

Оптическое кодирование изображений с временным интегрированием с использованием коммерческой фотокамеры и жидкокристаллического монитора

В. В. Краснов, С. Н. Стариков, П. А. Черёмхин

Кафедра лазерной физики

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31*

Описывается реализация метода оптического кодирования изображений с временным интегрированием с использованием коммерческой фотокамеры и ЖК монитора. Приводятся результаты экспериментов по оптическому кодированию тестовых изображений и их численному восстановлению. Данный метод может быть использован для определения достижимых характеристик в методах оптического кодирования с применением дифракционных оптических элементов, а также как независимый метод оптического кодирования.

Ключевые слова: временное интегрирование, оптическое кодирование, функция рассеяния точки (ФРТ).

1. Введение

Методы оптического кодирования информации [1–3] имеют такие преимущества перед электронными кодирующими методами как высокое быстродействие, отсутствие побочных сигналов и защищённость от помех в радиодиапазоне. В настоящее время широко распространены способы оптического кодирования с использованием дифракционных оптических элементов (ДОЭ), в которых кодирование осуществляется при прохождении излучения от кодируемого объекта через ДОЭ, в результате чего образуется свёртка изображения объекта с импульсным откликом ДОЭ [4, 5]. Такие способы кодирования применяется не только в криптографии, но и для увеличения глубины резкости [6], устранения хроматических aberrаций [7], снижения массы и габаритов оптических систем [8]. При работе с ДОЭ как правило существуют определённые требования к временной (иногда и пространственной) когерентности, кроме того ДОЭ могут быть сложны и дороги в изготовлении. В данной работе реализован метод оптического кодирования изображений без применения ДОЭ. Здесь свёртка осуществляется временным интегрированием перемещающегося относительно фотосенсора по некоторой траектории изображения объекта. Такой метод оптического вычисления свёртки не нов и используется, например, в некогерентных акустооптических корреляторах с временным интегрированием [9–11], однако для задач оптического кодирования такой метод ранее не применялся [12]. К достоинствам данного метода можно отнести возможность оперативного изменения кодирующей траектории — функции рассеяния точки (ФРТ) и отсутствие специальных требований к когерентности освещения.

2. Описание метода оптического кодирования с временным интегрированием

Оптическое кодирование с временным интегрированием реализуется перемещением изображения объекта относительно фотосенсора. В данном методе кодирование осуществляется оптической свёрткой (рис. 1) посредством регистрации

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2011 г.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Авторы выражают благодарность с.н.с. НИЯУ МИФИ Родину В.Г. за помощь и ценные обсуждения при подготовке и проведении этой работы.

фотоприёмником перемещающегося кодируемого изображения f по дискретной кодирующей траектории (кодирующей ФРТ) — матрице, состоящей из нулей и единиц, h , являющейся изображением кодирующей траектории:

$$g(i, j) = \sum_{m=1}^M f(i - i_m, j - j_m) = \sum_{i_1=1}^N \sum_{j_1=1}^N f(i_1, j_1) h(i - i_1, j - j_1) = f(i, j) \otimes h(i, j), \quad (1)$$

где i_m, j_m — индексы, соответствующие координатам m -го ненулевого элемента матрицы h ; M — количество точек траектории (ненулевых элементов матрицы h); i, j — индексы, соответствующие координатам отсчётов изображения. При этом время нахождения изображения объекта в каждой точке траектории одинаково.



Рис. 1. Схема процесса оптического кодирования с временным интегрированием

Таким образом, осуществляется дискретная свёртка кодируемого изображения f и изображения траектории h . Ввиду отсутствия ДОЭ данный метод может быть использован для отработки схемы кодирования с дифракционным оптическим элементом в предположении идеального ДОЭ.

Кодированное изображение, как и в случае при кодировании с использованием ДОЭ, является свёрткой кодируемого изображения и кодирующей ФРТ. Восстановление в данном случае может выполняться методами деконволюции и является классической обратной задачей: зная внесённое в изображение искажение, требуется найти обратное искажение для его компенсации. Задача восстановления изображений является некорректной, так как инверсное решение может не существовать, не являться единственным или устойчивым. Дефекты оптических систем и шумы фотосенсоров усложняют поиск обратного (восстанавливающего) искажения. Это приводит к искажениям и шумам в восстановленном изображении.

Процесс кодирования (см. выражение (1)) при наличии аддитивных шумов описывается уравнением:

$$g(i, j) = f(i, j) \otimes h(i, j) + n(i, j), \quad (2)$$

где g — кодированное изображение, f — исходное изображение, h — функция рассеяния точки (ФРТ) и n — аддитивный шум, i, j — индексы, соответствующие координатам отсчётов изображений.

В фурье-плоскости уравнение (2) имеет вид:

$$G(u, v) = F(u, v) \times H(u, v) + N(u, v), \quad (3)$$

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:

$$F'(u, v) \approx \frac{G(u, v)}{H(u, v)} = G(u, v) \times Y(u, v), \quad (4)$$

где $Y(u, v) = 1/H(u, v)$ — восстанавливающий инверсный фильтр. Поэлементное перемножение фурье-спектра кодированного изображения и восстанавливающего фильтра компенсирует внесённое искажение и позволяет получить фурье-спектр исходного изображения.

В данной работе для восстановления применялся инверсный фильтр с регуляризацией по Тихонову [13]. В качестве сглаживающей функции использовалась константа — максимум спектра мощности ФРТ:

$$Y(u, v, \alpha) = \frac{|H(u, v)|^*}{|H(u, v)|^2 + \alpha \cdot \max(|H(u, v)|^2)}, \quad (5)$$

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

3. Экспериментальная установка оптического кодирования изображений с временным интегрированием

В данной работе оптическое кодирование с временным интегрированием осуществлялось регистрацией цифровой камерой кодируемого изображения, перемещающегося относительно фотосенсора по траектории кодирующей ФРТ.

3.1. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Видеоряд, состоящий из кадров с кодируемым монохромным изображением, воспроизводится компьютером на мониторе Samsung SyncMaster 713BM Plus, отобранном в результате предварительных экспериментов, с разрешением 1280×1024 пикселей размером $0,264 \times 0,264$ мм², контрастностью в красном канале 2000:1, временем реакции матрицы 5 мс. Изображение выводимого на мониторе видеоряда регистрируется цветной цифровой фотокамерой Canon EOS 400D с фотосенсором 10,5 млн. пикселей размером $5,7 \times 5,7$ мкм², 12-битным АЦП. Зарегистрированное изображение представляет собой кодированное изображение. Регистрируемые изображения сохранялись на компьютере в виде необработанных (raw) файлов для получения с помощью конвертера DCRAW [14] необработанных данных с фотосенсора [4] с линейным динамическим диапазоном 65,5 дБ. Для восстановления исходного изображения использовались данные только из красного цветового канала камеры (1953×1301 пикселей) в связи с наилучшей контрастностью монитора в этом канале. Подготовка видеоряда, обработка и восстановление кодированного изображения осуществлялась на компьютере Intel Core 2 Duo 2,6 Гц с 2 Гб RAM.

Видеоряд создавался из кадров с кодируемым изображением, находящимся в положениях на экране, соответствующих координатам ненулевых отсчётов произвольной кодирующей ФРТ, количество кадров определяется количеством ненулевых отсчётов ФРТ. Далее видеоряд подвергался сжатию кодеком без потерь Huffyuv [15] для уменьшения битрейта видеоряда и увеличения скорости его воспроизведения. Созданный видеоряд воспроизводится с отключённой пост-обработкой.

На данной установке возможно кодирование монохромных полутоновых изображений с суммарным числом отсчётов кодируемого изображения и кодирующей

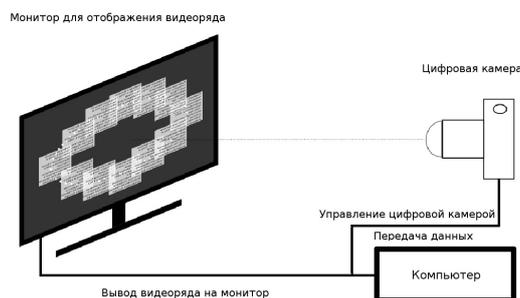


Рис. 2. Схема экспериментальная установка для оптического кодирования изображений с временным интегрированием

ФРТ до 1280×1024 со скоростью до 30 ненулевых отсчётов бинарной ФРТ в секунду.

3.2. Выбор монитора для установки

Контрастность монитора, используемого в установке, является важным параметром, так как при низкой контрастности темновая засветка монитора вне кодируемого изображения приводит к искажениям формируемой свёртки, которая для каждой точки кодирующей траектории неиспользуемой области экрана вне кодируемого изображения оказывается различной. Это приводит при восстановлении к падению качества восстанавливаемого изображения. В связи с этим при создании установки был проведён отбор имеющихся мониторов по этому критерию.

Так как в каждом цветовом канале регистрирующей камеры с байеровским массивом светофильтров контрастность монитора различна, необходимо было измерить контрастности мониторов во всех цветовых каналах камеры. Измерение проводилось следующим образом — тестовое изображение (белый квадрат на чёрном фоне) выводилось исследуемым монитором и регистрировалось камерой Canon EOS 400D, используемой в установке. При этом экспозиция подбиралась таким образом, чтобы сигнал в анализируемом цветовом канале занимал весь линейный динамический диапазон камеры. Для минимизации погрешности каждая экспозиция проводилась 16 раз, и результат усреднялся. Далее из усреднённого изображения извлекались данные анализируемого цветового канала камеры. По этим данным определялась средняя яркость пикселей изображений белого квадрата (максимальный уровень сигнала) и чёрного фона (минимальный уровень сигнала). Контрастность вычислялась как отношение этих величин. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Относительные погрешности измерений контрастности не превышали 0,003. В качестве относительной погрешности использовалось нормированное среднеквадратическое отклонение (СКО) контрастностей по отдельным снимкам от средней по серии.

По результатам измерений был отобран ЖК монитор Samsung SyncMaster 713BM Plus с контрастностью $(2,023 \pm 0,005) \cdot 10^3$ в красном цветовом канале камеры Canon EOS 400D.

3.3. Устранение эффекта муаровых полос

При регистрации изображений с ЖК монитора цифровой фотокамерой на полученных изображениях наблюдались крупные по сравнению с размерами пикселей камеры периодические структуры — муаровые полосы. При этом на изображениях, восстанавливаемых из кодированных, эффект муаровых полос (рис. 3,а)

Таблица 1

Результаты измерений контрастности

Мониторы	Контрастность по каналам		
	красный	зелёный	синий
AsusM5200AE	721	617	434
AsusVW202	1226	927	614
Bliss4020	703	458	313
LG Flatron 775FT	192	147	220
LG Flatron 795FT SP	398	329	410
Samsungs SM 713BM Plus	2023	1399	819

оказывается во много раз сильнее чем на изображениях, зарегистрированных камерой без кодирования.

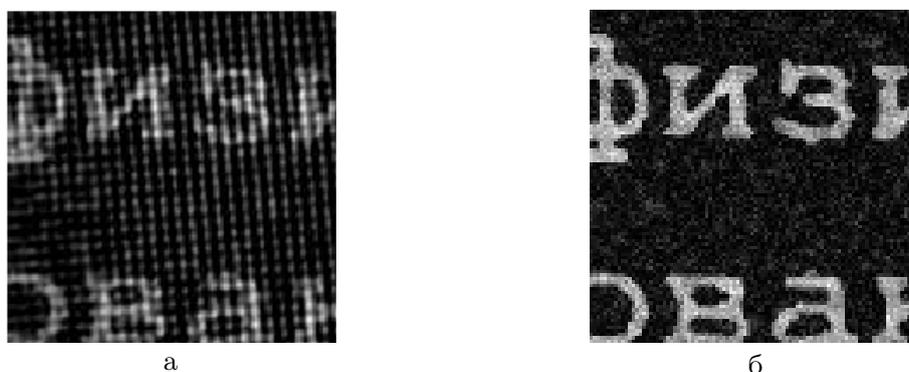


Рис. 3. Фрагменты изображений, восстановленных из кодированных: (а) с точной наводкой на резкость и (б) с подобранной дефокусировкой

Для оценки разрешающей способности оптической системы после проведения дефокусировки была проведена регистрация тестового изображения, содержащего чередующиеся белые и чёрные линии толщинами в 1, 2, 3 и 4 пикселя монитора (рис. 4). Проекция одного пикселя монитора составляла $0,93 \times 0,93$ пикселя камеры. При этом на зарегистрированном изображении линии с толщиной в 2 пикселя и более различаются полностью, а линии с толщиной в 1 пиксель лишь частично. Таким образом, было получено пространственное разрешение регистрируемых изображений в 2 пикселя монитора. При этом количество отсчётов в регистрируемых изображениях, как и ожидалось, уменьшилось в 4 раза. Следовательно, при отображении одного отсчёта изображения на 2×2 пикселя монитора, разрешение при регистрации изображений снижаться не будет. При этом для используемого в установке монитора суммарное число отсчётов кодируемого изображения и кодирующей ФРТ не может превышать значения 640×512 отсчётов.

Для количественной оценки величины муара при различных значениях дефокусировки рассчитывались дисперсии значений трёх цветовых коэффициентов для регистрируемого камерой изображения белого поля на мониторе. Цветовые коэффициенты для каждого полного байеровского пикселя представляли собой отношения сигналов пикселей в красном, втором зелёном и синем цветовых каналах к сигналу пикселя в первом зелёном канале. Поскольку структура муаровых полос отличается для различных цветовых каналов, использование дисперсии цветовых коэффициентов по полю кадра позволяет получить состоятельную оценку величины муара. При этом не имеет значения, какой из четырёх цветовых

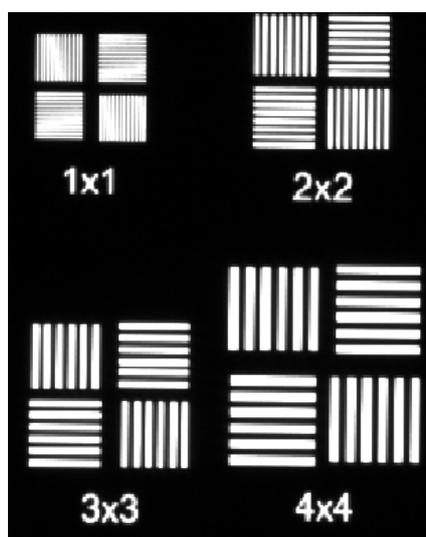


Рис. 4. Фрагмент тестового изображения, зарегистрированного камерой, при подобранной дефокусировке

каналов использовать в знаменателе цветowych коэффициентов, поведение кривых дисперсий от этого не изменяется. Величина муара для конкретного значения диаметра пятна геометрического размытия точки характеризовалась наибольшей из трёх дисперсий цветowych коэффициентов. При полном отсутствии муара дисперсия всех цветowych коэффициентов должна быть близка к нулю (с точностью до дисперсии шумов фотосенсора). Полученные зависимости дисперсий цветowych коэффициентов представлены на рис. 5.

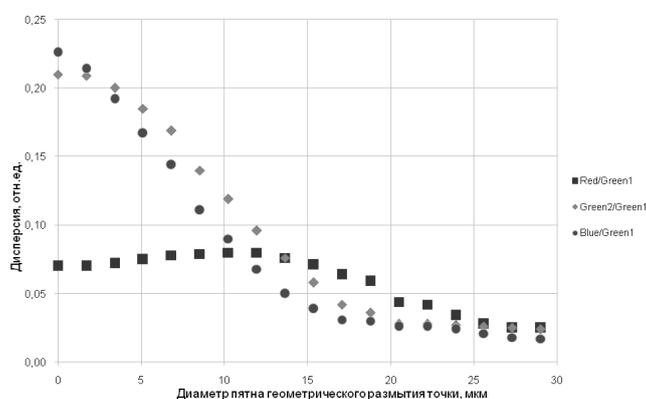


Рис. 5. Зависимость величин дисперсий цветowych коэффициентов от диаметра пятна геометрического размытия точки

Значению дефокусировки (14,3 мкм), при которой наблюдалось практически полное исчезновение муаровых полос на восстановленных изображениях, соответствует максимальный уровень дисперсии цветowych коэффициентов равный 0,08. Таким образом, полученное значение максимально допустимого уровня дисперсии позволяет выполнять быстрый подбор требуемой дефокусировки при настройке установки только измерением дисперсий цветowych коэффициентов, без проведения дополнительных экспериментов по кодированию и восстановлению тестовых изображений.

4. Эксперименты по оптическому кодированию изображений с временным интегрированием

Для проверки и отработки метода оптического кодирования с временным интегрированием были проведены эксперименты по кодированию и восстановлению изображений, содержащих текстовую и графическую информацию.

Для кодирования использовались бинарное и полутоновое изображения текста (рис. 6,а,б) размером 662×705 отсчётов и стандартное полутоновое тестовое изображение (рис. 6,в) размером 662×662 отсчётов и два измерительных изображения (рис. 6,г,д) размером 662×662 отсчётов. Используемая кодирующая ФРТ изображена на (рис. 6,е) и имела размер 214×303 отсчётов и содержала 255 ненулевых отсчётов. Частота смены кадров видеоряда составляла 15 кадров в секунду. Экспозиции при кодировании изображений и регистрации ФРТ составляли 20 секунд. Все регистрируемые изображения снимались по 16 раз и затем усреднялись для уменьшения влияния шумов камеры.

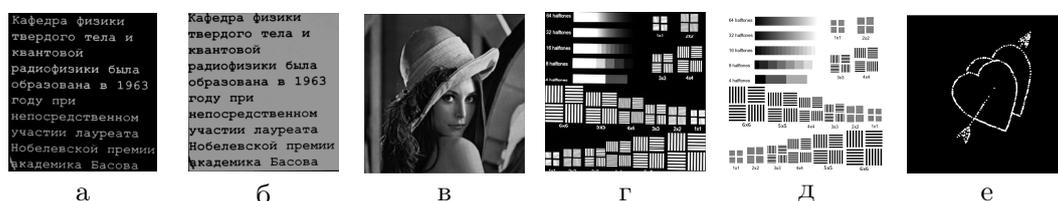


Рис. 6. Используемые для кодирования изображения (а-д) и кодирующая ФРТ (е)

Для восстановления (декодирования) кодированных изображений применялась инверсная фильтрация с регуляризацией по Тихонову (см. выражение (5)). Для расчёта восстанавливающего фильтра использовалось зарегистрированное камерой изображение ФРТ, статично отображённой на мониторе. Параметр регуляризации фильтра α варьировался при восстановлении в пределах от 1 до 10^{-7} . Для количественной оценки качества восстановления вычислялись нормированные СКО восстановленных изображений от зарегистрированного камерой исходного изображения (рис. 6,а-д).

На рис. 7–10 приведены результаты кодирования и восстановления бинарного (рис. 7, 8) и полутонового (рис. 9) изображений текста, а также стандартного полутонового тестового изображения (рис. 10). На рис. 7,а представлено полученное экспериментально кодированное изображение, являющееся результатом оптического вычисления свёртки бинарного изображения текста (см. рис. 6,а) и кодирующей ФРТ (см. рис. 6,е). Для сравнения на рис. 7,б приведён результат численного вычисления свёртки зарегистрированных камерой бинарного изображения текста и изображения кодирующей ФРТ. Результаты оптического и численного вычисления свёрток, как в данном, так и в остальных проводившихся экспериментах, согласуются между собой. Как и предполагалось, исходя из результатов численного моделирования, для использованной кодирующей ФРТ, на всех экспериментально полученных кодированных изображениях (рис. 7,а, 9,а, 10,а) информационное содержание исходных изображений (рис. 6,а-в) визуально утрачено.

Результаты численного восстановления кодированных изображений приведены на рис. 8, 9,б,в, 10,б,в. Все восстановленные изображения уверенно идентифицируются с соответствующими исходными изображениями. При этом наименьшие значения нормированных СКО восстановленных изображений от исходных лежат в диапазоне $0,27 \div 0,30$.

Для оценки разрешающей способности и качества передачи полутонов при оптическом кодировании с временным интегрированием на данной установке были

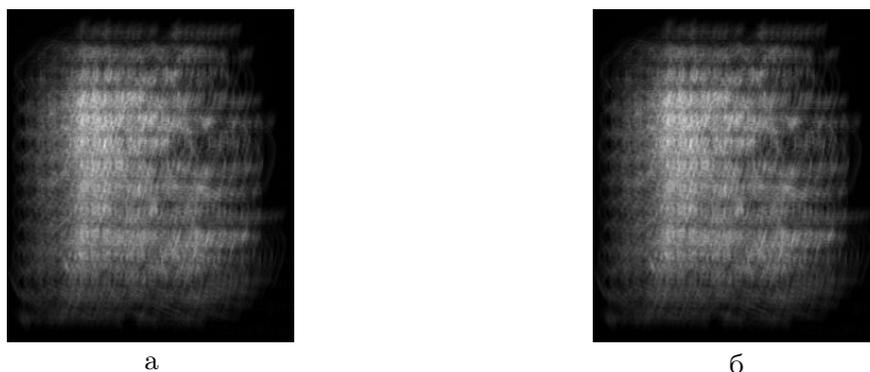
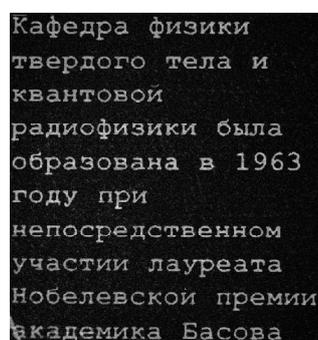
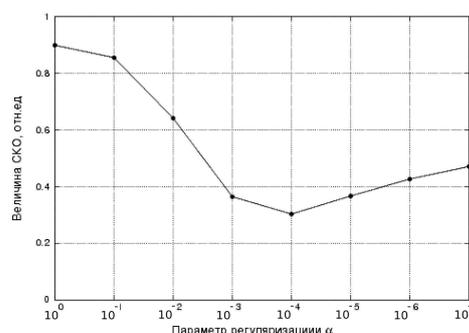


Рис. 7. Результаты оптического кодирования (а) и численного моделирования процесса кодирования (б) для бинарного изображения текста

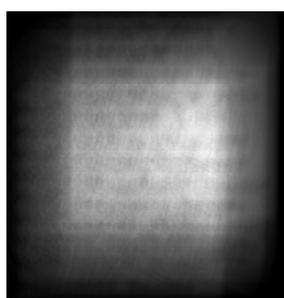


а

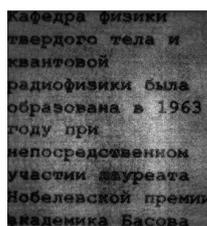


б

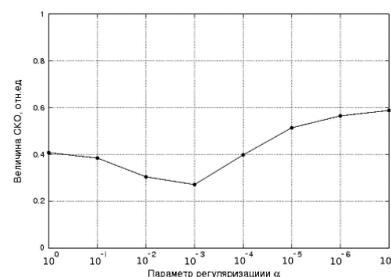
Рис. 8. Восстановление кодированного бинарного изображения текста: (а) наилучшее по СКО восстановленное изображение; (б) зависимость СКО от параметра регуляризации при восстановлении



а



б



в

Рис. 9. Кодирование и восстановление полутонового изображения текста: (а) оптически кодированное изображение; (б) наилучшее по СКО восстановленное изображение; (в) зависимость СКО от параметра регуляризации при восстановлении

проведены эксперименты по кодированию и восстановлению измерительных изображений. Измерительные изображения размером 662×662 отсчётов, показанные



Рис. 10. Кодирование и восстановление стандартного полутонового тестового изображения: (а) оптически кодированное изображение; (б) наилучшее по СКО восстановленное изображение; (в) зависимость СКО от параметра регуляризации при восстановлении

на рис. 6,г,д, содержали чередующиеся белые и чёрные линии толщинами 1–6 пикселей с шагом в 1 пиксель и многоградационные полосы с 4, 8, 16, 32 и 64 полутонами. Фрагменты этих изображений использовались ранее для определения разрешающей способности установки на этапе регистрации изображений (см. раздел 3.3). Результаты кодирования и восстановления измерительных изображений приведены на рис. 11, 12.

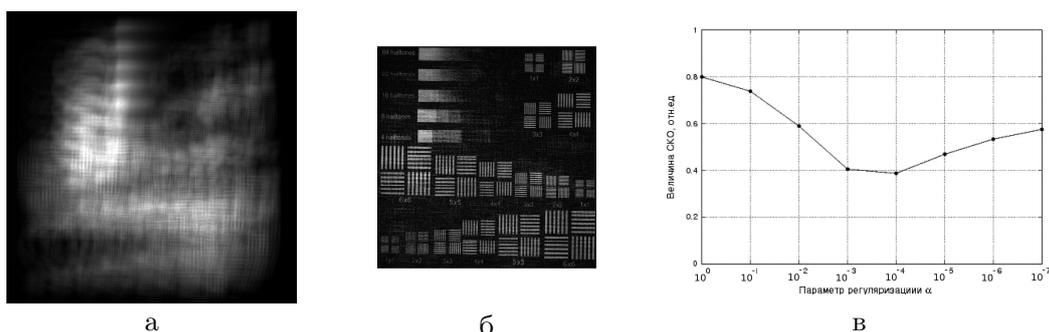


Рис. 11. Кодирование и восстановление измерительного изображения с чёрным фоном: (а) оптически кодированное изображение; (б) наилучшее по СКО восстановленное изображение; (в) зависимость СКО от параметра регуляризации при восстановлении

Проведённые эксперименты продемонстрировали успешное кодирование и последующее восстановление тестовых изображений. Из зависимостей нормированных СКО от параметра регуляризации при восстановлении для пяти кодированных изображений (см. рис. 8,б, 9,в–11,в) следует, что наилучшие результаты восстановления соответствуют значениям параметра регуляризации $10^{-3} \div 10^{-5}$. Установлено, что для реализованной установки оптического кодирования, разрешение изображений, восстанавливаемых из кодированных, не ниже разрешения изображений, регистрируемых без кодирования.

5. Выводы

Предложена экспериментальная реализация метода оптического кодирования изображений с временным интегрированием с использованием коммерческой фотокамеры и ЖК монитора. Оптическое кодирование осуществлялось свёрткой,

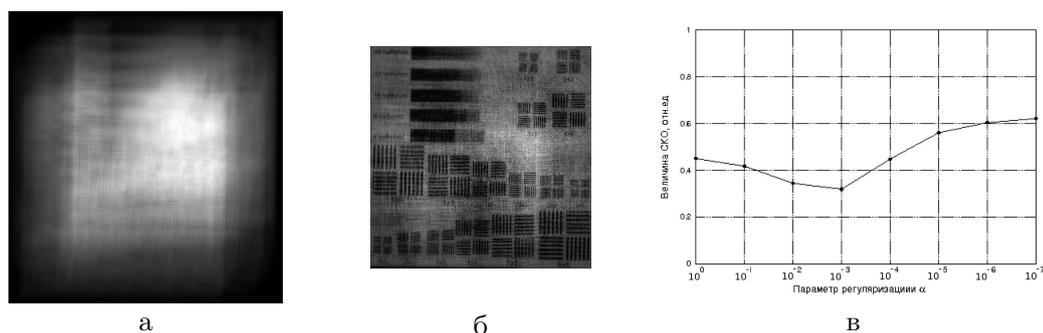


Рис. 12. Кодирование и восстановление измерительного изображения с белым фоном: (а) оптически закодированное изображение; (б) наилучшее по СКО восстановленное изображение; (в) зависимость СКО от параметра регуляризации при восстановлении

формируемой при регистрации фотоприёмником кодируемого изображения, перемещающегося на экране монитора по траектории кодирующей ФРТ. Для численного восстановления (декодирования) закодированных изображений применялась инверсная фильтрация с регуляризацией по Тихонову.

На реализованной установке возможно кодирование монохромных полутоновых изображений с суммарным числом отсчётов кодируемого изображения и кодирующей ФРТ до 1280×1024 со скоростью до 30 ненулевых отсчётов бинарной ФРТ в секунду. Для устранения эффекта муаровых полос, возникающего из-за наложения дискретных структур фотосенсора регистрирующей камеры и матрицы монитора, использована дефокусировка оптической системы. При этом пространственное разрешение регистрируемых изображений составило 2 отсчёта. Получено значение допустимой дисперсии цветковых коэффициентов равное 0,08, что позволяет выполнять быстрый подбор требуемой дефокусировки.

В ходе экспериментов на реализованной установке проведено кодирование и последующее численное восстановление тестовых изображений. Для всех проводившихся экспериментов результаты оптического кодирования и его численного моделирования согласуются между собой. Нормированные СКО изображений, восстановленных из закодированных, находятся в диапазоне значений $0,27 \div 0,39$. Все восстановленные изображения уверенно идентифицируются. Проведена оценка разрешающей способности и качества передачи полутонов при оптическом кодировании с временным интегрированием на реализованной установке. Установлено, что разрешение в процессе кодирования и восстановления изображений не снижается, обеспечивается корректная передача не менее 4 полутонов.

Полученные результаты подтверждают работоспособность метода оптического кодирования с временным интегрированием и целесообразность разработки его реализаций для решения практических задач.

Литература

1. *Javidi B.* Optical and Digital Techniques for Information Security. — Springer, 2004.
2. *Alfalou A., Brosseau C.* Dual Encryption Scheme of Images Using Polarized Light // Optics Letters. — 2010. — Vol. 35, No 13. — Pp. 2185–2187.
3. Noise-Free Recovery of Optodigital Encrypted and Multiplexed Images / R. Henao, E. Rueda, J. F. Barrera, R. Torroba // Optics Letters. — 2010. — Vol. 35, No 3. — Pp. 333–335.
4. *Konnik M., Starikov S.* The Use of a Consumer Grade Photo Camera in Optical-Digital Correlator for Pattern Recognition and Input Scene Restoration // Optics Communications. — 2009. — Vol. 282, No 21. — Pp. 4210–4219.

5. *Starikov S. N., Konnik M. V.* Using Commercial Photo Camera's Raw-Based Images in Optical-Digital Correlator for Pattern Recognition // Proc. SPIE, Optical Pattern Recognition XIX. — 2008. — P. 6977:69770R.
6. 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, No 2. — Pp. 67–75.
7. *Wach H. B., Edward R. Dowski j., Cathey W. T.* Control of Chromatic Focal Shift Through Wave-Front Coding // Appl. Opt. — 1998. — Vol. 37. — Pp. 5359–5367.
8. *Kubala K., Dowski E., Cathey W.* Reducing Complexity in Computational Imaging Systems // Opt. Express. — 2003. — Vol. 1. — Pp. 2102–2108.
9. *Колфилд Г.* Оптическая голография, Том 2. — М.: Мир, 1982. [*Kolfield G.* Opticheskaya golografiya, Tom 2. — М.: Mir, 1982.]
10. *Masalsky N. V.* Real-Time Waveguide Acousto-Optical Units for Processing of Bandwidth Optical Signals // Proc. SPIE. — Vol. 5066. — 2003. — P. 292.
11. *Kelvin S. K., Wagner R. M. N. W. Z.* Broadband Polarization Interferometric Time-Integrating Acousto-Optic Correlator for Random Noise Radar // Optical Engineering. — 2005. — Vol. 44, No 10. — P. 108202.
12. *Краснов В.В., Стариков С.Н.* Реализация метода оптического кодирования изображений с временным интегрированием с использованием ЖК отображающего устройства // Тезисы докладов 46 Всероссийской научной конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии: Москва. — 2010. — С. 50–51. [*Krasnov V. V., Starikov S. N.* Realizaciya metoda opticheskogo kodirovaniya izobrazheniy s vremennim integrirovaniem s ispolzovaniem ZhK otobrazhayuthego ustrojstva // Tezisih dokladov 46 Vserossiyskoyj nauchnoy konferencii po problemam matematiki, informatiki, fiziki i khimii: Moskva. — 2010. — S. 50–51.]
13. *Арсенин В. Я., Тихонов А. Н.* Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1979. [*Arsenin V. Ya., Tikhonov A. N.* Metodih resheniya nekorrektnihkh zadach. — М.: Nauka, 1979.]
14. *Coffin D. J.* — <http://www.cybercom.net/dcoffin/dcraw>.
15. *Rudiak-Gould B.* — <http://neuron2.net/www.math.berkeley.edu/benrg/huffyuv.html>.

UDC 535.4

Optical Image Coding by Time Integration Using Commercial Camera and Liquid Crystal Display

V. V. Krasnov, S. N. Starikov, P. A. Cheryomkhin

*Department of Laser Physics
National Research Nuclear University "MEPhI"
31, Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russia*

Experimental implementation of optical image coding method with time integration using commercial camera and liquid crystal display is described. Results of image optical coding and coded images numerical restoration are presented. This method could be used for accessible quality estimation of optical image coding using diffractive optical elements or as independent optical coding method.

Key words and phrases: optical coding, point spread function (PSF), time integration.