

На правах рукописи



Аминова Елена Альбертовна

**РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ИСТОЧНИКОВ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 05.12.04

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир – 2018

Работа выполнена на кафедре инфокоммуникаций и радиофизики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова

Научный руководитель **Приоров Андрей Леонидович**
доктор технических наук, доцент кафедры
инфокоммуникаций и радиофизики
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный
университет им. П.Г. Демидова», г. Ярославль.

Официальные оппоненты: **Орлов Алексей Александрович**
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой физики и прикладной
математики Муромского института (филиала)
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром,
Владимирская область.

Прозоров Александр Викторович
кандидат технических наук,
ИП «Прозоров Александр Викторович»,
г. Ярославль.

Ведущая организация ПАО «Ярославский радиозавод», г. Ярославль.

Защита диссертации состоится «3» октября 2018 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корп. 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан 6 июля 2018 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу:
600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, РТиРС, Самойлову А.Г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В радиотехнических системах среда передачи информации традиционно является самой уязвимой. На современном этапе к известным уязвимостям добавляются следующие уровни: носителей информации; средств взаимодействия с носителем; представления информации; содержания информации.

В работе более пристальное внимание уделено содержанию информации, так как это критично для автоматизированных систем распознавания изображений.

Существующие системы телевидения и CCTV (охранное телевидение) как в кабельной, так и в сетевой версии сильнее всего подвержены подготовленным злонамеренным вмешательствам. Разрешение телевизионного изображения в указанных прикладных областях науки и техники является зачастую критичным. Элементы сцены могут как совпадать с размерами пикселей, так и быть результатом отображения собственных шумовых артефактов устройства фотофиксации. Следовательно, необходимо отделять собственные признаки цифрового устройства и мельчайшие элементы изображения. Последние могут являться, в свою очередь, как естественными объектами сцены, так и искусственно добавленными элементами.

Постоянное совершенствование средств вычислительной техники на современном этапе ее развития привело к широкому распространению программных средств подтверждения подлинности разнообразных фактов и событий, используемых, в том числе, и в качестве цифровых доказательств в судебной практике. В большинстве практических случаев роль такого средства подтверждения отдается цифровым изображениям. Однако данная тенденция приводит к повышению риска их злонамеренного искажения.

Для исключения принятия фальсифицированного цифрового изображения в качестве цифрового доказательства проводится судебная фототехническая экспертиза. При ее производстве исследуют фотоизображения с различными свойствами и содержанием (как бумажные, так и цифровые). Задачами такой экспертизы являются отождествление оборудования для создания фотоизображений, идентификация участков местности, помещений и предметов, установление условий съемки, размеров объектов и расстояний между ними, а также выявление фотографического монтажа и ретуши. Видеотехническая экспертиза также неразрывно связана с анализом изображений. При ее производстве могут исследоваться как динамические изображения (сами видеозаписи), так и статические (отдельные кадры этих видеозаписей). Данная работа и направлена на решение задачи определения оборудования, с которого получен снимок сцены.

По аналогии с дактилоскопическими признаками, представленными отпечатками пальцев, являющимися известной и широко применяемой биометрической характеристикой, применяемой для решения задач идентификации личности, структурный шум матрицы камеры может применяться для идентификации устройства формирования исследуемого цифрового изображения.

В рассматриваемой задаче определения источника формирования изображения, можно выделить три основных этапа:

– получение тестового цифрового изображения;

- формирование распределения структурного шума цифрового устройства, на основе артефактов его присутствия на тестовом изображении;
- сравнение шаблона структурной помехи на тестовом изображении с имеющимися в базе структурными шумами устройств фотофиксации.

В настоящее время в судебно-технической экспертизе фотоматериалов применяется несколько методик: метод тонкослойной хроматографии, спектральные методы и т. п.

Однако рассмотренные подходы не позволяют точно идентифицировать устройство фиксации сцены интереса, представленной на изображении, а лишь дают информацию о характеристиках фотоматериала. Они не применимы для цифровых улик. Следует отметить, что определение источника получения цифрового фотоматериала более сложная задача, в отличие от исследования видеоматериала, поскольку в последнем случае изначально имеется больше априорной информации из-за наличия нескольких кадров.

Множество ученых внесли свой вклад как в разработку теории и методов обнаружения полезной информации среди различного рода помех, так и в специальные средства для воспрепятствования факту передачи информации или нарушения целостности сообщения. Значительный вклад в разработку современной теории в верификации цифровых изображений внесли такие ученые как Дж. Фридрих, Дж. Лукаш, А. Попеску, Х. Фарид, М. Гольян и другие.

В настоящее время исследованы лишь теоретические аспекты проведения экспертизы достоверности получения исследуемого изображения с предполагаемого цифрового устройства.

Цель работы. Целью работы является повышение достоверности идентификации истинных устройств фиксации цифровых изображений.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- исследование современных методов идентификации устройств фиксации цифровых изображений;
- разработка алгоритма формирования уникального двумерного признака цифрового устройства фиксации цифровых изображений на основе собственных шумовых артефактов аппарата;
- разработка алгоритма определения устройства формирования цифрового изображения;
- исследование влияния параметров входных изображений на качество работы предложенных алгоритмов.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались современные методы цифровой обработки изображений, распознавания образов, математического анализа, теории вероятностей и математической статистики. Для практической реализации алгоритмов применялись современные методы программирования и компьютерного моделирования на языке Matlab.

Объектом исследования является подлинность информации о получении цифровых изображений с исследуемого устройства фотофиксации.

Предметом исследований являются алгоритмы цифровой обработки изображений, применяемые для отождествления устройства фотофиксации.

Научная новизна. В рамках данной работы получены следующие новые научные результаты:

1. Предложено использование структурного шума матрицы цифрового устройства в качестве уникального признака, характеризующего аппарат фотофиксации.

2. Разработан алгоритм детектирования двумерного шумового признака цифрового устройства фотофиксации изображений на основе структурного шума.

3. Разработан алгоритм верификации цифрового устройства фотофиксации.

4. Предложено использование корреляционного параметра в качестве выходного параметра алгоритма идентификации конкретного устройства фиксации цифрового изображения.

5. Исследовано влияние параметров цифровых изображений на значение выходного критерия алгоритма идентификации устройства формирования цифровых изображений.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Разработанный алгоритм позволяет идентифицировать устройство фиксации цифрового изображения в условиях отсутствия априорной информации о нем с уровнем верного принятия решения на 2-9% выше, чем у известных алгоритмов.

2. Предложенный алгоритм извлечения собственного структурного признака цифрового устройства не зависит от контента используемых цифровых изображений.

3. Разработанный алгоритм может быть использован для первичной проверки изображения в качестве цифровой улики в судебно-технической экспертизе, а также в ряде других прикладных задач систем прикладного телевидения и цифровой обработки изображений.

Результаты работы внедрены в соответствующие разработки Экспертно-криминалистического центра УМВД России по Ярославской области (г. Ярославль) и Удостоверяющего центра ГБУ ЯО «Электронный регион» (г. Ярославль). Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ЯрГУ им. П.Г. Демидова в рамках дисциплин «Цифровая обработка изображений» и «Системы технического зрения», а также в научно-исследовательские работы при выполнении исследований в рамках гранта РФФИ (№16-37-00301). Работа осуществлялась при финансовой поддержке Министерства образования РФ в рамках научного проекта №14.575.21.0167, идентификатор работ – RFMEFI57517X0167. Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

Достоверность материалов диссертационной работы обеспечивается корректным использованием математического аппарата и экспериментальными данными, подтверждающими теоретические гипотезы и результаты известных из литературы исследований.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались на следующих научно-технических семинарах и конференциях:

1. Шестая и восьмая научно-технические конференции «Техническое зрение в системах управления», Москва, 2015, 2017.

2. Семнадцатая – двадцатая международные конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, 2015–2018.

3. Международная конференция «Методы фотограмметрического и компьютерного зрения для видеонаблюдения, биометрии и биомедицины», Москва, 2017.

4. Пятнадцатая всероссийская конференция «Нейрокомпьютеры и их применение», Москва, 2017.

5. Двенадцатая международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации», Суздаль, 2017.

6. Тринадцатая международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации», Москва, 2018.

7. Двадцать вторая международная конференция открытой инновационной ассоциации FRUCT, Хельсинки, 2018.

8. Ярославские областные конференции молодых ученых и аспирантов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, из них 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьи, индексируемые в базе SCOPUS, и 15 докладов на научных конференциях различного уровня. Получено три свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 76 наименований, и 3 приложения. Она изложена на 110 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту:

– алгоритм детектирования структурного шума матрицы источника формирования изображения, позволяющий идентифицировать истинное устройство фотофиксации;

– алгоритм идентификации устройства фиксации цифрового изображения, имеющий уровень верных срабатываний выше, чем у известных алгоритмов на 2–9%;

– методика использования цифровых изображений в качестве входных данных для алгоритма идентификации устройства фиксации цифровых изображений, позволяющая определить наилучшие параметры используемых изображений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлен обзор основных шумов и искажений, проявляющихся на разных этапах процесса формирования цифровых изображений в цифровых устройствах: детектирование и локализация оптических искажений, вызванных посторонними артефактами на объективе, детектирование неэффективных пикселей матрицы цифрового устройства, а также определение интерполяционных признаков устройства; рассмотрены современные алгоритмы идентификации устройств фотофиксации, выявлены их недостатки.

Решение указанных в работе задач рассмотрено в последующих двух главах.

Во второй главе предлагается алгоритм формирования собственного признака цифрового устройства и алгоритм идентификации источника цифрового изображения.

Многочисленные исследования в области цифровой фототехники позволяют построить следующую физическую модель формирования цифровых изображений в цифровых устройствах.

Исходя из известного процесса формирования изображения, неэффективные пиксели и этап предусиления (по питанию) каждого сенселя (группы светочувствительных пикселей), с последующими операциями АЦП (аналогово-цифрового преобразования) и квантования значений дают матрицу коэффициентов эффективности преобразования свет-сигнал. Размерность данной матрицы K равна размерности матрицы сенсора устройства $m \times n$ и характеризует неравномерность отклика пикселей сенсора. При получении снимка интенсивность I падающего света от сцены дает следующий отклик $I + IK$ устройства фотофиксации.

Экстремальными значениями матрицы K будут неэффективные пиксели (не несущие информации о сцене). В обычных условиях проявление влияния неравномерности отклика пикселей в виде матрицы K будет сильно зависеть от интенсивности падающего света во время получения снимка по закону IK . Однако интенсивность излучения может быть за границей воспринимаемого зрительной системой человека цветового диапазона, но в то же время активировать сенсели.

Это известное в технике явление носит название «темновой ток». Оно проявляется в определенном уровне сигнала от сенселей на входе АЦП даже при закрытом объективе камеры. В аппаратной части устройства формирования изображения вместе с темновым током имеет место ток питания сенселей. Он, в свою очередь, дает постоянное смещение O , в то время как темновой ток формально зависит от времени его накопления и настроенной чувствительности фотоаппарата и выражается через D , где D имеет размерность матрицы сенсора $m \times n$ и смысл неравномерности в работе усилителей и питании каждого отдельного элемента. Модели всех остальных, не типизированных ранее шумов, принимаются за аддитивный шум N .

Таким образом, модель формирования выходного изображения оптической и аппаратной системами устройства фотофиксации имеет следующий вид:

$$Y = I + IK + D + O + N. \quad (1)$$

Во всех коммерческих пользовательских устройствах на аппаратном уровне в автоматическом режиме проводится коррекция параметров темнового тока и постоянного смещения. В зависимости от алгоритма, выбранного производителем и установленных пользователем настроек чувствительности ISO, освещенности и т. Д., после такой функции коррекции F будет получена оценка шумов ϵ , уникальная для каждого конкретного аппарата в данный момент съемки:

$$\epsilon = F(D + O + N). \quad (2)$$

Итоговое представление выхода сенсора с учетом значимых для рассматриваемой задачи собственных шумов имеет следующий вид:

$$Y = I + IK + \epsilon. \quad (3)$$

Выполняемые далее процедуры P гамма-коррекции и интерполяции являются нелинейными и зависимыми от конкретных значений интенсивностей пикселей

изображения, поэтому следует перейти к пиксельному рассмотрению в выражении (3) [14]:

$$y_{ij} = I_{ij} + I_{ij}K_{ij} + \varepsilon_{ij}, \quad (4)$$

Тогда сохраняемое в системе значение конкретного пикселя формируемого изображения p_{ij} до операции сжатия можно будет записать следующим образом:

$$p_{ij} = P(y_{ij}, L(y_{ij}), i, j), \quad (5)$$

где $L(y_{ij})$ – локальная область соседних и оцениваемых пикселей для пикселя p_{ij} .

Рассмотрение выражения (5) в предложенной форме представляет значительные сложности, поэтому следует прибегнуть к следующему предположению: все нелинейные процедуры P рассматриваются как единый матричный оператор, действующий на матрицу K . Они являются менее значимым по влиянию на итоговое изображение фактором по сравнению с собственными признаками аппаратной части устройства фотофиксации.

Формирование собственного признака цифрового устройства проводилось следующим образом. Исходя из описания выходной характеристики сенсора (3), видно, что исходное изображение возможно отделить от матрицы K при помощи фильтрации F . Предполагая фильтрацию высококачественной, но допуская прохождение остаточного шума, получаем:

$$Z = Y - F(Y) = I + IK + \varepsilon - \hat{I} = IK + \theta, \quad (6)$$

где \hat{I} – изображение после фильтрации, θ – остаточный шум.

Данный подход, однако, требует оценки изображения, для разделения IK на компоненты, что накладывает определённые условия на алгоритм I . Кроме того, возникает необходимость компенсировать остаточный шум. Эти ограничения определяют применение базы изображений M , полученных с использованием конкретного аппарата для формирования его собственного признака:

$$pattern = \frac{\sum_{n=1}^M A_n(Z)}{M}. \quad (7)$$

Для построения собственного шума матрицы цифрового устройства используется набор исходных изображений, каждое из которых участвует в алгоритме A построения распределения. Данный алгоритм фактически позволяет физически разделить компоненты I и K . Для этого используется поэтапная пороговая обработка в области трансформант вейвлет-преобразования Добеши. Блок-схема предлагаемого алгоритма детектирования структурного шума устройства представлена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма детектирования собственного признака цифрового устройства

Для тестового изображения настроечной телевизионной таблицы (ГОСТ 14872-82. Таблицы испытательные оптические телевизионные. Типы, размеры и технические требования) построена карта собственного шумового признака. Результат данного построения представлен на рис. 2.

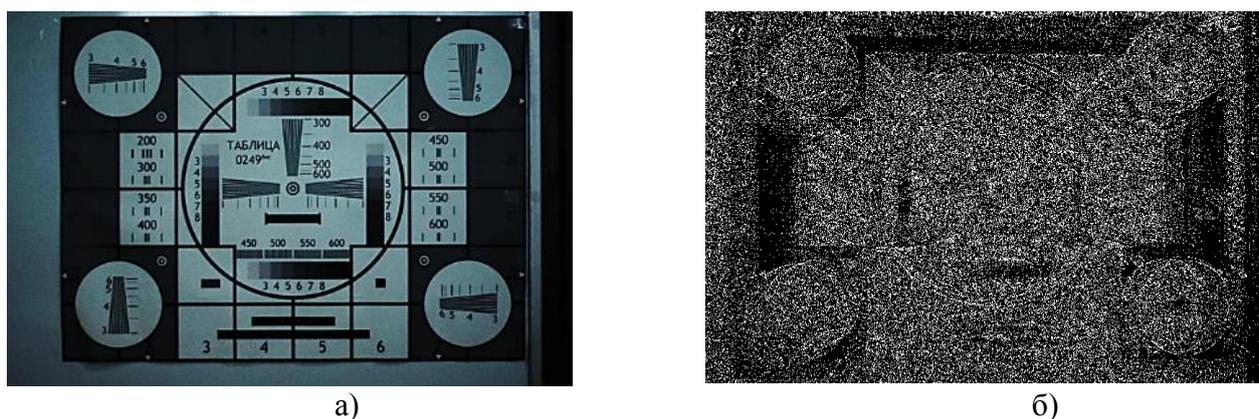


Рис. 2. Определение собственного признака аппарата: а) тестовое изображение; б) шаблон структурного шума

Построенное распределение помимо явно заметной шумовой составляющей содержит артефакты контента, содержащегося на рассматриваемом изображении. Однако при увеличении количества изображений в наборе для детектирования собственного признака в силу случайного пространственного распределения

контента изображений артефакты объектов пропадают и шумовая составляющая преобладает. Полученные в результате детектирования двумерные распределения структурного шума матриц цифровых устройств из базы изображены на рис. 3.

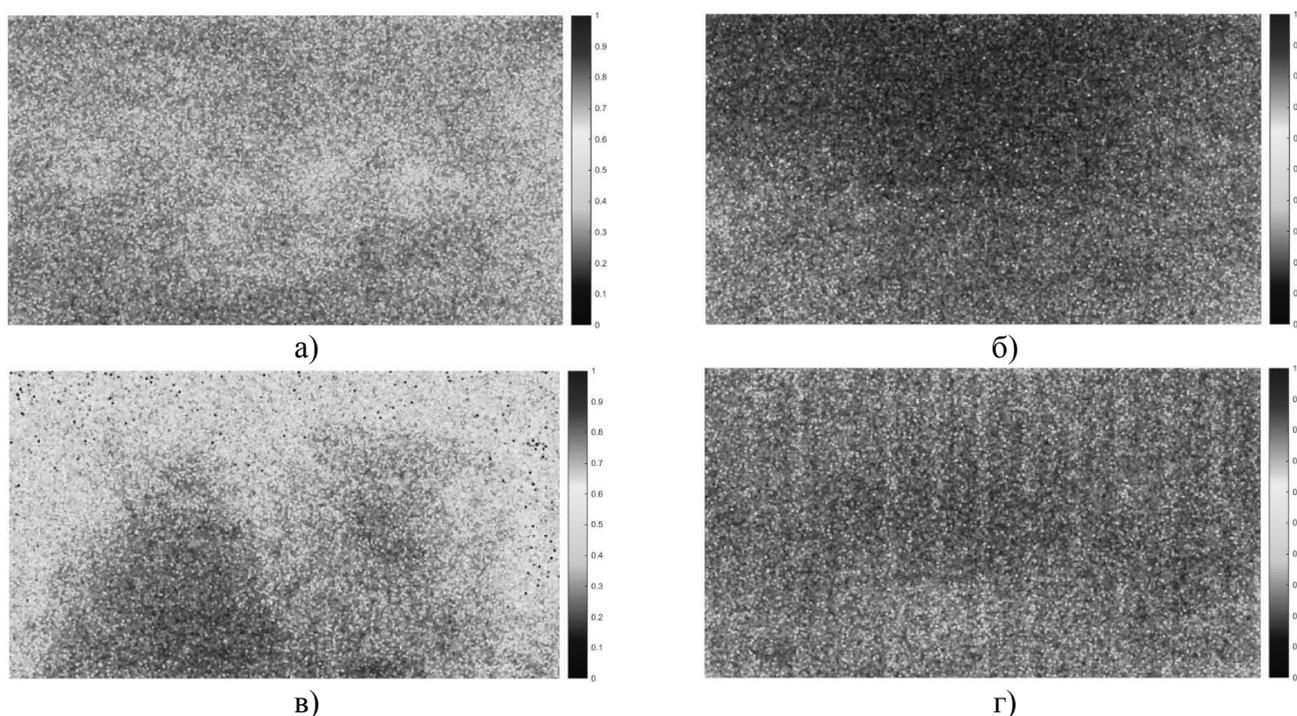


Рис. 3. Двумерные распределения структурных шумов цифровых устройств фотофиксации: а) Sony DSLR A700; б) Sony DSC W80; в) Panasonic DMC-FS5; г) Canon EOS 5D

Вид гистограммы шума матрицы устройства представлен на рис. 4.

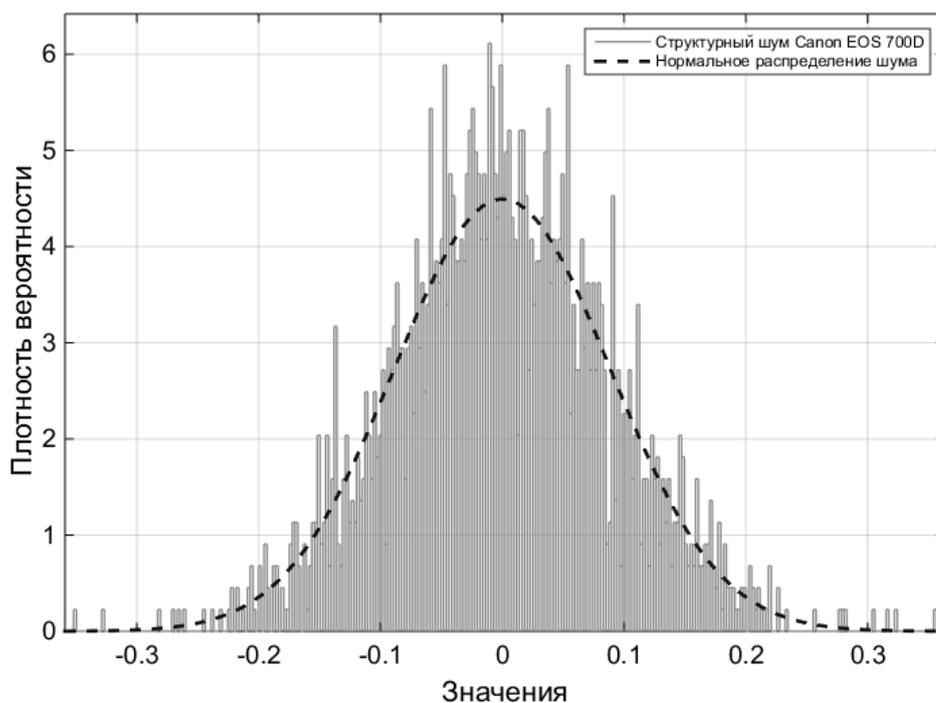


Рис. 4. Гистограмма собственного шумового признака тестового изображения

Как видно из построенной гистограммы, его вид достаточно близок к нормальному распределению. Следовательно, для полученного шумового признака характерны параметры нормального распределения.

После формирования распределения собственного шума для выбранного количества камер проводится тестирование для поиска наибольшего соответствия гипотезе: существует набор собственных признаков устройств $pattern_k$; для тестового изображения T проводится оценка $A(Z_T) = I_T K + \theta$.

Вычисление взаимной корреляционной функции тестового и эталонного изображений производится среди всего имеющегося набора двумерных импульсных характеристик устройств в базе:

$$\rho_q = corr(pattern_q, I_T K).$$

В данном случае взаимная корреляционная функция тестового изображения с предполагаемой двумерной импульсной характеристикой предлагается в качестве решения задачи детектирования источника формирования рассматриваемого изображения.

Наибольший отклик получается при совпадении шумовых распределений тестового изображения и изображения с аппарата, с которого оно было получено $T = q$ (рис. 5).

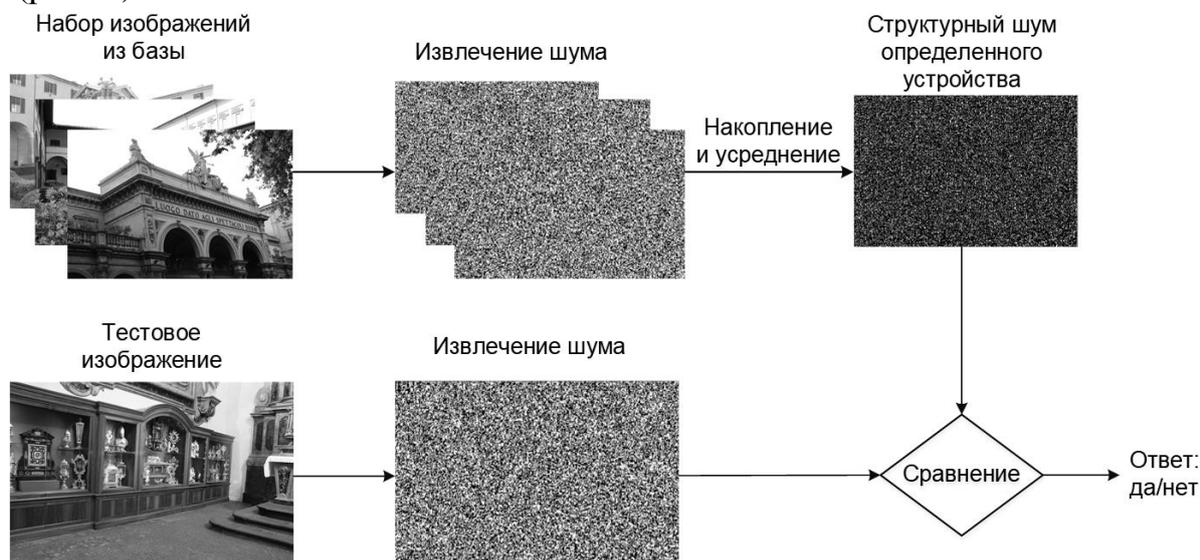


Рис. 5. Схема проверки гипотез о соответствии изображения определенному устройству фотофиксации

В данной задаче результатом расчета двумерной корреляционной функции двух распределений структурного шума будет один ярко выраженный пик в центре и низкие значения корреляции в других областях результирующего изображения при условии получения тестового изображения с рассматриваемого устройства фотофиксации (рис. 6).

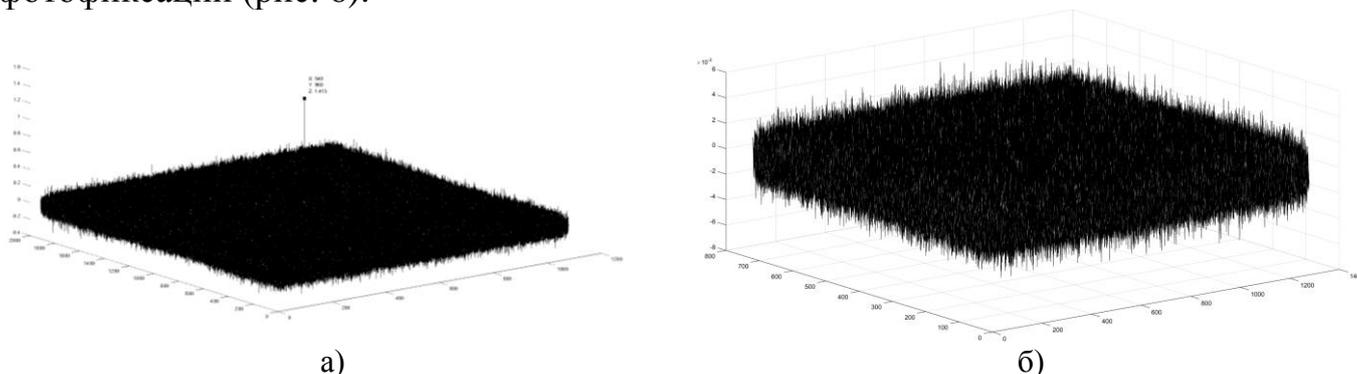


Рис. 6. Результат корреляционного анализа: а) при формировании тестового изображения предполагаемым аппаратом; б) при формировании тестового изображения аппаратом, отличным от предполагаемого

Предыдущие исследования в данной области показали, что использование среднего значения взаимной корреляционной функции не является объективным для данной задачи в силу зависимости от артефактов интенсивности изображений. Следовательно, предлагается применить нормировку максимума корреляции. Данный критерий определяется как отношение максимального значения корреляции (квадрат амплитуды пика) к энергии шума, применительно для двумерной функции взаимной корреляции:

$$R_{max\ corr\ q} = \frac{corr_{max}^2(pattern_q, I_{TK})}{corr_{s_{max}}^2(pattern_q, I_{TK})} sign(corr_{max}(pattern_q, I_{TK})),$$

где s_{max} – точка максимума корреляции, $corr_{s_{max}}$ – значение взаимной корреляционной функции без максимума за пределами интервала корреляции, $corr_{max}$ – максимальное значение взаимной корреляционной функции.

Для определения порога используется критерий Неймана-Пирсона, т. е. при фиксированном значении вероятности ложной тревоги значение порога τ выбирается таким образом, чтобы вероятность пропуска цели была минимальна. Задавая вероятность ложной тревоги равной 10^{-3} , и на основании значений TP, FP, FN, TN можно вычислить чувствительность (Sen – sensivity) и специфичность (Spe – specificity):

$$Spe = \frac{TN}{TN + FP}, Sen = \frac{TP}{TP + FN}.$$

Специфичность характеризует долю истинно-отрицательных решений алгоритма, в то время как чувствительность – долю истинно-положительных решений. В данном случае $Spe = Sen = 99,97\%$.

Для определения порога принятия решения алгоритма идентификации устройства фиксации цифрового изображения использовался участок равенства характеристик (рис. 7).

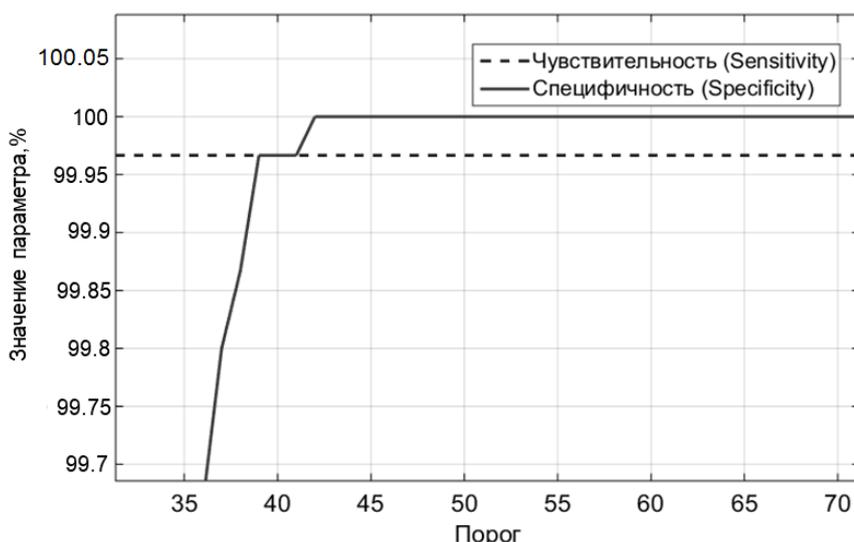


Рис. 7. Кривые специфичности и чувствительности алгоритма в увеличенном масштабе

На основе данных кривых определен порог срабатывания алгоритма $\tau = 40$.

Таким образом, увеличение уровня верного определения устройства фотофиксации для предлагаемого алгоритма по сравнению с алгоритмом оценки

интерполяционных артефактов составляет 2,97%, а по сравнению с алгоритмом на основе искажений оптической системы – 8,97%.

В третьей главе исследуется влияние различных параметров входных цифровых изображений на значение выходного корреляционного критерия алгоритма определения устройства фотофиксации.

Исследование разработанных алгоритмов проводилось на собственной базе цифровых изображений, включающей в себя изображения с устройств различных марок и моделей и содержащей: 51000 цифровых изображений различных сцен, 1000 изображений телевизионной настроечной таблицы, не входящих в предыдущий пункт, 43 цифровых устройства фотофиксации (профессиональные и любительские камеры; зеркальные фотокамеры и камеры мобильных устройств), 30 устройств фирмы Canon, 20 фотоаппаратов модели Canon EOS 6D.

Для выбора необходимого для корректной работы алгоритма числа изображений, участвующих в формировании собственного признака, проведено тестирование зависимости коэффициента максимальной корреляции от количества изображений (рис. 8а).

Полученная зависимость говорит о том, что с ростом количества изображений значение оценки растет практически линейно. В среднем значение оценки увеличивается на 2% на всем диапазоне. Однако наибольший рост значения предложенной оценки (на 9%) наблюдается при количестве используемых изображений до 15 (рис. 8б).

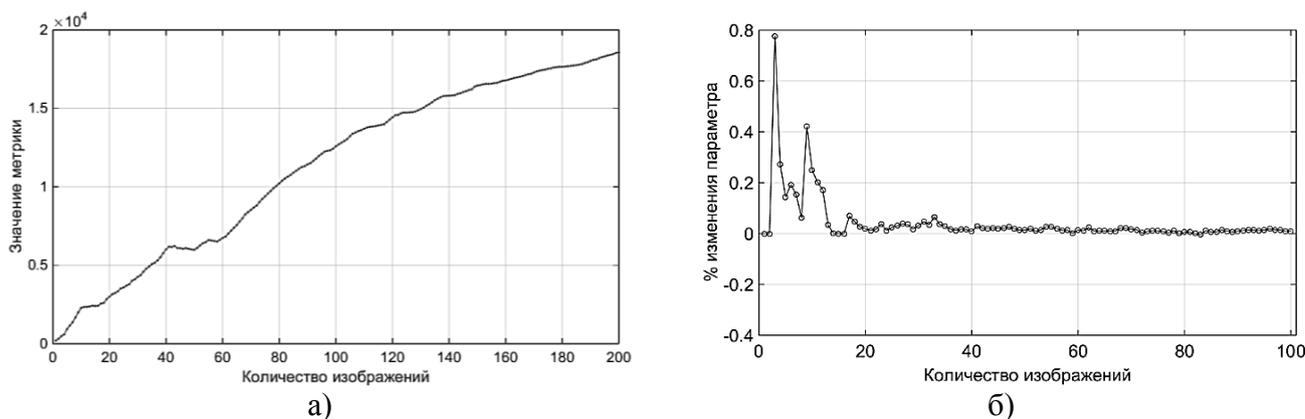


Рис. 8. Зависимость значения корреляционного параметра от числа используемых изображений: а) в абсолютном соотношении; б) в процентном соотношении

В связи с тем, что изначально изображения в созданной базе имеют различный размер, то для выбора наилучшего размера изображения проведен эксперимент по исследованию зависимости значения метрики и параметра быстродействия от размера используемого изображения (рис. 9а). Для исследования выбраны известные стандартные размеры кадра видеопоследовательности, соответствующие стандартным разрешениям экрана: 720x480, 800x600, 1024x768, 1280x720, 1366x768, 1600x900, 1920x1080.

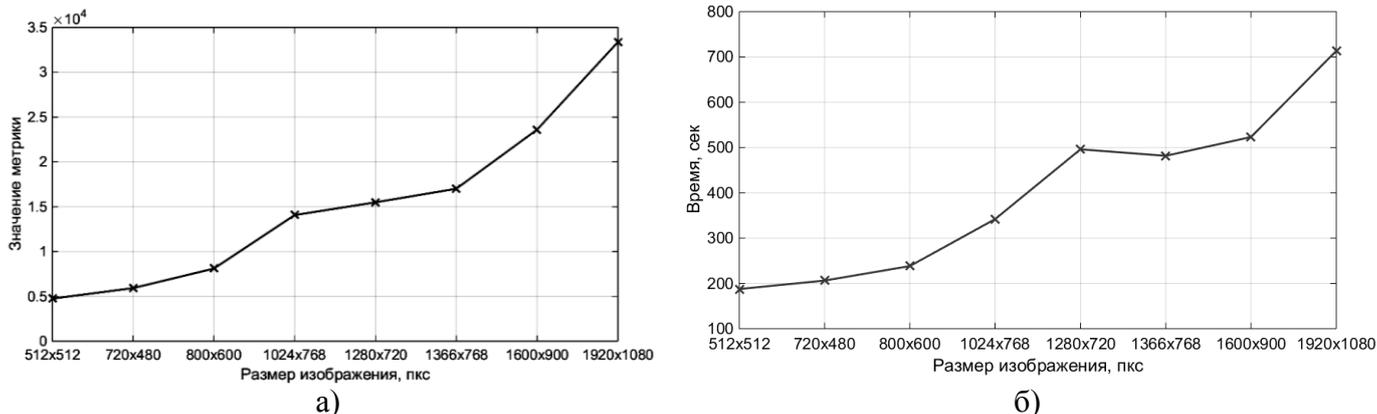


Рис. 9. Зависимость значения корреляционного параметра от размера используемых изображений: а) изменение значения параметра; б) быстродействие

Из полученного графика следует, что алгоритм работоспособен в большом диапазоне размеров анализируемых изображений. Следует отметить, при увеличении количества размеров изображений происходит накопление статистики по уникальным характеристикам устройств. С другой стороны – увеличение размера изображения приводит к возрастанию времени, требуемого на обработку каждого изображения (рис. 9б).

Проведено тестирование работы алгоритма для наиболее распространенных форматов хранения изображений: PNG, TIFF, JPEG и JPEG2000. Для проведения тестирования использовался набор цифровых изображений для четырех цифровых фотоустройств: Sony DSLR A700, Sony DSC W80, Panasonic DMC-FS5 и Nokia N97 из оригинальной базы изображений. Проводилось сравнение структурного шума каждого устройства с обнаруженным на тестовом изображении, не входившим в набор при формировании шумового признака устройства. В данном случае тестовое изображение было получено с использованием аппарата Panasonic DMC-FS5. Результаты данного исследования представлены на рис. 10. Видно, что значения выходного критерия для форматов файлов PNG и TIFF имеют наибольшие значения, поскольку первый использует сжатие без потерь, а второй является форматом хранения без сжатия данных.

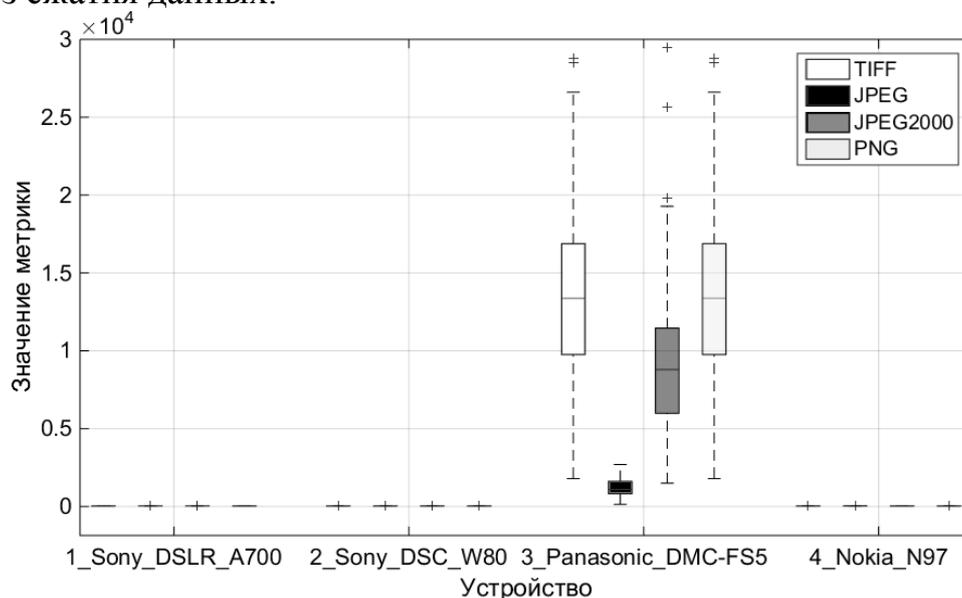


Рис. 10. Зависимость значения выходного параметра от формата входных изображений

Формат сжатия JPEG является достаточно сложным для анализа из-за использования алгоритмов сжатия с потерями. Сжатие в JPEG-формат искажает изображение, но эти искажения практически незаметны для зрительной системы человека. Вместе с тем, размер файла, даже при минимальной степени сжатия, сокращается в 5 раз. Степень сжатия можно регулировать установками фотоаппарата. Поскольку не все аппараты могут предоставить пользователю изображение с первичными цветовыми данными в работе изображения, формирующие собственную базу, имеют формат JPEG. Поэтому для кодека JPEG проведено дополнительное исследование влияния качества используемого изображения на значение выходного параметра (рис. 11).

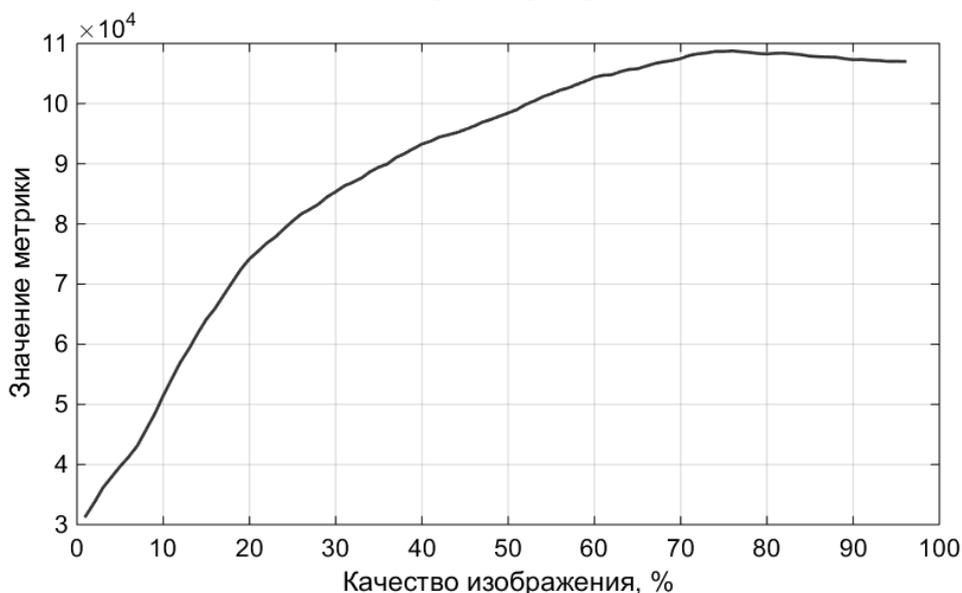


Рис. 11. Зависимость выходного критерия от параметра «качество» кодека JPEG

Алгоритмы сжатия с потерями кроме деталей сцены изображения теряют и детали, внесенные устройством фотофиксации. Таким образом, цифровые изображения как свидетельства должны быть получены при пользовательских настройках высокого качества изображения, а минимально необходимым качеством JPEG-изображения для наилучшей работы алгоритма является значение 75% от максимального и выше.

Наличие лишь небольшой области от исходного размера тестового изображения для проведения процедуры идентификации источника формирования изображения означает, что с изображением сцены проводилось геометрическое преобразование типа обрезания и передискретизации до разрешения, определенного настройками аппарата. Необходимо найти минимальный относительный размер области изображения (в %), при котором сохраняется устойчивость алгоритма в смысле высокого значения выходной метрики. Для этого проведен эксперимент, аналогичный исследованию влияния формата используемого изображения на уровень выходного параметра. В данном случае каждый этап вычисления отличается изменением размера части изображения, используемого в качестве тестового. Пример входного изображения представлен на рис. 12.

Следует отметить, что в рамках эксперимента учтено отношение сторон области изображения относительно первоначального. Также местоположение используемой области цифрового изображения не имеет значения.

Как показывают результаты исследования, для верной идентификации источника формирования цифрового изображения в рассмотренном случае достаточно даже 5% области изображения относительно первоначального размера.

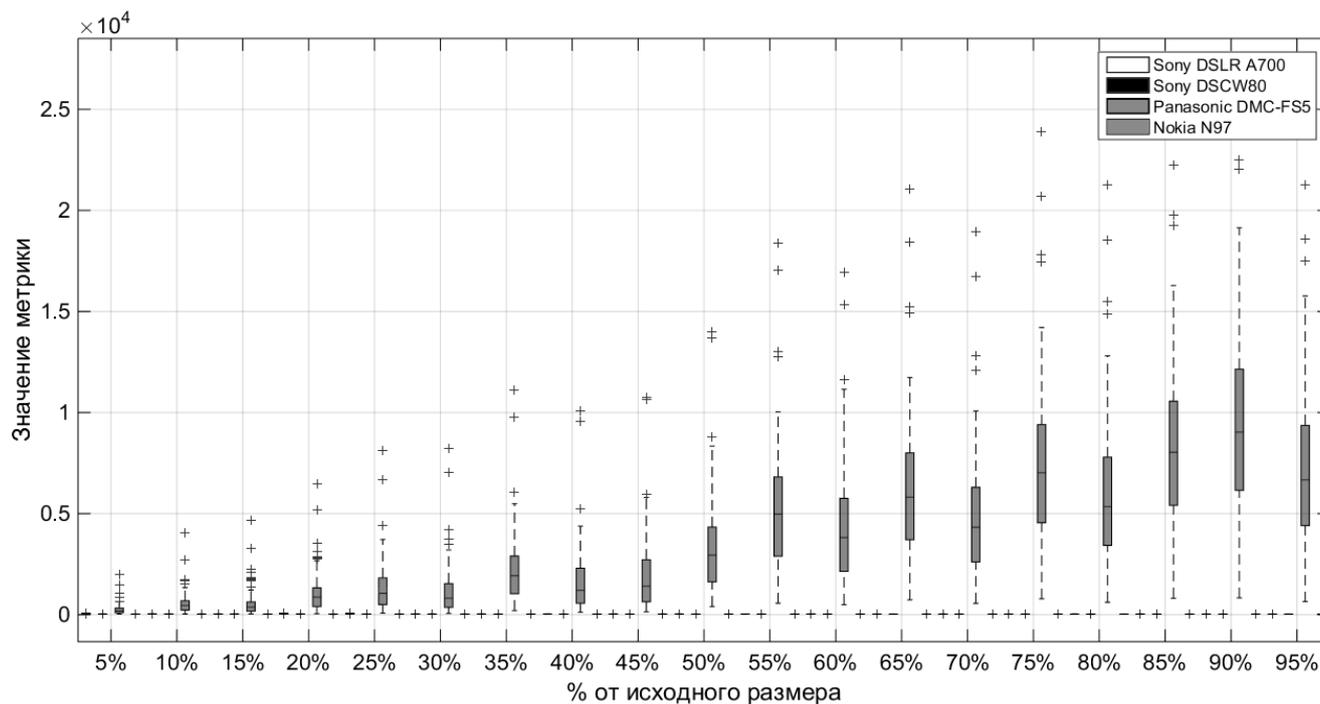
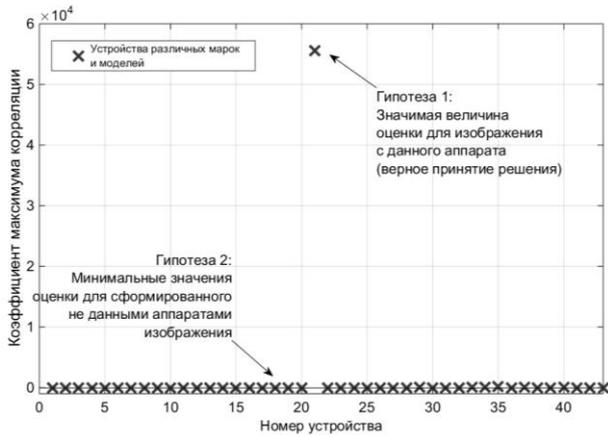


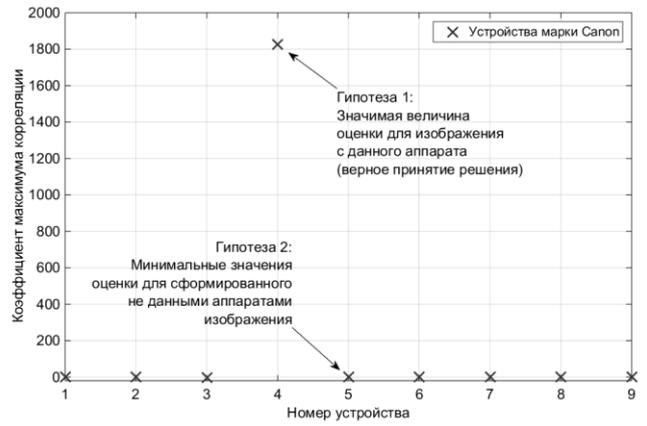
Рис. 12. Зависимость выходного параметра от размера используемой части цифрового изображения

Задача идентификации устройства фотофиксации помимо двухклассовой классификации на определение принадлежности исследуемого изображения к предполагаемому устройству включает в себя установление устройства фиксации изображения из имеющихся в базе сформированных заранее шумовых характеристик устройств. Проведено тестирование на идентификацию источника формирования тестового изображения из имеющегося набора 43 различных марок и моделей устройств (рис. 13а), среди 9 устройств различных моделей торговой марки Canon (рис. 13б) и 20 устройств производителя Canon модели EOS 6D (рис. 13в), для которых предварительно сформированы собственные признаки.

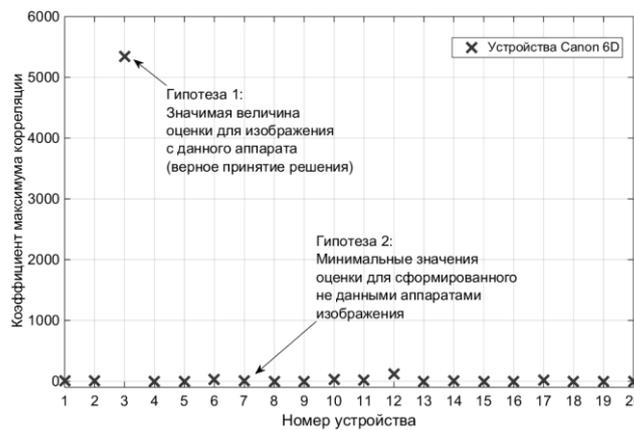
Как видно из графиков, алгоритмом было принято верное решение о принадлежности тестового изображения к устройству 21 в случае идентификации по всему набору устройств, верное решение о принадлежности к устройству 4 при определении устройства среди одной марки, но разных моделей и верное решение о принадлежности к устройству 3 в случае различных устройств одной марки и модели.



а)



б)



в)

Рис. 13. Результат идентификации устройства фотофиксации: а) среди различных моделей и марок; б) среди одной марки и различных моделей; в) среди одной модели и марки

Для оценки предложенного выходного критерия алгоритма выполнено сравнение корреляционного параметра с известными корреляционными подходами: кросс-корреляцией и корреляцией Пирсона (рис. 14).

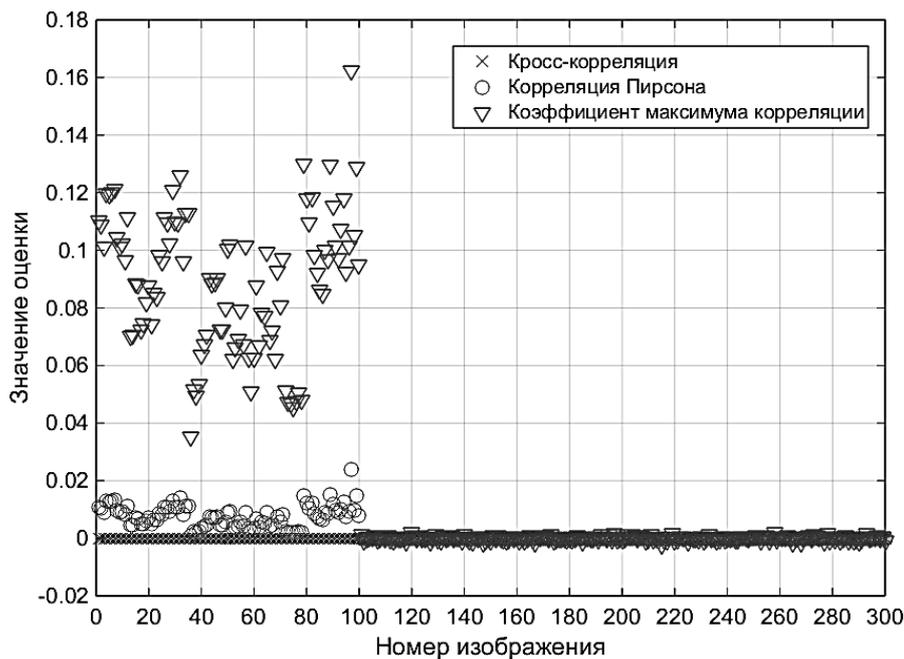


Рис. 14. Сравнение корреляционных методов

Тестирование проводилось на наборе из 300 изображений путем сравнения полученных из этих изображений шумовых характеристик с известным собственным признаком устройства фиксации изображений Canon 700D. Как видно из графика, предложенный способ корреляционной оценки изображений на основе коэффициента максимума корреляции имеет большую межклассовую различимость сравниваемых шумовых шаблонов для рассматриваемой задачи.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основании проведенных исследований в работе получены следующие основные результаты:

1. На основе анализа научно-технических источников в качестве собственного отличительного признака цифрового устройства фотофиксации выбрана неоднородность реакции пикселей на падающий световой поток.
2. Разработан алгоритм выявления собственного структурного шума матрицы цифрового устройства.
3. Предложено использование корреляционного коэффициента в качестве выходного критерия алгоритма идентификации источника формирования цифрового изображения.
4. Разработан алгоритм идентификации фотоприемного устройства фиксации цифровых изображений на основе двумерного распределения структурного шума матрицы цифрового устройства.
5. На основе критерия Немана-Пирсона и при зафиксированном значении вероятности ложной тревоги 10^{-3} определен порог срабатывания алгоритма $\tau = 40$.
6. Установлено, что уровень верной идентификации устройства формирования цифрового изображения составляет 99,97%. Данное значение выше по сравнению с существующими, полученными алгоритмом оценки интерполяционных артефактов – на 2,97%, а по сравнению с алгоритмом на основе искажений оптической системы – на 8,97%.
7. Проведено тестирование предложенного алгоритма на оригинальной базе цифровых изображений.
8. Исследовано влияние параметров входных изображений (количество изображений в наборе, размер, формат, качество JPEG изображений, относительный размер используемой области изображения) на значение выходного параметра.
9. Установлено, что в среднем добавление новых изображений в набор для формирования шумового распределения цифрового устройства увеличивает значение выходного параметра на 2%. Наибольший рост значения метрики наблюдается при количестве изображений до 15. При этом рост значения выходного параметра составляет 9%.
10. Исследовано влияние размера изображения на значения выходного параметра и установлено, что алгоритм работоспособен в большом диапазоне размеров анализируемых изображений.
11. Установлено, что разработанный алгоритм применим для распространенных форматов цифровых изображений как со сжатием, так и без него.

12. Установлено, что для формата сжатия JPEG рассматриваемый алгоритм показывает большие значения выходного параметра уже при значении качества изображения относительно оригинального 75%.
13. Результаты исследования показали, что алгоритм справляется с поставленной задачей даже при использовании 5% части тестового изображения.
14. Цель и задачи диссертационной работы успешно выполнены. Итоговая версия алгоритма реализована на языке Matlab с применением ряда библиотек цифровой обработки изображений, численных методов и визуализации данных. Получены три свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Аминова, Е.А. Определение устройства формирования цифрового изображения на основе собственных шумовых признаков / Аминова Е.А., Трапезников И.Н., Приоров А.Л. // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. № 5. С. 46–53.
2. Аминова, Е.А. Применение алгоритма определения устройства фотофиксации для различных параметров цифровых изображений / Аминова Е.А., Трапезников И.Н., Приоров А.Л., Брюханов Ю.А. // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. № 6. С. 3–11.

Статьи в других изданиях

3. Aminova, E. Overview of digital forensics algorithms in DSLR cameras / Aminova E., Trapeznikov I., Priorov A. // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. – Moscow, Russia. Pp. 199-205. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W4-199-2017, 2017 (Статья индексируется в Scopus).
4. Aminova, E. DSLR Imperfections Extraction From Image For Source Detection / Aminova E., Trapeznikov I., Priorov A., Khryashchev V. // Proceedings of the 22th Conference of Open Innovations Association FRUCT'22 – Jyvaskyla, Finland, 15–18 May, 2018. Pp. 12–18 (Статья индексируется в Scopus).

Доклады на российских и международных конференциях

5. Аминова, Е.А. Верификация изображений на основе уникального отпечатка матрицы устройства / Аминова Е.А., Потапов Е.В., Романов А.А. // Докл. 17-й междунар. конф. и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М., 2015. Т. 2. С. 694–696.
6. Аминова, Е.А. Обзор основных шумов матрицы цифровых устройств // Матер. междунар. научно-практ. конф. «Роль науки в развитии общества». Уфа, 2015. С. 9–11.
7. Аминова, Е.А. Разработка алгоритма верификации цифровых изображений на основе уникальных шумов матрицы устройства / Аминова Е.А., Трапезников И.Н. // Тез. докл. 13-й всерос. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение». Москва, 2015. С. 57–58.
8. Аминова, Е.А. Идентификация цифрового устройства на основе шумов матрицы / Аминова Е.А. Потапов Е.В., Романов А.А. // Сб. докл. междунар. конф.

«Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». Москва, 2015. С. 23–25.

9. Аминова, Е.А. Анализ шумов матрицы в задаче идентификации цифрового устройства // Тез. науч.-тех. конф. «Техническое зрение в системах управления». Москва, 2015. С. 12.

10. Аминова, Е.А. Комбинированный метод идентификации цифровых устройств фотофиксации / Аминова Е.А., Носков А.А. // Докл. 18-й междунар. конф. и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Москва, 2016. Т. 2. С. 700–703.

11. Аминова, Е.А. Двухклассовая и мультиклассовая идентификации цифровых устройств фотофиксации / Аминова Е.А., Носков А.А. // Сб. докл. междунар. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». Москва, 2016. Т. 2. С. 375–378.

12. Аминова, Е.А. Влияние интерполяции и способа формирования изображения на идентификацию цифровых устройств фотофиксации // Сб. ст. междунар. науч.-прак. конф. «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации». Волгоград, 2017. Т. 2. С. 10–13.

13. Аминова, Е.А. Интерполяция в задаче верификации изображений цифровых устройств фотофиксации / Аминова Е.А., Трапезников И.Н. // Тез. докл. всеросс. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение». Москва, 2017. С. 92–94.

14. Аминова, Е.А. Определение интерполяционных признаков формирования изображения в устройствах фотофиксации // Тез. докл. 8-й науч.-техн. конф. «Техническое зрение в системах управления». Москва, 2017. С. 85–86.

15. Аминова, Е.А. Определение необходимого для верификации цифровых изображений количества признаков / Аминова Е.А., Трапезников И.Н. // Докл. 19-й междунар. конф. и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Москва, 2017. Т. 2. С. 632–636.

16. Аминова, Е.А. Формирование карты оптических признаков DSLR камеры на основе артефактов пыли / Аминова Е.А., Трапезников И.Н. // Сб. докл. междунар. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». Москва, 2017. С. 280–284.

17. Аминова, Е.А. Разработка и анализ алгоритма детектирования синтезированных изображений / Аминова Е.А., Приоров А.Л. // Сб. тез. докл. 12-ой междунар. науч.-тех. конф. «Перспективные технологии в средствах передачи информации». Суздаль, 2017. С. 181–183.

18. Аминова, Е.А. Определение источника формирования цифрового изображения для различных форматов хранения данных / Аминова Е.А., Трапезников И.Н., Приоров А.Л. // Сб. тез. докл. 13-й междунар. науч.-тех. конф. «Перспективные технологии в средствах передачи информации». Москва, 2018. С. 11–12.

19. Аминова, Е.А. Применение алгоритма определения устройства фотофиксации для различных размеров цифрового изображения / Аминова Е.А., Приоров А.Л. // Докл. 20-й междунар. конф. и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Москва, 2018. Т. 2. С. 640–644.

Программы для ЭВМ

20. Аминова, Е.А. DSLR_dust – программное обеспечение для обнаружения оптических искажений на цифровых изображениях / Аминова Е.А., Трапезников И.Н. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615786 от 24 мая 2017.
21. Аминова, Е.А. Camera_FP – программное обеспечение для построения шумового распределения цифровых фотокамер / Аминова Е.А., Трапезников И.Н., Приоров А.Л. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613062 от 02 марта 2018.
22. Аминова, Е.А. FotoVer – программное обеспечение для идентификации устройства формирования цифрового изображения / Аминова Е.А., Трапезников И.Н., Приоров А.Л. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613593 от 19 марта 2018.

Подписано в печать 04.07.18
Формат 60×84 1/16. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе
Ярославский государственный университет
150003, Ярославль, ул. Советская, 14

