

УДК 004.932.4+004.942+535.42+535.8

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА В СХЕМЕ ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

А. П. Бондарева, Н. Н. Евтихийев, В. В. Краснов, С. Н. Стариков*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

В работе описывается применение фазового жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света «HoloEyePLUTOVIS» в качестве кодирующего элемента в схеме оптического кодирования изображений в пространственно-некогерентном свете. Проведено оптическое кодирование и численное декодирование тестовых изображений. Результаты экспериментов подтверждают работоспособность реализованной схемы оптического кодирования.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существуют и активно развиваются методы оптического кодирования информации, характеризующиеся высоким быстродействием, одновременной многоканальной обработкой и отсутствием сопутствующего излучения в радиодиапазоне. Широко распространены системы кодирования в пространственно-когерентном монохроматическом свете, одна из наиболее известных систем использует кодирование с двойной случайной фазой [1–5]. Кодирование при этом осуществляется в монохроматическом пространственно-когерентном свете с использованием двух случайных фазовых масок. Применение двумерных кодирующих ключей, в качестве которых используются случайные фазовые маски, приводит к тому, что такие системы обладают высокой криптостойкостью. Однако из-за необходимости регистрации фазы такие системы требуют голографических методов регистрации и, соответственно, сложных оптических схем. Использование также случайных фазовых масок приводит к низкому качеству декодирования изображений.

Для упрощения схемы кодирования и повышения качества декодирования можно перейти от пространственно-когерентного излучения к пространственно-некогерентному. В этом случае уже не требуется регистрация фазы закодированного изображения, что позволяет отказаться от голографической схемы записи. Кодирование при этом осуществляется прохождением монохроматического пространственно-некогерентного излучения от кодируемого объекта через дифракционный оптический элемент, в результате чего образуется распределение интенсивности, описываемое свёрткой изображения объекта с функцией рассеяния точки — импульсным откликом дифракционного оптического элемента по интенсивности [6, 7]. Данное распределение интенсивности представляет собой закодированное изображение, регистрируемое матричным фотосенсором.

Принципиальная возможность оптического кодирования в некогерентном свете была продемонстрирована в работе [8], однако использование случайной фазовой маски в качестве кодирующего дифракционного оптического элемента не позволило достичь приемлемого качества декодирования. Это обусловлено тем, что функция рассеяния точки случайной фазовой маски практически неограниченна пространственно и существенно превышает размеры кодируемого изображения, в результате чего фотосенсор регистрирует лишь центральную часть закодированного

* vitally.krasnov@mail.ru

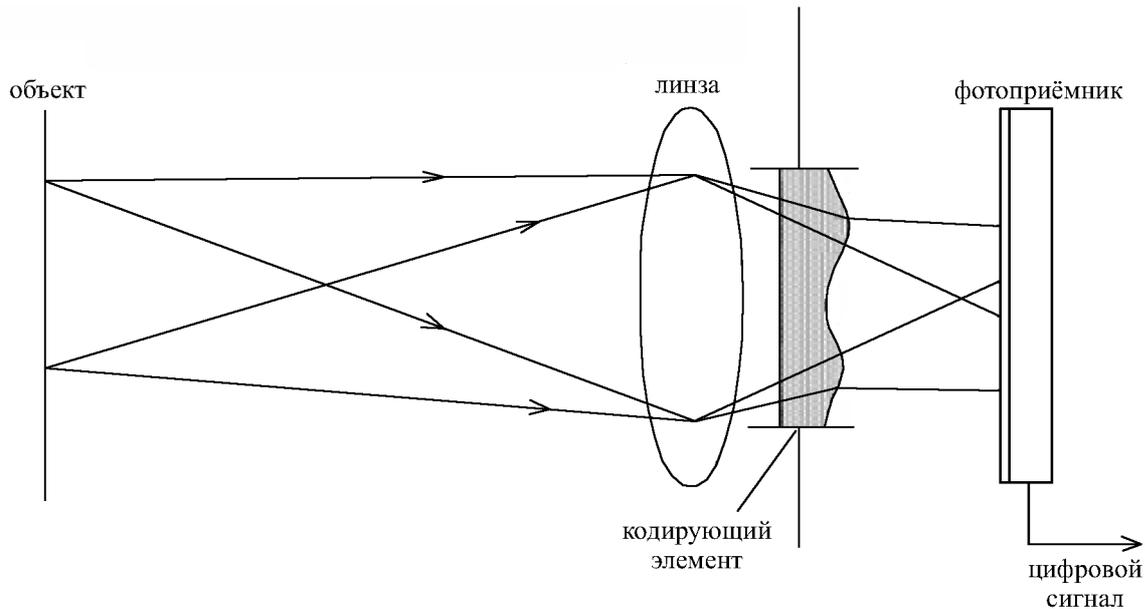


Рис. 1. Принципиальная схема оптического кодирования с использованием дифракционного оптического элемента

изображения, что приводит к искажениям декодируемого изображения. Для решения этой проблемы предлагается в качестве кодирующего элемента использовать не случайную фазовую маску, а дифракционный оптический элемент, обладающий заданной пространственно-ограниченной функцией рассеяния точки, с протяжённостью меньшей, чем размер кодируемого изображения.

Схема процесса кодирования приведена на рис. 1. Объект освещается пространственно-некогерентным монохроматическим светом. При прохождении излучения через дифракционный оптический элемент в плоскости фотосенсора формируется распределение интенсивности g , соответствующее свёртке изображения объекта f и функции рассеяния точки дифракционного оптического элемента h . Зарегистрированное изображение g является закодированным изображением объекта f , а функция рассеяния точки h — ключом кодирования.

В качестве дифракционного оптического элемента нередко применяются фурье-голограммы. Однако наличие у голограмм нескольких дифракционных порядков затрудняет их использование в оптико-цифровых системах, т. к. требуемая кодирующая функция рассеяния точки может быть сформирована только в одном дифракционном порядке. Альтернативой применения голограмм является использование таких синтезируемых фазовых дифракционных элементов как киноформы [9], формирующих единственный дифракционный порядок, содержащий требуемую функцию рассеяния точки [10].

Поскольку кодирование осуществляется свёрткой, возникает ограничение на распределение амплитуд фурье-спектра кодирующего ключа h . Спектр ключа должен перекрывать спектр кодируемого изображения f , в противном случае при кодировании неизбежны потери информации кодируемого изображения на пространственных частотах, которые не перекрываются спектром ключа. Идеальный ключ не должен содержать в фурье-спектре малых, по сравнению со средним уровнем, значений амплитуд во избежание потери информации при кодировании.

Основным требованием, предъявляемым к кодирующим системам, является возможность смены кодирующего ключа для каждой порции кодируемой информации. Это ограничивает возможность применения статических кодирующих элементов. Для реализации системы кодирования с динамически меняющимся кодирующим ключом целесообразно для отображения дифракци-

онного оптического элемента использовать пространственно-временные модуляторы света [11], позволяющие осуществлять смену элемента с частотой в десятки герц и более.

Такая схема кодирования была предложена и апробирована нами в работе [12]. Полученные в указанной работе экспериментальные результаты продемонстрировали недостаточную степень сокрытия информации в кодированных изображениях. В связи с этим целью настоящей работы являлось определение причин, приведших к этому, их устранение и проведение экспериментов по оптическому кодированию в пространственно-некогерентном свете с использованием жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света для формирования кодирующей функции рассеяния точки.

Статья организована следующим образом. В первом разделе приводится описание экспериментальной установки. Во втором разделе приведены результаты поиска и устранения причин недостаточной степени сокрытия информации. В третьем разделе приведены описание и результаты проведённых экспериментов. В заключении сформулированы основные выводы.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ И ВОЗМОЖНОСТЬЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ СМЕНЫ КОДИРУЮЩЕГО КЛЮЧА

Для экспериментальной реализации схемы оптического кодирования с возможностью динамической смены ключа был использован метод временного интегрирования [12, 13], применяемый, например, в некогерентных акустооптических корреляторах [14–16]. Суть метода заключается в следующем: регистрируется изображение объекта, перемещающегося по некоторой кодирующей траектории, в результате чего образуется изображение, описываемое свёрткой изображения объекта и кодирующей траектории. Математически такой процесс кодирования изображения f дискретной траекторией h можно описать следующим образом:

$$g(i, j) = \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^j f(k, l)h(i - k, j - l). \quad (1)$$

Здесь $g(i, j)$ — яркость пиксела изображения в точке с координатами i, j , $h(i - k, j - l)$ — значение элемента $(i - k, j - l)$ матрицы траектории с координатами $i - k, j - l$, величина h характеризует время нахождения изображения в данной точке траектории. Траектория h формирует кодирующую функцию рассеяния точки оптической системы по аналогии с функцией рассеяния точки дифракционного оптического элемента и является ключом кодирования.

Схема экспериментальной установки оптического кодирования изображений в пространственно-некогерентном свете на базе фазового жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света, предложенная нами в работе [12], изображена на рис. 2. Излучение гелий-неонового лазера (длина волны 0,63 мкм) коллимируется линзами Л1, Л2, вращающийся матовый рассеиватель (ВМР) разрушает пространственную когерентность излучения. Кодированная сцена размещена в передней фокальной плоскости линзы Л3. Жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света «HoloEyePLUTOVIS» состоит из 1920×1080 пикселей с размерами 8×8 мкм, способен выводить 256 уровней фазы и расположен в задней фокальной плоскости линзы Л3. Поляризаторы П и А ориентированы так, чтобы было обеспечено правильное функционирование фазового модулятора. Линза Л4 формирует изображение кодируемой сцены на фотосенсоре монохромной камеры «MegaPlus II ES11000» с разрешением 4008×2672 пикселей, 10-битным аналого-цифровым преобразователем и максимальным отношением сигнал/шум, равным 140. Модулятор формирует последовательно сменяющиеся фазовые решётки с пилообразным профилем. Смена в процессе регистрации кадра отображаемых модулятором решёток

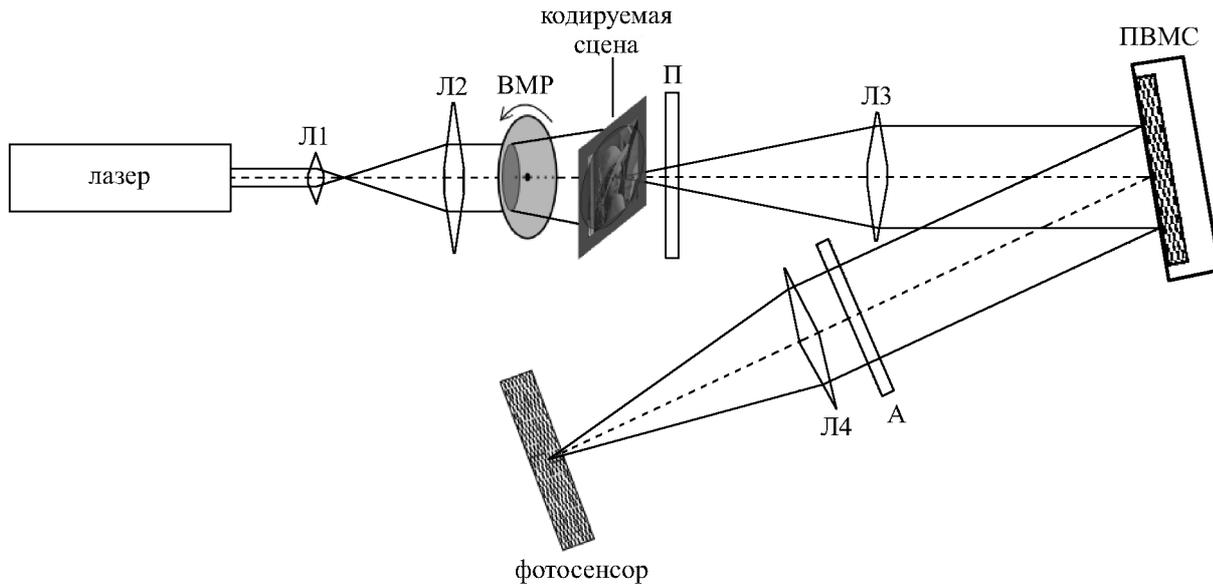


Рис. 2. Схема экспериментальной установки оптического кодирования изображений в пространственно-некогерентном свете на базе фазового жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света

(изменение их периода и ориентации) приводит к перемещению изображения сцены на фотосенсоре камеры. В результате этого изображение, фиксируемое камерой, соответствует свёртке изображения сцены и кодирующей траектории.

2. АНАЛИЗ И УСТРАНЕНИЕ ПРИЧИН НЕДОСТАТОЧНОЙ СТЕПЕНИ СОКРЫТИЯ ИНФОРМАЦИИ В КОДИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Как показал проведённый анализ, недостаточная степень сокрытия информации в кодированных изображениях была обусловлена значительными временными флуктуациями фазового сдвига за время отображения кадра на модуляторе света [17, 18]. В результате этих флуктуаций при формировании каждой точки функции рассеяния точки, помимо требуемого первого дифракционного порядка, наблюдался нежелательный нулевой порядок, интенсивность которого, по результатам измерений, составляла четвертую часть от интенсивности первого порядка. Соответственно, в кодирующей функции рассеяния точки, использованной в экспериментах, состоящей из 30 точек, суммарная интенсивность нулевого порядка почти в 8 раз превышала интенсивность остальных точек. В результате зарегистрированное изображение можно представить как сумму собственно кодированного изображения, образованного расчётной функцией рассеяния точки без нулевого порядка, и оригинального некодированного изображения с яркостью, в 8 раз превышающей яркость первого слагаемого. Это и обуславливает недостаточную степень сокрытия информации в результирующем кодированном изображении. Результат кодирования в описанных условиях приведён на рис. 3а — оригинальное изображение проступает на фоне кодированного.

Для уменьшения величины временных флуктуаций фазового сдвига была изменена конфигурация адресации управляющего напряжения в модуляторе света со стандартной на полученную по нашему запросу от производителя. По результатам проведённых измерений замена конфигурации снизила максимальную амплитуду флуктуаций почти в 4 раза — со значения $0,48\pi$ до $0,13\pi$.

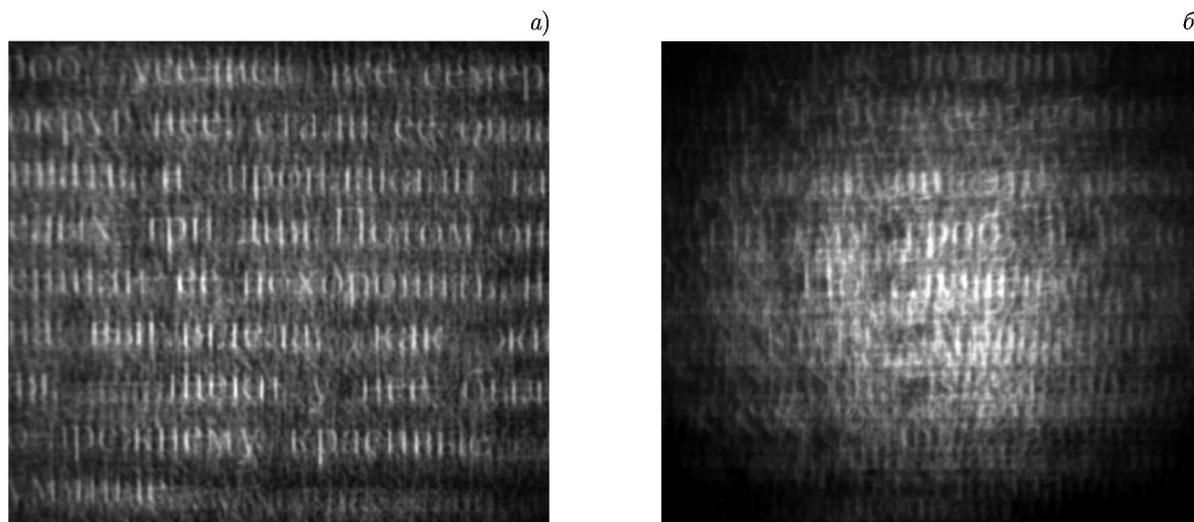


Рис. 3. Кодированные изображения: до (а) и после (б) уменьшения временных флуктуаций фазового сдвига модулятора

Вследствие этого удалось повысить отношение интенсивностей первого дифракционного порядка к нулевому в 2 раза — со значения 4,0 до 8,0. Это позволило принципиально повысить качество сокрытия информации в кодированных изображениях, что продемонстрировано на рис. 3: если ранее оригинальный текст проступал на фоне кодированного (см. рис. 3а), то после уменьшения временных флуктуаций фазового сдвига жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света в кодированном изображении идентифицируется только незначительное количество отдельных символов (см. рис. 3б). Дальнейшего уменьшения флуктуаций можно достичь с использованием средств синхронизации [18].

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОПТИЧЕСКОМУ КОДИРОВАНИЮ И ЧИСЛЕННОМУ ДЕКОДИРОВАНИЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для демонстрации кодирования на реализованной установке были использованы два типа изображений: полутоновые и бинарные штриховые. В экспериментах использовались изображения с линейными размерами в диапазоне от 700 до 1500 пикселей фотосенсора. Линейный размер кодирующей функции рассеяния точки составлял около трети от размера кодируемых изображений и был выбран из соображений скрыть информацию и обеспечить последующее декодирование.

Пример оптического кодирования изображения полутоновой сцены на реализованной установке приведён на рис. 4. Кодированное полутоновое изображение занимало на фотосенсоре камеры область с размерами 800×780 пикселей. Кодирующая функция рассеяния точки состояла из 30 точек, размещённых на поле с размерами 251×296 отсчётов, и занимала на фотосенсоре область с размерами 342×403 пикселей. Кодированное изображение, соответственно, занимало область с размерами 1141×1382 пикселей. Как и предполагалось, информационное содержание в кодированном изображении визуально утрачено.

Декодирование изображений осуществлялось численно методом инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову [19]. Результат численного декодирования изображения полутоновой сцены, представленного на рис. 4в, приведён на рис. 5а. Данное изображение, декодированное с па-



Рис. 4. Оптическое кодирование изображения полутоновой сцены: изображение кодируемой сцены (а), кодирующая функция рассеяния точки (б) и кодированное изображение сцены (в)

раметром регуляризации 10^{-2} , является визуально лучшим по группе декодированных с различными параметрами регуляризации изображений. Мерой качества декодированного изображения может служить нормированное среднеквадратическое отклонение (СКО) [20] декодированного изображения от оригинала. Зависимость нормированного СКО декодированных изображений от величины параметра регуляризации Тихонова приведена на рис. 5б. Несмотря на зашумлённость, декодированное изображение уверенно идентифицируется.

Пример оптического кодирования изображения фрагмента текста приведён на рис. 6. Кодируемое изображение фрагмента текста занимало на фотосенсоре камеры область с размерами 1104×864 пиксела. Кодирующая функция рассеяния точки использовалась та же, что и в предыдущем случае. Кодированное изображение, соответственно, занимало область с размерами 1445×1266 пикселей. Несмотря на то, что в кодированном изображении идентифицируется незначительное количество отдельных символов, прочесть кодированный текст не представляется возможным.

Результат численного декодирования изображения фрагмента текста (рис. 6в) приведён на рис. 7а. Данное изображение, декодированное с параметром регуляризации 10^{-4} , обладает мини-

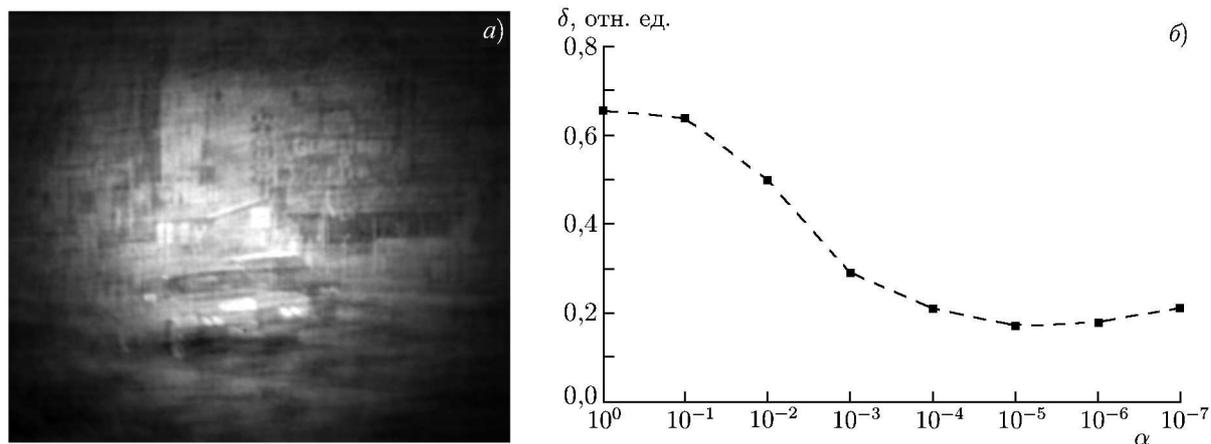


Рис. 5. Численное декодирование изображения полутонной сцены (рис. 3е): *a* — изображение, декодированное с параметром регуляризации 10^{-2} ; *б* — зависимость нормированного среднеквадратичного отклонения δ от параметра регуляризации Тихонова α



Рис. 6. Оптическое кодирование фрагмента текста: *a* — изображение текста; *б* — кодирующая функция рассеяния точки; *в* — кодированное изображение текста

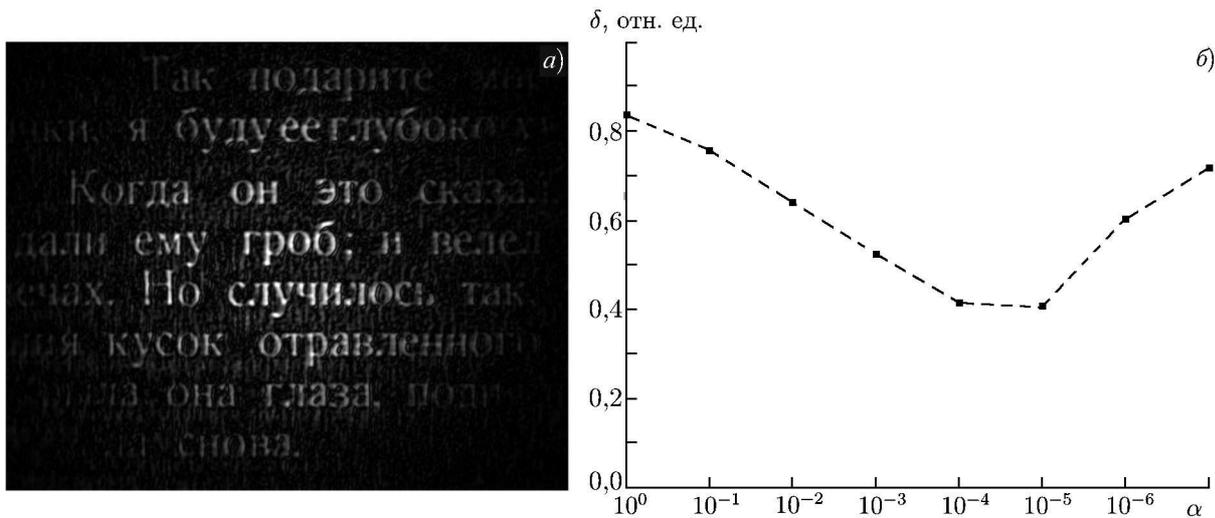


Рис. 7. Численное декодирование изображения фрагмента текста: *a* — декодированное изображение с минимальным нормированным среднеквадратичным отклонением от оригинала; *b* — зависимость нормированного среднеквадратичного отклонения δ от параметра регуляризации Тихонова α

мальным нормированным СКО от оригинала и является визуально лучшим по группе декодированных с различными параметрами регуляризации изображений. Зависимость нормированного СКО от параметра регуляризации Тихонова приведена на рис. 7б. Декодированное изображение фрагмента текста уверенно читается.

Качество кодирования определялось количеством ненулевых точек кодирующей функции рассеяния точки. Ввиду ограниченной длительности экспозиции использованной камеры количество точек кодирующей траектории было ограничено 30, что не всегда достаточно для полного сокрытия кодируемой информации. Шумы, наблюдаемые в декодированных изображениях, обусловлены в первую очередь заметными временными флуктуациями фазового сдвига и остаточной нелинейной зависимостью фазового сдвига от уровня подаваемого сигнала, что привело к появлению высших дифракционных порядков, выходящих за границы области регистрации кодированного изображения.

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. Для формирования кодирующей функции рассеяния точки использован метод временного интегрирования. За счёт четырёхкратного снижения величины временных флуктуаций фазового сдвига в модуляторе (с $0,48\pi$ до $0,13\pi$) в два раза снижена интенсивность нулевого дифракционного порядка в кодирующей функции рассеяния точки, в результате чего была обеспечена достаточная степень сокрытия информации в оптически кодированных изображениях. В экспериментах по оптическому кодированию линейный размер кодирующей функции рассеяния точки составлял около трети от размера кодируемых изображений и был выбран из соображений обеспечения сокрытия информации и возможности последующего численного декодирования. Декодированные текстовые изображения идентифицируются с соответствующими оригиналами. Результаты проведённых экспериментов подтверждают работоспособность реализованной схемы кодирования с

пространственно-некогерентным освещением и возможностью динамической смены кодирующего ключа.

Шумы, наблюдаемые в декодированных изображениях, обусловлены в первую очередь заметными временными флуктуациями фазового сдвига в модуляторе света. Для дальнейшего уменьшения флуктуаций и, соответственно, повышения качества декодирования следует использовать синхронизацию модулятора и источника излучения или регистрирующей камеры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13–07–00395).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Réfrégier P., Javidi B. // *Opt. Lett.* 1995. V. 20. P. 767.
2. Javidi B., Sergent A., Zhang G. S., Guibert L. // *Opt. Eng.* 1997. V. 36, No. 4. P. 992.
3. Unnikrishnan G. T., Joseph J., Singh K. // *Opt. Lett.* 2000. V. 25, No. 12. P. 887.
4. Javidi B., Towghi N., Maghzi N., Verall S. C. // *Appl. Opt.* 2000. V. 39, No. 14. P. 2313.
5. Hennelly B. M., Sheridan J. T. // *Opt. Eng.* 2004. V. 43, No. 10. P. 2239.
6. Henaо R., Rueda E., Barrera J. F., Torroba R. // *Opt. Lett.* 2010. V. 35, No. 3. P. 333.
7. Konnik M. V., Starikov S. N. // *Opt. Commun.* 2009. V. 282, No. 21. P. 4210.
8. Javidi B., Tajahuerce E., Lancis J., Andrés P. // *Opt. Lett.* 2001. V. 26, No. 10. P. 678.
9. Lesem L. B., Hirsch P. M., Jordan J. A. Jr. // *IBM J. Res. Dev.* 1969. No. 13. P. 150.
10. Starikov S. N., Rodin V. G., Shapkarina E. A., et al. // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5437. P. 301.
11. Mogensen P. C., Gluckstad J. // *Opt. Lett.* 2000. V. 25, No. 8. P. 566.
12. Evtikhiev N. N., Krasnov V. V., Starikov S. N., et al. // *Proc. SPIE.* 2012. V. 8429. Art. no. 84291P.
13. Краснов В. В., Стариков С. Н., Черёмхин П. А. // *Вестник РУДН. Сер. «Математика. Информатика. Физика».* 2011. № 4. С. 124.
14. Колфилд Г. *Оптическая голография.* М.: Мир, 1982. Т. 2. С. 584.
15. Masalsky N. V. // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5066. P. 292.
16. Kim S., Wagner K. // *Opt. Engineering.* 2005. V. 44, No. 10. Art. no. 108202.
17. Hermerschmidt A., Osten S., Krüger S., et al. // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6584. Art. no. 65840E.
18. Бондарева А. П., Краснов В. В., Черёмхин П. А. // *Сб. трудов VIII Международной конф. ученых и специалистов «Оптика-2013», Санкт-Петербург, 2013.* С. 207.
19. Арсенин В. Я., Тихонов А. Н. *Методы решения некорректных задач.* М.: Наука, 1979.
20. Fienup J. R. // *Appl. Opt.* 1997. V. 36, No. 32. P. 8352.

Поступила в редакцию 11 ноября 2013 г.; принята в печать 31 марта 2014 г.

APPLICATION OF PHASE LC SLM AS ENCODING ELEMENT IN IMAGE OPTICAL ENCRYPTION SCHEME WITH SPATIALLY INCOHERENT ILLUMINATION

A. P. Bondareva, N. N. Evtikhiev, V. V. Krasnov, and S. N. Starikov

We describe application of the phase liquid-crystal spatial light modulator HoloEyePLUTOVIS as an encoding element in the image optical encryption scheme with spatially incoherent illumination. Optical encryption and numerical decryption of test images were conducted. The results of experiments demonstrate the efficiency of the constructed optical encryption scheme.

A. П. Бондарева, Н. Н. Евтихийев, В. В. Краснов, С. Н. Стариков