

ОПТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ

Оптическое кодирование QR-кодов в схеме с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрзеркальных модуляторов света

Н.Н.Евтихийев, В.В.Краснов, И.Д.Кузьмин, Д.Ю.Молодцов,
В.Г.Родин, Р.С.Стариков, П.А.Черёмхин

Впервые представлена экспериментальная реализация системы оптического кодирования информации с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрзеркальных модуляторов света. Такие модуляторы являются в настоящее время наиболее быстродействующими средствами пространственно-временной модуляции света, их скоростные характеристики обеспечивают возможность создания систем оптического кодирования данных с пропускной способностью на уровне нескольких гигабит в секунду.

Ключевые слова: оптическое кодирование, пространственно-некогерентное освещение, микрзеркальный модулятор света, оптико-цифровая система, QR-код, голограмма.

1. Введение

Привлекательность методов оптического кодирования обусловлена высокими криптостойкостью и быстродействием, которые обеспечиваются параллельностью работы оптических систем [1–11]. Многие известные системы оптического кодирования [1–4] основаны на методе кодирования двумя случайными фазовыми масками, требующем использования полностью когерентного освещения. Основная проблема таких схем заключается в малом отношении сигнал/шум на выходе [5], обусловленном спекл-шумами, присущими когерентным оптическим системам. Кроме того, из-за необходимости регистрации фазового распределения в таких системах применяются голографические методы, что существенно усложняет оптическую схему. Для устранения недостатков, присущих системам кодирования с когерентным освещением, ранее были предложены методы кодирования, основанные на использовании пространственно-некогерентного освещения [5–7]. В таких системах голографическая регистрация не требуется и отсутствует спекл-шум, а невозможность применения фазовых масок, негативно сказывающаяся на криптостойкости [8], отчасти может быть скомпенсирована использованием дополнительных амплитудных масок [9]. Применение в схемах кодирования наиболее скоростных современных микрзеркальных пространственно-временных модуляторов света (МЗ ПВМС) может обеспечить возможность кодирования потока информации на уровне нескольких Гбит/с [10]. Учитывая вышесказанное, целью настоящей работы являлась экспериментальная реализация схемы оптического кодирования с

пространственно-некогерентным освещением на базе МЗ ПВМС.

2. Особенности применения МЗ ПВМС

МЗ ПВМС обеспечивают высокую, недостижимую для ПВМС других типов, скорость ввода (частота кадра 32 кГц при разрешении в 1920×1080 пикселей), но выполняют лишь бинарную амплитудную модуляцию. В случае представления кодируемой информации в виде страниц бинарных данных такое ограничение диапазона модуляции МЗ ПВМС с точки зрения её ввода является скорее достоинством. В настоящей работе для представления входных данных использован стандартный QR-код, отличающийся удобством считывания и наличием встроенного кода коррекции ошибок [5, 11] (впрочем, может быть использован любой удобный контейнер бинарных данных). Для формирования же кодирующего отклика системы с помощью МЗ ПВМС можно использовать лишь бинарные амплитудные дифракционные оптические элементы, что приводит к известным ограничениям по сравнению, например, с киноформом [5]. В настоящей работе для формирования кодирующего отклика применены компьютерно-синтезированные бинаризованные фурье-голограммы, синтезированные стандартными методами.

3. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. В качестве источника монохроматического освещения использован неодимовый лазер с длиной волны излучения 532 нм и мощностью 200 мВт. Его излучение коллимируется и фильтруется комбинацией линз Л1, Л2 и микродиафрагмы. Пространственная когерентность разрушается вращающимся матовым рассеивателем ВМР. Схема кодирования основана на «классической» $4f$ -архитектуре. МЗ ПВМС1, используемый для ввода данных, находится в передней фокальной плоскости линзы Л3, а МЗ ПВМС2, служащий для отображения формирующих

Н.Н.Евтихийев, В.В.Краснов, И.Д.Кузьмин, Д.Ю.Молодцов, В.Г.Родин, Р.С.Стариков, П.А.Черёмхин. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: vitaly.krasnov@mail.ru

Поступила в редакцию 23 сентября 2019 г., после доработки – 20 октября 2019 г.

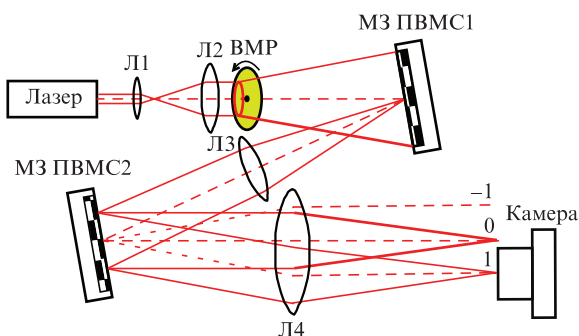


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

кодирующий отклик системы голограмм – в задней фокальной плоскости линзы Л3 и в передней фокальной плоскости линзы Л4. МЗ ПВМС (0.7 XGA DLP7000, Texas Instruments) имели 1024×768 пикселей размером 10.8×10.8 мкм каждый. Камера Canon EOS 400D с матрицей размером 3888×2592 пикселей (размер пикселя 5.7×5.7 мкм) находилась в задней фокальной плоскости линзы Л4 и осуществляла регистрацию кодированных изображений, представляющих собой оптическую свёртку изображения, выводимого на ПВМС1, с откликом голограммы, отображаемой ПВМС2.

4. Результаты эксперимента по оптическому кодированию QR-кода

В качестве объекта кодирования использовался QR-код размером 51×51 отсчёт, отображавшийся МЗ ПВМС1 и представленный на рис.2,а. Бинаризованная кодирующая фурье-голограмма, содержащая 300×300 отсчётов, выводилась на МЗ ПВМС2 и показана на рис.2,б. На рис.2,в представлен оптически зарегистрированный отклик голограммы в первом порядке дифракции. Для его регистрации на МЗ ПВМС1 выводилось чёрное поле с единственным белым пикселем в центре. Кодированное изображение, зарегистрированное камерой в зелёном цветовом канале, представлено на рис.3,а. Декодирование проводилось численно методом инверсной фильтрации с регуляризацией

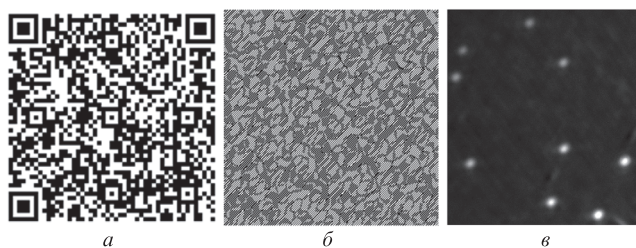


Рис.2. Объект кодирования – QR-код (а), кодирующая амплитудная фурье-голограмма (б) и её отклик в первом порядке дифракции (в).

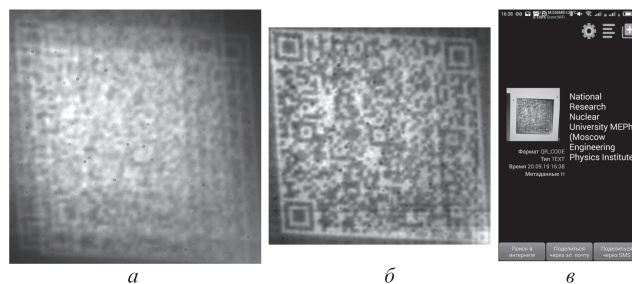


Рис.3. Кодированное (а) и декодированное (б) изображения, а также распознавание декодированного изображения смартфоном (в).

по Тихонову [12]. Декодированное изображение представлено на рис.3,б, нормированное среднее квадратическое отклонение от оригинала составило 0.17. Результат распознавания декодированного изображения смартфоном с общепотребимым программным обеспечением продемонстрирован на рис.3,в.

5. Заключение

Таким образом, осуществлена экспериментальная реализация схемы оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрзеркальных модуляторов света. Результаты экспериментов демонстрируют умеренный уровень шума: нормированное среднее квадратическое отклонение декодированного изображения от оригинала составляет 0.17, декодированный QR-код успешно распознан стандартными средствами. Полученные результаты показывают возможность применения микрзеркальных модуляторов света при построении скоростных систем оптического кодирования информации.

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

1. Refregier P., Javidi B. *Opt. Lett.*, **20**, 767 (1995).
2. Rajput S., Nishchal N. *Appl. Opt.*, **51**, 1446 (2012).
3. Markman A., Wang J., Javidi B. *Optica*, **1**, 332 (2014).
4. Situ G., Zhang J. *Opt. Lett.*, **29**, 1584 (2004).
5. Cheremkhin P., Krasnov V., Rodin V., Starikov R. *Las. Phys. Lett.*, **14**, 026202 (2017).
6. Краснов В., Стариков С., Стариков Р., Черёмхин П. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **58**, 29 (2016).
7. Tajahuerce E., Lancis J., Javidi B., Andrés P. *Opt. Lett.*, **26**, 678 (2001).
8. Cheremkhin P., Evtikhiev N., Krasnov V., Rodin V., Shifrina A. *Proc. SPIE*, **10433**, 104330B (2017).
9. Евтихийев Н., Краснов В., Черёмхин П., Шифрина А. *Комп. опт.*, **41**, 391 (2017).
10. Bondareva A., Cheremkhin P., Krasnov V., Rodin V., Starikov R., Starikov S. *Proc. SPIE*, **9648**, 96480S (2015).
11. Barrera J., Mira A., Torroba R. *Opt. Express*, **21**, 5373 (2013).
12. Арсенин В., Тихонов А. *Методы решения некорректных задач* (М.: Наука, 1979).