariant error metrics for image reconstruction // Appl. Opt. 1997. Vol. 36. № 32. P. 8352-8357.

**SCHEME OF IMAGE OPTICAL ENCRYPTION  
WITH SPATIALLY INCOHERENT ILLUMINATION  
AND ABILITY OF DYNAMIC CHANGE OF ENCRYPTON KEY**

© 2015 A.P. Bondareva, V.V. Krasnov

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

Scheme of image optical encryption with spatially incoherent illumination and ability of dynamic change of encryption key is proposed. In proposed scheme in capacity of dynamically changeable encryption elements kinoforms are used. They are displayed with liquid crystal spatial light modulator. It allows to encrypt images at the registration stage with rate of dozens images per second. Results of images optical encryption and numerical decryption are presented.

*Keywords:* image optical encryption, optical convolution, spatially incoherent illumination, spatial light modulator.