

Высокоскоростная оперативная реализация голографических и дифракционных элементов с применением микрозеркальных пространственно-временных модуляторов света

Н.Н.Евтихийев, Е.Ю.Злоказов, В.В.Краснов, В.Г.Родин, Р.С.Стариков, П.А.Черёмхин

Представлены результаты моделирования и экспериментов по формированию световых распределений голограммами и дифракционными элементами, реализованными с помощью микрозеркальных пространственно-временных модуляторов света, а также продемонстрированы примеры успешных экспериментов по реализации вариантов оптико-цифровых систем на их основе.

Ключевые слова: микрозеркальный модулятор света, голограмма, дифракционный оптический элемент, коррелятор, инвариантный корреляционный фильтр, оптическое кодирование, пространственно-некогерентное освещение.

1. Введение

Микрозеркальный пространственно-временной модулятор света (МЗ ПВМС, или DMD – Digital Micromirror Device) – микроэлектромеханическое устройство, позволяющее осуществлять бинарную амплитудную модуляцию света [1]. В настоящее время МЗ ПВМС являются широко распространёнными и технологически освоенными устройствами и обладают наибольшим быстродействием среди доступных средств пространственной модуляции света. Лучшие серийные модели МЗ ПВМС обеспечивают килогерцевые скорости смены кадров при разрешении в единицы мегапикселей и микронных размерах пикселя. Столь высокие скоростные и пространственно-частотные характеристики МЗ ПВМС определяют интерес к их использованию при создании дифракционных оптико-цифровых систем различного назначения [2], в основе работы которых лежит формирование заданных световых распределений и/или выполнение пространственной фильтрации.

В настоящей статье представлены результаты экспериментов по реализации дифракционных и голографических элементов посредством МЗ ПВМС, предназначенных для применения в дифракционных системах как при когерентном, так и при пространственно-некогерентном освещении.

2. Микрозеркальные ПВМС

Модуляция, осуществляемая МЗ ПВМС, обусловлена отражением света от матрицы микрозеркал, представляющей собой кремниевый чип. В зависимости от управляющего сигнала качающиеся микрозеркала МЗ ПВМС отражают падающее излучение в двух направлениях под

углами около $\pm 15^\circ$, одно из направлений соответствует состоянию светлого пикселя, другое – тёмного. МЗ ПВМС обеспечивают бинарную амплитудную модуляцию света при разрешении в несколько мегапикселей, частоте смены кадра в десятки килогерц и размере пикселя около 10 мкм. Такие параметры модуляции определяют возможность создания на основе МЗ ПВМС относительно компактных оптико-цифровых дифракционных систем обработки информации, обеспечивающих пропускную способность по входу в несколько десятков гигабит в секунду. Наиболее привлекательным представляется применение МЗ ПВМС для оперативного ввода в оптическую систему дифракционных элементов, определяющих функционал системы. Существенной проблемой при этом является принципиально бинарный характер выполняемой МЗ ПВМС амплитудной модуляции, поскольку такое ограничение её диапазона определяет необходимость применения различных (в зависимости от типа и назначения системы) подходов для обеспечения требуемых параметров дифракционных элементов.

С целью определения практических возможностей применения МЗ ПВМС в оптико-цифровых дифракционных системах были проведены эксперименты по реализации голографических и дифракционных элементов, в том числе:

- компьютерно-синтезированных и цифровых голограмм, формирующих изображения объектов (разд.3);
- компьютерно-синтезированных голограмм Фурье и дифракционных элементов, формирующих отклики, которые соответствуют корреляционным фильтрам (разд.4,5);
- компьютерно-синтезированных голограмм Фурье, формирующих кодирующий отклик в системе оптического кодирования (разд.6);
- компьютерно-синтезированных дифракционных элементов без пространственной несущей частоты, формирующих изображения объектов (разд.7);
- цифровых голограмм, формирующих изображения объектов (разд.8).

При проведении экспериментов для реализации голографических и дифракционных элементов использованы серийные МЗ ПВМС Texas Instruments 0.7 XGA DLP7000 (разрешение 1024×768 пикселей, размер пикселя $10.8 \times$

Н.Н.Евтихийев, Е.Ю.Злоказов, В.В.Краснов, 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 18 февраля 2020 г., после доработки – 12 марта 2020 г.

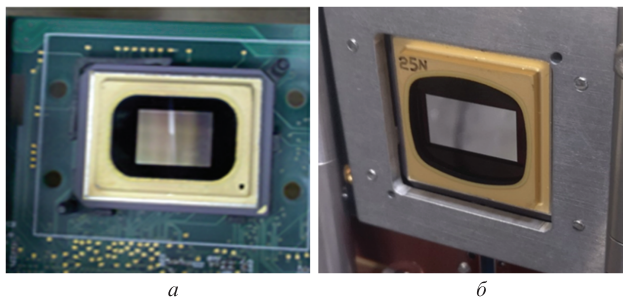


Рис.1. МЗ ПВМС: Texas Instruments, модель 0.7 XGA DLP7000, разрешение 1024×768 пикселей, частота смены кадров свыше 32 кГц (а) и Texas Instruments, модель Discovery на чипе DLP9500BFLN, разрешение 1920×1080 пикселей, частота смены кадров свыше 23 кГц (б).

10.8 мкм, частота смены кадров 32 кГц) и Texas Instruments Discovery DLP9500BFLN (разрешение 1920×1080 пикселей, размер пикселя 10.8×10.8 мкм, частота смены кадров свыше 23 кГц). Их фото представлены на рис.1.

3. Реализация компьютерно-синтезированных голограмм Фурье

В настоящее время значительное развитие получили методы компьютерного синтеза голограмм [3–5]. Для заданного двумерного распределения h внеосевая компьютерно-синтезированная голограмма Фурье может быть получена стандартным образом, по формуле

$$H_{\text{holo}}(x, y) = \text{Re}\{H'(x, y)\} - \min\{\text{Re}\{H'(x, y)\}\},$$

где

$$H'(x, y) = H(x, y) \exp[-i2\pi(\Delta_x x + \Delta_y y)];$$

$H(x, y)$ – фурье-образ матрицы h ; Δ_x, Δ_y – смещение изображения h от оптической оси. Восстановление изображения может быть произведено численно, путём расчёта преобразования Фурье от функции голограммы $H_{\text{holo}}(x, y)$, а также оптически в схеме когерентного фурье-каскада. На рис.2 представлены результаты компьютерного синтеза голограмм Фурье и численного восстановления полутонового изображения с их помощью. Голограмма представляет собой полутоновое растровое изображение с глубиной градации серого 8 бит (уровни от 0 до 255).

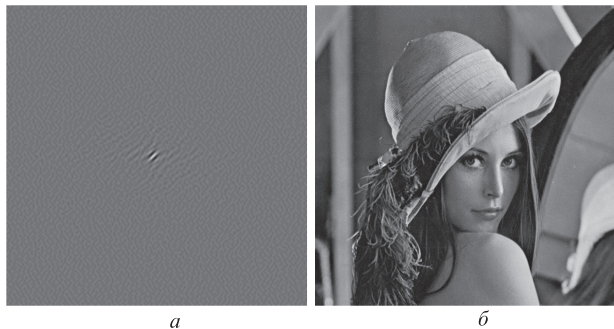


Рис.2. Компьютерно-синтезированная голограмма Фурье для полутонового изображения: центральная часть голограммы (а) и численно восстановленное изображение (здесь и далее – первый порядок дифракции) (б).

Результаты исследований возможностей компьютерно-синтезированных голограмм Фурье по восстановлению изображений и формированию световых пучков с заданным распределением комплексной амплитуды демонстрируют, что при реализации с помощью чисто амплитудных модулирующих средств отношение сигнал/шум для восстановленного сигнала определяется динамическим диапазоном модуляции носителя, на котором получена синтезированная голограмма [6]. При формировании же такой голограммы с применением МЗ ПВМС возникает необходимость её бинарного представления, которое должно обеспечивать наименьшее снижение качества восстанавливаемого светового распределения относительно исходного. При этом необходимо разделить две принципиальные возможности: использование бинарного растривания для представления градаций отсчётов и использование методов прямой бинаризации отсчётов [7–9].

В случае использования бинарного растривания каждый пиксель исходной голограммы представляется несколькими бинарными субпикселями ПВМС, так что для представления $m^2 + 1$ градаций отсчётов голограммы размерности $N \times N$ требуется ПВМС размерности $mN \times mN$. Применение методов прямой бинаризации «экономнее» с точки зрения использования размерности ПВМС, поскольку в этом случае для вывода голограммы размерности $N \times N$ требуется ПВМС такой же размерности. Однако ограничение числа уровней квантования голограммы до двух приводит к росту шума квантования в формируемом голограммой сигнале. Для снижения влияния шумов квантования на выходной сигнал могут быть использованы различные методы бинаризации, такие как методы глобального порога (например, метод Отсу [10]), использующие одно значение порога для всего изображения, а также методы адаптивной бинаризации, основанные на расчёте порога для каждого пикселя изображения исходя из статистических особенностей яркости соседних пикселей [11, 12]. Выбор метода бинаризации определяется в каждом конкретном случае свойствами объекта и условиями использования синтезированной голограммы. Действие некоторых методов бинаризации иллюстрируется на рис.3.

На рис.4 представлены результаты бинаризации голограммы Фурье, приведенной на рис.2, и численного восстановления ею изображений; бинаризация выполнена адаптивным методом Брэдли [12]. Необходимо отметить, что бинарное представление голограмм всегда снижает качество восстанавливаемых распределений относительно исходных (рис.4,б), но в этом отношении следует упомянуть и о возможностях применения широко известных и активно развивающихся методов улучшения качества восстановления изображений с голограмм Фурье. Одним из таких методов является мультиплексирование, приме-



Рис.3. Фрагмент исходной голограммы (а), он же, бинаризованный методом Отсу (б) и представленный случайными растрами с пятью (в) и 17 (г) градациями.

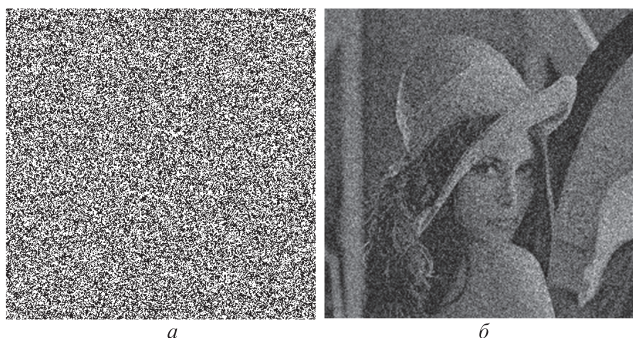


Рис.4. Бинаризованная методом Брэдли голограмма, представленная на рис.2,а (а), и результат численного восстановления изображения полутонного объекта с ней (б).

нимое для любых объектов [13]; мультиплексированная голограмма представляет собой набор одинаковых голограмм, расположенных симметрично [14]. Такой подход позволяет получить лучшее качество восстановления изображений голограммами. Для голограмм чисто амплитудных объектов эффективность может быть повышена путём добавления для каждого пикселя случайного фазового сдвига [15]. Отдельно следует выделить проблему, связанную с наличием фазовых искажений, обусловленных неплоскостью матрицы и защитного стекла МЗ ПВМС [16], но более совершенным моделям МЗ ПВМС такой недостаток присущ в меньшей степени.

На рис.5 представлена экспериментальная установка для восстановления изображений голограммами Фурье, реализованными с помощью МЗ ПВМС. Плоский лазерный пучок, полученный с помощью коллиматора, состоящего из микрообъектива Л1, микродиафрагмы и линзы Л2, освещает поверхность МЗ ПВМС. На МЗ ПВМС выводится изображение, соответствующее компьютерно-синтезированной голограмме. Отражённый МЗ ПВМС модулированный пучок направляется в линзу Л3, в результате чего в её задней фокальной плоскости можно наблюдать восстановленное в порядках дифракции исходное изображение.

На рис.6 представлен результат эксперимента по оптическому восстановлению полутонного изображения бинаризованной компьютерно-синтезированной голограммой Фурье. Несмотря на существенный уровень шумов, восстановленное голограммой изображение обладает удовлетворительным качеством, элементы отображённого объекта можно без труда выделить с помощью известных средств обработки изображений.

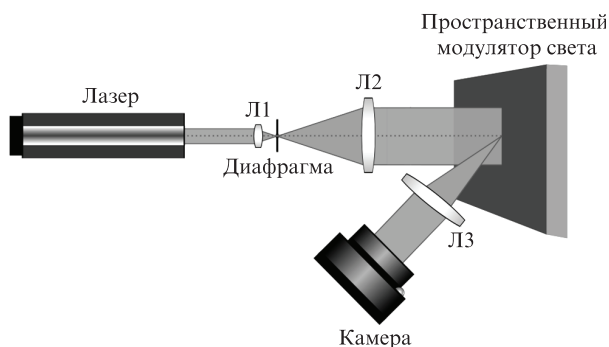


Рис.5. Экспериментальная установка для восстановления изображений с голограмм Фурье.



Рис.6. Результат оптического восстановления изображения с синтезированной голограммы, представленной на рис.4,а. Цветной вариант рис.6–8, 10 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

4. Реализация инвариантных корреляционных фильтров

Главное достоинство реализации корреляционного метода распознавания изображений на базе инвариантных оптико-цифровых дифракционных корреляторов – высокая скорость обработки и энергоэффективность вычислений, достигаемые, в первую очередь, за счёт использования ПВМС. С момента появления идеи оптического коррелятора и до новейших впечатляющих успехов в данной области основные требования предъявляются к быстродействию и разрешению ПВМС, используемых для ввода входной сцены и эталонной функции [17–26]. Так, когерентный коррелятор на основе современных ПВМС может иметь до нескольких миллионов параллельных каналов со скоростью переключения в десятки килогерц, что обеспечивает эквивалентное быстродействие порядка 10^{12} – 10^{14} опер./с (операций в секунду); при этом его энергопотребление составит ~ 10 Вт. Соответствующая мера энергоэффективности будет превышать 10^{11} опер./((с·Вт)). Для сравнения: суперкомпьютеры из первых строчек списка Green500 имеют вычислительную эффективность не более 1.7×10^{10} опер.·с⁻¹·Вт⁻¹.

В основе работы оптического коррелятора лежит решение задачи формирования импульсного отклика оптической системы, соответствующего эталонному объекту, – как для схем с фильтром в плоскости частот, так и для схем с регистрацией совместного спектра. В настоящее время вместо классического подхода, который состоит в реализации согласованного фильтра, обладающего высокой чувствительностью к искажениям, используются различные виды инвариантных фильтров, синтезируемых на основе набора изображений эталона, подвергнутых априори известному типу искажений [17]. Как правило, инвариантный фильтр является комплекснозначным объектом; для формирования соответствующего комплексного импульсного отклика оптической системы коррелятора на практике должны использоваться методы, учитывающие характеристики используемого ПВМС. В этом разделе работы рассматриваются инвариантные фильтры для схем когерентных корреляторов с фильтрацией в плоскости частот (4f-схема), что, впрочем, не исключает возможности обобщения результатов, в том числе для схем с регистрацией совместного спектра или для различных вариантов некогерентных схем. Экспериментальная реализация одной из некогерентных схем представлена в разд.5.

Эффективным способом получения инвариантного фильтра является компьютерный синтез соответствующего

щего голографического фильтра (ГФ) – фурье-голограммы исходного инвариантного фильтра, используемой, подобно фильтру Ван дер Люгта, в качестве фильтра пространственных частот. Синтез ГФ аналогичен рассмотренному в разд.2 синтезу голограмм Фурье, и точно так же для вывода ГФ на бинарный МЗ ПВМС необходимо воспользоваться методами бинаризации [8, 9, 27–31]. Для повышения качества распознавания в оптико-цифровом корреляторе применение бинарного растривания при синтезе инвариантного фильтра, как правило, не эффективно из-за возникающих при этом ограничений на размерность обрабатываемых изображений. Использование мультиплексирования практически невозможно или усложняет схему, а поскольку инвариантный фильтр – комплекснозначный объект, при синтезе ГФ нельзя воспользоваться методом случайных фазовых масок. Тем не менее в ряде случаев возможен подбор метода прямой бинаризации, обеспечивающий для данного типа фильтра наилучший результат; в частности в [8, 9] при распознавании контурных изображений продемонстрировано существенное улучшение качества распознавания по сравнению с исходным фильтром при бинаризации ГФ методом глобального порога Отсу. На рис.7 представлен пример инвариантного фильтра с максимальной высотой корреляционного пика [32], а также результаты его численного и оптического восстановления с соответствующей фурье-голограммы, бинаризованной методом Брэдли.

Другой способ реализации инвариантных фильтров основан на идее адаптации фильтра к модуляционной характеристике ПВМС и заключается в поиске так называемой оптимальной проекции фурье-образа фильтра на значения, доступные для модуляции ПВМС. При этом в качестве критерия оптимальности могут выступать как

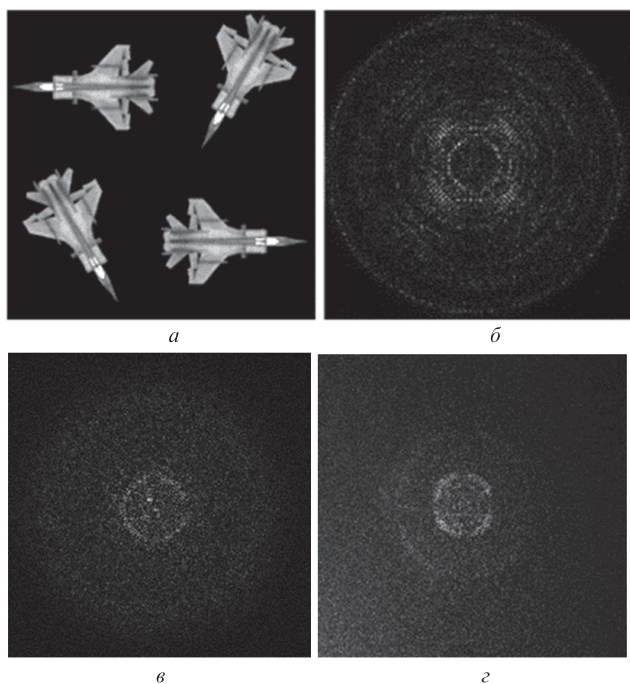


Рис.7. Изображения объекта, для которого был синтезирован корреляционный фильтр (КФ) (а), распределение амплитуды КФ с максимальной высотой корреляционного пика, обеспечивающего инвариантность распознавания при повороте в плоскости объекта (б), результат численного восстановления ГФ (в) и результат оптического восстановления ГФ, реализованного с помощью МЗ ПВМС (г).

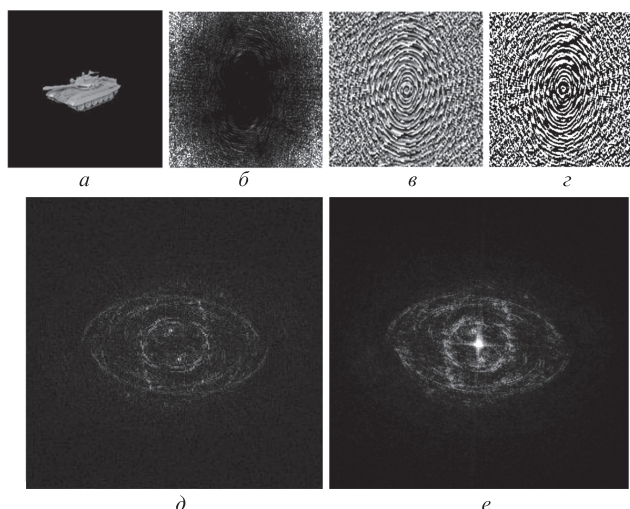


Рис.8. Объект, для которого синтезирован КФ (а), распределения амплитуды (б) и фазы (в) фурье-образа КФ с минимумом шума и средней энергии корреляции, распределение бинарной амплитуды оптимальной проекции на модуляционную характеристику МЗ ПВМС (г), отклик оптимальной проекции, соответствующий исходному КФ, – эксперимент (д) и расчёт (е).

минимальная евклидова дистанция от фильтра до его проекции, так и оценка погрешности распознавания. Параметрами же оптимизации выступают общие для всех отсчётов фильтра фазовый и амплитудный множители, осуществляющие соответственно поворот или масштабирование положения значений отсчётов фурье-образа фильтра на модуляционной диаграмме. Возникающая при таком подходе проблема наложения областей корреляции и свёртки решается введением дополнительных фазовых множителей на этапе получения проекции, формирующих пространственную несущую.

На рис.8 представлен пример реализации оптимальной проекции фильтра с минимумом шума и энергии корреляции [33, 34] с помощью МЗ ПВМС. Оптимизация по евклидовой дистанции выполнена методом градиентного спуска; фильтр обеспечивает инвариантность распознавания при пространственном повороте объекта в диапазоне 180° . Несмотря на то что такой метод не гарантирует точного соответствия амплитуды и фазы оптической системы амплитуде и фазе исходного фильтра, в ряде случаев проекция фильтра обеспечивает лучшие характеристики распознавания, чем у исходного фильтра [34].

5. Экспериментальная реализация оптического коррелятора на основе МЗ ПВМС в некогерентном свете

Совокупность характеристик МЗ ПВМС даёт основания полагать, что современные МЗ ПВМС могут быть успешно использованы в качестве устройств оперативного вывода голограмм-фильтров в установках оптических корреляторов не только при когерентном освещении.

Оптический коррелятор с выводом фильтров на МЗ ПВМС [35, 36], используемый в работе для оперативного распознавания объектов, был построен по схеме только с одним объективом для формирования корреляционного распределения. Применение такой схемы особенно целесообразно при распознавании объектов в пространственно-некогерентном свете. В выходной плоскости корреля-

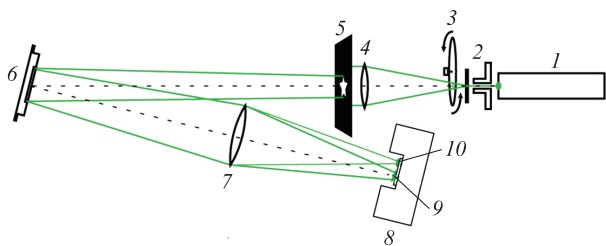


Рис.9. Схема экспериментальной установки некогерентного голографического коррелятора на основе МЗ ПВМС: 1 – лазер; 2 – микрообъектив с диафрагмой; 3 – вращающийся матовый рассеиватель; 4 – коллимирующий объектив; 5 – транспарант с изображением распознаваемого объекта; 6 – МЗ ПВМС с выведенным на него голографическим фильтром; 7 – объектив; 8 – регистрирующая камера; 9 – нулевой порядок дифракции (изображение объекта); 10 – первый порядок дифракции (область корреляционного сигнала)

тора формируется корреляционный сигнал по интенсивности, а не по амплитуде, как в когерентном корреляторе, что позволяет устранить фазовые искажения, влияющие на качество корреляционного сигнала.

Схема экспериментальной установки представлена на рис.9. Когерентное излучение от источника 1 проходит через коллимирующую систему (микрообъектив 2, диафрагма и объектив 4), в которой установлен вращающийся матовый рассеиватель 3 для разрушения пространственной когерентности излучения. Транспарант 5 с изображением тестового объекта, расположенный во входной плоскости коррелятора, освещается уже пространственно-некогерентным излучением, которое затем отражается от МЗ ПВМС 6 (Texas Instruments 0.7 XGA DLP7000) с выведенным на него голографическим фильтром, заранее синтезированным на компьютере под необходимый опорный объект. В выходной плоскости коррелятора расположена камера 8, регистрирующая формируемую объективом 7 структуру, включающую нулевой порядок 9 (изображение объекта) и первый порядок дифракции 10 (область корреляционного сигнала), по наличию в котором локализованного интенсивного пика можно сделать вывод о совпадении пространственных характеристик опорного и распознаваемого объектов.

В качестве тестовых распознаваемых объектов использовались различные контурные изображения. На рис.10 представлены результаты распознавания в случае, когда входной объект оставался неизменным, а на модулятор последовательно выводились голограммы-фильтры, синтезированные для различных объектов. При совпадении форм входного и опорного объектов наблюдается сигнал распознавания (рис.10,а). При несовпадении масштабов объектов (опорный объект больше входного) и форм объектов (опорный объект является контуром рыбы) локали-

зованные корреляционные пики отсутствуют (рис.10,б,в соответственно). Таким образом, была продемонстрирована работа некогерентного коррелятора при динамическом изменении параметров распознавания. Применение МЗ ПВМС в подобной схеме обеспечивает возможность выполнения десятков тысяч корреляционных сравнений в секунду.

6. Оптическое кодирование информации с применением МЗ ПВМС

Перспективность методов оптического кодирования [37–46] обусловлена высокой криптостойкостью, обеспечиваемой двумерностью кодирующих ключей, в сочетании с быстродействием оптических методов. Поскольку для создания высокоскоростной системы кодирования необходимо использовать наиболее быстродействующие устройства ввода, применение именно МЗ ПВМС в этом случае является предпочтительным.

Схема экспериментальной установки оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением на базе двух МЗ ПВМС представлена на рис.11.

В качестве источника монохроматического освещения использовался Nd:YAG-лазер мощностью 200 мВт с длиной волны излучения 532 нм. Пространственная когерентность разрушалась вращающимся матовым рассеивателем (ВМР). Схема кодирования построена на основе классической 4f-архитектуры. МЗ ПВМС1, используемый для ввода информации, находился в передней фокальной плоскости линзы Л3. МЗ ПВМС2, служивший для вывода синтезированных голограмм, формирующих кодирующий отклик системы, находился в задней фокальной плоскости линзы Л3 и в передней фокальной плоскости линзы Л4. Два МЗ ПВМС Texas Instruments 0.7XGA DLP7000 имели 1024×768 пикселей размером 10.8×10.8 мкм каждый. Камера Canon EOS 400D с матри-

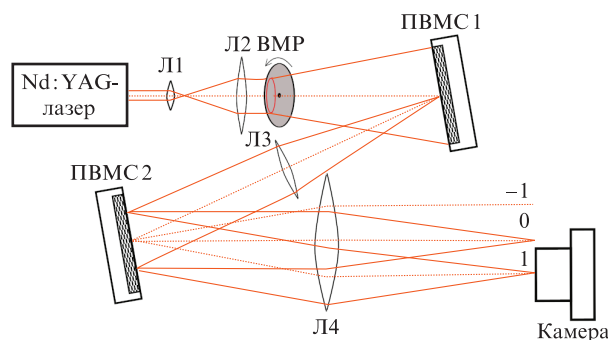


Рис.11. Схема экспериментальной установки оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением на базе двух МЗ ПВМС.

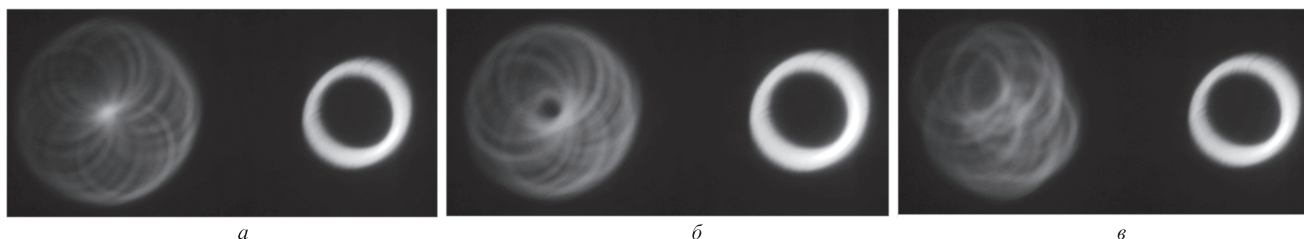


Рис.10. Изображения сигналов на выходе коррелятора при совпадении входного и опорного объектов (а), при несовпадении масштабов объектов (опорный объект больше входного) (б) и при несовпадении объектов (опорный объект – контур рыбы) (в).

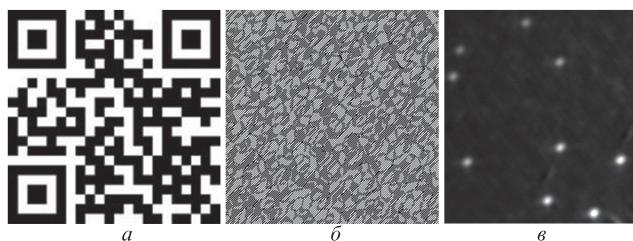


Рис.12. Кодированное бинарное изображение (*a*), кодирующая амплитудная фурье-голограмма (*б*) и ее отклик в первом порядке дифракции (*в*).

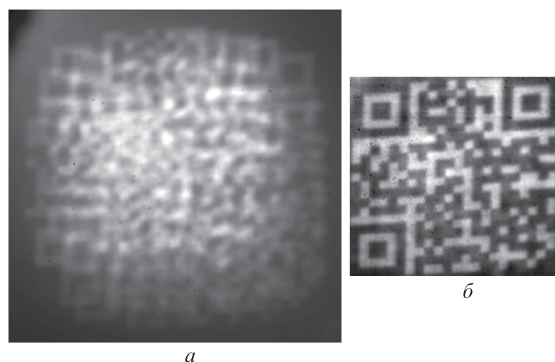


Рис.13. Кодированное (*a*) и декодированное (*б*) изображения.

цей 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 свертку изображения, выводимого на ПВМС1, с откликом кодирующей голограммы, отображаемой ПВМС2.

Кодируемое бинарное изображение, отображавшееся на МЗ ПВМС1, представлено на рис.12,*a*. Кодирующая компьютерно-синтезированная бинаризованная амплитудная фурье-голограмма, содержащая 300×300 отсчетов и выводившаяся на МЗ ПВМС2, показана на рис.12,*б*. На рис.12,*в* представлен отклик голограммы в первом порядке дифракции. Кодированное изображение представлено на рис.13,*a*. Декодирование проводилось численно методом инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову [47]. Декодированное изображение показано на рис.13,*б*. Визуальное качество декодированного изображения достаточно высокое, нормированное среднеквадратичное отклонение от оригинала составляет 0.18.

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность работы высокоскоростной системы кодирования на базе МЗ ПВМС.

7. Бинарный амплитудный дифракционный элемент без несущей пространственной частоты

Основными недостатками МЗ ПВМС по сравнению с ЖК ПВМС являются невозможность модуляции фазы света и бинарный характер модуляции. Фактически единственным дифракционным оптическим элементом (ДОЭ), подходящим для вывода на МЗ ПВМС, является бинарная амплитудная голограмма. К недостаткам таких голограмм относятся наличие нежелательных порядков дифракции, что требует их пространственного разделения и, соответственно, уменьшает полезную область поля ре-

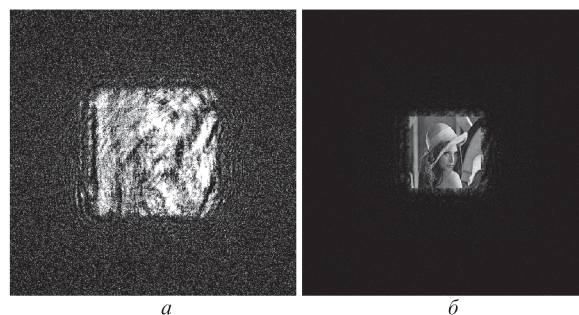


Рис.14. Синтезированный ДОЭ без несущей пространственной частоты (*a*) и его расчетный отклик (*б*).

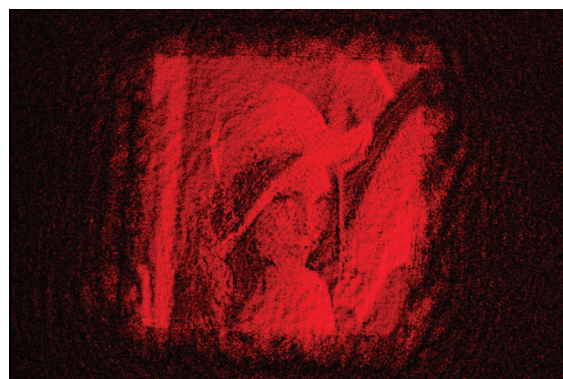


Рис.15. Результат оптической реконструкции ДОЭ, представленного на рис.14,*a*.

конструкции, а также низкая дифракционная эффективность – порядка 2%–4%.

Для устранения этих недостатков впервые предложен и опробован метод синтеза самофокусирующихся амплитудных ДОЭ без несущей пространственной частоты. Такой ДОЭ при освещении сферической расходящейся волной определенного радиуса кривизны на заданном расстоянии формирует требуемое световое распределение. В основе метода синтеза ДОЭ лежит итерационный алгоритм, подобный алгоритму Герчберга–Сэжстона [48], с теми отличиями, что синтезируемый ДОЭ – амплитудный, а не фазовый, а падающий волновой фронт – расходящийся сферический. Пример синтезированного бинарного ДОЭ без несущей пространственной частоты приведен на рис.14,*a*, его поле реконструкции – на рис.14,*б*. Размер ДОЭ составил 1024×1024 отсчетов, ошибка синтеза была равна 7%, дифракционная эффективность – 8%. Результат оптической реконструкции ДОЭ с использованием МЗ ПВМС Texas Instruments Discovery DLP9500BFLN представлен на рис.15.

8. Применение МЗ ПВМС для оптической реконструкции сцен с цифровых голограмм

В настоящее время под цифровой голографией понимают оптическую регистрацию цифровым фоторегистратором интерференционной картины от объектной и опорной волн в виде массива чисел [49]. Восстанавливать изображение объекта с полученной цифровой голограммы можно численно (с помощью компьютера) [50] и оптически (при освещении голограмм, выводимых на ПВМС) [51]. По большинству параметров МЗ ПВМС является весьма предпочтительным вариантом для вывода голограмм [2], особенно – по скорости отображения кадров,

что находит применение в задачах создания дисплеев [52], при характеристике светорассеивающих сред [53] и др.

Поскольку цифровые голограммы регистрируются камерами, число градаций яркости у которых обычно составляет сотни или тысячи, то для вывода голограмм на МЗ ПВМС необходимо вначале произвести бинаризацию полученного снимка, как и в случае компьютерно-синтезированных голограмм [8, 9]. При регистрации цифровых голограмм различных объектов наиболее применимыми оказываются такие методы бинаризации, как введение локального [7] или глобального порога [7], использование стандартной [54, 55] или точечной операции диффузии ошибки [56] и др. При этом необходимо учитывать такой параметр, как время выполнения бинаризации. Если обработка цифровой голограммы размером 2048×2048 пикселей с помощью глобальных методов бинаризации на основе анализа гистограмм на стандартном компьютере занимает миллисекунды, то операция с использованием некоторых кластерных методов проводится в течение ~ 10 с [52], что может потребовать дополнительных вычислительных мощностей, в том числе программных архитектур типа CUDA [56], графических процессоров [56], программируемых схем [57] и т. п. Все это приводит к необходимости поиска компромисса между качеством восстанавливаемых изображений, дифракционной эффективностью, скоростью бинаризации и скоростью вывода голограмм на ПВМС.

Фрагмент (размером 128×128 пикселей) оптически зарегистрированной цифровой голограммы Френеля диффузного объекта в исходном полутоновом виде и его численно восстановленное изображение приведены на рис. 16. Фрагмент голограммы такого же размера, бинаризованный методом Ниблэка [58], и её численно восстановленное изображение представлены на рис. 17, а, б. Оптическая реализация восстановления изображений с цифровых голограмм проводилась на установке, схема которой сходна с приведённой на рис. 5, однако регистрация получен-

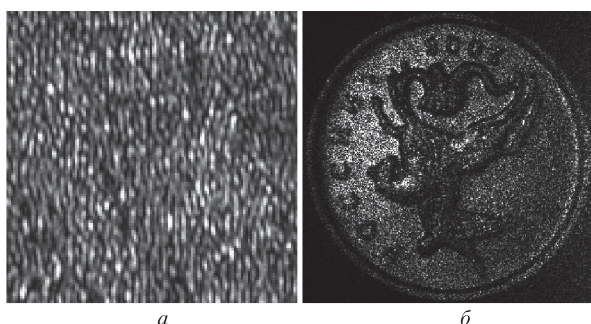


Рис. 16. Фрагмент зарегистрированной полутоновой цифровой голограммы (а) и численно восстановленное с неё изображение (б).

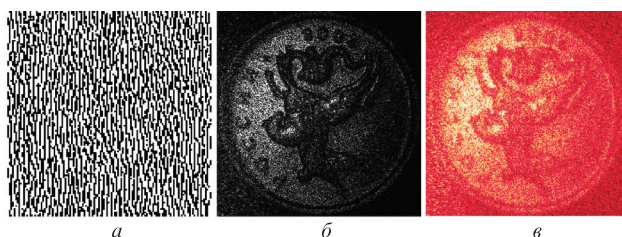


Рис. 17. Фрагмент бинаризованной цифровой голограммы (а), а также численно (б) и оптически (в) восстановленные с неё изображения.

ного изображения велась в зоне дифракции Френеля. Пример оптически восстановленного изображения с бинаризованной голограммы, выведенной на МЗ ПВМС, представлен на рис. 17, в.

9. Заключение

Таким образом, в настоящей работе представлены результаты моделирования и оптических экспериментов по восстановлению световых распределений голограммами и дифракционными элементами, реализованными с помощью МЗ ПВМС, а также продемонстрированы возможные варианты оптико-цифровых систем на их основе. Как видно из результатов экспериментов, МЗ ПВМС обеспечивают восстановление заданных световых распределений с приемлемым качеством, сравнимым с качеством при численном моделировании. Основной проблемой применения МЗ ПВМС при построении оптико-цифровых систем является негативное влияние бинарного представления отсчётов голограмм и дифракционных элементов на качество восстанавливаемых световых распределений. Однако в значительном числе случаев бинарный характер модуляции МЗ ПВМС может быть учтён и в той или иной степени скомпенсирован при синтезе голограмм и дифракционных элементов. Главные же преимущества МЗ ПВМС – высокие быстродействие и пространственное разрешение – обеспечивают в настоящее время возможности реализации оптико-цифровых систем различного назначения, обладающих пропускной способностью на уровне десятков гигабит в секунду.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (разд. 6) (грант № 17-07-00829).

- Hainich R.R., Bimber O. *Displays: Fundamentals and Applications* (Boca Raton, FL: CRC Press, 2016).
- Компанец И.Н., Андреев А.Л. *Квантовая электроника*, **47**, 294 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 294 (2017)].
- Shimobaba T., Ito T. *Computer Holography: Acceleration Algorithms and Hardware Implementations* (Boca Raton, FL: CRC Press, 2019).
- Tsang P.W.M., Poon T.C., Wu Y.M. *Photon. Res.*, **6**, 837 (2018).
- Kakue T., Wagatsuma Y., Yamada S., Nishitsuji T., Endo Y., Nagahama Y., Hirayama R., Shimobaba T., Ito T. *Opt. Eng.*, **57**, 061621 (2018).
- Zlokazov E.Yu. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58**, SKKD04 (2019).
- Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A. *Opt. Lasers Eng.*, **115**, 119 (2019).
- Starikov R.S., Zlokazov E.Yu., Shaulskiy D.V. *Proc. SPIE*, **7358**, 73580W (2009).
- Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Shaulskiy D.V., Starikov R.S., Zlokazov E.Yu. *Opt. Eng.*, **50**, 065803 (2011).
- Otsu N. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, **9** (1), 62 (1979).
- Trier O.D., Taxt T. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intel.*, **17** (3), 312 (1995).
- Bradley D., Roth G. *J. Graph. Tools*, **12**, 13 (2007).
- Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Porshneva L.A., Rodin V.G., Starikov S.N. *Proc. SPIE*, **9249**, 92491B (2014).
- Christmas J., Collings N. *Appl. Sci.*, **8**, 685 (2018).
- Burckhardt C.B. *Appl. Opt.*, **9** (3), 695 (1970).
- Molodtsov D.Yu., Rodin V.G., Starikov S.N. *Phys. Proced.*, **73**, 338 (2015).
- Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R.D. *Correlation Pattern Recognition* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005).
- Lugt A.V. *IEEE Transact. Inform. Theory*, **10**, 139 (1964).
- Rau J.E. *J. Opt. Soc. Am.*, **56**, 1490 (1966).
- Weaver C.S., Goodman J.W. *Appl. Opt.*, **5**, 1248 (1966).
- Chao T.-H., Lu T., Walker B.P., Reyes G.F. *Proc. SPIE*, **9094**, 909402 (2014).

22. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Проценко Е.Д., Злоказов Е.Ю., Солякин И.В., Стариков Р.С., Шапкарина Е.А., Шаульский Д.В. *Квантовая электроника*, **42**, 1039 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 1039 (2012)].
23. Xu P., Hong C., Cheng G., Zhou L., Sun Z. *Opt. Express*, **23**, 6773 (2015).
24. Monjur M.S., Tseng S., Fouda M.F., Shahriar S.M. *Appl. Opt.*, **56**, 2754 (2017).
25. Ikeda K., Suzuki H., Watanabe E. *Opt. Lett.*, **42**, 2603 (2017).
26. Jridi M., Napoléon T., Alfalou A. *Appl. Opt.*, **57**, 2087 (2018).
27. Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Sirotkin S.A., Starikov R.S., Zlokazov E.Yu. *Proc. SPIE*, **6977**, 69770C (2008).
28. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Злоказов Е.Ю., Сироткин С.А., Стариков Р.С. *Квантовая электроника*, **38**, 191 (2008) [*Quantum Electron.*, **38**, 191 (2008)].
29. Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Starikov R.S., Zlokazov E.Y. *Proc. SPIE*, **7340**, 73400R (2009).
30. Evtikhiev N.N., Shaulskiy D.V., Zlokazov E.Y., Starikov R.S. *Proc. SPIE*, **8748**, 87480O (2013).
31. Shaulskiy D., Evtikhiev N., Starikov R., Starikov S., Zlokazov E. *Proc. SPIE*, **9094**, 90940K (2014).
32. Mahalanobis A., Vijaya Kumar B.V.K., Song S., Sims S.R.F., Epperson J.F. *Appl. Opt.*, **33**, 3751 (1994).
33. Ravichandran G., Casasent D. *Appl. Opt.*, **31**, 1823 (1992).
34. Shaulskiy D.V., Evtikhiev N.N., Zlokazov E.Y., Starikov S.N., Starikov R.S., Petrova E.K., Molodtsov D.Y. *Proc. SPIE*, **9598**, 95980T (2015).
35. Molodtsov D.Yu., Rodin V.G. *Proc. SPIE*, **10176**, 101761A (2016).
36. Родин В.Г. *Компьютерная оптика*, **42**, 347 (2018).
37. Refregier P., Javidi B. *Opt. Lett.*, **20**, 767 (1995).
38. Rajput S.K., Nishchal N.K. *Appl. Opt.*, **51**, 1446 (2012).
39. Markman A., Wang J., Javidi B. *Optica*, **1**, 332 (2014).
40. Situ G., Zhang J. *Opt. Lett.*, **29**, 1584 (2004).
41. Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov R.S. *Laser Phys. Lett.*, **14**, 026202 (2017).
42. Краснов В.В., Стариков С.Н., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. *Изв. вузов. Физика*, **58**, 29 (2015) [*Russ. Phys. J.*, **58**, 1394 (2015)].
43. Tajahuerce E., Lancis J., Javidi B., Andrés P. *Opt. Lett.*, **26**, 678 (2001).
44. Barrera J.F., Mira A., Torroba R. *Opt. Express*, **21**, 5373 (2013).
45. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Кузьмин И.Д., Молодцов Д.Ю., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. *Квантовая электроника*, **50**, 195 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 195 (2020)].
46. Bondareva A.P., Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov R.S., Starikov S.N. *Proc. SPIE*, **9648**, 96480S (2015).
47. Арсенин В.Я., Тихонов А.Н. *Методы решения некорректных задач* (М.: Наука, 1979).
48. Gerchberg R.W., Saxton W.O. *Optik*, **2**, 237 (1969).
49. Schnars U., Falldorf C., Watson J., Jüptner W. *Digital Holography and Wavefront Sensing: Principles, Techniques and Applications* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015).
50. Verrier N., Atlan M. *Appl. Opt.*, **50**, H136 (2011).
51. Tsang P.W.M., Poon T.-C. *IEEE Transact. Industr. Inform.*, **12**, 886 (2016).
52. Pan Y., Liu J., Li X., Wang Y. *IEEE Transact. Industr. Inform.*, **12**, 1599 (2016).
53. Conkey D.B., Caravaca-Aguirre A.M., Piestun R. *Opt. Express*, **20**, 1733 (2012).
54. Yang G., Jiao S., Liu J.-P., Lei T., Yuan X. *Appl. Opt.*, **58**, 5547 (2019).
55. Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A., in *Proceedings of Digital Holography and 3-D Imaging* (USA, 2019, Th3A.22).
56. Makey G., El-Daher M.S., Al-Shufi K. *Optik*, **124**, 5486 (2013).
57. Buckley E. *J. Display Technol.*, **7**, 70 (2011).
58. Niblack W. *An Introduction to Digital Image Processing* (Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1986).