

УДК 535.8, 004.932, 004.942

МНОГОФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

© Н. Н. Евтихийев, В. В. Краснов, Р. С. Стариков, А. В. Шифрина

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское шоссе, 31
E-mail: avshifrina@gmail.com*

Предложена многофакторная модель системы оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. Данная модель учитывает влияние шумов регистрирующего фотосенсора, изменения растров изображений при прохождении через оптическую систему, паразитной засветки и шумов синтеза кодирующего дифракционного оптического элемента на качество декодированного изображения. Показано, что предложенная модель хорошо соотносится с оптическим экспериментом (ошибка декодирования отличается не более чем на 6 %).

Ключевые слова: оптическое кодирование, пространственно-некогерентное освещение, дифракционный оптический элемент, оптическая свёртка, численное декодирование, компьютерное моделирование.

DOI: 10.15372/AUT20200209

Введение. В настоящее время исследования в области кодирования информации привлекают всё большее внимание научного сообщества. Один из популярных подходов — оптическое кодирование [1–19]. По сравнению с более распространённым цифровым кодированием оно имеет ряд потенциальных преимуществ: более высокие криптостойкость и быстродействие, обусловленные параллелизмом оптического излучения и двумерностью кодирующих ключей, возможность кодирования данных непосредственно в процессе их регистрации. Оптическое кодирование применяется для кодирования монохромных и цветных изображений [12], а также цифровой информации [5], в том числе QR-кодов [13, 15, 19].

Наиболее распространённым является метод оптического кодирования с использованием двух случайных фазовых масок [6]. Метод реализуется на базе 4F-схемы пространственно-частотной фильтрации [20]. Первая маска накладывается непосредственно на входное изображение и обеспечивает белый спектр входного светового распределения. Вторая фазовая маска, находящаяся в фурье-плоскости, формирует кодирующий отклик системы. В выходной плоскости формируется оптическая свёртка входного амплитудно-фазового светового распределения с функцией рассеяния точки (ФРТ) второй маски. Так как входное распределение содержит не только амплитудную, но и фазовую составляющие, необходимо использовать полностью когерентное освещение. Если применяемые случайные маски статистически не зависят друг от друга, то закодированное изображение представляет собой стационарный белый шум, что обеспечивает высокую криптостойкость.

Существует множество модификаций метода кодирования двумя случайными фазовыми масками, применяющих, как правило, другие оптические преобразования [1–3, 12, 14, 16, 17]. Все они, как и оригинальная методика, работают с пространственно-когерентным монохроматическим освещением, что приводит к появлению спекл-шума в кодированных изображениях и низкому отношению сигнал/шум в декодированных [19].

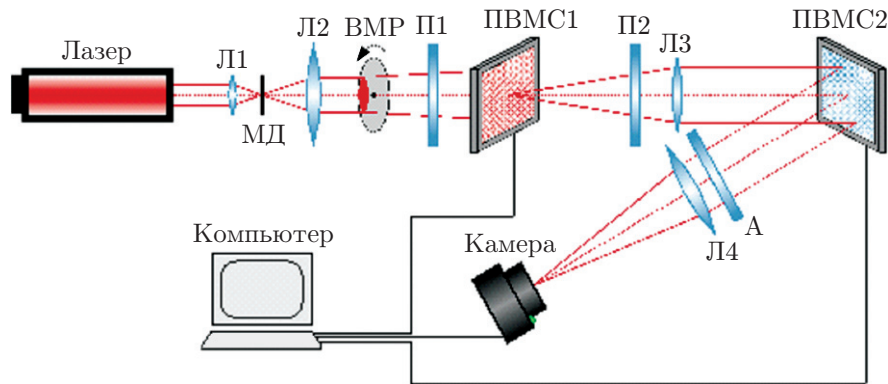


Рис. 1. Пример схемы аппаратной реализации оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением

Кроме того, требуется регистрация не только амплитудного, но и фазового световых распределений, т. е. необходимо использовать голографическую схему записи. Это значительно усложняет аппаратные реализации подобных схем.

Для устранения недостатков, присущих когерентным методам, вместо полностью когерентного освещения может быть применено пространственно-некогерентное [7–9]. В этом случае спекл-шум не формируется, а фазовая составляющая кодированного изображения не содержит полезной информации (она находится лишь в распределении амплитуд) и не требует регистрации, соответственно не требуется голографическая схема записи. Недостатком является невозможность использования входной фазовой маски, что снижает криптоустойчивость такого подхода [10], что частично может компенсироваться с помощью дополнительных случайных амплитудных масок [11].

Оптическое кодирование математически описывается операцией свёртки кодируемого изображения с ФРТ кодирующего дифракционного оптического элемента (ДОЭ), которая выполняет роль ключа кодирования. Для декодирования используется инверсный фильтр с регуляризацией по Тихонову [21], основанный на этой ФРТ.

Применявшаяся в [11] численная модель оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением давала возможность лишь приблизительно оценивать результаты и судить о характерах зависимостей, так как из всех факторов учитывала лишь влияние шумов регистрирующего фотосенсора. Соответственно необходимо создать более точную модель, которая позволила бы получать результаты, максимально близкие к результатам оптических экспериментов. Такая модель должна учесть все основные факторы, влияющие на процесс оптического кодирования, что позволит уже на этапе проектирования системы подобрать оптимальные значения её параметров.

Процесс оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. Пример схемы оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением [19], основанной на 4F-архитектуре, представлен на рис. 1.

В качестве источника освещения используется лазер. Линзы Л1 и Л2 формируют коллимированный пучок излучения, который проходит через микродиафрагму (МД). Вращающийся матовый рассеиватель (ВМР) разрушает пространственную когерентность излучения. Кодируемое изображение отображается амплитудным жидкокристаллическим (ЖК) пространственно-временным модулятором света 1 (ПВМС1). Поляризаторы П1, П2 и анализатор А обеспечивают правильное функционирование ЖК ПВМС. На фазовый ЖК ПВМС2 выводится кодирующий фазовый ДОЭ — киноформ [22]. Фотосенсор камеры регистрирует кодированное изображение — свёртку кодируемого изображения и ФРТ ДОЭ, после чего оно передаётся на компьютер.

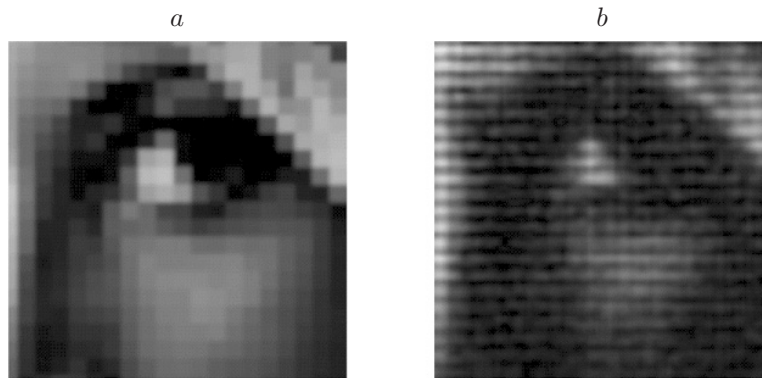


Рис. 2. Преобразование растра исходного изображения при его регистрации фотосенсором: *a* — фрагмент изображения при его выводе на ПВМС, *b* — тот же фрагмент, зарегистрированный камерой

Ранее для моделирования процесса оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением использовалась численная модель, учитывающая только шумы фотосенсора [11]. Процесс регистрации вносит существенный вклад в искажение кодированного изображения и, как следствие, приводит к понижению его качества. Однако, как показало сравнение результатов оптических и численных экспериментов, учёта одних только шумов фотосенсора недостаточно — расхождение в значениях превышает 100 %. Так, значение нормированного среднеквадратичного отклонения (НСКО) [23] декодированного изображения от исходного для оптического эксперимента составило 0,19, для численного — 0,05. В обоих случаях для кодирования использовались изображения и ключи с одинаковыми параметрами (изображения полутоновые, 256 градаций яркости, размер 128×128 отсчётов). Ключи кодирования: нормированная средняя энергия (НСЭ) 0,005, т. е. отношение средней энергии ключа кодирования к его максимальному значению, размер 64×64 отсчёта.

Учёт основных факторов, влияющих на процесс оптического кодирования.

Помимо шумов фотосенсора, на качество декодированного изображения оказывают влияние следующие факторы.

1. Преобразование растров отклика кодирующего ДОЭ и исходного изображения при их регистрации фотосенсором. При построении изображения оптической системой одному пикселю входного изображения соответствует группа пикселей фотосенсора. На рис. 2 представлены идентичные фрагменты исходного изображения при его выводе на ПВМС до (рис. 2, *a*) и после (рис. 2, *b*) регистрации камерой. В данном случае на 1 пиксель входного изображения приходится блок из приблизительно 6×6 пикселей фотосенсора.

2. Оптические aberrации. При построении изображения системой изображение точки размывается в соответствии с величиной aberrаций и разрешением фазового ЖК ПВМС2. Пример того, как выглядит зарегистрированная фотосенсором уединённая точка ФРТ кодирующего ДОЭ, приведён на рис. 3.

3. Шум синтеза ДОЭ. Как отмечено выше, ключом кодирования является отклик кодирующего ДОЭ. Синтез ДОЭ осуществляется итерационным методом Герчберга — Сэкстона с локализацией шума [24]. Шум синтеза проявляется как некоторая зашумлённость отклика кодирующего ДОЭ и соответственно кодированного изображения. Это приводит к падению отношения сигнал/шум в декодированных изображениях. При увеличении плотности точек, т. е. НСЭ ключа кодирования, растёт величина шума синтеза.

4. Паразитная засветка. При прохождении через оптическую систему излучение взаимодействует с различными оптическими элементами и частично отражается от них. Часть

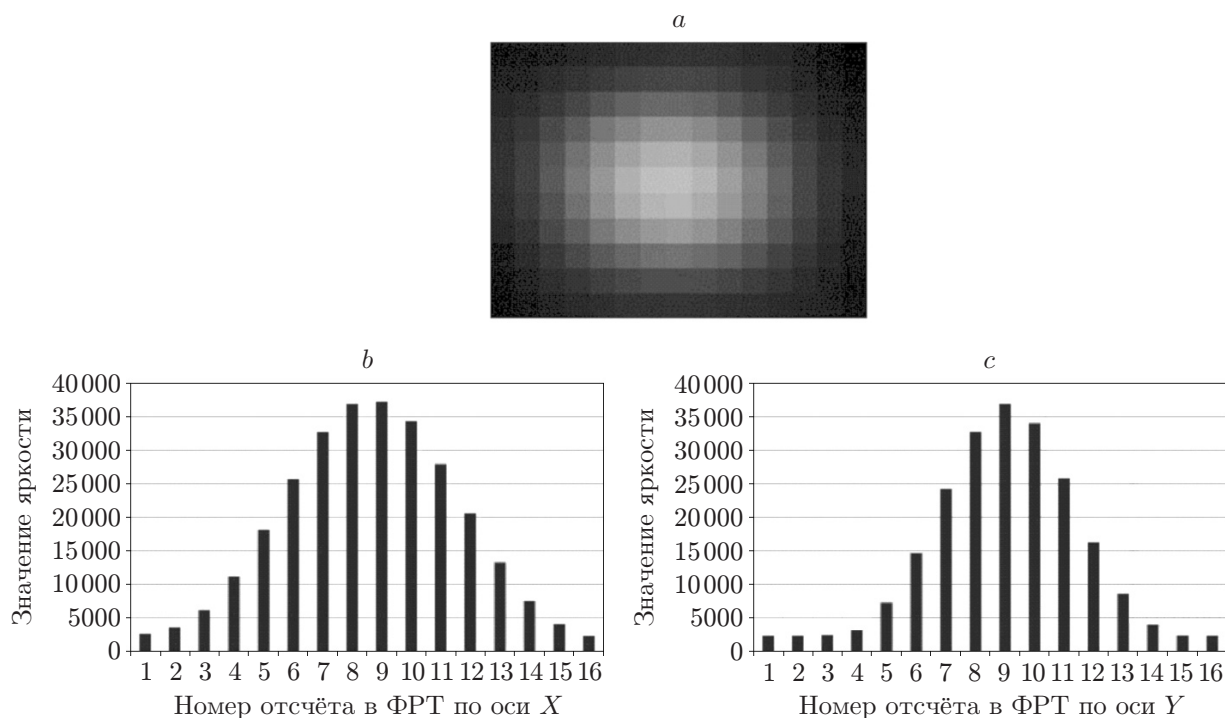


Рис. 3. Уединённая точка ФРТ кодирующего ДОЭ: зарегистрированное изображение (*a*) и его сечения по X (*b*) и Y (*c*)

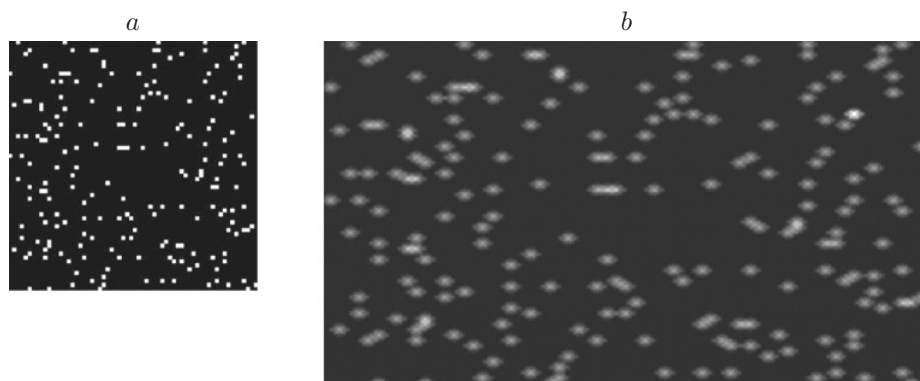


Рис. 4. Ключ кодирования: исходный (*a*), смоделированный (*b*)

этого излучения попадает на фотосенсор, приводя к появлению фоновой засветки кодированного изображения. Другим фактором является искажение ДОЭ при его отображении на фазовом ЖК ПВМС из-за флуктуаций фазового сдвига [25].

Параметры численных экспериментов. Для численных экспериментов по моделированию процесса оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением использовались:

— набор из 11 полутоновых изображений размером 512×512 отсчётов с 256 градациями яркости;

— набор из 38 ключей кодирования размером 64×64 отсчёта с 2 градациями яркости (бинарные); НСЭ ключей лежала в диапазоне 0,005–0,5 (по два ключа на каждое значение энергии);

— шумовые характеристики цифровой камеры MegaPlus II ES11000, измеренные в [26].

Влияние факторов, введённых в новую модель, учитывалось как:

1. Несовпадение растров: увеличение количества отсчётов в кодируемом изображении в 2 раза по оси X и в 2 раза по оси Y ; в ключе кодирования — в 3 раза по оси X и 5,33 раза по оси Y . Разное увеличение ключа кодирования для осей X и Y обусловлено разным количеством отсчётов в ПВМС по этим осям, на который он выводится (разрешение его матрицы 1920×1080 отсчётов).

2. Оптические aberrации: фильтрация ключа кодирования с использованием матрицы размытия, рассчитанной по экспериментальным данным (см. рис. 3).

3. Шум синтеза ДОЭ: применение вместо исходного ключа кодирования ФРТ кодирующего ДОЭ, синтезированного на основе данного ключа методом Герчберга — Сэкстона с локализацией шума [24]. Количество итераций ограничивалось 1000, так как существенного снижения шума синтеза далее не происходило.

4. Паразитная засветка: использование линейной модели засветки, интенсивность которой P зависела от НСЭ ключа кодирования: $P = C \times \text{НСЭ}$. Коэффициент зависимости C был рассчитан по экспериментальным данным (см. рис. 3) и составил 1,4. Величина P измерялась в долях максимальной яркости зарегистрированного изображения.

Результаты численных экспериментов. Операции оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением и последующего численного декодирования моделировались следующим образом:

1. Изменение размеров кодируемого изображения от 512×512 до 1024×1024 отсчётов для учёта преобразования его раstra при регистрации.

2. Синтез кодирующего ДОЭ на основе выбранного ключа кодирования. Размер ДОЭ 1920×1080 отсчётов взят исходя из количества отсчётов фазового ПВМС2.

3. Изменение размеров ФРТ синтезированного ДОЭ с 64×64 до 342×192 отсчётов для учёта преобразования его раstra при прохождении через оптическую систему.

4. Фильтрация импульсного отклика с использованием матрицы размытия.

5. Расчёт и наложение паразитной засветки на полученный импульсный отклик. На рис. 4 представлены примеры исходного и полученного на данном этапе ключей кодирования.

6. Расчёт закодированного изображения: свёртки кодируемого изображения, сформированного в результате выполнения пункта 1, и ключа кодирования, полученного благодаря пунктам 2—5. Кодированное изображение имеет размер 1367×1217 отсчётов.

7. Наложение шумов камеры на закодированное изображение для эмуляции процесса его регистрации фотосенсором.

8. Декодирование зашумлённого закодированного изображения с использованием инверсного фильтра, основанного на ключе кодирования, полученном в результате пунктов 2—5.

9. Расчёт НСКО декодированного изображения от исходного.

На рис. 5 представлены зависимости НСКО от НСЭ ключей кодирования при учёте влияния только шумов фотосенсора и при учёте влияния всех факторов.

Сравнение результатов оптического и численных экспериментов с использованием новой модели продемонстрировано на рис. 6.

Так, для декодированного изображения, полученного в результате численного эксперимента с применением новой модели, значение НСКО составило 0,13 (в то время как для старой модели — 0,05), что значительно ближе к результатам оптического эксперимента 0,19.

Исходя из полученных результатов, новая модель оптического кодирования, учитывающая дополнительные факторы, позволяет точнее предсказывать поведение реальной оптической системы и может быть использована для анализа и определения требований, предъявляемых как к системе в целом, так и к отдельным её элементам.

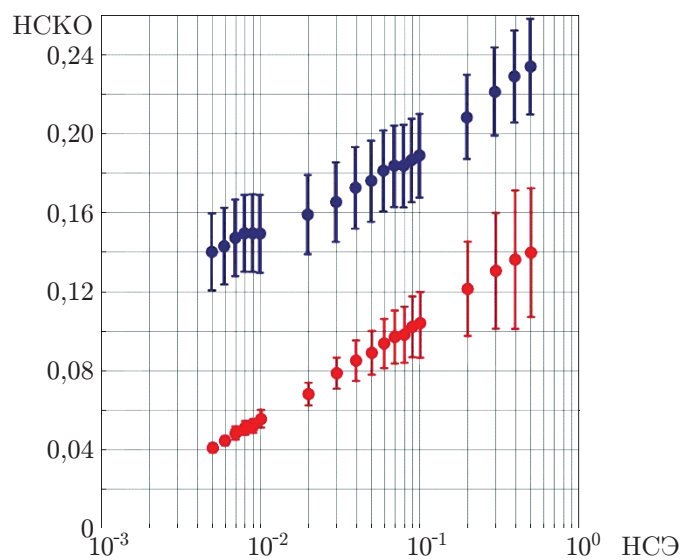


Рис. 5. Зависимость НСКО от НСЭ ключей кодирования с учётом влияния только шумов фотосенсора (красные кружки) и всех факторов (синие кружки)

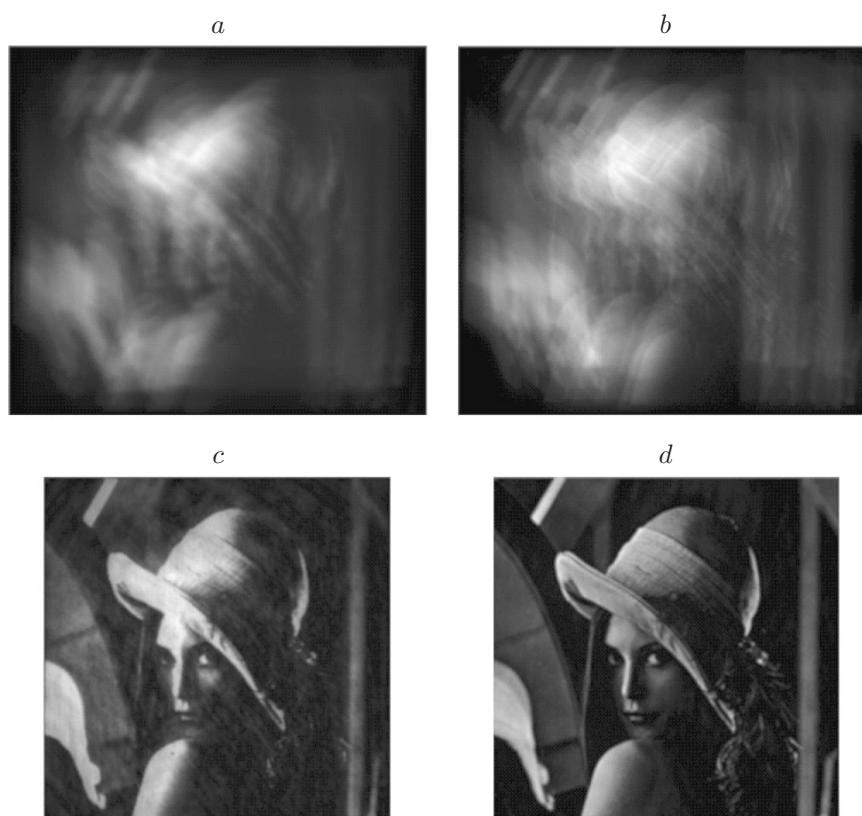


Рис. 6. Кодированные и декодированные изображения, полученные при использовании идентичных ключей кодирования: *a, c* — в оптическом эксперименте (НСКО — 0,19); *b, d* — в численном эксперименте при использовании новой модели (НСКО — 0,13)

Заключение. В данной работе предложена многофакторная модель системы оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. Модель учитывает влияние на качество декодированных изображений многих факторов: как шумов регистрирующего фотосенсора, так и изменения раstra изображений, паразитной засветки и шумов синтеза кодирующего дифракционного оптического элемента. Проведённые численные и оптические эксперименты показали, что данная модель обеспечивает адекватное соответствие оптическому эксперименту: значение нормированного среднеквадратичного отклонения декодированного изображения от исходного при моделировании составило 0,13, а в оптическом эксперименте — 0,19, что делает возможным использование модели при проектировании систем оптического кодирования информации.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00498).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Unnikrishnan G., Joseph J., Singh K.** Optical encryption by double-random phase encoding in the fractional Fourier domain // *Opt. Lett.* 2000. **25**, N 12. P. 887–889.
2. **Lin C., Shen X., Li B.** Four-dimensional key design in amplitude, phase, polarization and distance for optical encryption based on polarization digital holography and QR code // *Opt. Express.* 2014. **22**, N 17. P. 20727–20739.
3. **Liansheng S., Yin C., Bing L. et al.** Optical image encryption via high-quality computational ghost imaging using iterative phase retrieval // *Laser Phys. Lett.* 2018. **15**, N 7. 075204.
4. **Wang Z., Lv X., Wang H. et al.** Hierarchical multiple binary image encryption based on a chaos and phase retrieval algorithm in the Fresnel domain // *Laser Phys. Lett.* 2016. **13**, N 3. 036201.
5. **Krasnov V. V., Starikov S. N., Starikov R. S., Cheremkhin P. A.** Optical encryption of arrays of binary digits in spatially incoherent light // *Russ. Phys. Journ.* 2016. **58**, N 10. P. 1394–1401.
6. **Refregier P., Javidi B.** Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding // *Opt. Lett.* 1995. **20**, N 7. P. 767–769.
7. **Tajahuerce E., Lancis J., Javidi B., Andrés P.** Optical security and encryption with totally incoherent light // *Opt. Lett.* 2001. **26**, N 10. P. 678–680.
8. **Shifrina A. V., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V.** Application of input amplitude masks in scheme of optical image encryption with spatially-incoherent illumination // *Journ. Phys. Conf. Ser.* 2016. **737**, N 1. 012063.
9. **Evtikhiev N. N., Starikov S. N., Cheryomkhin P. A. et al.** Method of optical image coding by time integration // *Proc. SPIE.* 2012. **8429**. 84291P.
10. **Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V. et al.** Method of attack on schemes of optical encryption with spatially incoherent illumination // *Proc. SPIE.* 2017. **10433**. 104330B.
11. **Евтихийев Н. Н., Краснов В. В., Черёмхин П. А., Шифрина А. В.** Применение дополнительных входных амплитудных масок в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением // *Компьютерная оптика.* 2017. **41**, № 3. P. 391–398.
12. **Liu Z., Dai J., Sun X., Liu S.** Color image encryption by using the rotation of color vector in Hartley transform domains // *Opt. Lasers Eng.* 2010. **48**, N 7–8. P. 800–805.
13. **Barrera J. F., Mira A., Torroba R.** Optical encryption and QR codes: secure and noise-free information retrieval // *Opt. Express.* 2013. **21**, N 5. P. 5373–5378.

14. **Javidi B., Carnicer A., Yamaguchi M. et al.** Roadmap on optical security // Journ. Opt. 2016. **18**, N 8. 083001.
15. **Barrera J. F., Mira-Agudelo A., Torroba R.** Experimental QR code optical encryption: noise-free data recovering // Opt. Lett. 2014. **39**, N 10. P. 3074–3077.
16. **Kumar R., Bhaduri B.** Optical image encryption in Fresnel domain using spiral phase transform // Journ. Opt. 2017. **19**, N 9. 095701.
17. **Zhao M.-D., Gao X.-Z., Pan Y. et al.** Image encryption based on fractal-structured phase mask in fractional Fourier transform domain // Journ. Opt. 2018. **20**, N 4. 045703.
18. **Chen J.-X., Zhu Z.-L., Fu C. et al.** Cryptanalysis and improvement of an optical image encryption scheme using a chaotic Baker map and double random phase encoding // Journ. Opt. 2014. **16**, N 12. 125403.
19. **Cheremkhin P. A., Krasnov V. V., Rodin V. G., Starikov R. S.** QR code optical encryption using spatially incoherent illumination // Laser Phys. Lett. 2017. **14**, N 2. 026202.
20. **Гудмен Дж.** Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 365 с.
21. **Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
22. **Lesem L. B., Hirsch P. M., Jordan J. A.** The kinoform: A new wavefront reconstruction device // IBM Journ. Res. Dev. 1969. **13**, N 2. P. 150–155.
23. **Fienup J. R.** Invariant error metrics for image reconstruction // Appl. Opt. 1997. **36**, N 32. P. 8352–8357.
24. **Akahori H.** Spectrum leveling by an iterative algorithm with a dummy area for synthesizing the kinoform // Appl. Opt. 1986. **25**, N 5. P. 802–811.
25. **Bondareva A. P., Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N. et al.** Measurement of characteristics and phase modulation accuracy increase of LC SLM “HoloEye PLUTO VIS” // Journ. Phys. Conf. Ser. 2014. **536**, N 1. 012011.
26. **Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V. et al.** Modified temporal noise measurement method with automatic segmentation of non-uniform target, its accuracy estimation and application to cameras of different types // Opt. Eng. 2014. **53**, N 10. 102107.

Поступила в редакцию 22.11.2019

После доработки 11.12.2019

Принята к публикации 24.12.2019
