

ПРИМЕНЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВХОДНЫХ АМПЛИТУДНЫХ МАСОК В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

Н.Н. Евтихийев¹, В.В. Краснов¹, П.А. Черёмхин¹, А.В. Шифрина¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Аннотация

Предложено использование дополнительных входных амплитудных масок в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением для повышения отношения сигнал/шум в декодированных изображениях и увеличения визуальной скрытности кодированных изображений. Проведено компьютерное моделирование оптического кодирования с использованием данных масок для различных полутоновых изображений и ключей кодирования с широким диапазоном параметров. Получено, что применение дополнительных входных амплитудных масок приводит к увеличению отношения сигнал/шум в декодированном изображении более чем в 2 раза, а также значительно увеличивает визуальную скрытность кодированного изображения.

Ключевые слова: оптическое кодирование, некогерентное освещение, амплитудные маски, оптическая свертка.

Цитирование: Евтихийев, Н.Н. Применение дополнительных входных амплитудных масок в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением / Н.Н. Евтихийев, В.В. Краснов, П.А. Черёмхин, А.В. Шифрина // Компьютерная оптика. – 2017 – Т. 41, № 3. – С. 391-398. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-391-398.

Введение

В настоящее время активно исследуются методы оптического кодирования информации [1–9], обладающие рядом преимуществ, таких как быстрдействие, параллелизм и отсутствие сопутствующего излучения в радиодиапазоне. Методы оптического кодирования применяются для кодирования как полутоновых монохромных и цветных [8] изображений, так и цифровой информации [3] или QR-кодов [9].

Одним из наиболее широко применяемых методов оптического кодирования является оптическое кодирование с использованием двух случайных фазовых масок [1, 2, 7]. Его принципиальная схема представлена на рис. 1.

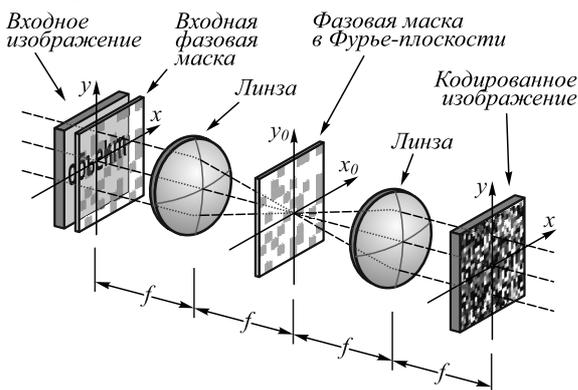


Рис. 1. Принципиальная схема оптического кодирования с использованием двух случайных фазовых масок

Если используемые случайные маски статистически не зависят друг от друга, то кодированное изображение представляет собой стационарный белый шум. Теоретические и экспериментальные результаты показывают, что кодирование с двойной случайной маской способно обеспечить высокую степень скрытности кодированного изображения.

Основным преимуществом такого подхода является возможность достичь у кодированного изображения ровного «белого» спектра. В таком спектре нет характерных особенностей, позволяющих упростить задачу декодирования изображения без знания ключа.

К недостаткам стоит отнести необходимость регистрации как амплитуды, так и фазы кодированного изображения, для чего требуется использовать голографические (интерференционные) методы его записи, а также полностью когерентное освещение, что приводит к возникновению спекл-шума, значительно ухудшающего качество декодированных изображений [10].

Для упрощения схемы кодирования и повышения качества декодированных изображений возможен переход от когерентного монохроматического излучения к пространственно-некогерентному [4]. Такая система не требует регистрации фазы, т.е. голографической схемы записи. Кодированное изображение представляет собой зарегистрированное распределение интенсивностей. Принципиальная схема кодирования приведена на рис. 2. Киноформ располагается вплотную к линзе объектива в соответствии с условием $a \ll b$.

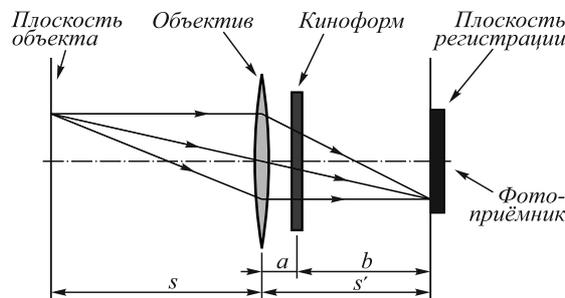


Рис. 2. Принципиальная схема оптического кодирования с использованием дифракционного оптического элемента (киноформа)

В данной схеме ключ кодирования формирует дифракционный оптический элемент (ДОЭ), в каче-

стве которого может быть использован киноформ [11], в отличие от голограммы формирующий единственный дифракционный порядок. Компьютерно-синтезируемые ДОО широко применяются для управления параметрами светового излучения [12–15]. Кодированное изображение представляет собой свёртку распределения интенсивностей кодируемого изображения и интенсивности функции рассеяния точки (ФРТ) ДОО.

Достоинствами метода оптического кодирования с использованием пространственно-некогерентного освещения являются простота реализации и отсутствие спекл-шума. Использование в схеме ДОО требует монохроматичности используемого излучения. Обеспечить динамическую смену кодирующих ключей можно, используя вместо статических ДОО динамические, отображаемые фазовым пространственно-временным модулятором света (ПВМС).

Если реализовать схему кодирования без использования ДОО, то можно снять требование на монохроматичность излучения. Так, оптическая свёртка также может быть осуществлена временным интегрированием [4]: при регистрации изображения объекта, перемещающегося по некоторой кодирующей траектории, образуется оптическая свёртка изображения объекта и «изображения» кодирующей траектории.

Основным ограничивающим фактором для схем оптического кодирования является низкое отношение сигнал/шум (ОСШ) в декодированных изображениях. Соответственно, разработка методов, повышающих качество декодированных изображений и визуальную скрытность кодированных, представляется весьма актуальной и практически важной задачей.

1. Математическое описание оптического кодирования с пространственно-некогерентным монохроматическим освещением и численного декодирования изображений

Используя модель аддитивных шумов, доминирующих над другими типами шумов [16], процесс оптического кодирования можно приближённо описать уравнением:

$$g(i, j) = f(i, j) \otimes h(i, j) + n(i, j), \tag{1}$$

где g – кодированное изображение, f – исходное изображение, h – ФРТ и n – аддитивный шум, i, j – индексы, соответствующие координатам отсчетов изображений.

В фурье-плоскости уравнение (1) имеет вид:

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v) + N(u, v), \tag{2}$$

где G, F, H и N – фурье-спектры функций g, f, h и n ; u, v – индексы, соответствующие координатам в фурье-плоскости. В отсутствие шума ($N(u, v) = 0$) и нулевых значений у функции $H(u, v)$, фурье-спектр F' декодированного изображения f' находится как:

$$F'(u, v) = G(u, v) / H(u, v) = G(u, v) \cdot Y(u, v), \tag{3}$$

где $Y(u, v) = 1 / H(u, v)$ – декодирующий инверсный фильтр. Поэлементное перемножение фурье-спектра

кодированного изображения и декодирующего фильтра компенсирует внесённое искажение и позволяет получить фурье-спектр исходного изображения. Однако для полного декодирования необходимым условием является отсутствие нулей в фурье-спектре кодирующей ФРТ.

В данной работе для декодирования применялся инверсный фильтр с регуляризацией А.Н. Тихонова [17]. В качестве сглаживающей функции использовалась константа – максимум спектра мощности ФРТ:

$$Y(u, v, \alpha) = |H(u, v)| / (|H(u, v)|^2 + \alpha \cdot \max(|H(u, v)|^2)), \tag{4}$$

где α – параметр регуляризации.

Метод регуляризации Тихонова является действенным средством стабилизации некорректной задачи цифрового декодирования изображений и позволяет подбирать параметр регуляризации в зависимости от условий решаемой задачи.

2. Улучшение характеристик оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением

Одним из факторов, определяющих качество декодированного изображения, является наличие шумов устройств ввода кодируемого изображения и кодирующего ДОО, а также регистрирующего фотосенсора. Но для систем оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением возможны её реализации, в которых отсутствуют устройства ввода [4]. При этом цифровой фоторегистратор является неотъемлемым элементом схемы оптического кодирования, и поэтому ослабление влияния его шумов представляется важной задачей.

Другим фактором, определяющим качество декодированного изображения, в случае кодирования с пространственно-некогерентным освещением является наличие в фурье-спектрах кодируемого изображения и ключа кодирования пиков на нулевой пространственной частоте [6]. Данные пики возникают в результате регистрации только интенсивности световых распределений.

При оптическом кодировании происходит перемножение спектров кодируемого изображения и ключа кодирования. В результате составляющие спектра кодированного изображения, несущие информацию об исходном изображении, оказываются ниже таковых в спектре исходного изображения.

К тому же наличие максимума на нулевой пространственной частоте является серьёзным демаскирующим фактором, заметно понижающим визуальную скрытность кодированного изображения.

Характеристики ключа кодирования оказывают сильное влияние на значение ОСШ в декодированном изображении [6]. Этими характеристиками являются: отношение величины пика фурье-спектра на нулевой частоте к среднему уровню спектра (ОПС) и значение нормированной средней энергии (НСЭ) (отношение средней величины энергии в ФРТ ключа кодирования к максимальному по ключу значению энергии).

Кроме того, на распределение амплитуд фурье-спектра кодирующего ключа накладывается ограничение: его спектр должен быть шире спектра кодируемого изображения, так как оптическое кодирование осуществляется сверткой изображения объекта и ФРТ ключа кодирования (см. уравнение (2)). Невыполнение этого условия приводит к потерям информационных частот при кодировании. Также наличие в фурье-спектре ключа нулевых и близких к нулю значений приводит к потере информации на соответствующих пространственных частотах при кодировании и декодировании (поскольку декодирующий фильтр основан на инвертированном ключе кодирования).

Одним из методов повышения качества декодированных изображений является использование дополнительных амплитудных масок, накладываемых на кодируемое изображение. Впервые данный метод для систем оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением был предложен в [18]. В таких системах невозможно применение фазовых масок, используемых в системах с когерентным освещением, поскольку при регистрации закодированного изображения фиксируется только распределение интенсивности.

Амплитудные маски трансформируют спектр исходного изображения таким образом, чтобы он в меньшей степени искажался при процедуре кодирования-декодирования, тем самым повышая ОСШ в декодированных изображениях и увеличивая визуальную скрытность закодированных изображений [18].

3. Описание и параметры численного эксперимента

Для улучшения параметров систем оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением предлагается использование двух видов бинарных амплитудных масок, накладываемых непосредственно на исходное изображение: периодических и взаимодополняющих случайных.

Моделируемая схема оптического кодирования с использованием дополнительной входной амплитудной маски представлена на рис. 3.

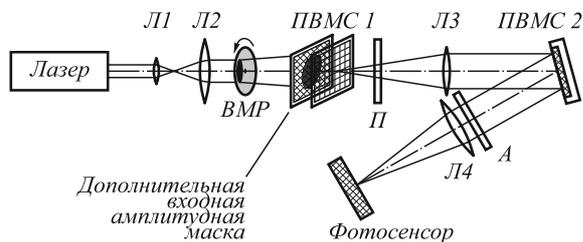


Рис. 3. Схема оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением с использованием дополнительной входной амплитудной маски

Линзы Л1 и Л2 формируют коллимированный пучок излучения лазера. Вращающийся матовый рассеиватель ВМР [19] разрушает пространственную когерентность излучения. На амплитудный жидкокри-

сталлический ПВМС1 выводится кодируемая информация. Излучение проходит через дополнительную входную амплитудную маску. Поляризатор П и анализатор А выделяют требуемое ПВМС2 направление поляризации. Линза Л3 осуществляет прямое преобразование Фурье. На фазовый жидкокристаллический ПВМС2 (использование фазового ЖК ПВМС возможно за счёт набора пространственной когерентности излучения при его распространении [20]), находящийся в задней фокальной плоскости линзы Л3 и передней фокальной плоскости линзы Л4, выводится кодирующий ДОЭ. Л4 осуществляет обратное преобразование Фурье. В результате фотосенсором, расположенным в задней фокальной плоскости линзы Л4, фиксируется свертка изображения объекта и ФРТ кодирующего ДОЭ, являющейся ключом кодирования. Зарегистрированная свертка представляет собой закодированное изображение.

Для проведения численных экспериментов по оценке эффективности использования входных амплитудных масок при оптическом кодировании использовались группа из 10 полутоновых тестовых изображений с числом отсчётов 512×512 пикселей и набор из 160 ключей кодирования. Ключи кодирования имели 32 значения НСЭ от 0,0005 до 0,5, по 5 реализаций ключа для каждого значения, значения ОПС лежали в диапазоне от 1,58 до 191,52.

4. Применение входных амплитудных масок для увеличения отношения сигнал/шум в декодированных изображениях

Наложение амплитудной маски в виде бинарной двумерной решётки приводит к мультиплицированию спектра кодируемого изображения, т.е. появлению дополнительных пиков. Чтобы избежать потери информационных отсчётов, возможна реализация метода в виде разрежения исходного изображения: раздвижения его пикселей и заполнения промежутков чёрными пикселями. Как и наложение решётки, это приводит к появлению дополнительных максимумов в спектре кодируемого изображения. Установлено, что наиболее эффективно попиксельное раздвижение по осям X и Y на 1 пиксель с последующим удалением промежуточных чёрных пикселей («Разрежение 1×1 со снятием», рис. 4).

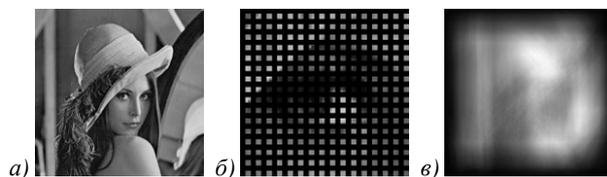


Рис. 4. Метод «Разрежение 1×1 со снятием»: исходное изображение (а), фрагмент разреженного изображения в масштабе 16:1 (б), закодированное изображение (в)

На рис. 5 представлены усреднённая по ключам зависимость минимального нормированного среднеквадратичного отклонения декодированного изображения от кодируемого (НСКО) [21] (а) и зависимость эффективности метода (увеличения ОСШ) (б) от ОПС

ключа кодирования для метода «Разрежение 1×1 со снятием».

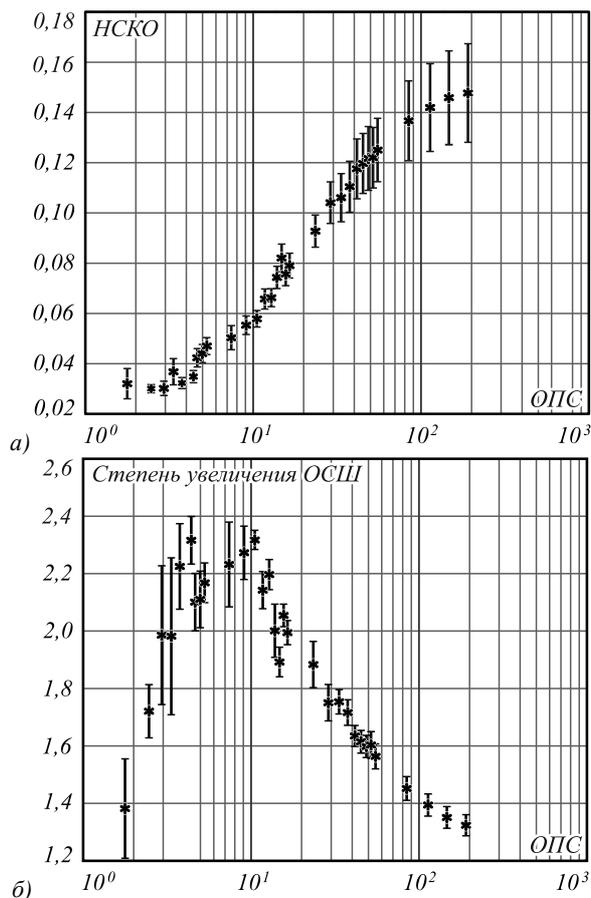


Рис. 5. Усреднённая по ключам зависимость минимального НСКО (а) и зависимость степени увеличения ОСШ по сравнению с кодированием без использования метода (б) от ОПС ключа кодирования при кодировании с использованием метода «Разрежение 1×1 со снятием»

Эффективность метода оценивалась по степени увеличения ОСШ по сравнению с кодированием без использования метода. Для всех полученных в данных численных эксперимента значениях НСКО значение ОСШ можно рассчитать по формуле $ОСШ \approx (НСКО)^{-1}$ с точностью до 10% [21].

По данной зависимости можно определить, что наиболее эффективен метод «Разрежение 1×1 со снятием» для ключей с ОПС в диапазоне от 2 до 20, где ОСШ увеличивается в 2 и более раз. Данным ОПС соответствует НСЭ ключей от 0,0003 до 0,02.

Совместное использование метода «Разрежение 1×1 со снятием» и методов взаимодополняющих масок, наиболее эффективный из которых «Случайная маска с вычитанием», направлено на одновременное повышение криптостойкости кодированного изображения и ОСШ декодированного изображения.

Внесение разности фаз выравнивает спектр кодированного изображения и уменьшает пик на нулевой частоте спектра, что приводит к повышению визуальной скрытности.

Метод «Случайная маска с вычитанием» заключается в создании знакопеременного кодированного

изображения путём вычитания из кадра, кодированного с использованием случайной амплитудной маски, кадра, кодированного с использованием её негатива. Таким образом, в итоговом кодированном изображении половине отсчётов кодируемого изображения эффективно присваивается значение фазы, равное π ; вторая половина отсчётов имеет значение фазы 0. На рис. 6 представлены спектры изображения, кодированного без использования данного метода (а) и его использованием (б).

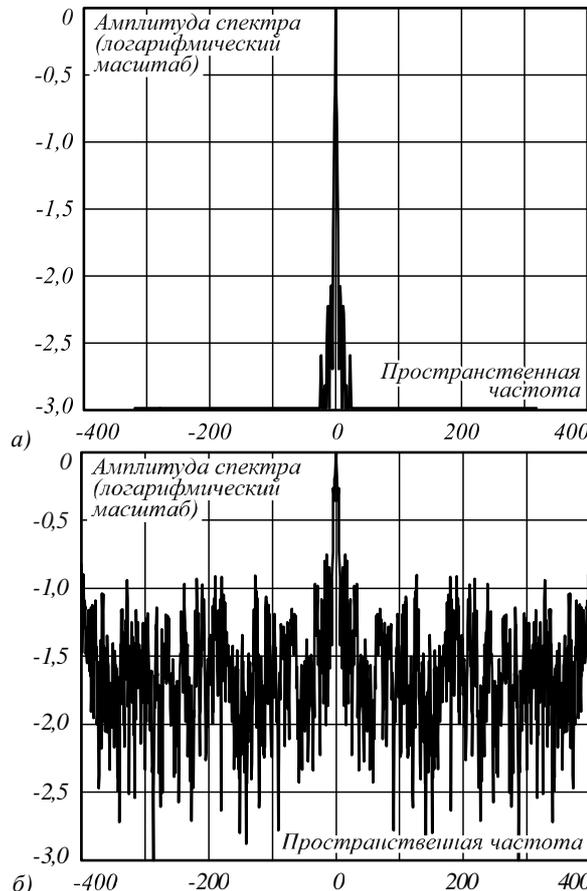


Рис. 6. Спектры изображения, кодированного без использования метода «Случайная маска с вычитанием» (а) и с его использованием (б)

На рис. 7 представлены усреднённая по ключам зависимость ОСШ (а) и зависимость эффективности совместного применения методов (б) от ОПС ключа кодирования для комбинации методов «Разрежение 1×1 со снятием» и «Случайная маска с вычитанием».

Как и для одного только метода «Разрежение 1×1 со снятием», комбинация методов наиболее эффективна для ключей с ОПС, лежащим в диапазоне 2 до 20, где ОСШ увеличивается в среднем в 1,8 раза. При этом добавление метода «Случайная маска с вычитанием» значительно увеличивает визуальную скрытность кодированного изображения. На рис. 8 приведены примеры кодированных изображений при использовании комбинации методов «Разрежение 1×1 со снятием» и «Случайная маска с вычитанием» и без её использования (ОПС ключа кодирования – 23).

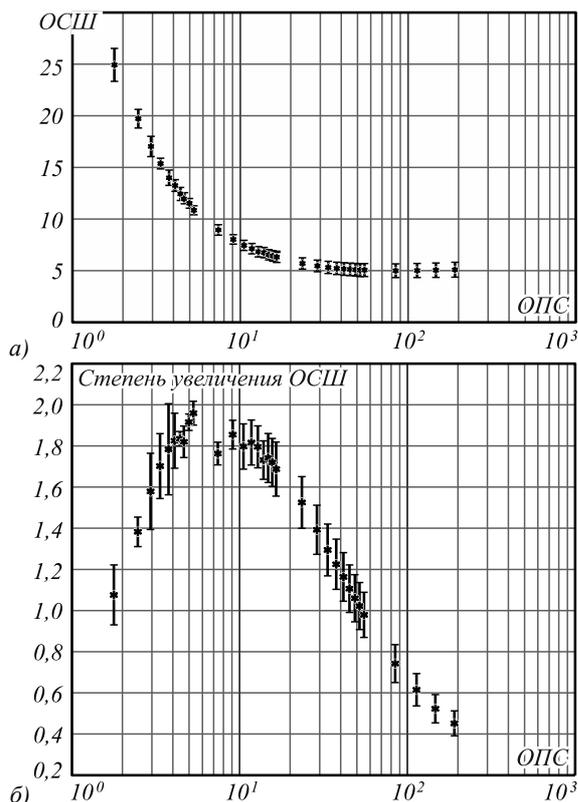


Рис. 7. Усреднённая по ключам зависимость ОСШ (а) и зависимость степени увеличения ОСШ по сравнению с кодированием без использования метода (б) от ОПС ключа кодирования при кодировании с использованием комбинации методов «Разрежение 1×1 со снятием» и «Случайная маска с вычитанием»

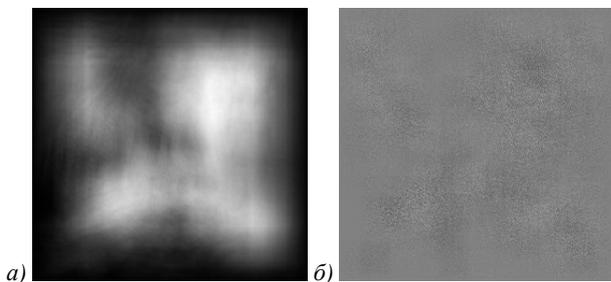


Рис. 8. Кодированные изображения: без использования методов (а), с использованием комбинации методов «Разрежение 1×1 со снятием» и «Случайная маска с вычитанием» (б)

На рис. 9 представлены фрагменты соответствующих декодированных изображений.

Совместное использование методов «Разрежение 1×1 со снятием» и «Случайная маска с вычитанием» позволяет получить знакопеременное кодированное изображение с практически ровным спектром и высокой визуальной скрытностью.

Заклучение

Разработаны и исследованы два типа дополнительных входных амплитудных масок: периодические и взаимодополняющие случайные. Использование периодических масок приводит к мультиплицированию спектра кодируемого изображения в область вы-

соких пространственных частот в соответствии с пространственной частотой маски. Взаимодополняющие случайные маски распределяют интенсивность каждой составляющей спектра по всему спектру пространственных частот.



Рис. 9. Фрагменты декодированных изображений: без использования методов (а), с использованием комбинации методов «Разрежение 1×1 со снятием» и «Случайная маска с вычитанием» (б)

По результатам численных экспериментов установлено, что применение дополнительных входных бинарных амплитудных масок в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением увеличивает отношение сигнал/шум в декодированных изображениях и повышает визуальную скрытность кодированных изображений.

Для наиболее эффективного метода повышения отношения сигнал/шум в декодированном изображении – «Разрежение 1×1 со снятием» – среднее увеличение ОСШ при использовании оптимальных ключей кодирования – 2 раза. Определен диапазон оптимальных значений отношения величины пика фурье-спектра на нулевой частоте к среднему уровню спектра ключей кодирования – $2 \div 20$.

При совместном применении методов «Разрежение 1×1 со снятием» и «Случайная маска с вычитани-

ем» среднее увеличение ОСШ составило 1,8 раза, при этом степень визуального сокрытия кодированного изображения оказывается заметно выше таковой в случае кодирования без применения дополнительных амплитудных масок.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-19-01751).

Литература

1. **Refregier, P.** Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding / P. Refregier, B. Javidi // *Optics Letters*. – 1995. – Vol. 20(7). – P. 767-769. – DOI: 10.1364/OL.20.000767.
2. **Unnikrishnan, G.** Optical encryption by double-random phase encoding in the fractional Fourier domain / G. Unnikrishnan, J. Joseph, K. Singh // *Optics Letters*. – 2000. – Vol. 25(12). – P. 887-889. – DOI: 10.1364/OL.29.001584.
3. **Краснов, В.В.** Оптическое кодирование массивов двоичных чисел в пространственно-некогерентном свете / В.В. Краснов, С.Н. Стариков, Р.С. Стариков, П.А. Черёмхин // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2015. – Т. 58, № 10. – С. 29-36.
4. **Evtikhiev, N.N.** Method of optical image coding by time integration / N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, P.A. Cheryomkhin, V.V. Krasnov, V.G. Rodin // *Proceedings of SPIE*. – 2012. – Vol. 8429. – 84291P. – DOI: 10.1117/12.922540.
5. **Cathey, W.T.** New paradigm for imaging systems / W.T. Cathey, E.R. Dowski // *Applied Optics*. – 2002. – Vol. 41(29). – P. 6080-6092. – DOI: 10.1364/AO.41.006080.
6. **Cheremkhin, P.A.** Generation of keys for image optical encryption in spatially incoherent light aimed at reduction of image decryption error / P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev, V.V. Krasnov, V.G. Rodin, S.N. Starikov // *Proceedings of SPIE*. – 2014. – Vol. 9131. – 913125. – DOI: 10.1117/12.2052723.
7. **Li, J.** Optical image encryption and hiding based on a modified Mach-Zehnder interferometer / J. Li, L. Shen, Y. Pan, R. Li // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 4. – P. 4849-4860. – DOI: 10.1364/OE.22.004849.
8. **Liu, Z.** Color image encryption by using the rotation of color vector in Hartley transform domains / Z. Liu, J. Dai, X. Sun, S. Liu // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2010. – Vol. 48, Issue 7. – P. 800-805. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2010.02.005.
9. **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. 21, Issue 5. – P. 5373-5378. – DOI: 10.1364/OE.21.005373.
10. **Cheremkhin, P.A.** QR code optical encryption using spatially incoherent illumination / P.A. Cheremkhin, V.V. Krasnov, V.G. Rodin, R.S. Starikov // *Laser Physics Letters*. – 2017. – Vol. 14, Issue 2. – 026202. – DOI: 10.1088/1612-202X/aa5242.
11. **Lesem, L.B.** The kinoform: A new wavefront reconstruction device / L.B. Lesem, P.M. Hirsch, J.A. Jordan // *IBM Journal of Research and Development*. – 1969. – Vol. 13, Issue 2. – P. 150-155. – DOI: 10.1147/rd.132.0150.
12. **Котляр, В.В.** Кодирование дифракционных оптических элементов методом локального фазового скачка / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, А.С. Мелехин, В.А. Соيفер // *Компьютерная оптика* – 1999. – № 19. – С. 54-64.
13. **Qu, W.** Precise design of two-dimensional diffractive optical elements for beam shaping / W. Qu, H. Gu, Q. Tan, G. Jin // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54(21). – P. 6521-6525. – DOI: 10.1364/AO.54.006521.
14. **Хонина, С.Н.** Формирование лазерных пучков Эйри с помощью бинарно-кодированных дифракционных оптических элементов для манипулирования микрочастицами / С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика* – 2009. – Т. 33, № 2. – С. 138-146.
15. **Rahlves, M.** Flexible, fast, and low-cost production process for polymer based diffractive optics / M. Rahlves, M. Rezem, K. Boroz // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23(3). – P. 3614-3622. – DOI: 10.1364/OE.23.003614.
16. **Janesick, J.** *Scientific charge-coupled devices* / J. Janesick. – Bellingham, Washington: SPIE Press, 2001. – 906 p. – ISBN: 0-8194-3698-4.
17. **Арсенин, В.Я.** Методы решения некорректных задач / В.Я. Арсенин, А.Н. Тихонов. – М.: Наука, 1979. – 288 с.
18. **Cheremkhin, P.A.** Application of input amplitude masks in image encryption with spatially incoherent illumination for increase of decrypted images signal-to-noise ratio / P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev, V.V. Krasnov, D.Y. Molodtsov, V.G. Rodin, A.V. Shifrina // *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 9889. – 988911. – DOI: 10.1117/12.2227596.
19. **Ярославский, Л.П.** Методы цифровой голографии / Л.П. Ярославский, Н.С. Мерзляков. – М.: Наука, 1977. – 192 с.
20. **Saleh, B.E.A.** *Fundamentals of photonics* / B.E.A. Saleh, M.C. Teich. – New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, Inc.; 1991. – ISBN: 978-0-471-83965-1.
21. **Fienup, J.R.** Invariant error metrics for image reconstruction / J.R. Fienup, // *Applied Optics*. – 1997. – Vol. 36(32). – P. 8352-8357. – DOI: 10.1364/AO.36.008352.

Сведения об авторах

Евтихий Николай Николаевич, д.ф.-м.н., проф., заведующий кафедрой лазерной физики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Область научных интересов: обработка сигналов и изображений, оптическая обработка информации, оптика, лазерная физика, распознавание образов. E-mail: k1121@mail.ru.

Краснов Виталий Вячеславович, к.ф.-м.н., доцент, Институт лазерных и плазменных технологий, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Область научных интересов: оптическое кодирование, синтез дифракционных оптических элементов, восстановление волнового фронта, обработки сигналов, шумы камеры. E-mail: vitaly.krasnov@mail.ru.

Черёмхин Павел Аркадьевич, к.ф.-м.н., доцент, кафедра лазерной физики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Область научных интересов: цифровая голография, шу-

мы камер, дифракционная оптика, восстановление волнового фронта, обработка сигналов и изображений, аналоговые оптические линии связи. E-mail: cheremhinpavel@mail.ru.

Шифрина Анна Владимировна, магистрант, кафедра физики твердого тела и наносистем, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Область научных интересов: информационная оптика, обработка сигналов, оптическое кодирование. E-mail: avshifrina@gmail.com.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 26 декабря 2016 г. Окончательный вариант – 19 мая 2017 г.

APPLICATION OF ADDITIONAL INPUT AMPLITUDE MASKS IN SCHEMES OF OPTICAL IMAGE ENCRYPTION WITH SPATIALLY INCOHERENT ILLUMINATION

N.N. Evtikhiev¹, V.V. Krasnov¹, P.A. Cheremkhin¹, A.V. Shifrina¹
¹National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

Abstract

Application of additional input amplitude masks in schemes of optical image encryption with spatially incoherent illumination is proposed. The masks are used for increasing the signal-to-noise ratio in decrypted images and enhancing the security of encrypted images. Two kinds of additional input amplitude masks were developed and tested. The first one is a rectangular grating mask. Its application results in duplications of the original image spectrum at high spatial frequencies corresponding to mask's frequency. The second one is a random mask. Its application results in the distribution of each component of the original image spectrum throughout the entire Fourier spectrum. Computer simulations of optical encryption with spatially incoherent illumination and additional input amplitude masks were performed. Increase in signal-to-noise ratio of > 2 times was achieved, as well as attaining the enhanced security of the encrypted image.

Keywords: optical encryption, spatially incoherent illumination, amplitude masks, optical convolution.

Citation: Evtikhiev NN, Krasnov VV, Cheremkhin PA, Shifrina AV. Application of additional input amplitude masks in schemes of optical image encryption with spatially incoherent illumination. *Computer Optics* 2017; 41(3): 391-398. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-391-398.

Acknowledgements: The work was partially funded by Russian Science Foundation (RSF), grant No. 14-19-01751.

References

- [1] Refregier P, Javidi B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding. *Opt Lett* 1995; 20(7): 767-769. DOI: 10.1364/OL.20.000767.
- [2] Unnikrishnan G, Joseph J, Singh K. Optical encryption by double-random phase encoding in the fractional Fourier domain. *Opt Lett* 2000; 25(12): 887-889. DOI: 10.1364/OL.29.001584.
- [3] Krasnov VV, Starikov SN, Starikov RS, Cheremkhin PA. Optical encryption of arrays of binary digits in spatially incoherent light. *Russ Phys J* 2016; 58(10): 1394-1401. DOI: 10.1007/s11182-016-0661-7.
- [4] Evtikhiev NN, Starikov SN, Cheryomkhin PA, Krasnov VV, Rodin VG. Method of optical image coding by time integration. *Proc SPIE* 2012; 8429: 84291P. DOI: 10.1117/12.922540.
- [5] Cathey WT, Dowski ER. New paradigm for imaging systems. *Appl Opt* 2002; 41(29): 6080-6092. DOI: 10.1364/AO.41.006080.
- [6] Cheremkhin PA, Evtikhiev NN, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov SN. Generation of keys for image optical encryption in spatially incoherent light aimed at reduction of image decryption error. *Proc of SPIE* 2014; 9131, 913125. DOI: 10.1117/12.2052723.
- [7] Li J, Shen L, Pan Y, Li R. Optical image encryption and hiding based on a modified Mach-Zehnder interferometer. *Optics Express* 2014; 22(4): 4849-4860. DOI: 10.1364/OE.22.004849.
- [8] Liu Z, Dai J, Sun X, Liu S. Color image encryption by using the rotation of color vector in Hartley transform domains. *Optics and Lasers in Engineering* 2010; 48(7): 800-805. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2010.02.005.
- [9] Barrera JF, Mira A., Torroba R. Optical encryption and QR codes: Secure and noise-free information retrieval. *Optics Express* 2013; 21(5): 5373-5378. DOI: 10.1364/OE.21.005373.
- [10] Cheremkhin PA, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov RS. QR code optical encryption using spatially incoherent illumination. *Laser Physics Letters* 2017; 14(2): 026202. DOI: 10.1088/1612-202X/aa5242.
- [11] Lesem LB, Hirsch PM, Jordan JA. The kinoform: A new wavefront reconstruction device. *IBM J Res Dev* 1969; 13(2): 150-155. DOI: 10.1147/rd.132.0150.
- [12] Kotlyar VV, Khonina SN. Encoding of optical diffractive elements by method of local surge of phase [In Russian]. *Computer Optics* 1999; 19: 54-64.
- [13] Qu W, Gu H, Tan Q, Jin G. Precise design of two-dimensional diffractive optical elements for beam shaping. *Appl Opt* 2015; 54(21): 6521-6525. DOI: 10.1364/AO.54.006521.
- [14] Khonina SN, Skidanov RV, Moiseev OY. Airy laser beams generation by binary-coded diffractive optical elements for microparticles manipulation [In Russian]. *Computer Optics* 2009; 33(2): 138-146.
- [15] Rahlves M, Rezem M, Boroz K. Flexible, fast, and low-cost production process for polymer based diffractive op-

- tics. Optics Express 2015; 23(3): 3614-3622. DOI: 10.1364/OE.23.003614.
- [16] Janesick J. Scientific Charge-Coupled Devices. Bellingham, Washington: SPIE Press; 2001. ISBN: 0-8194-3698-4.
- [17] Arsenin VY, Tikhonov AN. Methods for solving of incorrect problems [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher, 1979.
- [18] Cheremkhin PA, Evtikhiev NN, Krasnov VV, Molodtsov DY, Rodin VG, Shifrina AV. Application of input amplitude masks in image encryption with spatially incoherent illumination for increase of decrypted images signal-to-noise ratio. Proc SPIE 2016; 9889: 988911. DOI: 10.1117/12.2227596.
- [19] Yaroslavsky LP, Merzliakov YS. Methods of digital holography [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher, 1977.
- [20] Saleh BEA, Teich MC. Fundamentals of photonics. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, Inc, 1991. ISBN: 978-0-471-83965-1.
- [21] Fienup, JR. Invariant error metrics for image reconstruction. Appl Opt 1997; 36(32): 8352-8357. DOI: 10.1364/AO.36.008352.

Authors' information

Nikolay Nikolaevich Evtikhiev, PhD, prof., Head of Laser Physics department, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Research interests: signal and image processing, optical information processing, optics, laser physics, pattern recognition. E-mail: k1121@mail.ru.

Vitaly Vyacheslavovich Krasnov, PhD, Associate Professor, Institute of Laser and Plasma Technologies, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Research interests: optical encryption, diffraction optical elements synthesis, wavefront reconstruction, signal processing, camera noises. E-mail: vitaly.krasnov@mail.ru.

Pavel Arkadevich Cheremkhin, PhD, Associate Professor, Laser Physics department, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Research interests: digital holography, camera noises, diffraction optics, wavefront reconstruction, signal and image processing, analog optical links. E-mail: cheremhinpavel@mail.ru.

Anna Vladimirovna Shifrina, student, Physics department of Solid State and Nanosystems, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Research interests: information optics, signal processing, optical encryption. E-mail: avshifrina@gmail.com.

Received December 26, 2016. The final version – May 19, 2017.