

Старченко Алексей Петрович

**МЕТОДЫ ВСТРАИВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ СКРЫТЫХ
ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ**

Специальность

05.13.19 – «Методы и системы защиты информации, информационная
безопасность»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики на кафедре Проектирования компьютерных систем

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Гатчин Юрий Арменакович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Нырков Анатолий Павлович доктор технических наук, профессор Тропченко Александр Ювенальевич
Ведущая организация:	Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Защита состоится 26 апреля 2011 г. в 15 часов 50 минут на заседании диссертационного совета Д.212.227.05 в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Автореферат разослан «25» марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д.212.227.05
к.т.н., доцент

В.И. Поляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие средств и методов защиты информационного наполнения документов остается традиционной и актуальной задачей. Одним из ключевых элементов многих документов является фотография. Защита авторских прав владельцев на фотоизображение, защита торговой марки полиграфической продукции, противодействие копированию и подделкам фотографий – далеко не полный перечень применений методов защиты изображений. Развитие средств вычислительной техники в последнее десятилетие дало новый толчок для компьютерной стеганографии. Популярность получили методы защиты изображений с помощью скрытых водяных знаков. Наметилось новое научное направление – цифровая стеганография. К составной части этого направления относится встраивание цифровых водяных знаков (ЦВЗ) в изображение.

Процесс внедрения ЦВЗ и процесс идентификации решаются исключительно цифровыми средствами, процессы фотопечати и сканирования фотодокументов остаются аналоговыми. Очевидно, что методы внедрения скрытых водяных знаков должны обеспечивать устойчивость к физическим воздействиям со стороны фотопечати и сканирования.

В результате анализа текущего состояния в сфере стеганографических алгоритмов, предназначенных для внедрения данных, был сделан вывод о необходимости разработки нового метода сокрытия данных, позволяющего скрывать информацию не только в цифровых изображениях, но и в фотографиях. Предложен метод встраивания и восстановления скрытых ЦВЗ в фотоизображение на основе цифровой голографии. ЦВЗ представляет собой голограмму и встраивается в изображение.

В результате анализа стойкости современных стеганоалгоритмов к различным воздействиям был сделан следующий вывод: необходимо разработать алгоритмы и методы, повышающие отношение сигнал/шум (С/Ш) восстановленного водяного знака и уменьшающие искажения в изображении - контейнере. Внедрение методов, реализованных в виде программно-аппаратного комплекса позволит сократить потери от незаконного использования как цифровых, так и аналоговых изображений, являющихся интеллектуальной собственностью. Таким образом тема диссертационной работы является актуальной.

Предметом исследования является встраивание и идентификация ЦВЗ в изображение с целью увеличения отношения С/Ш восстановленного ЦВЗ и снижение искажений в защищенном изображении-контейнере.

Целью работы является разработка методов и алгоритмов на основе цифровой голографии, позволяющих упростить идентификацию ЦВЗ и уменьшить искажения в изображении-контейнере, содержащем скрытый ЦВЗ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику сравнительного анализа устойчивости различных стеганоалгоритмов.

2. Разработать метод и алгоритм построения голограммы водяного знака на основе дискретного косинусного преобразования;
3. Разработать метод и алгоритм компенсации искажений, возникающих со стороны фотопечати и сканирования изображения, содержащего ЦВЗ;
4. Разработать метод и алгоритм сжатия динамического диапазона цифровых голограмм Фурье для снижения искажений в изображении-контейнере, содержащем ЦВЗ.

Методы исследования. В методах исследования использовались: методы теоретического и эмпирического исследования, вычислительной математики, методы программирования, цифровой голографии.

Научная новизна работы. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Разработана методика построения голограммы ЦВЗ на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП) с вещественным фазовым рассеивателем для встраивания скрытых ЦВЗ в изображение;
2. Разработана методика компенсации искажений с помощью умножения функции сигнала ЦВЗ на инверсную функцию передаточной характеристики системы;
3. Логарифмирование функции интенсивности голограмм с рассеивателем в целях снижения искажений в изображении-контейнере;

Практическая ценность.

1. Разработаны алгоритмические и программные средства, позволяющие выполнять встраивание и извлечение скрытого ЦВЗ по различным методам и сравнивать эффективность таких методов для различных изображений.
2. Разработан метод и алгоритм компенсации искажений, возникающих со стороны фотосканера и фотопринтера при встраивании скрытого водяного знака в фотоизображение. Получены практические результаты в виде защищенных пластиковых карт и фотографий, содержащих скрытый ЦВЗ.
3. Разработан метод и алгоритм снижения искажений в изображении, содержащем скрытый водяной знак.
4. Разработан программно-аппаратный комплекс встраивания и идентификации скрытых ЦВЗ в фотоизображение на основе цифровой голографии.

Внедрение результатов работы. Программно-аппаратный комплекс при разработке курса практических занятий в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики по специальности 090104 «Комплексная защита объектов информатизации». Полученные результаты исследований реализованы в ООО Нева-Кард.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 8 печатных работ, в том числе 3 входящие в перечень, рекомендованный ВАК РФ для опубликования кандидатских диссертаций.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы прошли апробацию в ходе докладов и обсуждений на: XXXVIII научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО; VI Всероссийская

межвузовской конференции молодых ученых, 14-17 апреля 2009 г. СПб; VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых, 20-23 апреля 2010 г. СПб; IX международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности”, 22-23 апреля 2010 г. СПб; конференции ППС, февраль 2011 г., где получили одобрение.

Основные положения выносимые на защиту:

1. Метод и алгоритм дискретного косинусного преобразования для построения голограммы скрытого водяного знака в задаче встраивания скрытых водяных знаков.
2. Метод и алгоритм компенсации влияния пространственно-частотной характеристики на процессы фотопечати и сканирования при встраивании скрытых цифровых водяных знаков в фотоизображение.
3. Метод и алгоритм сжатия динамического диапазона цифровых голограмм Фурье в задаче встраивания скрытых ЦВЗ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 70 наименований, изложена на 103 страницах, содержит 59 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе разработана модель изображений для, которых применимы методы встраивания и восстановления скрытых водяных знаков на основе цифровой голографии. Рассмотрены понятия, относящиеся к стеганографии как науке. Рассмотрены методы цифровой голографии: синтез и восстановление голограмм. Основное внимание уделено цифровой голографии, при помощи методов которой создается голограмма скрытого цифрового водяного знака для последующего встраивания в изображение-контейнер.

Во второй главе представлены основные положения предлагаемого метода построения голограммы скрытого цифрового водяного знака на основе ДКП.

Применение ДКП обеспечивает ускоренное вычисление косинусных голограмм за счет уменьшения количества операций по сравнению с преобразованием Фурье. Использование ДКП актуально и особенно при аппаратной реализации на программируемых цифровых сигнальных процессорах (ЦСП). Преимущество ДКП широко известно и используется во многих практических задачах, в которых необходима высокая скорость обработки в сочетании с сохранением качественного представления данных. Примером могут служить ЦСП для обработки и кодирования сигналов изображения, а так же применение ДКП в современных алгоритмах сжатия медиаданных. Целесообразность применения ДКП, в задаче встраивания скрытых водяных знаков, продиктована теми же преимуществами перед дискретным преобразованием Фурье (ДПФ). Цель предложенного метода - показать возможность существенного повышения отношения С/Ш в

изображении водяного знака, восстановленном при использовании ДКП, по сравнению с изображением, восстанавливаемом по традиционной методике, основанной на ДПФ.

Изначальная избыточность, свойственная представлению данных с помощью преобразования Фурье является недостатком метода. В основе избыточности преобразования Фурье лежит известное свойство комплексного сопряжения, которое выражается в симметрии комплексных коэффициентов преобразования Фурье:

$$S(e^{i\omega}) = S^*(e^{-i\omega}), \quad (1)$$

где звездочка обозначает комплексное сопряжение, $S(e^{i\omega})$ - преобразование Фурье сигнала $s(x)$. Следствием свойства комплексно-сопряженной симметрии преобразования Фурье является появление суммы двух изображений функции $W(u,v)$ в процессе восстановления функции цифровой голограммы Фурье $h(x,y)$. Эти изображения имеют осевую зеркальную симметрию:

$$F\{h(x,y)\} = W(u-M, v-N) + W(-u-M, -v-N) + A(u,v), \quad (2)$$

и равны друг другу:

$$W(u-M, v-N) = -W(-u-M, -v-N), \quad (3)$$

где N и M - несущие частоты, F - оператор преобразования Фурье, $A(u,v)$ - автокорреляция.

В качестве оценки отношения С/Ш будем использовать оценку взаимной центрированной корреляции (ковариации) функции исходного изображения водяного знака W и функции изображения водяного знака W_1 после восстановления

$$C(u_1, v_1) = \langle [W(u,v) - a][W_1(u-u_1, v-v_1)] \rangle, \quad (4)$$

где $\langle \rangle$ оператор усреднения по двумерному пространству v, u ; a и a_1 - средние значения сигналов W и W_1 соответственно. Такой подход широко используется при обнаружении объектов с помощью согласованной фильтрации, когда критерием оптимальности служит отношение С/Ш в момент полного совпадения сигналов. Выходной эффект согласованной фильтрации характеризует степень корреляции входного изображения с эталонным сигналом. С учетом того, что отношение С/Ш определяется по пиковому значению, нас будет интересовать значение ковариации $C(0,0)$ при полном совмещении сигналов. При этом формула для вычисления отношения С/Ш упростится и примет вид

$$C/Ш = C(0,0) / \langle P_{gg}(u,v) \rangle, \quad (5)$$

$P_{gg}(u,v)$ - спектральная плотность мощности входного изображения; $C(0,0)$ - пиковая ковариация, соответствующая полному совпадению сигналов W и W_1 , когда

$$C(0,0) = \sum \sum [W(u,v) - a][W_1(u,v) - a_1] dudv \quad (6)$$

В соответствии с равенством Парсеваля окончательно запишем формулу для расчета отношения С/Ш как

$$C/Ш = \sum \sum [W(u,v) - a][W_1(u,v) - a_1] dudv / \sum \sum s^2(x,y) dx dy \quad (7)$$

На рис. 1а представлено случайное полутоновое изображение-контейнер $g(x,y)$ с нормальным распределением сигнала и дисперсией равной 6, 8 уровней квантования. Размерность изображения 256x256 элементов, число уровней квантования 2^8 . На рис.1б показан пример восстановления изображения методом ДПФ.

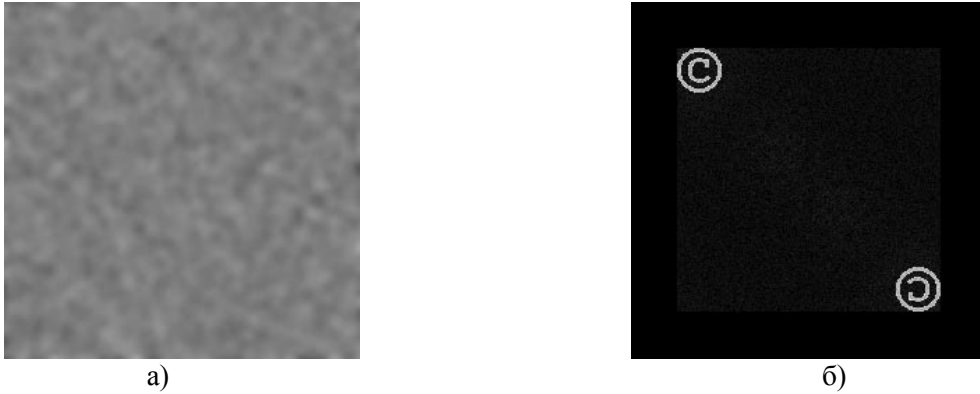


Рис.1. а) – изображение-контейнер с нормальным распределением сигнала;
б) – восстановленное изображение методом ДПФ

Исходя из выше сказанного, эффективнее будет использовать ДКП, как при создании голограммы, так и при восстановлении водяного знака.

В косинусном преобразовании присутствуют только действительные числа. Благодаря этому, исчезает избыточность спектральных составляющих, присутствующих в преобразовании Фурье. Очевидно, что ДКП не обладает осевой симметрией, и поэтому результат восстановления функции водяного знака $W(u,v)$ после обратного ДКП будет иметь вид:

$$K\{r(x,y)\} \sim W_1(u-M, v-N), \quad (8)$$

где K - оператор косинусного преобразования, $r(x,y)$ – функция голограммы на основе ДКП, $W_1(u,v)$ – функция изображения восстановленного водяного знака.

Рассматривается возможность применения ДКП для встраивания и восстановления скрытых водяных знаков. Ядро косинусного преобразования представляет собой четную функцию косинуса в отличие от комплексного ядра преобразования Фурье, и вследствие этого ДКП не обладает осевой симметрией.

Исключение осевой симметрии, за счет использования ДКП, обеспечивает двукратное сокращение избыточности по сравнению с базовым методом цифровой голограммы Фурье. Сокращение избыточности, при восстановлении голограммы на основе ДКП, соответствует перераспределению энергии в восстановленном изображении водяного знака. Перераспределение энергии, по сравнению с методом голограммы Фурье, обеспечивает при прочих равных условиях расширение динамического диапазона восстановленного водяного знака, что в свою очередь, обеспечивает повышение отношения сигнал/шум.

Математически функция оригинального изображения-контейнера $g(x,y)$, функция изображения голограммы на основе ДКП водяного знака $r(x,y)$ и содержащая водяной знак функция изображения-носителя $s(x,y)$ имеют вид:

$$s(x,y) = g(x,y) + f\{r(x,y)\}, \quad (9)$$

причем $s(x,y)>0$ и $g(x,y)>0$ для всех x и y . Оператор f служит для коррекции функции голограммы $r(x,y)$ и может быть нелинейный в общем случае. Косинусное преобразование изображения водяного знака, для получения функции голограммы на основе ДКП $r(x,y)$, запишем в виде соотношения:

$$r(x, y) = K^{-1}\{W(u - M, v - N)\}, \quad (10)$$

где K^{-1} - оператор обратного косинусного преобразования, M и N - смещение функции водяного знака в плоскости частот (u, v) . Распределение интенсивности в голограмме, после выполнения косинусного преобразования функции $W(u, v)$ будет иметь вид:

$$r(x, y) = w(x, y)\cos(xM + yN) + A_0, \quad (11)$$

где A_0 - постоянная составляющая. Результат вычисления функции голограммы на основе ДКП является вещественным преобразованием. В косинусном преобразовании присутствуют только действительные числа. Для восстановления функции голограммы на основе ДКП и выделения изображения водяного знака необходимо выполнить прямое косинусное преобразование:

$$K\{r(x, y)\} = W_1(u - M, v - N) + A(u, v), \quad (12)$$

где $A(u, v)$ - автокорреляция.

На рис.2 показан пример восстановления изображения методом ДКП. В качестве водяного знака использовался знак copyright © размерностью 32x32 элемента.

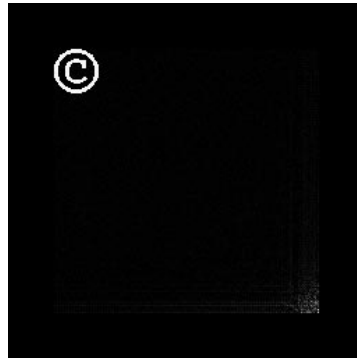


Рис.2. Восстановленное изображения методом ДКП

Исследования показали принципиальную возможность и преимущества применения косинусной голограммы для встраивания скрытых водяных знаков. Метод построения голограммы на основе ДКП, по критерию отношения С/Ш, превышает метод голограммы Фурье не менее, чем в 1.6 раза, и обеспечивает расширение в 2 раза динамического диапазона восстановленного изображения водяного знака.

Установлено, что расширение динамического диапазона, и сокращение избыточности в косинусной голограмме водяного знака, обусловлены исключением зеркально-осевой симметрии, при построении цифровой голограммы с помощью ДКП.

В третьей главе разработан метод априорной компенсации пространственно-частотной характеристики на процессы фотопечати и сканирования в задаче встраивания скрытых водяных знаков.

Искажения, вносимые физическими системами, приводят к подавлению энергии сигналов в полосе частот. Априорное знание передаточных характеристик (функции передачи модуляции) позволяет выполнить коррекцию сигналов (водяных знаков) в процессе их встраивания голографическими методами. Не нарушая общности, будем оперировать с монотонно-убывающими передаточными функциями систем регистрации, как с фильтрами нижних частот или просто дифракционно-ограниченными. Констатируем, что фильтр нижних частот приводит к значительному подавлению в полосе средних и высоких частот, как изображения контейнера, так и сигнала водяного знака.

Технология встраивания скрытых водяных знаков на основе цифровой голографии в фотографическое изображение состоит из двух самостоятельных процессов. Первый процесс включает собственно процедуру встраивания, которая осуществляется программным путем и процедуру регистрации изображения с водяным знаком на фотоносителе. Наибольшие искажения изображения водяного знака на этом этапе обусловлены воздействием передаточной характеристики системы фотографической регистрации: фотопринтера и фотоносителя.

Второй процесс включает процедуру сканирования и оцифровки фотоносителя, содержащего скрытый водяной знак и программную процедуру цифрового восстановления голограммы. Наибольшие искажения связаны с действием пространственно-частотной передаточной характеристики и шумами дискретизации фото-сканера (ПЗС камеры). Разработан программно-аппаратный комплекс (ПАК), позволяющий встраивать скрытые ЦВЗ в фотоизображение. В процессе работы получены защищенные фотографии и пластиковые карты, содержащие скрытый водяной знак, используемый для защиты информации. ПАК состоит из фотосканера, фотопринтера, ЖК-телевизора, цифрового фотоаппарата, ноутбука, программного обеспечения, которое хранится на твердом диске ноутбука. Программное обеспечение позволяет встроить голограмму ЦВЗ в изображение и восстановить ЦВЗ, расчет отношения С/Ш восстановленного ЦВЗ, дисперсии, СКО.

Априорное знание функции передачи модуляции (ФПМ) физических систем, позволяет охарактеризовать передаточную функцию сквозного тракта фотопринтер-фотоноситель-фотосканер как монотонно-убывающую функцию. Рассматривается метод для компенсации воздействия передаточной характеристики сквозного тракта оптико-электронной системы (ОЭС) фотопринтер-фотоноситель-фотосканер при встраивании и восстановлении скрытых водяных знаков.

Полный каскад ОЭС ФПМ фотопринтер-фотоноситель-фотосканер представляет собой произведение ФПМ фоторегистрирующего устройства, ФПМ фотоносителя и ФПМ фотоприемника. При этом, определяющими параметрами сквозной ФПМ каскада, влияющими на вид пространственно-частотной характеристики, являются шаг фоторегистратора по строке и по кадру и размер фоточувствительных элементов ПЗС по строке и по кадру. При этом справедливо полагать, что вклад искажений качественных оптических элементов сквозного тракта не существен, а оптическая передаточная

функция (ОПФ) близка к дифракционно-ограниченной в области определения сквозной ФПМ.

Очевидно, что с точки зрения уменьшения воздействия передаточных характеристик ОЭС на изображение водяного знака, последний следует размещать в низкочастотной области ФПМ сквозного тракта ОЭС. Анизотропия сквозной ФПМ, связанная с пространственным различием по кадру и строке, предполагает диагональное размещение водяных знаков.

Физическое моделирование, для получения цифровой голограммы Фурье без искажений в ОЭС, сводится к пространственному преобразованию Фурье сигнала водяного знака $W(u-M, v-N)$:

$$h(x, y) = F^{-1} \{W(u-M, v-N) + A_0\} \quad (13)$$

где A_0 - постоянная составляющая, F^{-1} - оператор обратного преобразования Фурье, величины M и N – пространственные несущие в плоскости частот (u, v) . Результат восстановления водяного знака, в соответствии с обратной процедурой

$$W_1(u, v) = F \{h(x, y)\}, \quad (14)$$

при размещении сигнала водяного знака в низкочастотной области, где F - оператор преобразования Фурье. Значение трансформант M и N равно 17, размерность бинарного водяного знака составляет $D=64 \times 64$ дискретных отсчетов, а размерность поля голограммы равно 256×256 отсчетов. На рис.3 приведено тестовое изображение-контейнер «Lenna». Результат восстановления водяного знака, в соответствии с обратной процедурой по формуле (14) представлен на рис.4.



Рис.3. Тестовое изображение «Lenna»

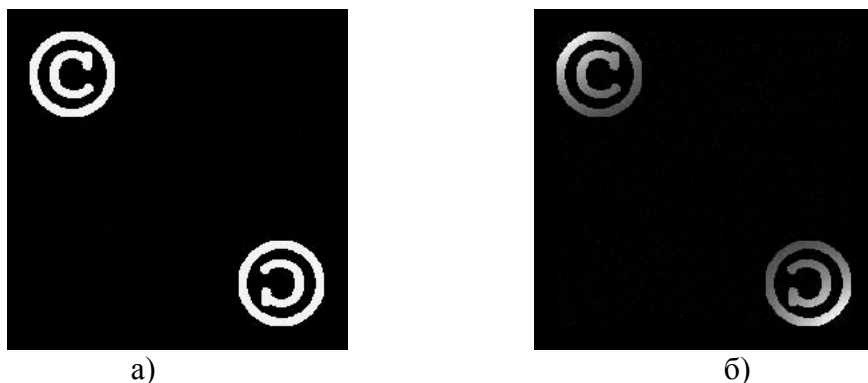


Рис. 4. Результаты восстановления водяных знаков при их размещении в низкочастотной области, а – восстановление без искажения голограммы Фурье, б – восстановление голограммы Фурье, искаженной в тракте ОЭС

Физическое моделирование воздействия ФПМ тракта ОЭС на процесс встраивания сигнала водяного знака описывается выражением

$$h_1(x, y) = F^{-1}\{F\{h(x, y)\}R(u, v)\} \quad (15)$$

где $R(u, v)$ - сквозная функция передачи модуляции тракта ОЭС, $h_1(x, y)$ - искаженное распределение интенсивности в голограмме. Восстановление искаженной голограммы $h_1(x, y)$ представлено на рис.4б и осуществляется в соответствии с обратной процедурой:

$$W_1(u, v) = F\{h_1(x, y)\}. \quad (16)$$

Физическое моделирование процесса встраивания водяных знаков в среднечастотной и высокочастотной областях сквозной ФПМ, представлено результатами восстановления бинарных водяных знаков на рис.5а и рис.5б, соответственно.



Рис. 5. Результаты восстановления водяных знаков, а – среднечастотная область ФПМ, б – размещение в высокочастотной области ФПМ

На рис. 6 представлены результаты восстановления искаженного действием ФМП изображения и априорной компенсации соответственно.

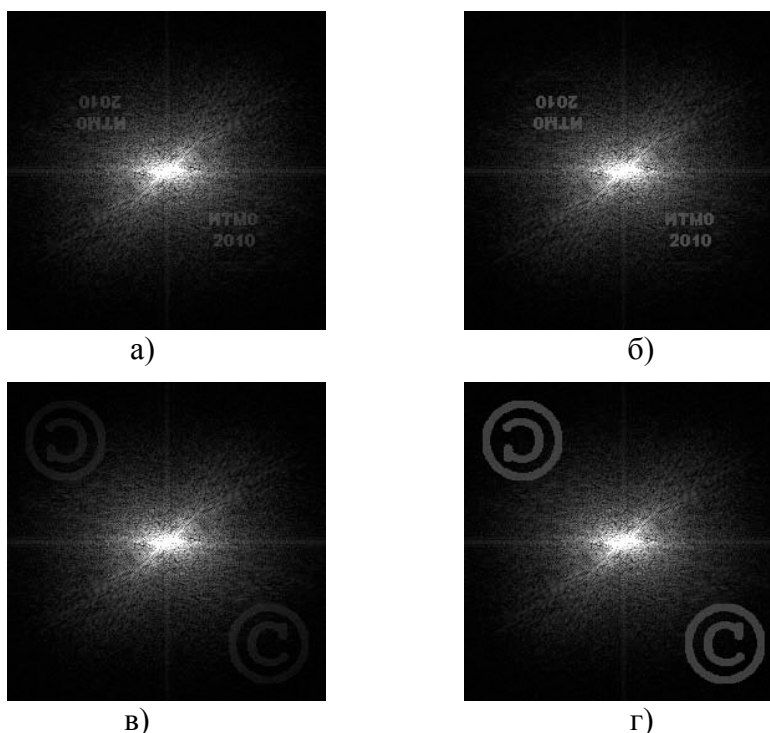


Рис 6. а), в) – результаты восстановления искаженного действием ФМП изображения; б), г) – результаты априорной компенсации

Полученные результаты восстановления водяных знаков продемонстрировали динамику амплитудных искажений водяных знаков, связанных с влиянием ФПМ тракта ОЭС. Степень подавления амплитуды сигнала увеличивается с увеличением частоты пространственного спектра и функционально связана с ФПМ.

При голографическом встраивании скрытых водяных знаков в носители информации на твердой основе, такие как фотографии на фотобумаге, пластиковые карты, денежные купюры и другие носители, имеющие достаточный динамический диапазон для фиксирования полутонных, основным фактором искажений является ФПМ сквозного тракта ОЭС.

Исследования по размещению водяных знаков относительно пространственных частот выявили противоположные тенденции при выборе области пространственного спектра. Учет влияния ФПМ приводит к заключению о более эффективном размещении водяных знаков в области низких частот. Учет же влияния сигнала водяного знака на качество воспроизведения изображения контейнера говорит о том, что наименьшие искажения будут при размещении в области высоких частот.

Выбор области средних частот для размещения водяных знаков является оптимальным, с учетом свойства сосредоточения энергии реальных изображений в области низких частот и монотонно-убывающий характер ФПМ сквозной ОЭС, вне зависимости от параметров ОЭС.

Метод априорной компенсации искажений ФПМ при голографическом встраивании скрытых водяных знаков показал повышение отношения С/Ш не менее, чем в 1.44 раза.

В четвертой главе разработан метод сжатия динамического диапазона цифровых голограмм Фурье для уменьшения искажений в изображении-контейнере, содержащем скрытый водяной знак.

Предлагается методика уменьшения искажений в изображении-контейнере со встроенной голограммой водяного знака, основанная на изменении динамического диапазона голограммы методом логарифмического преобразования. Предложенная методика позволяет снизить искажения, возникающие при восстановлении изображения водяного знака, по сравнению с традиционным методом голограммы Фурье. Выявлена линейная зависимость между изменением амплитуды сигнала водяного знака и средним квадратичным отклонением интенсивности цифровой голограммы Фурье.

Для улучшения устойчивости скрытых водяных знаков требуется повышение амплитуды сигнала водяного знака, что неминуемо отражается на величине искажений в изображении-носителе. Для оценки зависимости величины искажений в изображении-носителе от повышения амплитуды сигнала водяного знака рассмотрим изменение интенсивности цифровой голограммы со случайной фазой $z(u, v)$ от величины амплитуды сигнала водяного знака.

Распределение интенсивности в цифровой голограмме в рассматриваемом случае определяется соотношением

$$h(x, y) = F^{-1}\{bW(u - N, v - M)\exp(jz(u, v))\}, \quad (17)$$

где b – коэффициент усиления сигнала водяного знака, $W(u - N, v - M)$ – функция изображения водяного знака, где N и M – пространственные несущие в плоскости частот (u, v) , F^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье.

Были проведены экспериментальные исследования при встраивании голограммы водяного знака в изображение для двух значений амплитуды сигнала водяного знака $b=50$ и $b=150$ для значений интенсивности в 256 градаций. В качестве примера водяного знака был использован знак ©. Выполнены расчеты среднего квадратичного отклонения (СКО) и дисперсии D интенсивности голограммы Фурье водяного знака при изменении значений амплитуды сигнала водяного знака b в диапазоне от 50 до 150.

Для снижения динамического диапазона в голограмме предлагается использовать метод логарифмического преобразования, которое используется в задачах гомоморфной фильтрации изображений. В ряде случаев используются нелинейные преобразования, которые подчиняются обобщенному принципу суперпозиции и получили название гомоморфных систем обработки сигналов. Применение гомоморфной обработки изображений позволяет, с одной стороны, повысить контрастность, а с другой стороны – сжать динамический диапазон.

Применительно к задаче уменьшения динамического диапазона интенсивности цифровых голограмм, важной операцией при гомоморфной обработке является операция логарифмирования или вычисления степенной функции вида $x^{p/q}$, где $p/q < 1$. Как известно, эти операции имеют схожие характеристики: как логарифмическая функция, так и степенная функция при $p/q < 1$, обеспечивают снижение уровня сигналов с большей амплитудой по сравнению с сигналами незначительной амплитуды.

Чтобы оценить зависимость логарифмического преобразования интенсивности цифровой голограммы Фурье от преобразования интенсивности без логарифмирования, исследуем изменение СКО интенсивности цифровой голограммы со случайной фазой и изменение отношения сигнал/шум (С/Ш) при восстановлении водяного знака от величины амплитуды сигнала водяного знака. Для описания процедуры встраивания водяных знаков $W(u, v)$ в предметной области будем использовать формулу

$$s(x, y) = g(x, y) + f\{h(x, y)\}, \quad (18)$$

где $s(x, y)$ – функция изображения со встроенной голограммой водяного знака, $g(x, y)$ – функция изображения-контейнера, $h(x, y)$ – функция цифровой голограммы Фурье, рассчитанная по формуле (13), которая имеет явную зависимость от амплитуды сигнала водяного знака b , f – функция логарифмического преобразования интенсивности голограммы. Для оценки отношения С/Ш воспользуемся формулой для оценки отношения сигнал/шум:

$$C/Ш = \sum \sum [W(u, v) - a][W_1(u, v) - a_1]dudv / \sum \sum s^2(x, y)dxdy, \quad (19)$$

где $W(u, v)$ и $W_1(u, v)$ сравниваемые сигналы водяного знака, a и a_1 – средние значения сигналов W и W_1 , соответственно. Ковариация вычисляется при полном совмещении исходного изображения водяного знака W и восстановленного изображения W_1 .

Предлагается применить степенное преобразования вида

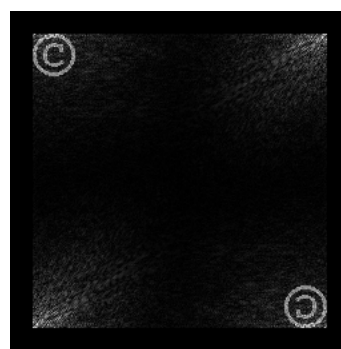
$$h_m(x, y) = y_m h^{p/q}(x, y), \quad (20)$$

соответственно. Параметр y_m определяется по формуле $y_m = B_m/B_m^{p/q}$, и представляет собой, как будет рассмотрено ниже, угол наклона искомой зависимости, где B_m — максимальное значение интенсивности голограммы, $h_m(x, y)$ — голограмма после нелинейного амплитудного преобразования. Столбцы значений С/Ш₁ и С/Ш₂ являются средними значениями отношения сигнал/шум для этих двух случаев, соответственно. Результаты экспериментов получены при $p=5$, $q=8$, $y_m=2.15$, размере водяного знака © равной 32 пикселей. В качестве контейнера использовалось тестовое изображение “Lenna” форматом 256×256 пикселей.

На рис. 7а представлено изображение-контейнер со встроенной голограммой водяного знака без предварительного преобразования интенсивности и восстановленный водяной знак на рис. 7б, а на рис. 8а показано изображение после нелинейного преобразования интенсивности голограммы и восстановленный водяной знак на рис. 8б. В обоих случаях значение амплитуды сигнала водяного знака составляло $b=150$. Задание такого значения амплитуды сигнала водяного знака позволяет оценить полученный эффект снижения динамического диапазона интенсивности голограммы.



а)

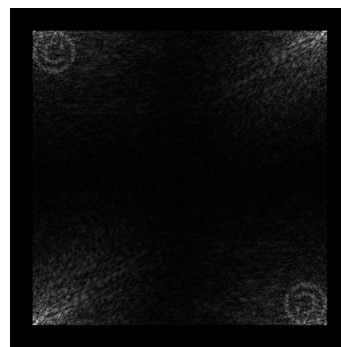


б)

Рис. 7. а) – изображение-контейнер без применения логарифмирования;
б) – восстановленное изображение водяного знака



а)



б)

Рис. 8. а) – изображение-контейнер с применением логарифмирования
б) – восстановленное изображение водяного знака

На рис. 9 представлен график зависимости среднеквадратического отклонения (СКО) интенсивности голограммы Фурье от амплитуды сигнала

водяного знака (на графике 1 — результат степенного преобразования, 2 — без логарифмического преобразования).

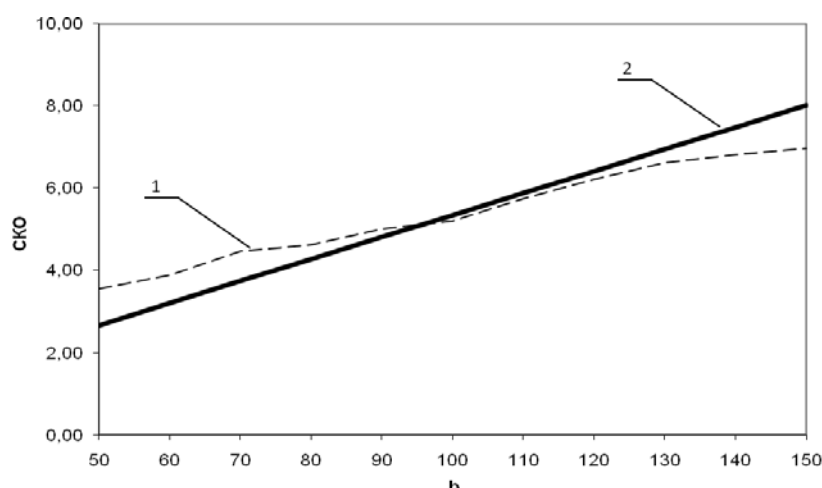


Рис. 9. Зависимость СКО интенсивности голограммы Фурье от амплитуды сигнала водяного знака

Из анализа полученных зависимостей на рис. 9 видно, что результаты логарифмического преобразования интенсивности голограммы имеют как положительный, так отрицательный эффект. Результаты, связанные со снижением динамического диапазона голограммы, встраиваемой в контейнер, начинают проявляться с порогового значения амплитуды сигнала b_m водяного знака. При относительно небольших значениях амплитуды сигнала водяного знака СКО интенсивности голограммы, после нелинейного амплитудного преобразования, превышает соответствующее значение СКО голограммы без преобразования интенсивности. Однако при этом отношение сигнал/шум для голограммы с амплитудным нелинейным преобразованием превышает соответствующие значения для голограммы без нелинейного преобразования интенсивности.

При увеличении значения амплитуды сигнала водяного знака ситуация меняется на противоположную, а именно, при больших значениях амплитуды сигнала водяного знака динамический диапазон интенсивности голограммы снижается, и СКО достигает 12% при значении амплитуды сигнала водяного знака $b=150$. Для выбранных параметров формирования голограммы и параметров степенного преобразования $p/q=5/8$, $y_m=2.15$ положительный эффект сжатия интенсивности голограммы начинает наблюдаться со значений амплитуды сигнала водяного знака примерно равного $b_m=95$.

Из графика на рис. 9 следует, что коэффициент пропорциональности y_m определяет угол наклона рассматриваемых зависимостей для случая применения нелинейного преобразования интенсивности голограммы. На рис. 10 представлены графики степенной функции уровней квантования b при $p/q=5/8$ для трех вариантов угла наклона y_m : 1.0, 2.15 и 5.0. При этом входное изменение уровней квантования $B1$ задавали в диапазоне 0-255. Крутизна выходных характеристик $B2$ изменяются в зависимости от параметра y_m и может регулироваться в широких пределах.

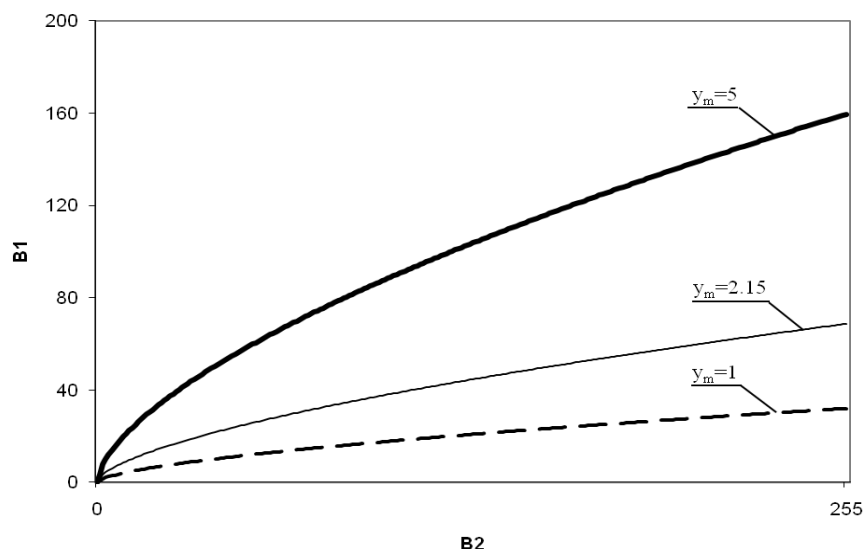


Рис. 10. графики степенной функции уровней квантования b при $p/q=5/8$ для трех вариантов угла наклона y_m : 1.0, 2.15 и 5.0

Таким образом, в процессе экспериментов по применению логарифмического сжатия динамического диапазона интенсивности голограмм Фурье со случайной фазой установлено, что положительный эффект начинает выполняться с порогового значения амплитуды b_m водяного знака, величина которого определяется параметрами степенного преобразования $x^{p/q}$ ($p/q < 1$) и параметром наклона y_m , который влияет на крутизну характеристики преобразования. Установлена линейная зависимость между изменением амплитуды сигнала водяного знака и средним квадратичным отклонением интенсивности цифровой голограммы Фурье.

Проведенные эксперименты логарифмического сжатия интенсивности голограмм водяных знаков, встраиваемых в изображение-контейнер, показали существенное снижение динамического диапазона голограммы в области больших значений амплитуды сигнала водяного знака. Для значения амплитуды сигнала водяного знака $b=150$ и параметров степенного преобразования (4) $p=5$, $q=8$, $y_m=2.15$, получено уменьшение динамического диапазона ΔB на 37%, при этом уменьшение среднего квадратичного отклонения интенсивности голограммы составило около 12%.

Установлено, что эффект логарифмического преобразования интенсивности голограммы не является однозначным по мере увеличения амплитуды сигнала водяного знака. В области небольших значений амплитуды сигнала водяного знака СКО превышает соответствующее значение для голограммы без преобразования интенсивности. При увеличении амплитуды сигнала водяного знака, СКО интенсивности нелинейно преобразованных голограмм снижается и становится меньше соответствующей характеристики голограмм без этого преобразования.

В заключении приведены основные результаты исследования и разработки:

1. Разработан метод и алгоритм построения голограммы водяного знака на основе дискретного косинусного преобразования для защиты изображений.

2. Разработан метод и алгоритм построения голограммы водяного знака на основе преобразования Фурье для защиты изображений. Даны практические рекомендации по использованию методов на основе ДКП и ДПФ.
3. Разработан метод и алгоритм априорной компенсации искажений ФПМ при встраивании скрытых водяных знаков в фотоизображение на основе цифровой голографии.
4. Разработан метод и алгоритм сжатия динамического диапазона интенсивности цифровых голограмм Фурье водяного знака позволяющий уменьшить появление артефактов визуализации встраивания скрытого водяного знака в изображении-контейнере.

Публикации по теме диссертации.

1. Старченко А.П. Метод косинусной голограммы в задаче встраивания скрытых водяных знаков /Сб. трудов Девятой международной научно-практической конференции "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности"(СПб, 22-24 апреля 2010 г.) / Под ред. А.П. Кудинова. СПб: Издательство Санкт-Петербургского Политехнического университета. 2010. Т.3. С. 140-148.
2. Старченко А.П. Технология защиты документов в задаче встраивания скрытых водяных знаков /Сб. трудов Десятой международной научно-практической конференции "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности" (СПб, 9-11 декабря 2010 г.) / Под ред. А.П. Кудинова. СПб: Издательство Санкт-Петербургского Политехнического университета. 2010. Т.1. С. 191-196.
3. Старченко А.П. Применение дискретного косинусного преобразования для построения голограммы в задаче встраивания скрытых водяных знаков // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 3. С. 29-33.
4. Старченко А.П., Гатчин Ю.А. Метод сжатия динамического диапазона цифровых голограмм Фурье в задаче встраивания скрытых водяных знаков // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. – вып. 72. С. 141 – 146.
5. Бронштейн И.Г., Старченко А.П., Унчун Чо Разработка методики и исследование электронной системы стабилизации изображения видеокамеры // Информационно-управляющие системы, СПб ГУАП, 2008. №1, 32. С. 7-11.
6. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010615980 «Программа построения косинусной голограммы при встраивании и восстановлении скрытых водяных знаков» // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 сентября 2010 г.
7. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010615979 «Программа физического моделирования влияния функции передачи модуляции на сигналы изображений» // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 сентября 2010 г.
8. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2011610739 «Программа для амплитудного преобразования интенсивности цифровых голограмм Фурье» // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 января 2011 г.