

На правах рукописи

УДК 681.7



Колесников Максим Вячеславович

**ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА
ДЛЯ СКРЫТОЙ МАРКИРОВКИ
РЕГИСТРИРУЕМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: Колючкин Василий Яковлевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры лазерных и оптико-
электронных систем

Официальные оппоненты: Коротаяев Валерий Викторович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой оптико-электронных
приборов и систем Университета ИТМО

Митекин Виталий Анатольевич,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник НИЛ-55 ФГАОУ ВО «Самарский
национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

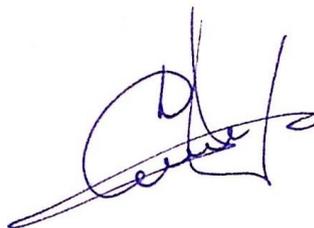
Защита диссертации состоится « » ноября 2017 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан « » сентября 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.19
кандидат физико-математических наук



Д.А. Семеренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время видеозаписи, полученные с цифровых телевизионных камер систем обеспечения безопасности, широко используются при проведении следственных действий, криминалистических экспертиз, судебных процессов. Это приводит к необходимости совершенствования методов, позволяющих подтвердить подлинность цифровых видеозаписей. Процедура проверки подлинности (аутентификации) видеозаписи включает в себя подтверждение использования конкретного технического устройства для регистрации видеозаписи, а также подтверждение отсутствия признаков монтажа в видеозаписи. Для решения задачи аутентификации видеозаписи могут применяться методы, основанные на анализе характеристик реализаций помех, содержащихся в кадрах видеозаписи. Недостаток указанных методов заключается в малом числе аутентифицирующих признаков, которые могут быть утрачены в результате воздействия процедур сжатия информации.

С целью повышения достоверности аутентификации можно использовать скрытую маркировку регистрируемых кадров видеозаписи. Под маркировкой понимается процедура внедрения в кадры видеозаписи блока данных, содержащего аутентифицирующий код (АК). Аутентичность маркированной видеозаписи может быть подтверждена путем сопоставления извлеченного из кадров видеозаписи АК с эталоном. Маркировка, предназначенная для подтверждения аутентичности, должна быть скрытой и устойчивой к имитации. Под скрытностью понимается незаметность искажений, вызванных маркировкой, при визуальном наблюдении кадров видеозаписи. Для обеспечения скрытности маркировки целесообразно использовать методы стеганографии. Процедура внедрения АК с использованием методов стеганографии может быть реализована программным путем или аппаратным. Аппаратная реализация процедуры внедрения обеспечивает большую устойчивость к имитации маркировки.

Маркировка с применением аппаратных средств может быть реализована либо специальной обработкой цифрового сигнала в электронном тракте устройства регистрации видеозаписи, либо суммированием на этапе регистрации основного оптического сигнала, содержащего изображение пространства предметов, с дополнительным оптическим сигналом (стеганограммой), в параметрах которого содержится АК. Реализация процедуры маркировки в оптическом канале с использованием методов стеганографии обладает следующими достоинствами: высокая степень устойчивости маркировки к имитации; возможность реализации для практически любых устройств регистрации изображений без их существенных доработок.

Разработке методов маркировки изображений посвящены работы Б. Явиди (B. Javidi), Дж. Розена (J. Rosen), Н. Такаи (N. Takai), В.Г. Грибунина, В.И. Коржика, М.В. Смирнова и др. Исследования в данной области ведутся в Университете ИТМО, СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, МОУ «Институт инженерной физики» и ряде других организаций. Представленные в печати публикации содержат результаты исследований методов внедрения данных в

цифровые изображения путем их цифровой обработки, реализуемой с помощью программных средств. Однако сведения об оптической реализации методов внедрения данных в изображение в литературных источниках отсутствуют. Поэтому тема диссертации, посвящённая разработке аппаратно реализуемых оптических методов маркировки регистрируемых изображений, является актуальной.

Цель диссертации заключается в разработке аппаратно реализуемых оптических методов и оптико-электронных устройств для внедрения скрытого АК в регистрируемые изображения.

Задачи диссертации

Для достижения поставленной цели в диссертации были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Определены требования к системе, осуществляющей внедрение скрытого АК в процессе регистрации оптического изображения;
2. Разработаны оптические методы маркировки регистрируемых изображений и принципы действия реализующих их оптико-электронных устройств;
3. Исследована устойчивость разработанных оптических методов маркировки изображений и кадров видеозаписей к воздействию методов сжатия JPEG и MPEG-4 соответственно, и определены условия, при которых сохраняется устойчивость;
4. Разработана методика проектирования оптико-электронных устройств, обеспечивающих маркировку регистрируемых изображений;
5. Методика проектирования апробирована при создании макетного образца оптико-электронного устройства маркировки изображений, проведены экспериментальные исследования процесса маркировки, подтвердившие основные теоретические положения диссертации.

Методы исследований

При решении поставленных задач использовались методы скалярной теории дифракции, оптической и цифровой обработки изображений, теории вероятности и математической статистики.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

- разработан оптический метод маркировки, названный спекл-методом маркировки, заключающийся в наложении на регистрируемое изображение спекл-структуры, формируемой в дальней зоне дифракции, который обеспечивает внедрение АК во всем пространственно-частотном диапазоне регистрируемого изображения;
- разработан оптический метод маркировки, названный интерференционным методом маркировки, заключающийся в наложении на регистрируемое изображение интерференционной структуры, формируемой в результате интерференции опорной и объектной волн в дальней зоне дифракции, который обеспечивает внедрение АК в требуемой области пространственных частот регистрируемого изображения;
- предложены новые функциональные схемы оптико-электронных устройств для оптической маркировки регистрируемых изображений, принципы действия

которых основаны на реализации спекл-метода маркировки и интерференционного метода маркировки с помощью фурье-преобразующего объекта.

Практическая ценность заключается в том, что разработанные оптические методы маркировки регистрируемых изображений и оптико-электронные устройства для их реализации позволяют получать видеозаписи, которые могут служить доказательной базой в следственных и судебных органах РФ.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Применение дополнительной пространственной псевдослучайной фазовой модуляции оптической волны, имеющей бинарную модуляцию амплитуды или фазы, позволяет с предсказуемым уровнем аддитивных помех реконструировать поле комплексных амплитуд этой волны по распределению интенсивности в зоне Фраунгофера;
2. Маркировка регистрируемых изображений путем наложения спекл-структуры в дальней зоне дифракции устойчива к воздействию сжатия по стандарту JPEG, если размеры индивидуального спекла превышают два периода пространственной дискретизации;
3. Применение пространственной фазовой модуляции оптической волны при кодировании битов аутентифицирующего кода обеспечивает большую вероятность обнаружения наличия аутентифицирующего кода по сравнению с использованием пространственной амплитудной модуляции.

Достоверность результатов работы основана на корректном применении используемых методов, а также на соответствии результатов математического моделирования и экспериментальных исследований.

Реализация и внедрение результатов

Результаты диссертации использованы в ФГКУ «В/ч 34435», что подтверждается соответствующим актом.

Апробация работы

Результаты проведенного исследования докладывались на VIII и IX международных конференциях «Прикладная оптика» (Санкт-Петербург, 2008, 2010 г.), III конференции «Будущее оптики» (Санкт-Петербург, 2015 г.) и всероссийской научно-технической конференции «Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении» (Москва, 2016 г.).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 6 публикациях, в том числе, в 2 научных статьях, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения и списка литературы, содержащего 85 библиографических описаний цитируемых источников. Диссертация изложена на 137 страницах, содержит 41 рисунок и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, решаемой в диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ существующих стеганографических алгоритмов и определены требования к системам, предназначенным для внедрения скрытого АК в процессе регистрации оптического изображения.

В общем случае для систем сокрытия данных наиболее важными техническими показателями являются: показатели устойчивости к возможным искажениям и атакам, показатели незаметности наличия дополнительной внедренной информации в изображении и количество внедренной информации. Главной задачей при разработке стеганографического алгоритма, является обеспечение компромисса между указанными показателями для конкретных условий использования системы сокрытия данных. Для систем сокрытия данных, предназначенных для проверки аутентичности при криминалистической экспертизе, должна обеспечиваться устойчивость к методам сжатия информации. При этом редактирование кадров видеозаписи или их перестановка, должны приводить к заметным искажениям при извлечении АК.

Процедура внедрения АК в оптическом канале заключается в суммировании распределения интенсивности изображения (изображения-контейнера), формируемого объективом в основном оптическом канале системы регистрации, с распределением интенсивности сигнала (стеганограммой), в параметрах которого содержится АК. Внедрение АК в реальном времени в последовательность регистрируемых кадров накладывает жесткие требования к скорости процесса внедрения, которые могут быть обеспечены только путем аппаратной реализации.

Временные ограничения не позволяют использовать сложные модели зрительной системы человека, предполагающие анализ изображения-контейнера, поэтому незаметность стеганограммы на фоне изображения-контейнера обеспечивается её относительно низким уровнем интенсивности. На основе анализа особенностей зрительного восприятия изображений показано, что в условиях априори неизвестной структуры изображения-контейнера для обеспечения визуальной незаметности среднее квадратическое отклонение (СКО) интенсивности в стеганограмме, не должно превышать 1% от среднего значения интенсивности изображения-контейнера.

Проведен сравнительный анализ оптических методов, используемых в системах обеспечения безопасности. Особенность оптических методов заключается в том, что данные кодируется в параметрах когерентного оптического сигнала (амплитуде и фазе). На основе анализа сделано заключение, что для получения стеганограммы, устойчивой к имитации, целесообразно использование псевдослучайной фазовой модуляции оптического сигнала, а в качестве основной операции кодирования – оптического фурие-преобразования.

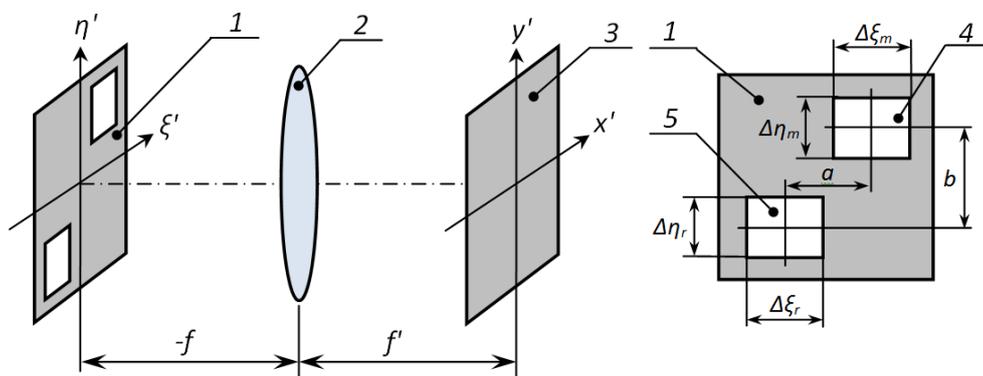
Во второй главе изложены методы стеганографического внедрения АК, представляющего собой бинарное изображение (БИ). Особенностью предложенных методов является то, что стеганограмма формируется в виде фурие-

образа амплитудно-фазового транспаранта, в амплитуде или фазе которого кодируется БИ. Предлагаемые методы могут быть реализованы с использованием компактных опико-электронных устройств для серийно выпускаемых средств регистрации изображений.

Формирование стеганограммы в интерференционном методе маркировки заключается в представлении дополнительного оптического сигнала, как результата интерференции двух волн: объектной волны, в параметрах которой содержится БИ, и опорной волны, все параметры которой априори известны. Для аппаратной реализации данного метода используется схема коррелятора совместного преобразования, представленная на Рис. 1. Амплитудно-фазовый транспарант 1 располагается в передней фокальной плоскости фурье-преобразующего объектива (ФПО) 2 и содержит две области, которые смещены относительно друг друга и используются для формирования объектной и опорной волн. Комплексный коэффициент пропускания транспаранта описывается выражением

$$\tau_{\Sigma}(\xi, \eta) = [\tau_M(\xi - a, \eta - b) + \tau_R(\xi, \eta)] \exp[i\varphi(\xi, \eta)], \quad (1)$$

где $\tau_M(\xi_m, \eta_m)$, $\tau_R(\xi_r, \eta_r)$ – комплексные коэффициенты пропускания в областях объектной и опорной волн соответственно; a, b – параметры смещения; $\varphi(\xi, \eta)$ – псевдослучайная функция, описывающая пропускание фазовой части транспаранта, которая обеспечивает подавление нулевого порядка в спектре сигнала. Эта функция должна быть известна, т.к. она используется для реконструкции объектной волны при извлечении АК.



- 1 – амплитудно-фазовый транспарант; 2 – фурье-преобразующий объектив;
 3 – плоскость регистрации; 4 – область объектной волны;
 5 – область опорной волны.

Рис. 1. Формирование стеганограммы по схеме коррелятора совместного преобразования

При подсветке транспаранта плоской волной с единичной амплитудой поле комплексных амплитуд волны в плоскости, расположенной перед ФПО 2, можно представить, как

$$A(\xi, \eta) = A_M(\xi - a, \eta - b) + A_R(\xi, \eta), \quad (2)$$

где $A_M(\xi_m, \eta_m) = \tau_M(\xi_m, \eta_m) \exp[i\varphi(\xi_m, \eta_m)]$ – поле комплексных амплитуд объектной волны, $A_R(\xi_r, \eta_r) = \tau_R(\xi_r, \eta_r) \exp[i\varphi(\xi_r, \eta_r)]$ – поле комплексных амплитуд опорной волны. Пространственный спектр сформированной таким образом стеганограммы будет содержать два симметричных корреляционных «пика», смещенных относительно нулевого порядка на значения $v_{x0} = a/\lambda f'$ и $v_{y0} = b/\lambda f'$, каждый из которых представляет собой свертку функций, описывающих объектную и опорную волны в плоскости транспаранта:

$$\tilde{I}_W(v_x, v_y) = \tilde{I}_0(v_x, v_y) + \tilde{I}_{+1}(v_x, v_y) + \tilde{I}_{-1}(v_x, v_y), \quad (3)$$

где введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_0(v_x, v_y) &= (\lambda f')^2 \left[A_M(-\lambda f'v_x, -\lambda f'v_y) \otimes A_M^*(\lambda f'v_x, \lambda f'v_y) + \right. \\ &\quad \left. + A_R(-\lambda f'v_x, -\lambda f'v_y) \otimes A_R^*(\lambda f'v_x, \lambda f'v_y) \right], \\ \tilde{I}_{+1}(v_x, v_y) &= (\lambda f')^2 A_M(-\lambda f'v_x, -\lambda f'v_y) \otimes A_R^*(\lambda f'v_x, \lambda f'v_y) \otimes \delta(v_x + v_{x0}, v_y + v_{y0}), \\ \tilde{I}_{-1}(v_x, v_y) &= (\lambda f')^2 A_M^*(\lambda f'v_x, \lambda f'v_y) \otimes A_R(-\lambda f'v_x, -\lambda f'v_y) \otimes \delta(v_x - v_{x0}, v_y - v_{y0}). \end{aligned}$$

При наложении интерференционной структуры на произвольное изображение (изображение–контейнер) внедренное БИ будет содержаться в определенной области частот в пределах $\Delta v_x = (\Delta \xi_m + \Delta \xi_r) / (\lambda f')$ и $\Delta v_y = (\Delta \eta_m + \Delta \eta_r) / (\lambda f')$, где $\Delta \xi_m, \Delta \eta_m$ и $\Delta \xi_r, \Delta \eta_r$ – размеры областей транспаранта, в которых формируется объектная и опорная волны.

Размер и смещение корреляционных «пиков» в спектре стегано-изображения (изображения–контейнера с наложенной стеганограммой) определяются параметрами транспаранта, что позволяет при известной опорной волне $A_R(\xi_r, \eta_r)$ однозначно определить внедренное БИ. В работе предложено для решения задачи извлечения БИ применить алгоритм фазовой корреляции, достоинства которого являются устойчивость к помехам и простота реализации. Для этого на первом этапе алгоритма необходимо путём соответствующей линейной фильтрации выделить только ту область спектра пространственных частот, в которой находится один из корреляционных «пиков». На втором этапе восстановленная объектная волна определяется в соответствии с выражением

$$A_M^r(\xi - a, \eta - b) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \frac{I_{+1}(x', y') \tilde{A}_R(x'/\lambda f', y'/\lambda f')}{|I_{+1}(x', y') \tilde{A}_R(x'/\lambda f', y'/\lambda f')|} \right\}, \quad (4)$$

где \mathfrak{F}^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье, $I_{+1}(x', y')$ – стегано-изображение после частотной фильтрации.

Результаты математического моделирования процедур внедрения и извлечения БИ в интерференционном методе маркировки представлены на Рис. 2. При моделировании в качестве изображения-контейнера использовалось типовое тестовое изображение «Peppers» размером 512×512 пикселей. Опорная волна задавалась прямоугольной областью, модуль комплексного коэффициента

пропускания $\tau_M(\xi_m, \eta_m)$ в области объектной волны имел вид БИ в виде символов «МГТУ», а псевдослучайная фазовая функция $\varphi(\xi, \eta)$ являлась бинарной, и принимала значения 0 или π .



Рис. 2. Результаты моделирования процедур внедрения и извлечения АК в виде БИ в интерференционном методе маркировки

Недостатком интерференционного метода является наличие в стеганограмме характерных для интерференционной структуры регулярных полос с определённым направлением и периодом, что снижает скрытность маркировки.

Формирование стеганограммы в спекл-методе маркировки заключается в представлении дополнительного оптического сигнала в виде объективной спекл-структуры в зоне Фраунгофера, а именно, в задней фокальной плоскости ФПО. При этом АК, описываемый бинарной функцией $M(\xi, \eta)$, задается путём амплитудной или фазовой модуляции когерентного излучения в плоскости псевдослучайного фазового транспаранта, который находится перед ФПО. Поле комплексных амплитуд в плоскости фазового транспаранта при подсветке транспаранта плоской волной с единичной амплитудой имеет вид $A_\varphi(\xi, \eta) = \exp[i\varphi_R(\xi, \eta)]$. Сложность извлечения АК при реализации этого метода обусловлена потерей фазовой составляющей при регистрации распределения интенсивности в виде спекл-структуры. В диссертации предложен алгоритм для восстановления исходного распределения поля по зарегистрированному распределению интенсивности.

Если АК кодируются путём бинарной амплитудной или фазовой модуляцией с комплексным значением коэффициента модуляции, равным τ_0 , то поле комплексных амплитуд волны в плоскости транспаранта можно описать функцией вида

$$A(\xi, \eta) = A_1(\xi, \eta) + \tau_0 A_2(\xi, \eta), \quad (5)$$

где $A_1(\xi, \eta) = \bar{M}(\xi, \eta) A_\varphi(\xi, \eta)$, $A_2(\xi, \eta) = M(\xi, \eta) A_\varphi(\xi, \eta)$, $\bar{M}(\xi, \eta) = 1 - M(\xi, \eta)$.

Распределение интенсивности в фокальной плоскости ФПО, где располагается устройство регистрации, с точностью до постоянного множителя можно представить как

$$I_w = \tilde{A} \cdot \tilde{A}_\varphi^* + (|\tau_0|^2 - \tau_0) |\tilde{A}_2|^2 + (\tau_0^* - 1) \tilde{A}_1 \tilde{A}_2^*. \quad (6)$$

На Рис. 3 приведена иллюстрация процедуры формирования поля комплексных амплитуд волны перед ФПО. Псевдослучайная фазовая функция представлена в градациях серого.

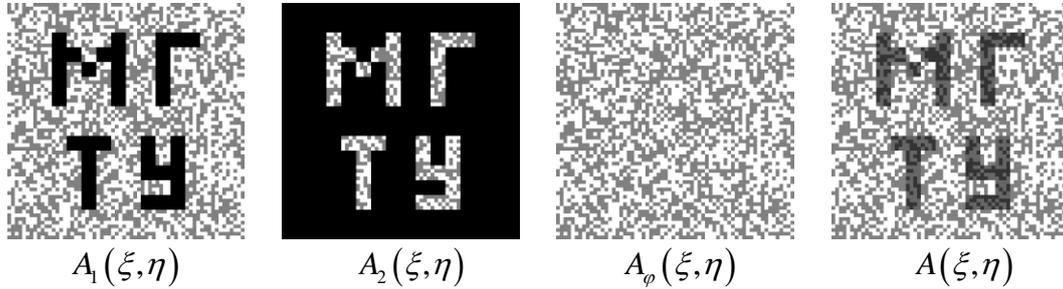


Рис. 3. Иллюстрация представления поля комплексных амплитуды волны перед ФПО в спекл-методе маркировки

Из выражения (6) следует, что при известном опорном распределении $A_\varphi(\xi, \eta)$ существует принципиальная возможность восстановления поля комплексных амплитуд $A(\xi, \eta)$ в плоскости транспаранта, например, с помощью винеровской фильтрации. Так как опорное поле комплексных амплитуд представляет собой реализацию случайного поля, то после восстановления поля комплексных амплитуд волны второе и третье слагаемое в выражении (6) примут вид реализации типа «белого» шума.

В работе предложен алгоритм восстановления, основанный на использовании фазовой функции опорного распределения

$$\psi_R(v_x, v_y) = \arg[\tilde{A}_\varphi(v_x, v_y)]. \quad (7)$$

Восстановленное поле комплексных амплитуд в плоскости транспаранта, определяемое как

$$A^{ret}(\xi, \eta) = \mathfrak{I}^{-1} \left\{ \left[I_w(v_x, v_y) \right]^{0.5} \exp \left[i \psi_R(v_x, v_y) \right] \right\}, \quad (8)$$

не совпадает с $A(\xi, \eta)$ и является её приближённым представлением, искажённым помехой. Уровень помехи в восстановленном сигнале, зависит от значения коэффициента модуляции τ_0 , а также соотношения между площадью транспаранта, в пределах которой задается АК, и общей площадью фазового транспаранта.

Поскольку стегано-изображение представляет собой сумму изображения-контейнера и распределения интенсивности, имеющего шумоподобный вид, то на первом этапе извлечения АК требуется отделить шумовую составляющую, в которой содержится полезный сигнал, от основного изображения. Для этой цели могут быть использованы алгоритмы цифровой фильтрации, которые обычно используют для подавления помех.

Иллюстрация результатов моделирования при выполнении процедур внедрения и извлечения АК в спекл-методе маркировки представлена на Рис. 4.



Рис. 4. Результаты моделирования процедур внедрения и извлечения АК в спекл-методе маркировки

Из проведенного анализа следует, что предложенные оптические методы маркировки изображений, основанные на использовании фурье-преобразующих объективов, могут быть реализованы по одинаковым оптическим схемам, но с различными амплитудно-фазовыми транспарантами. Для оценки практической применимости этих методов требуется провести их анализ с точки зрения устойчивости к процедурам сжатия и возможности использования для выявления монтажа видеозаписей.

В третьей главе изложены алгоритмы извлечения АК, внедрённого различными методами, из маркированного изображения, а также приведены результаты исследований устойчивости АК к процедурам сжатия изображений и видеопотоков.

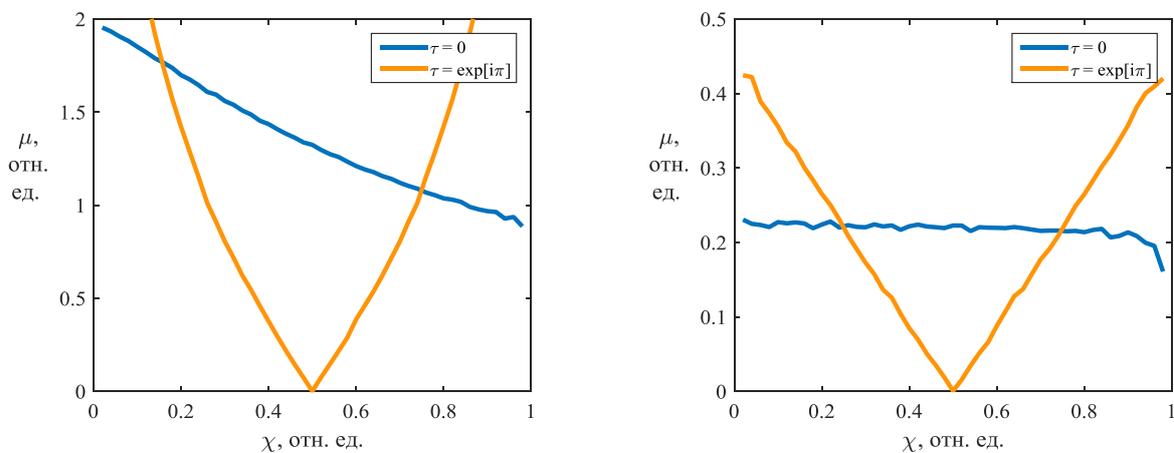
Для практического использования предложенных методов внедрения АК, представленного в виде БИ, необходимо определить порядок задания информации на амплитудно-фазовом транспаранте, а также соответствующий ему алгоритм извлечения АК. Формализовать процесс задания информации можно путем разбиения площади фазового транспаранта, в пределах которого задается АК, на некоторое количество элементарных областей с количеством ячеек $\Delta m_b \times \Delta n_b$, каждая из которых задает один бит информации путём амплитудной или фазовой модуляции оптического сигнала. Выбор размера элемента информации определяется на основе компромисса между количеством элементов информации и отношением сигнал/шум μ в цифровом изображении, содержащем извлечённый АК. Увеличивая размер, можно добиться необходимого отношения сигнал/шум путём усреднения сигнала по соответствующим областям, причем $\mu \sim \sqrt{\Delta m_b \times \Delta n_b}$. При извлечении АК порядок задания элементов информации на амплитудно-фазовом транспаранте должен быть известен. Максимальное количество битов информации, внедряемой в пределах одного кадра, определяется выражением

$$N_{\text{inf}} = \chi M_{\varphi} N_{\varphi} (\Delta m_b \Delta n_b)^{-1}, \quad (9)$$

где $M_\varphi \times N_\varphi$ – количество ячеек фазового транспаранта; χ – коэффициент использования, равный отношению площади модулируемых областей фазового транспаранта, ко всей площади фазового транспаранта.

Процедура извлечения АК из интерференционной структуры при известных параметрах опорной волны не зависит от параметров объектной волны, поэтому в интерференционном методе маркировки максимальная площадь модулируемых областей равна площади области объектной волны, то есть $\chi = 1$. В спекл-методе маркировки, чем больше площадь модулируемых областей, тем сильнее будет отличаться фазовая функция $\psi_R(v_x, v_y)$ опорного распределения, используемая при извлечении АК, от фазовой функции, потерянной при регистрации. Поэтому значение коэффициента χ влияет на отношение сигнал/шум в цифровом изображении, содержащем извлечённый АК.

На Рис. 5 представлены полученные методом математического моделирования расчётные зависимости отношения сигнал/шум от коэффициента χ при использовании спекл-метода маркировки для бинарной амплитудной и бинарной фазовой модуляции. Эти зависимости рассчитаны с учётом линейных искажений, дискретизации и квантования, возникающих при регистрации изображения. При моделировании процесса регистрации размер пятен спекл-структуры равнялся двум периодам расположения элементов матричного приёмника, а СКО спекл-структуры соответствовал одному уровню квантования.



а) без изображения-контейнера б) с изображением-контейнером
 Рис. 5. Зависимость отношения сигнал/шум от значения коэффициента использования фазового транспаранта при амплитудной и фазовой модуляции

Как следует из Рис. 5, наличие контейнера приводит к существенному снижению отношения сигнал/шум как при амплитудной, так и при фазовой модуляции, используемой для кодирования АК. Чтобы получить приемлемое отношение сигнал/шум при извлечении АК, требуется увеличивать линейные размеры области для задания одного элемента АК. Отметим, что для случая фазовой модуляции при $\chi > 0,5$ происходит инверсия контраста в изображении, содержащем АК. При условии $\chi < 0,25$ использование фазовой модуляции

позволяет достигать большего значения отношения сигнал/шум в сравнении с амплитудной модуляцией. Особенностью кодирования АК с использованием амплитудной модуляции является то, что форма и размеры пятен спекл-структуры зависят от количества и расположения кодируемых элементов АК.

Устойчивость оптических методов маркировки к методу сжатия JPEG будем оценивать вероятностью обнаружения АК. В соответствии с критерием максимального правдоподобия вероятность обнаружения определяется выражением

$$P_{\text{обн}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{0,5\mu}^{\infty} \exp\left(-\frac{(z-\mu)^2}{2}\right) dz, \quad (10)$$

где $\mu = \mu_0 \sqrt{\chi \cdot M_{\phi} N_{\phi}}$ – отношение сигнал/шум после согласованной фильтрации, μ_0 – отношение сигнал/шум в изображении, содержащем извлеченный АК.

На Рис. 6 представлены зависимости вероятности обнаружения от значения показателя качества q метода JPEG, полученные при численном моделировании процесса внедрения АК в цифровые полутоновые изображения размером 512×512 пикселей.

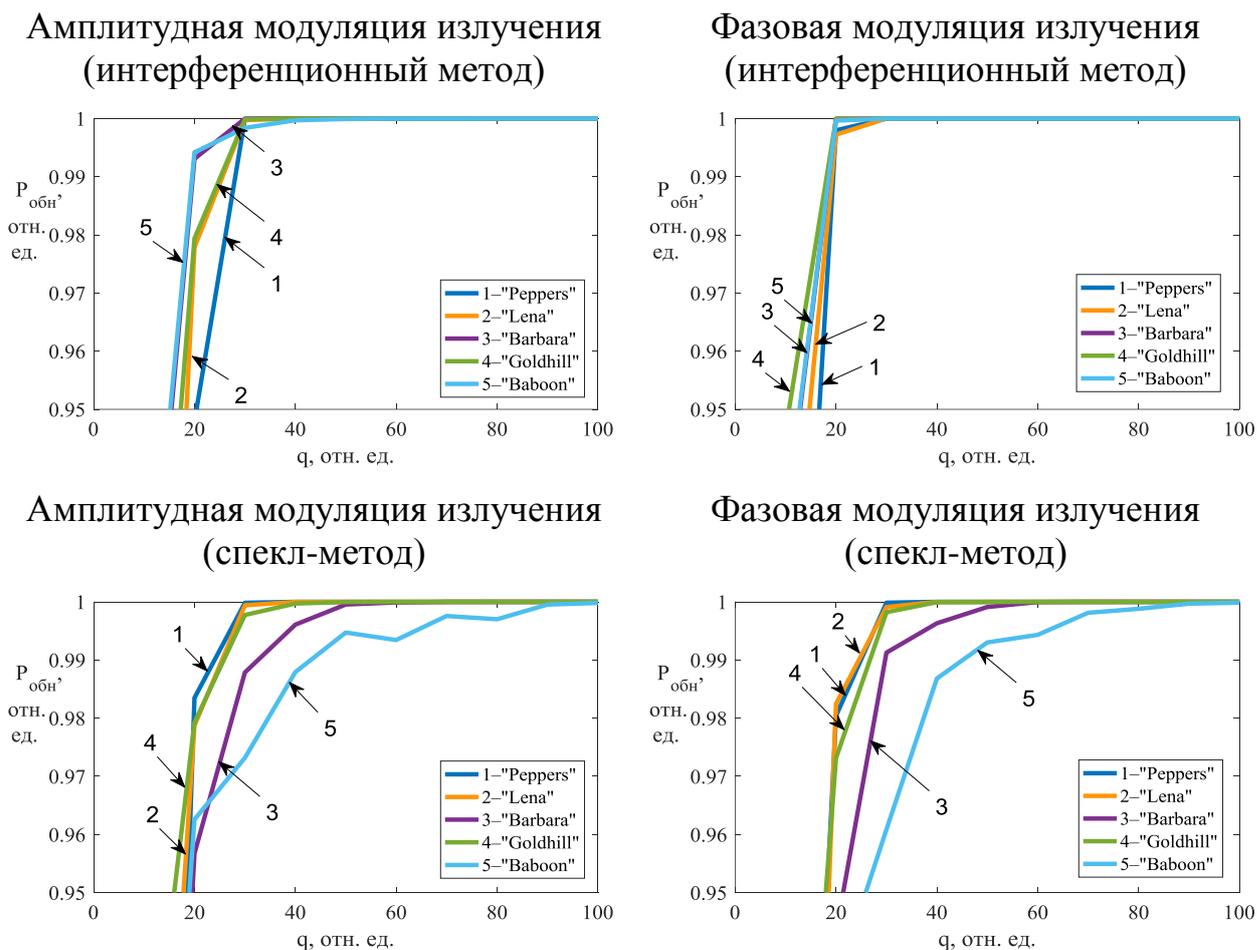


Рис. 6. Зависимость вероятности обнаружения АК от коэффициента качества JPEG

В качестве изображения-контейнера использовались типовые тестовые изображения: «Peppers», «Lena», «Barbara», «Goldhill», «Baboon». В качестве внедряемых данных использовались случайные равновероятные битовые последовательности. В интерференционном методе маркировки объектная и опорная волны задавались квадратными областями равных размеров, расположенными таким образом, что внедрение АК осуществлялось в средней области пространственных частот изображения-контейнера: $\Delta v_x = 0,5v_{Nx}$ и $\Delta v_y = 0,5v_{Ny}$ при средних значениях частот $v_{x0} = 0$ и $v_{y0} = 0,5v_{Nx}$, где v_{Nx} и v_{Ny} – значения частоты Найквиста по соответствующим координатным осям спектра.

В спекл-методе маркировки размер одного элемента спекл-структуры в формируемой стеганограмме соответствовал двум пикселям изображения-контейнера, а для задания элементов информации использовалась 1/4 площади фазового транспаранта ($\chi = 0,25$) размером 256×256 ячеек. В интерференционном методе маркировки использовалась 1/2 площади фазового транспаранта ($\chi = 0,5$) размером 64×64 ячеек. Для наиболее эффективного обнаружения элементов информации, фазовая и амплитудная модуляции на этапе внедрения имели максимальную глубину, а именно, $\tau_0 = \exp(i\pi)$ и $\tau_0 = 0$ соответственно.

Как следует из графиков на Рис. 6, более устойчивым к методу сжатия JPEG является интерференционный метод маркировки при использовании фазовой модуляции для задания элементов информации. Это объясняется тем, что на данные, содержащиеся в фазе, меньшее влияние оказывают пространственно-частотные составляющие спектра изображения-контейнера. Меньшее значение вероятности обнаружения при использовании изображений-контейнеров типа «Goldhill» и «Baboon» объясняется большими значениями амплитуд фурье-спектра этих изображений в полосе средних и высоких частот.

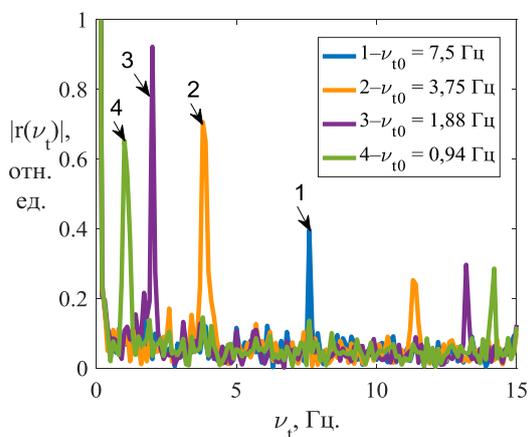
Применительно к цифровым видеопотокам наиболее распространенным является метод сжатия по стандарту MPEG-4 part 10. Численным моделированием исследована устойчивость разработанных методов к процедурам сжатия по стандарту MPEG-4 part 10 при внедрении АК в последовательность видеок кадров. В результате моделирования установлено, что устойчивость АК обеспечивается при уровнях сжатия, соответствующих сохранению визуального качества видеозаписи.

Предложено для повышения устойчивости к сжатию использовать временную модуляцию интенсивности стеганограммы. Тогда коэффициент взаимной корреляции эталона и АК, извлеченного из последовательности кадров, можно представить функцией времени $r(t)$, в спектре которой содержится составляющая на частоте временной модуляции. На Рис. 7 представлены графики модуля спектра функции $r(t)$, вычисленные на основе результатов извлечения АК из типовой видеопоследовательности «Crew», которая подвергалась сжатию по стандарту MPEG-4 part 10, после которого скорость видеопотока составляла 1 Мбит/с.

Наличие маркировки в видеозаписи следует оценивать по соотношению амплитуды на частоте модуляции к СКО помехи на остальных временных

частотах. Полученные результаты свидетельствуют о том, что интерференционный метод маркировки и спекл-метод маркировки обеспечивают сопоставимую степень устойчивости АК при применении временной модуляции уровня сигнала.

Интерференционный метод маркировки



Спекл-метод маркировки

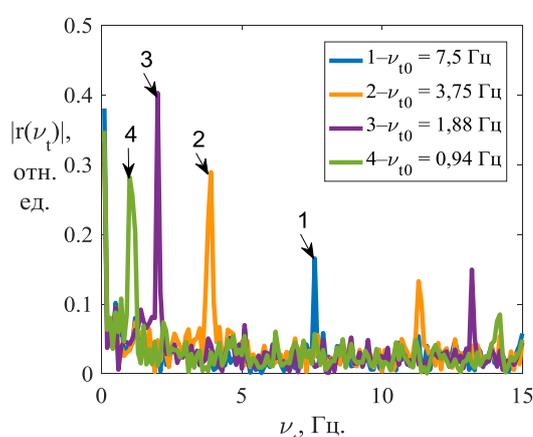


Рис. 7. Вид функции $|\tilde{r}(\nu_i)|$ при различных частотах временной модуляции уровня стеганограммы

Несанкционированный монтаж может заключаться в редактировании отдельных кадров изображений, а также добавлении или исключении кадров видеозаписей. Установление факта редактирования отдельных кадров видеозаписей можно производить путем анализа АК, извлечённого из произвольных фрагментов кадра. Факт добавления или исключения кадров видеозаписей можно контролировать по результатам анализа флуктуаций фазы функции $r(t)$.

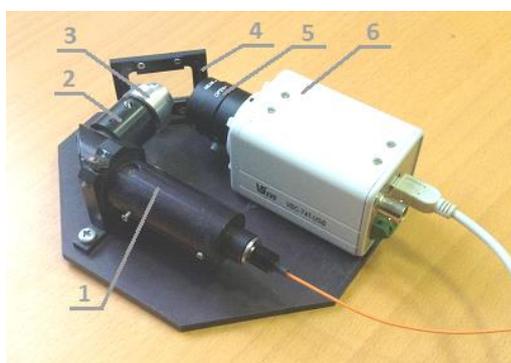
В четвертой главе изложены методика проектирования оптико-электронных устройств маркировки изображений на системотехническом уровне и результаты экспериментальных исследований, которые выполнялись для проверки основных теоретических положений диссертации.

Разработанная методика проектирования позволяет определить технические требования к основным элементам оптико-электронных устройств маркировки изображений, в том числе:

- значения конструктивных параметров кодирующих амплитудно-фазовых транспарантов, включая, размеры и количество элементарных ячеек амплитудно-фазового транспаранта, а также значения допустимых погрешностей его изготовления;
- значения конструктивных параметров ФПО и объектива основного оптического канала, включая, фокусные расстояния, диаметр апертурной диафрагмы;
- значения конструктивных параметров устройства регистрации изображений, включая, количество и периоды расположения чувствительных элементов матричного приёмника излучения.

Целью экспериментальных исследований являлась проверка обоснованности допущений, принятых при моделировании процессов внедрения АК, в частности, пренебрежение влиянием aberrаций ФПО, а также основных положений методики проектирования оптико-электронных устройств маркировки изображений.

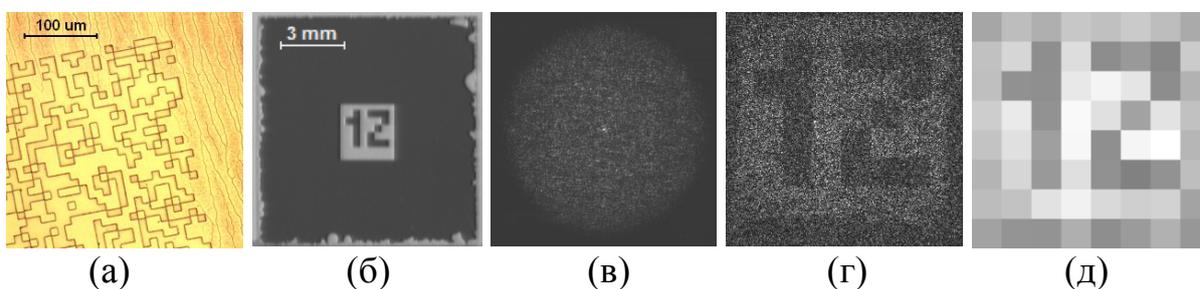
Экспериментальные исследования проводились на разработанном в соответствии с предложенной методикой проектирования макетном образце оптико-электронного устройства маркировки изображений (см. Рис. 8), в котором был реализован спекл-метод маркировки. Для регистрации изображения использовалась телевизионная (ТВ) камера модели VBS-741-USB с разрешением 740×576 пикселей и периодом расположения чувствительных элементов $T_x = 6,5$ мкм и $T_y = 6,25$ мкм. Для подсветки амплитудно-фазового транспаранта использован полупроводниковый лазер типа ПОМ-17-670 с длиной волны излучения $\lambda = 0,66$ мкм.



- 1- Модуль лазерной подсветки ($\lambda=0,66$ мкм)
- 2- Афокальная система ($\Gamma=3^\times$)
- 3- Аттenuатор
- 4- Светоделитель
- 5- Объектив ($f'=16$ мм)
- 6- ТВ камера (VBS-741-USB)

Рис. 8. Макетный образец оптико-электронного устройства маркировки изображений

Амплитудно-фазовый транспарант состоял из двух пластин, одна из которых была выполнена как фазовый транспарант (см. Рис. 9, а), а другая – как амплитудный транспарант (см. Рис. 9, б).



а – фазовый транспарант, б – амплитудный транспарант; в – дифракционная картина в плоскости регистрации, г – изображение извлечённого АК, д – изображение извлечённого АК после дополнительной цифровой обработки.

Рис. 9. Результаты экспериментальных исследований

Фазовый транспарант, изготовленный ионно-плазменным травлением пластины из стекла марки К8, содержал 256×256 элементарных ячеек квадратной формы с псевдослучайным расположением, имеющих размер 10 мкм и среднее

значение глубины профиля 650 нм. Следует отметить, что расчётное значение глубины профиля, при котором обеспечивается подавление нулевого порядка, равно 642 нм. Амплитудный транспарант, который содержал АК в виде символов «12» с размерами элементов $0,32 \times 0,32 \text{ мм}^2$, был изготовлен путём нанесения покрытия из хрома на стеклянную подложку.

Для обеспечения требуемого размера индивидуального спекла, а также сопряжения плоскости амплитудно-фазового транспаранта с входным зрачком объектива ТВ камеры в схеме макетного образца использована афокальная система. Таким образом в плоскости регистрации обеспечивался размер спекла не менее 13 мкм, который в 2 раза превышал размеры чувствительных элементов ТВ камеры. При таком условии обеспечивается устойчивость стеганограммы к искажениям, которые могут вносить методы сжатия изображения.

На Рис 9, в представлено распределение в дифракционной картине, которое было зарегистрировано при проведении эксперимента, а на Рис. 9, г и Рис. 9, д – восстановленный символ. Аналогичные изображения были получены в результате математического моделирования. Следует отметить, что значение интенсивности в нулевом порядке дифракции как в эксперименте, так и при моделировании, примерно в 20 раз превышало СКО интенсивности спекл-структуры, что обусловлено отличием среднего значения глубины профиля транспаранта от расчётного оптимального значения. Полученное в эксперименте значение отношения сигнал/шум в восстановленном изображении символа (см. Рис. 9, г) отличалось от значения, которое получено при моделировании, на величину, не превышающую 20%. Хорошее совпадение результатов эксперимента и численного эксперимента свидетельствует об адекватности математической модели, разработанной в диссертации, а также правильности основных положений методики проектирования оптико-электронного устройства маркировки изображений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработаны спекл-метод и интерференционный метод маркировки изображений, которые основаны на использовании фурье-преобразующих объективов. Спекл-метод маркировки позволяет внедрять АК в широком диапазоне пространственных частот, а интерференционный метод маркировки – в ограниченной области пространственных частот изображений, регистрируемых оптико-электронными приборами.

2. Разработан метод реконструкции поля комплексных амплитуд в плоскости псевдослучайного фазового транспаранта по распределению интенсивности в дальней зоне дифракции. Метод используется для извлечения АК, внедрённого спекл-методом маркировки.

3. Доказана устойчивость разработанных методов маркировки к сжатию изображений по стандарту JPEG. В частности, вероятность обнаружения АК в маркированных стандартных тестовых изображениях размером 512x512 пикселей, подвергнутых сжатию с коэффициентом качества 60, приближается к единице.

4. Доказана устойчивость разработанных методов маркировки к сжатию видеопотоков по стандарту MPEG-4 part 10. Для повышения устойчивости маркировки к воздействию методов сжатия видеопотоков, а также выявления факта монтажа исходной видеозаписи, предложено при внедрении АК в последовательность видеок кадров использовать временную амплитудную модуляцию стеганограммы.

5. Предложены процедуры анализа маркированных видеозаписей и отдельных кадров, которые позволяют контролировать наличие или отсутствие признаков монтажа.

6. Предложены функциональные схемы опико-электронных устройств маркировки регистрируемых изображений и разработана методика проектирования на системотехническом уровне, позволяющая определить значения конструктивных параметров основных элементов этих устройств.

7. Методика проектирования апробирована при создании макетного образца опико-электронного устройства маркировки изображений, который использовался для экспериментальных исследований. Проведённые экспериментальные исследования подтвердили правильность основных теоретических положений диссертации.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Оптические методы стеганографической защиты цифровых изображений / М.В. Колесников [и др.] // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2010. №1. С. 29–40. (0,8 п.л. / 0,4 п.л.)
2. Колесников М.В. Метод скрытой передачи данных в оптическом канале видеокамеры // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. Эл. №. ФС77-51036. 2013. № 2. URL. <http://engbul.bmstu.ru/doc/543251.html> (0,4 п.л.)
3. Колесников М.В., Трофимов Н.Е. Одномерные статистические характеристики дифракционного распределения в дальней зоне от бинарного случайного фазового транспаранта // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2015. № 5. С. 97–108. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)
4. Колесников М.В., Колючкин В.Я. Оптические методы нанесения цифровых водяных знаков // Прикладная оптика: Сборник трудов VIII международной конференции. СПб, 2008. Т1. С. 241–245. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)
5. Колесников М.В., Колючкин В.Я. Метод встраивания скрытых данных с использованием спекл-структуры // Прикладная оптика: Сборник трудов IX международной конференции. СПб, 2010. Т1. С. 9–13. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)
6. Трофимов Н.Е., Колесников М.В. Одномерные статистические характеристики дифракционного распределения в дальней зоне от случайного фазового матричного транспаранта // Будущее оптики: Сборник трудов III конференции. СПб, 2015. С. 108 – 112. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)