

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

На правах рукописи

Краснов Виталий Вячеславович

Оптическое криптографическое кодирование изображений  
в пространственно-некогерентном свете

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор: *Краснов*

Москва 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете  
«МИФИ»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
профессор

Евтихийев Николай Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор

Проклов Валерий Владимирович,  
(ФирЭ им. В.А.Котельникова РАН)

кандидат физико-математических наук,  
вед. н.с.

Быковский Алексей Юрьевич,  
(Физический институт РАН)

Ведущая организация

НИИ радиоэлектроники и лазерной  
техники МГТУ имени Н.Э. Баумана

Защита состоится 22 мая 2013 г. в 16:30 в аудитории К-608 на заседании  
диссертационного совета Д 212.130.05 при Национальном исследовательском  
ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, Москва, Каширское  
шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального  
исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Автореферат разослан 17 апреля 2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
д.ф.-м.н.



Стариков Р.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время существуют и активно развиваются методы оптического кодирования информации, характеризующиеся высоким быстродействием, параллелизмом и отсутствием сопутствующего излучения в радиодиапазоне. Широко распространены системы кодирования в пространственно-когерентном монохроматическом свете. Среди наиболее известных – кодирование с двойной случайной фазой. Кодирование при этом осуществляется в монохроматическом пространственно-когерентном свете с использованием двух случайных фазовых масок. Такие системы обладают высокой криптостойкостью. В качестве кодирующих ключей в таких системах используются случайные фазовые маски. Однако, ввиду необходимости регистрации фазы, такие системы требуют голографических методов регистрации и, соответственно сложных оптических схем. Протяженность импульсных откликов случайных фазовых масок приводит к низкому качеству декодируемых изображений.

Для упрощения схемы кодирования и повышения качества декодирования возможен переход от пространственно-когерентного монохроматического излучения к пространственно-некогерентному. В этом случае уже не требуется регистрация фазы, что позволяет отказаться от голографической схемы записи. Процесс кодирования при этом может быть осуществлен прохождением монохроматического пространственно-некогерентного излучения от кодируемого объекта через дифракционный оптический элемент (ДОЭ), в результате чего образуется свертка изображения объекта с функцией рассеяния точки (ФРТ) – импульсным откликом ДОЭ. Системы на базе ДОЭ широко применяются для таких задач как: увеличение глубины резкости, устранение хроматических аберраций, снижение массы и габаритов оптических систем.

Поскольку кодирование в этом случае осуществляется сверткой, наличие в распределении амплитуд Фурье-спектра кодирующего ключа нулевых и близких к нулю значений приводит к потере информации в кодированном изображении. Соответственно, идеальный ключ не должен содержать в спектре нулевых и близких к нулю значений во избежание потерь информации при кодировании.

Использование ДОЭ накладывает ограничения на монохроматичность используемого излучения, кроме того, недостатком такой схемы кодирования является сложность замены кодирующего ключа. Последний недостаток можно устранить посредством использования фазовых пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) вместо статических ДОЭ. Ограничения на монохроматичность излучения также можно устранить, если реализовать схему кодирования без использования ДОЭ.

Существует метод оптического вычисления свертки в некогерентном свете – метод временного интегрирования, в котором ФРТ формируется не пространственным распределением, как в случае с ДОЭ, а временным – путем прописывания ФРТ траекторией, по которой осуществляется перемещение изображаемой сцены в процессе регистрации. Такой метод используется в некогерентных акустооптических корреляторах, конволверах и спектроанализаторах с временным интегрированием, однако для задач оптического кодирования данный метод ранее не применялся. Применение этого метода для оптического кодирования позволяет реализовать систему кодирования в некогерентном свете без использования ДОЭ.

К достоинствам метода оптического кодирования посредством временного интегрирования можно отнести возможности оперативного изменения кодирующей траектории и реализации, как в монохроматичном, так и в некогерентном свете. Кроме того, данный метод может быть использован в процессе создания схем оптического кодирования для моделирования ДОЭ.

В соответствии с вышеизложенным, **целью диссертационной работы** является разработка и экспериментальная апробация методов реализации оптического кодирования изображений в пространственно-некогерентном свете.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **основные задачи**:

1. Моделирование процесса оптического кодирования и численного восстановления кодированных изображений. Разработка метода оптического кодирования изображений посредством временного интегрирования.
2. Разработка методики генерации оптимальных ключей для конволюционного оптического кодирования в пространственно-некогерентном свете.
3. Разработка методики измерения двумерных модуляционных передаточных функций систем оптического кодирования.
4. Оценка достижимых характеристик систем оптического кодирования в пространственно-некогерентном свете. Оценка криптостойкости конволюционных методов оптического кодирования.
5. Экспериментальная реализация оптического кодирования с использованием перестраиваемого фазового дифракционного оптического элемента – ЖК ПВМС.

**Научная новизна** диссертации состоит в следующем:

1. Метод оптического вычисления свертки посредством временного интегрирования впервые применен для оптического кодирования, что позволяет реализовать систему оптического кодирования с некогерентным освещением.
2. Предложен метод прямого поиска со случайной траекторией, позволяющий генерировать действительные массивы с заданными спектральными свойствами. Метод позволяет осуществлять генерацию оптимальных ключей для оптического кодирования.
3. Разработана методика, позволяющая по результатам съемки одной сцены измерять двумерную модуляционную передаточную функцию отображающих оптических систем, в том числе кодирующих.
4. Впервые осуществлена экспериментальная реализация метода оптического кодирования в пространственно-некогерентном свете с использованием фазового ЖК ПВМС для динамической смены кодирующего ключа.

**Научная и практическая значимость** работы:

1. Разработанный метод оптического кодирования посредством временного интегрирования может быть применен не только в криптографических целях, но и для улучшения характеристик оптико-цифровых систем формирования изображений.
2. Предложенная методика может быть использована для оперативного измерения двумерной модуляционной передаточной функции отображающих оптических систем, в том числе основанных на принципе кодирования волнового фронта.
3. Измеренные характеристики фазового ЖК ПВМС и результаты их анализа позволяют осуществить оптимизацию его работы в системах оптической обработки информации, формирования лазерных пучков и отображения трехмерных сцен.
4. Результаты проведенного численного моделирования схемы оптического кодирования цифровой информации в пространственно-некогерентном свете могут быть использованы для разработки оптико-цифровых криптографических систем.

**Основные научные положения**, выносимые на защиту:

1. Метод оптического кодирования посредством временного интегрирования для осуществления реализаций оптических кодирующих систем, как в когерентном, так и в некогерентном свете. Экспериментально подтверждена возможность оптического

кодирования изображений предложенным методом в процессе их регистрации. Разрешающая способность реализованной установки кодирования-декодирования превышает таковую для регистрирующей оптической подсистемы.

2. Разработан метод прямого поиска со случайной траекторией для генерации кодирующих ключей и массивов с постоянными спектрами мощности, позволяющий получать массивы с нормированным среднеквадратическим отклонением распределения амплитуд Фурье-спектра от среднего значения от 0,002.
3. Разработана и экспериментально проверена методика измерения двумерной модуляционной передаточной функции отображающих оптических систем по результатам съемки одной сцены.
4. Экспериментальная реализация системы оптического кодирования на основе фазового ЖК ПВМС для осуществления кодирования изображений в пространственно-некогерентном свете с возможностью динамической смены кодирующего ключа.
5. Схема оптического кодирования цифровой информации в пространственно-некогерентном свете, которая позволяет достичь следующих предельных характеристик: быстродействие – 4,2 Гбит/с, вероятность ошибки –  $1,2 \cdot 10^{-15}$  и эквивалентная длина двоичного ключа – 128 Кбит.

#### **Личный вклад автора**

Все результаты получены лично автором работы или в соавторстве при его непосредственном участии.

#### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на международных конференциях IS&T/SPIE Electronic Imaging (Берлингейм, США, 2012), SPIE Photonics Europe (Брюссель, Бельгия, 2012), Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics (Москва-Самара, 2011); 7, 8, 9 Международных конференциях «ГОЛОЭКСПО» (Москва, 2010; Минск, 2011; Суздаль, 2012); VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011» (Санкт-Петербург, 2011); Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики–2012» (Санкт–Петербург, 2012); I и II Всероссийских конференциях по фотонике и информационной оптике (Москва, 2012, 2013); XLVI Всероссийской научной конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии (Москва, 2010);

ХІІІ, ХІV, ХV и ХVІ конференциях «Молодежь и наука» (Москва, 2010-2013); Научных сессиях НИЯУ МИФИ-2010, 2011 (Москва, 2010, 2011); ХLVIІ и ХLVIІІ Всероссийских конференциях по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники (Москва, 2011, 2012); ІХ и Х Всероссийских молодежных Самарских конкурсах-конференциях научных работ по оптике и лазерной физике (Самара, 2011, 2012); 2-й Школе-семинаре «Фотоника нано- и микроструктур» (Владивосток, 2013).

#### **Публикации по теме работы**

По теме работы опубликовано 25 печатных работ, среди них 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, 10 - в трудах международных конференций, 11 - в трудах всероссийских конференций.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 129 страниц, включая 68 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 44 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Результаты исследований в рамках диссертационной темы изложены в следующем порядке.

В **первой главе** рассмотрен метод оптического кодирования изображений в пространственно-некогерентном монохроматическом свете с использованием ДОЭ. Предложен метод оптического кодирования с временным интегрированием, который может быть реализован в пространственно-некогерентном некогерентном свете. Также здесь дано описание использованной методики цифрового восстановления кодированных изображений.

В параграфе **1.1** рассмотрен метод оптического кодирования с использованием дифракционных оптических элементов. В основе метода кодирования оптическая свертка кодируемого изображения и импульсного отклика ДОЭ. Достоинствами метода являются высокое быстродействие и простота аппаратной реализации. К недостаткам относятся: необходимость использования монохроматического излучения и высококачественных ДОЭ. В качестве ДОЭ целесообразно использовать ПВМС, что позволяет осуществлять оперативную смену кодирующего ключа.

В параграфе 1.2 предложен метод оптического кодирования с временным интегрированием. Метод базируется на принципе оптического вычисления свертки посредством временного интегрирования – в данном случае изображение объекта сворачивается с функцией перемещения, то есть траекторией. К достоинствам метода оптического кодирования с временным интегрированием можно отнести возможность оперативного изменения кодирующей траектории и реализации, как в когерентном, так и в некогерентном свете. Кроме того, данный метод может быть использован в процессе создания схем оптического кодирования для моделирования ДОЭ. Другим применением является устранение спеклов при регистрации изображений в системах, использующих пространственно-когерентное лазерное излучение. В результате анализа методов численного восстановления оптически кодированных изображений выбран метод инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову, являющийся быстрым, эффективным и простым в реализации средством решения некорректной обратной задачи восстановления кодированных изображений.

**Вторая глава** посвящена созданию амплитудных массивов с заданными спектральными свойствами для использования в качестве ключей в схемах оптического конволюционного кодирования, а также в качестве масок для измерения двумерной модуляционной передаточной функции (МПФ) оптических систем. Проведен анализ литературы. Предложены два оригинальных метода генерации таких массивов. Проведена сравнительная оценка устойчивости спектров массивов, полученных различными методами.

В параграфе 2.1 по результатам анализа литературы отобраны два вида массивов с постоянными спектрами мощности – случайные массивы и URA (uniformly redundant arrays). Случайные массивы характеризуются высоким значением локальных флюктуаций в спектрах – среднеквадратическое отклонение (СКО) распределения амплитуд Фурье-спектра от среднего значения, нормированного на единицу, находится около значения 0,5. В результате в их спектрах значительное количество нулевых и околонулевых значений, что отрицательно сказывается на качестве восстановления кодированных с их использованием изображений. URA массивы, с другой стороны, обладают практически идеально ровным спектром с СКО на два порядка ниже, чем у случайных массивов. Недостатком URA массивов является их детерминированность – существует только один URA массив определенного размера.

В параграфе 2.2 предложена модификация метода Герчберга-Сэкстона (ГС) для генерации массивов с заданным распределением амплитуд Фурье-спектра. Алгоритм

характеризуется низкой вычислительной сложностью и быстрой сходимостью, позволяя получать массивы с СКО спектров от 0,004. Из полученной зависимости СКО от размеров массивов следует, что алгоритм дает наилучшие результаты для массивов небольшого размера (до  $128 \times 128$  отсчетов).

В параграфе 2.3 представлен разработанный метод прямого поиска со случайной траекторией (ППСТ). Метод позволяет генерировать массивы с заданной размерностью и требуемым числом градаций, обладающие нормированными СКО распределения амплитуд Фурье-спектра от 0,002 (для 256 градаций при размере массивов  $64 \times 64$  отсчетов и более). В отличие от метода Герчберга-Сэкстона, данный метод характеризуется высокими вычислительными затратами, но позволяет получать массивы со значительно меньшими значениями СКО спектров. Из полученной зависимости СКО от размеров массивов следует, что алгоритм дает наилучшие результаты для массивов размером  $32 \times 32$  отсчета и более.

В параграфе 2.4 приведены результаты сравнительной оценки устойчивости спектров массивов полученных методами ППСТ, ГС, а также URA и случайных массивов (рис.1) к шумам и геометрическим искажениям. Установлено, что массивы, полученные методом прямого поиска со случайной траекторией, обладают большей устойчивостью к геометрическим искажениям, чем URA массивы и массивы, полученные методом Герчберга-Сэкстона. Массивы ГС обладают лучшей устойчивостью к шумам, незначительно опережая ППСТ массивы. При малых искажениях, однако, спектры ППСТ, ГС и URA массивов ведут себя практически одинаково, в результате чего все они годятся для точных измерений двумерной МПФ. Для достижения требуемой точности совмещения растров маски и фотосенсора целесообразно использовать корреляционный метод. Для грубых же оценок, в отсутствие возможности осуществить точную субпиксельную юстировку, ППСТ и ГС маски предпочтительней URA, обеспечивая точность измерений в 36% против 42% у URA и до двух раз меньший уровень ВЧ шумов в спектре.

В параграфе 2.5 показано, что отношение величины пика на нулевой частоте к среднему (за исключением нулевой частоты) значению распределения амплитуд Фурье-спектра определяет качество декодированных изображений. Ключи, полученные методом ППСТ, дают до 20% лучшие результаты по сравнению с ключами, полученными посредством случайного распределения.

В третьей главе приводится анализ литературы по методам измерения МПФ, предложен метод измерения двумерных модуляционных передаточных функций и проведена его экспериментальная апробация.

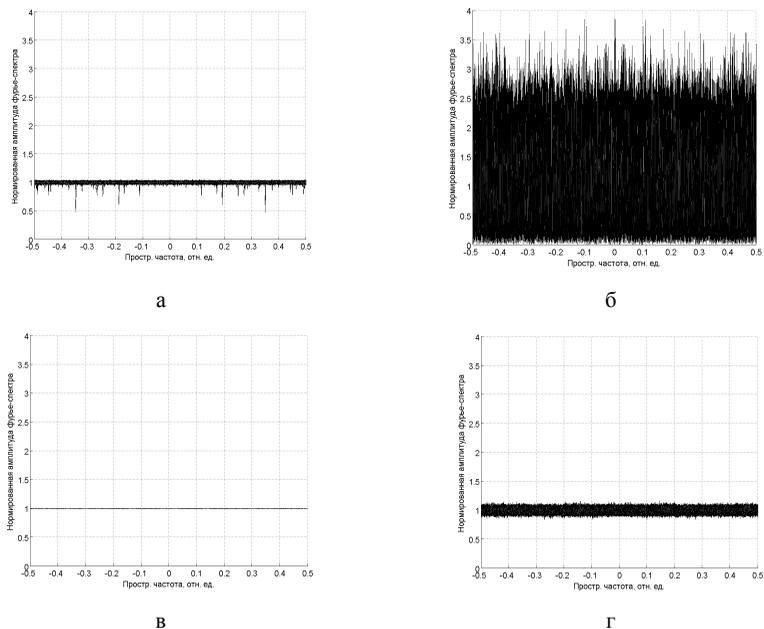


Рис. 1. Проекция распределений амплитуд Фурье-спектров массивов: ППСТ (а), случайного (б), URA (в) и ГС (г).

В параграфе 3.1 изложены результаты анализа литературы по методам измерения МПФ. Установлено, что в настоящее время нет методов, позволяющих точно определять двумерную модуляционную передаточную функцию без проведения большого количества ресурсоемких измерений.

В параграфе 3.2 предложен новый метод измерения двумерных модуляционных передаточных функций оптических систем. Предложенный метод позволяет осуществлять измерение двумерной МПФ оптической системы или производить ее быструю оценку без проведения большого количества измерений, не требуя при этом специального оборудования.

В параграфе 3.3 произведена экспериментальная апробация предложенного метода измерения двумерных МПФ оптических систем с использованием маски, полученной при

помощи разработанного алгоритма прямого поиска со случайной траекторией, и корреляционного совмещения растров изображения маски и фотосенсора. Результаты измерения МПФ, полученные предложенным методом, согласуются с результатами оценки, полученными стандартным методом с использованием миры.

**Четвертая глава** посвящена измерению характеристик фазового жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света (ЖК ПВМС) и оптимизации его работы в схемах оптического кодирования.

В параграфе **4.1** описаны преимущества использования фазовых ЖК ПВМС для оптического кодирования. Современные ЖК ПВМС характеризуются большим количеством отсчетов (до  $6 \cdot 10^6$ ), адресуемых градаций фазы (до 256) и глубиной модуляции (до  $10\pi$ ), обеспечивая частоту смены кадров до 60 Гц. Применение таких модуляторов для оптического кодирования изображений позволяет отказаться от механических элементов, достичь высокого качества кодирования/восстановления и обеспечить динамическую смену кодирующих ключей. В большинстве современных модуляторов используется цифровая адресация сигналов, что позволяет реализовывать компактные контроллеры при большом количестве пикселей (~10 млн.). Однако, при цифровой адресации сигналов в ЖК ПВМС неизбежны флюктуации фазы, вызванные ступенчатым профилем управляющего напряжения. Для устранения негативных эффектов флюктуации фазы возможно использование синхронизации ПВМС и источника излучения или регистрирующей камеры.

В параграфе **4.2** приводится описание спроектированной и изготовленной схемы синхронизации для DVI видеointерфейса, позволяющей осуществлять синхронизацию ПВМС с камерой или лазером.

В параграфе **4.3** описана созданная с использованием изготовленной схемы синхронизации и управляемой линии задержки экспериментальная установка для автоматизированных измерений флюктуаций фазы ЖК ПВМС.

В параграфе **4.4** приводятся результаты измерения характеристик фазовой модуляции ЖК ПВМС «HOLOEYE PLUTO VIS». Определено, что оптимальной конфигурацией адресации сигналов на ПВМС без использования синхронизации является конфигурация «0-6», обеспечивающая удвоенное СКО флюктуаций фазы не превышающее  $0,13 \pi$  и 9 разрешимых градаций фазы. Установлены оптимальные параметры работы ПВМС в режиме синхронизации – конфигурация «18-6» и задержка от начала кадра 12,5 мс, обеспечивающие удвоенное СКО флюктуаций фазы не превышающее  $0,025 \pi$  и 55 разрешимых градаций фазы.

В пятой главе описываются осуществленные экспериментальные реализации оптического кодирования в пространственно-некогерентном свете, приведены результаты физических экспериментов и численного моделирования.

В параграфе 5.1 описана осуществленная экспериментальная реализация оптического кодирования посредством временного интегрирования с использованием ЖК дисплея для перемещения кодируемого изображения. На реализованной установке возможно кодирование монохромных полутоновых изображений с суммарным числом отсчетов кодируемого изображения и кодирующей функции рассеяния точки (ФРТ) до  $1920 \times 1080$  со скоростью до 30 ненулевых отсчетов бинарной ФРТ в секунду. Выработан критерий исчезновения муаровых полос на восстанавливаемых изображениях при использовании цветной камеры для регистрации кодированных изображений – уровень дисперсии цветовых коэффициентов зарегистрированного белого поля не превышающий 0,08. Полученное значение максимально допустимого уровня дисперсии позволяет выполнять быстрый подбор требуемой дефокусировки при настройке установки, ограничиваясь измерением дисперсий цветовых коэффициентов, без проведения дополнительных экспериментов по кодированию и восстановлению тестовых изображений. Установлено, что одним из основных искажающих факторов при оптическом кодировании является искажение значений яркости выводимого изображения, связанное с неравномерной подсветкой экрана ЖК монитора и зависимостью яркости его пикселей от угла наблюдения. Минимизация влияния данного фактора посредством численной корректировки экспериментально полученной маски неоднородностей позволила снизить СКО восстановленных изображений от оригиналов в 2 раза. Результаты экспериментов (рис. 2) демонстрируют успешное кодирование и последующее восстановление пяти тестовых изображений. Из зависимостей нормированных СКО от параметра регуляризации при восстановлении для пяти кодированных изображений следует, что наилучшие результаты восстановления соответствуют значениям параметра регуляризации  $10^{-3} \div 10^{-5}$ . В процессе кодирования-декодирования получен эффект повышения разрешения за счет некоторой компенсации искажений вносимых оптикой.

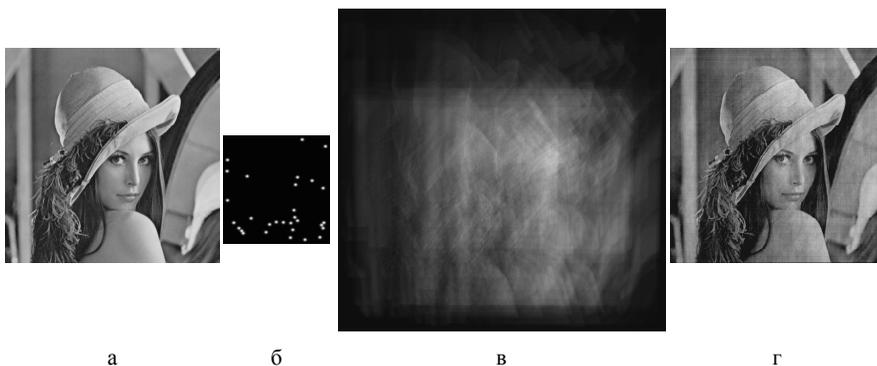


Рис. 2. Пример оптического кодирования: кодируемое изображение (а) кодируется траекторией (б), формируя кодированное изображений (в), которое затем численно декодируется (г)

В параграфе 5.2 приводится экспериментальная реализация метода оптического кодирования с временным интегрированием на базе фазового ЖК ПВМС (рис. 3). Модулятор формирует последовательно сменяющиеся решетки фазовых клиньев (концентрирующие дифракционные решетки), где каждая решетка отражает свет под определенным углом в зависимости от ее периода и угла поворота. ПВМС при этом работает как зеркало с двумя степенями свободы, но без каких-либо перемещающихся деталей. Результаты экспериментов демонстрируют успешное кодирование-декодирование тестовых изображений.

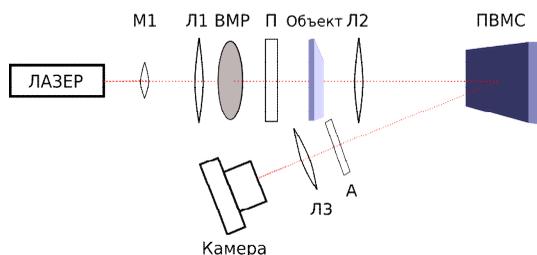


Рис. 3. Схема оптического кодирования с временным интегрированием на базе ЖК ПВМС

В параграфе 5.3 предложена схема оптического кодирования цифровой информации в пространственно-некогерентном свете. С учетом характеристик современной элементной базы определены основные компоненты ее аппаратной реализации.

Осуществлено численное моделирование предложенной схемы на базе двух DLP модуляторов и высокоскоростной камеры. Согласно полученным результатам, предложенная система характеризуется высоким быстродействием – 4,2 Гбит/с, низкой вероятностью ошибки -  $1,2 \cdot 10^{-15}$  и потенциально высокой криптостойкостью: эквивалентная длина двоичного ключа – 128 Кбит. Предложенная схема кодирования цифровой информации позволяет эффективно сочетать методы численного и оптического кодирования для дальнейшего увеличения криптостойкости.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен метод оптического кодирования с временным интегрированием. Метод базируется на принципе оптического вычисления свертки посредством временного интегрирования. К достоинствам метода оптического кодирования с временным интегрированием относятся возможность оперативного изменения кодирующей траектории и реализация, как в когерентном, так и в некогерентном свете.
2. Проведено обоснование метода оптического кодирования посредством временного интегрирования и его численное моделирование. Предложены варианты аппаратных реализаций оптических кодирующих систем на его основе, оценены основные достижимые параметры таких систем.
3. Разработан метод прямого поиска со случайной траекторией (ППСТ) для создания амплитудных массивов с заданными спектральными свойствами для генерации оптимальных ключей для оптического кодирования. Метод позволяет генерировать массивы с заданной размерностью и требуемым числом градаций, обладающие нормированными СКО распределения амплитуд Фурье-спектра от 0,002 (для 256 градаций при размере масок  $64 \times 64$  пикселей и более).
4. Исследование устойчивости массивов к геометрическим искажениям и шумам показало, что массивы, полученные ППСТ алгоритмом, обладают большей устойчивостью к геометрическим искажениям, чем URA (uniformly redundant array) и массивы, полученные алгоритмом Герчберга-Сэкстона (ГС). Для достижения требуемой точности совмещения растров маски и фотосенсора целесообразно использовать корреляционный метод. Для грубых же оценок, когда нет возможности осуществить точную субпиксельную юстировку, ППСТ и ГС массивы предпочтительней URA, обеспечивая точность измерений в 36% против 42% у URA и вдвое меньший уровень ВЧ шумов в спектре.

5. Предложен новый метод измерения модуляционной передаточной функции оптических систем (МПФ), позволяющий осуществлять измерение двумерной МПФ оптической системы или производить ее быструю оценку, без проведения большого количества измерений, не требуя при этом специального оборудования.
6. Произведена экспериментальная апробация предложенного метода измерения двумерных МПФ оптических систем с использованием массива, полученного при помощи ППСТ алгоритма и корреляционного совмещения растров изображения маски и фотосенсора. Результаты измерения МПФ, полученные предложенным методом, согласуются с результатами оценки, полученными стандартным методом с использованием миры.
7. На созданной установке проведены измерения характеристик фазовой модуляции ЖК ПВМС «HOLOEYE PLUTO VIS». Определено, что оптимальной конфигурацией адресации сигналов на ПВМС без использования синхронизации является конфигурация «0-6», обеспечивающая удвоенное СКО флюктуаций фазы не превышающее  $0,13\pi$  и 9 разрешимых градаций фазы. Установлены оптимальные параметры работы ПВМС в режиме синхронизации – конфигурация «18-6» и задержка от начала кадра 12,5 мс, обеспечивающие удвоенное СКО флюктуаций фазы не превышающее  $0,025\pi$  и 55 разрешимых градаций фазы.
8. Осуществлена экспериментальная реализация метода оптического кодирования с временным интегрированием на базе фазового ЖК ПВМС. На реализованной установке возможно кодирование монохромных полутоновых изображений с разрешением до  $750 \times 750$  отсчетов со скоростью до 30 ненулевых отсчетов бинарной ФРТ в секунду при размере ключа  $330 \times 330$  отсчетов.
9. Предложена и численно смоделирована схема оптического кодирования цифровой информации в пространственно-некогерентном свете, характеризующаяся высоким быстродействием – 4,2 Гбит/с, низкой вероятностью ошибки –  $1,2 \cdot 10^{-15}$  и потенциально высокой криптостойкостью: эквивалентная длина двоичного ключа – 128 Кбит.

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Краснов В.В., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. Оптическое кодирование изображений с временным интегрированием с использованием коммерческой фотокамеры и жидкокристаллического монитора // Вестник РУДН, Серия «Математика. Информатика. Физика». 2011. № 4. С. 124-134.
2. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Стариков С.Н. [и др.]. Увеличение отношения сигнал/шум за счёт пространственного усреднения при регистрации изображений // Вестник РУДН, Серия «Математика. Информатика. Физика». 2012. № 4. С. 122-136.
3. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Стариков С.Н. Моделирование системы оптического кодирования цифровой информации с пространственно-некогерентным освещением // Научные технологии. 2013. № 4. С. 3-11.
4. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Стариков С.Н. Метод генерации амплитудных масок с постоянными спектрами мощности и их использование для измерения двумерных модуляционных передаточных функций оптических систем // Оптический журнал, 2013. Т. 80. № 5. С. 44-52.
5. Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Krasnov V.V. [et al.]. Method of optical image coding by time integration // Proc.SPIE. 2012. Vol. 8429. 84291P.
6. Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Krasnov V.V. [et al.]. Measurement of noises and modulation transfer function of cameras used in optical-digital correlators // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8301. 830113.
7. Конник М.В., Краснов В.В., Стариков С.Н. Экспериментальная реализация метода оптического кодирования изображений с временным интегрированием // Сборник трудов XIII международной телекоммуникационной конференции молодых ученых и студентов «Молодежь и наука». М., 2010. Ч. 3. С. 132-133
8. 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. М., 2010. С. 50-51.
9. Манькин Э.А., Стариков С.Н., Краснов В.В. [и др.]. Исследование характеристик матричных фоторегистраторов для записи цифровых голограмм // Сборник трудов 7 Международной конференции "ГОЛОЭКСПО-2010". М., 2010. С. 306-310.
10. Краснов В.В., Стариков С.Н. Обеспечение требований к отображению информации при оптическом кодировании с временным интегрированием // Сборник трудов

научно-технической конференции-семинара по фотонике и информационной оптике. М., 2011. С. 214-215.

11. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Стариков С.Н. [и др.]. Измерение модуляционной передаточной функции, шумов и радиометрической функции фото - и видеокамер // Сборник трудов научно-технической конференции-семинара по фотонике и информационной оптике. М., 2011. С. 230-231.
12. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Стариков С.Н. Измерение двумерной модуляционной передаточной функции при помощи амплитудных масок с постоянным спектром мощности // Тезисы докладов 47 Всероссийской конференции по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники. М., 2011. С. 38-39.
13. Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov S.N. Modified random target method for measurement of the two-dimensional modulation transfer function of an optical system // Proc. of APCOM–2011. Moscow - Samara, 2011. P. MOSP8.
14. Краснов В.В., Стариков С.Н. Оптическое кодирование изображений с использованием ЖК монитора и монохромной цифровой камеры // Сборник трудов 8 Международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2011». Минск, 2011. С. 512-515.
15. Краснов В.В., Стариков С.Н. Оптическое кодирование изображений с временным интегрированием // Сборник трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011». Санкт-Петербург, 2011. С. 102-104.
16. Краснов В.В., Черемхин П.А. Метод измерения модуляционной передаточной функции оптических систем с использованием амплитудных масок с постоянными спектрами мощности // Сборник докладов IX Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике. Самара, 2011. С. 232-236.
17. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Стариков С.Н. [и др.]. Метод измерения двумерных модуляционных передаточных функций оптических систем // Сборник трудов Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2012. С. 213-214.
18. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Стариков С.Н. [и др.]. Использование пространственного усреднения для увеличения отношения сигнал/шум при регистрации изображений // Сборник трудов Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2012. С. 233-234.

19. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Стариков С.Н. [и др.]. Измерение временных флуктуаций модуляции фазы в ЖК ПВМС HOLOEYE PLUTO VIS // Сборник трудов 48 Всероссийской конференции по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники. М., 2012. С. 250-253.
20. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Стариков С.Н. Оптическое кодирование изображений с временным интегрированием при помощи фазового ЖК ПВМС // Сборник трудов 9 Международной конференции «ГОЛОЭКСПО–2012». Суздаль, 2012. С. 116-119.
21. Краснов В.В. Метод измерения МПФ с использованием маски с постоянным спектром мощности и его устойчивость к субпиксельным смещениям //Сборник трудов Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики–2012». Санкт–Петербург, 2012. С. 559-562.
22. Краснов В.В., Кузицин Ю.А. Измерение характеристик модуляции фазы в ЖК ПВМС HOLOEYE PLUTO VIS. Сборник трудов X Всероссийского молодежного конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике. Самара, 2012. С. 87-93.
23. Бондарева А.П., Евтихийев Н.Н., Краснов В.В. [и др.]. Амплитудные маски с постоянными спектрами мощности для измерения двумерных МПФ оптических систем // Сборник трудов II Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2013. С. 171-172.
24. Краснов В.В., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Оценка количества разрешимых градаций сигнала цифровых камер // Сборник трудов II Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2013. С. 281-282.
25. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Стариков С.Н. [и др.]. Оптическое кодирование изображений при их регистрации в некогерентном свете // Сборник трудов XVI международной телекоммуникационной конференции молодых ученых и студентов «Молодежь и наука». М., 2013. Ч. 2. С. 87-88.