

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент Приоров Андрей Леонидович

Ярославль – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ВЕРИФИКАЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	14
1.1. Вводные замечания	14
1.2. Формирование изображений в цифровых устройствах.....	16
1.3. Причины возникновения и типы искажений и шумов	20
1.3.1. Классификация вносимых цифровым устройством шумов и искажений	20
1.3.2. Дробовой шум.....	21
1.3.3. Тепловой шум	22
1.3.4. Шум считывания	23
1.3.5. Структурный шум	23
1.4. Современные подходы к задаче идентификации устройства фотофиксации.....	25
1.4.1. Сравнение с оригиналом в формате RAW	26
1.4.2. Проверка метаданных EXIF.....	26
1.5. Обзор алгоритмов идентификации устройства фиксации цифровых изображений.....	27
1.5.1. Обнаружение артефактов оптической системы на изображениях.....	27
1.5.2. Поиск неэффективных пикселей матрицы цифрового устройства.....	30
1.5.3. Артефакты повторной интерполяции	36
1.6. Краткие выводы.....	41

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦИФРОВОГО УСТРОЙСТВА ФОТОФИКСАЦИИ.....	43
2.1. Вводные замечания.....	43
2.2. Формализация шумовых характеристик устройства фотофиксации.....	44
2.3. Алгоритм детектирования структурного шума устройства.....	50
2.4. Алгоритм корреляционного анализа.....	59
2.5. Выбор порога принятия решения.....	64
2.6. Краткие выводы	70
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВХОДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	72
3.1. Вводные замечания.....	72
3.2. База изображений.....	72
3.3. Зависимость выходной метрики от параметров входных изображений.....	74
3.3.1. Размер изображений.....	74
3.3.2. Формат используемых изображений	77
3.3.3. Определение устройства по части входного изображения.....	80
3.4. Эксперименты по идентификации устройства формирования изображения из базы.....	82
3.5. Сравнение методов идентификации источника изображения	86
3.6. Краткие выводы.....	87

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	89
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	92
ПРИЛОЖЕНИЕ А	103
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	104
ПРИЛОЖЕНИЕ В	107

ВВЕДЕНИЕ

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 ССТV (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 [40]. Элементы сцены могут совпадать с размерами пикселей, а могут 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 [36, 41, 43, 48,].

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 [5]. В большинстве практических случаев роль такого средства подтверждения отдается цифровым изображениям. Однако данная тенденция приводит к повышению риска злонамеренного искажения цифровых изображений.

Для исключения принятия фальсифицированного цифрового изображения в качестве цифрового доказательства проводится судебная фототехническая экспертиза [1]. 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 динамическое изображение (сама видеозапись), так и статические (отдельные кадры этой видеозаписи) [4]. Данная диссертационная работа 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 может

применяться для идентификации устройства формирования исследуемого цифрового изображения.

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

1. Получение тестового цифрового изображения.
2. Формирование распределения структурного шума цифрового устройства, на основе артефактов его присутствия на тестовом изображении.
3. 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 [3], спектральные методы [1] и т.п.

Однако рассмотренные подходы не позволяют точно идентифицировать устройство фиксации сцены интереса, представленной на изображении, а лишь дают информацию о характеристиках фотоматериала и не применимы для цифровых улик [2]. 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 Фридрих Дж., Лукаш Дж., 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 [10, 15, 37, 52, 53].

Цель работы. Основной 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 формирования цифровых изображений;
- разработка алгоритма формирования уникального двумерного признака цифрового устройства фиксации цифровых изображений на основе структурного шума аппарата;
- разработка алгоритма идентификации 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, математической статистики, линейной алгебры. 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 идентификации 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

1. Разработанный алгоритм позволяет идентифицировать устройство фиксации цифрового изображения в условиях отсутствия априорной информации о нем.
2. Предложенный алгоритм извлечения собственного структурного признака цифрового устройства не зависит от контента используемых цифровых изображений.
3. Разработанный алгоритм может быть использован в качестве 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. Получены три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (№2017615786, №2018613062, №2018613593).

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 научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления 2015», Москва, 2015.
2. Семнадцатая международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, 2015.
3. Восемнадцатая международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, 2016.
4. Международная конференция «Методы фотограмметрического и компьютерного зрения для видеонаблюдения, биометрии и биомедицины», Москва, 2017.
5. Пятнадцатая всероссийская конференция «Нейрокомпьютеры и их применение», Москва, 2017.

6. Восьмая научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления 2017», Москва, 2017.
7. Двенадцатая международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации», Суздаль, 2017.
8. Тринадцатая международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации», Москва, 2018.
9. Двадцать вторая международная конференция открытой инновационной ассоциации FRUCT, Хельсинки, 2018.
10. Ярославских областных конференциях 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.

Благодарности. Автор выражает слова глубокой благодарности своему научному руководителю д.т.н. Приорову Андрею Леонидовичу за помощь на всех этапах выполнения данной работы.

Спасибо всем коллегам по лаборатории «Цифровые цепи и сигналы» кафедры инфокоммуникаций и радиофизики ЯрГУ, возглавляемой профессором Ю.А. Брюхановым, среди которых особенно хочется отметить И.Н. Трапезникова, И.С. Мочалова и Ю.А. Лукашевича, за безграничный поток идей и оказание высококвалифицированной помощи при подготовке диссертационной работы, чьи рекомендации позволили существенно улучшить ее качество. Также автор выражает глубокую благодарность родственникам и друзьям, поддерживавшим его на протяжении написания работы.

ГЛАВА 1

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ВЕРИФИКАЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

1.1. Вводные замечания

В связи с распространением цифровой фототехники одним из направлений современной радиотехники является приём, передача и обработка информации с использованием в качестве несущего сигнала цифрового изображения. Следовательно, дополнительным требованием, предъявляемое к радиотехническим системам, становится получение своевременной и достоверной информации от источника к приемнику и обеспечение целостности передаваемой информации. Целостность информации – это состояние информации, при котором отсутствует любое ее изменение либо изменение осуществляется только преднамеренно субъектами, имеющими на это право (Рекомендации по стандартизации Р 50.1.056-2005 «Техническая защита информации, основные термины и определения», ГОСТ Р 56035-2014 «Системы охраняемые телевизионные. Защита оцифрованных видеоданных от случайного и преднамеренного искажения. Общие требования»). Учитывая правовую составляющую, но концентрируясь на технической стороне вопроса, далее считаем, что целостность информации – свойство информации, заключающееся в ее существовании в неискаженном виде (неизменном по отношению к некоторому

фиксированному ее состоянию к моменту фиксирования для изображений) [19].

Наряду с целостностью, достоверность является одним из ключевых свойств информации. Она характеризует вероятность получения искажений для передаваемого бита данных в цифровых системах. Критериями достоверной информации являются: отсутствие ложных или искажённых данных [18], разборчивость, низкая вероятность ошибочного употребления единиц информации (буквы, цифры, символы и т.п.) [23, 48, 50].

Достоверность информации оценивается по шкалам так же, как и источник этой информации (полностью надёжный, чаще всего надёжный, довольно надёжный и так далее до совершенно ненадёжного и того, чей статус не определён) [49]. То есть, для определения достоверности самой информации необходимо сначала определить степень достоверности ее источника. Следует отметить, что в большинстве случаев, когда источник информации является неизвестным, то степень достоверности самой информации может быть занижена, поскольку наименование источника могло быть искусственным злонамеренным способом изменено в процессе передачи информации в тракте радиотехнической системы. Таким образом, актуальна задача проверки подлинности обозначенного на входе приемника наименования источника (в большинстве случаев и передатчика) информации.

1.2. Формирование изображений в цифровых устройствах

Общие принципы и последовательность этапов обработки данных во всех цифровых устройствах формирования изображений, несмотря на различную компонентную базу, очень схожи [32, 38]. Блок-схема процесса формирования изображения представлена на рис. 1.1.

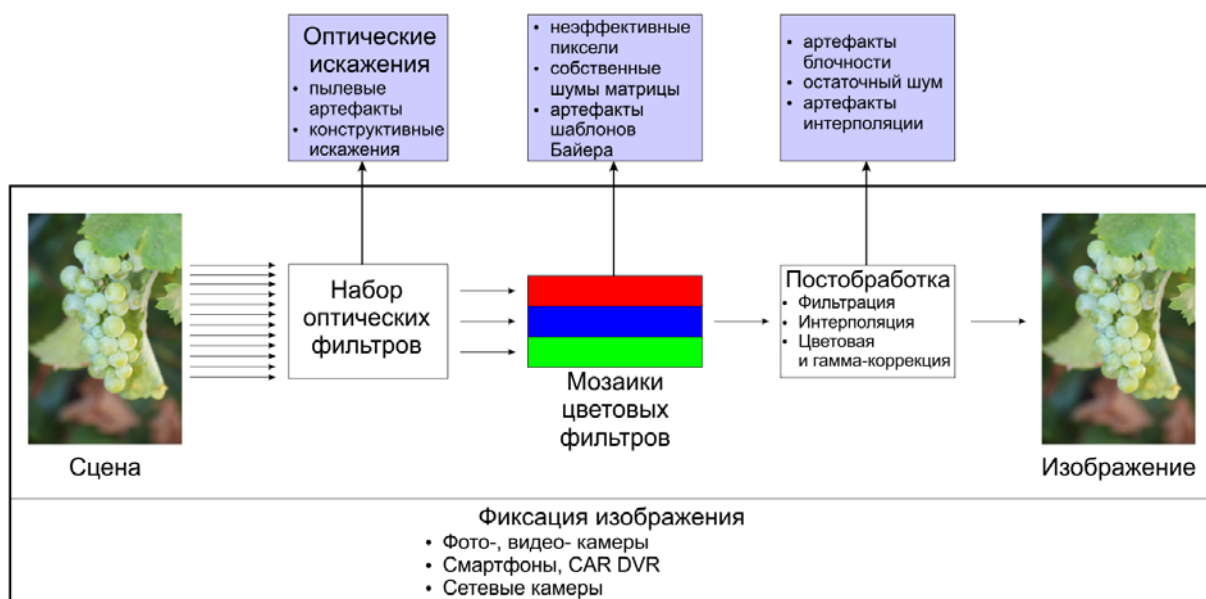


Рис. 1.1. Блок-схема основных этапов формирования изображений в цифровых камерах

Свет, попадая сквозь оптическую систему линз, фильтруется посредством применения сглаживающих фильтров и фокусируется на чувствительных светодиодах ПЗС-матрицы (матрицы приборов с зарядовой связью), то есть пикселях. Элементы ПЗС-матрицы являются основными и наиболее дорогостоящими компонентами цифровых камер. Каждый светочувствительный элемент ПЗС-матрицы объединяет падающий на него свет по всему спектру, который содержит электрический сигнал, представляющий сцену.

Поскольку каждый элемент ПЗС монохроматичен, для формирования цветных изображений требуется набор отдельных монохроматических массивов ПЗС для каждой цветовой компоненты [39]. Тем не менее, исходя из соображений стоимости элементной базы, большинство цифровых камер имеют только одну матрицу ПЗС, организованную из элементов по определенному шаблону, представляющего собой набор спектральных фильтров, как правило, из красного, зеленого или синего (RGB) цветов. Эта маска в передней части датчика устройства и называется «массив цветных фильтров» (CFA) [12].

Таким образом, каждый элемент ПЗС чувствителен лишь к одной полосе длин волн, и, как следствие, первичные или «сырые» изображения собраны из массива красных, зеленых и синих пикселей. Поскольку зрительная система человека наиболее чувствительна к зеленому свету, мозаики цветных фильтров CFA, как правило, имеют больше значений зеленого цвета, чем красного и синего. На рис. 1.2 показаны общие закономерности CFA, используемые в RGB (red, green, blue) и в CMYK (cyan, magenta, yellow, key) цветовых пространствах.



Рис. 1.2. Цветовой шаблон CFA: а) в цветовом пространстве RGB; б) в цветовом пространстве CMYK

В результате использования CFA, каждый пиксель в изображении имеет только одну компоненту цвета, связанную с ним. Отсутствующие RGB-значения вычисляются на основании значений соседних пикселей посредством операции интерполяции (demosaicing). По сути, это определенная форма интерполяции, основанная на вычислении значения рассматриваемого пикселя с помощью определенных весов и стоимостей на основе объединения значений соседних пикселей, входящих в окно для расчета. На практике операция интерполяции заключается в определении размера окна и весовых коэффициентов, составляющих ядро интерполяции. Несмотря на то, что каждый производитель использует собственные оригинальные интерполяционные методы, т. е. ядра различных размеров и форм и различные алгоритмы интерполяции, методы демозаикинга могут быть сгруппированы в два основных класса.

Первый класс включает в себя хорошо известные методы, такие как метод ближайшего соседа, билинейная и бикубическая интерполяции. Эти методы рассматривают все цветовые каналы как три независимых изображения и основываются на использовании метода ближайшего соседа с различными интерполяционными ядрами для вычисления недостающих цветовых компонент. В низкочастотных частях изображения одноканальные алгоритмы показывают удовлетворительные результаты, однако в высокочастотных – особенно в районе границ объектов – оставляют на изображении интерполяционные артефакты. Большая эффективность данных

подходов может быть достигнута путем применения межканальной корреляции.

Вторая группа методов основана на использовании не только межканальной интерполяции, но и внутриканальной, например, интерполяция границ, интерполяция на основе значения постоянной оттенка, градиентов второго порядка, сглаживание, интерполяция, основанная на анализе однородностей, интерполяция по шаблону, векторно-ориентированная интерполяция, Фурье-фильтрация и др. Более подробное описание второго класса методов можно найти в работе [12].

После процедуры интерполяции проводится баланс белого. На данном этапе происходит удаление нереалистичных цветовых вспышек. Таким образом, объекты, которые воспринимаются зрительной системой человека как белые, таковыми и будут в сформированном изображении. Это достигается благодаря применению колориметрической интерпретации и гамма коррекции. Последняя необходима для перераспределения информации о тоне для более точного соответствия восприятию яркости зрительной системой человека. Это связано, прежде всего, с тем, что цифровые камеры представляют яркость в линейном виде, а зрительная система человека – в логарифмическом.

Затем происходит процесс шумоподавления, сглаживания и повышения резкости для предотвращения появления цветовых артефактов.

В завершении процесса формирования изображения выполняется сжатие и сохранение в памяти устройства готового изображения [6].

1.3. Причины возникновения и типы искажений и шумов

В связи с неидеальностью процесса изготовления элементной базы цифровых устройств каждый из этапов формирования цифрового изображения вносит свои артефакты в преобразование типа «свет-сигнал» в регистрирующем устройстве (рис. 1.1) и, как следствие, итоговое изображение будет содержать некие дефекты – шумы. Источниками искажений и шумов могут быть различные части цифрового устройства: объектив, матрица, мозаики цветowych фильтров, аналогово-цифровой преобразователь, а также внешние помехи, такие, например, как пыль на объективе.

1.3.1. Классификация вносимых цифровым устройством шумов и искажений

Все шумы, вносимые цифровым устройством в формируемое изображение, можно разделить на два больших класса [7]:

1. хроматический шум;
2. яркостный шум.

Хроматический шум проявляется в виде пикселей постороннего цвета в однотонных областях изображений. Несмотря на то, что данный шум более заметен визуально, он не является объектом интереса, поскольку носит случайный характер и легко устраняется известными простыми методами фильтрации.

Яркостный шум, в свою очередь, разделяется на несколько подклассов, включающих в себя как случайные, так и фиксированные компоненты.

На рис. 1.3. представлена классификационная схема шумов цифрового устройства.

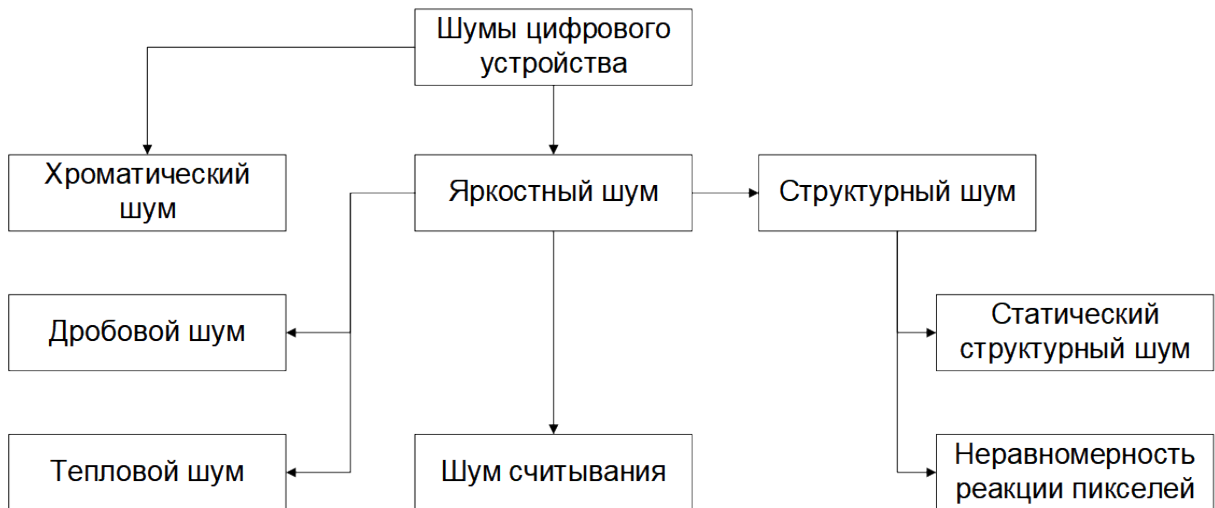


Рис. 1.3. Классификация шумов цифровой камеры

1.3.2. Дробовой шум

Дробовой шум обусловлен дискретной природой света. Получение идеального изображения с цифровой камеры – является недостижимой целью. Даже в случае, когда берется изображение равномерно освещенной сцены, цифровой сигнал на выходе будет отображать небольшие изменения чувствительности между разными пикселями. Частично это происходит из-за дробового шума, также известного как фотонный шум, который является случайным процессом, а частично – из-за структурного шума (PN, pattern noise), являющегося постоянной и детерминированной компонентой шума [33, 45].

Эффект различия в регистрации фотонов при дробовом шуме объясняется флуктуацией поглощения фотона и генерации пары электрон-дырка. Результат зависит от количества образовавшихся пар в определенный момент времени. Такой шум имеет случайный характер и изменяется от изображения к изображению.

Дробовой шум определяется следующим выражением:

$$I_{др}^2 = 2eI_{фср}\Delta f,$$

где e – заряд электрона, $I_{фср}$ – среднее значение фототока, Δf – ширина частотной полосы фотоприемника. Из данного выражения следует, что дробовой шум растет при росте значения тока и ширины полосы.

1.3.3. Тепловой шум

Поскольку в процессе эксплуатации матрица фотоприемника нагревается, то помимо зарядов, прошедших с зарегистрированными фотонами света, образуются тепловые заряды, попавшие в полезный заряд. Следовательно, данные, полученные матрицей, искажаются, и на конечном изображении проявляются артефакты данного шума. Такой шум имеет случайную природу и зависит от нескольких параметров, включающих в себя длительность непрерывной работы устройства, температуру окружающей среды, время выдержки снимка и т. д.

Тепловой шум определяется как

$$I_{шR}^2 = \frac{4kT\Delta f}{R_1},$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура в кельвинах, Δf – ширина частотной полосы фотоприемника, R_1 – активное сопротивление нагрузки фотодетектора.

1.3.4. Шум считывания

Шум считывания проявляется на этапе вывода сигнала с матрицы цифрового устройства, его усиления и преобразования в напряжение для дальнейшей обработки. Данный вид шума проявляется на абсолютно темном изображении. Шум считывания зависит от элементов усиления, преобразования и других подсистем устройства. Для качественных устройств уровень данного шума составляет от 15–20 до 1 электрона.

1.3.5. Структурный шум

Данный вид шума, в отличие от рассмотренных выше, обладает постоянной природой и детерминированностью. Структурный шум остается практически неизменным на множестве фотографий одной и той же сцены. Таким образом, структурный шум присутствует на каждой фотографии, сделанной камерой, и, соответственно, может быть использован в дальнейшем для ее установления (идентификации). Наверное, правильно было бы называть его систематическим искажением, а не шумом. Тем не менее, структурный шум является утвердившимся термином в технической литературе [45]. Определено, что усреднение нескольких изображений одной сцены уменьшает случайную компоненту шума и усиливает структурный шум.

Как уже отмечалось, двумя основными компонентами структурного шума являются: статический структурный шум (FPN, fixed pattern noise) и неравномерный структурный шум (PRNU, photo-response non-uniformity). В основном статический структурный шум относится к ситуациям, когда датчик изображения не подвержен воздействию света, и выражается в разнице интенсивностей между соседними пикселями. Так как этот шум является аддитивным, большинство относительно дорогих камер подавляют эту компоненту основного шума автоматически путем вычитания темного кадра из каждого полученного изображения. Статический структурный шум зависит также от температуры и освещенности.

В реальных изображениях основной частью структурного шума является неоднородность реакции пикселей (PNU, pixel non-uniformity), которая в свою очередь объясняется неоднородностью кремниевых пластин и дефектами датчика, нанесенными во время его производства. Природа и характер PNU шума делают маловероятным ситуацию, при которой даже произведенные из одной пластины датчики, дадут на изображении шум с одинаковыми параметрами. Данный вид шума полностью независим от температуры и влажности окружающей среды.

Преломление света на частичках пыли и отражающих поверхностях, а также настройки увеличения вносят существенный вклад в PRNU. Эти компоненты называются низкочастотными шумами (low-frequency defects). Из-за того, что эти низкочастотные компоненты не являются характеристиками датчика, их нельзя

использовать для идентификации камеры. Вместо них используется компонента PNU, которая является свойством самого датчика.

Незаметные различия между чувствительностью пикселей матрицы цифрового устройства к падающему на фотоэлемент световому потоку являются причиной неравномерности фотоотклика (PRNU) как ПЗС (приборах с зарядовой связью), так и КМОП-сенсоров. Неравномерный структурный шум (PRNU) проявляется на каждом изображении, полученном с устройства фотофиксации, в виде конкретного уникального распределения. Таким образом, можно определить, сформировано ли рассматриваемое изображение в предполагаемом цифровом устройстве или нет.

1.4. Современные подходы к задаче идентификации устройства фотофиксации

Современные исследования, решающие проблему идентификации источника изображения, базируются на получении характеристик устройства фиксации изображения. Поставленная цель достигается путем анализа изображений и извлечения характеристик, относящихся к цифровой камере. По существу, упомянутые характеристики являются сочетанием двух взаимосвязанных факторов: во-первых, классовые свойства, которые являются общими для всех камер определенной марки и модели; во-вторых, индивидуальные свойства, которые идентифицируют устройство внутри своего класса.

Таким образом, подходы можно разделить на две большие группы в зависимости от того, направлены ли они на определение

модели камеры или конкретного устройства в определенном классе. Однако в данной работе разрабатываемый алгоритм может быть применен для решения обеих задач.

Существуют как экспертные субъективные методы идентификации устройства фотофиксации, так и автоматизированные объективные.

1.4.1. Сравнение с оригиналом в формате RAW

Визуально и программно можно сравнить исследуемый экземпляр с его предшественником до постобработки, в том числе и в самой камере в формате *.RAW, получив его непосредственно у автора снимка. Однако не всегда это представляется возможным.

1.4.2. Проверка метаданных EXIF

Следующим этапом в определении происхождения цифрового изображения является проверка метаданных.

Формат EXIF (Exchangeable image format) необходим для корректной работы различных устройств с мультимедийными файлами. Данный формат предусматривает хранение данных изображения или музыки, их уменьшенных копий и подраздела текстового описания данных в одном файле [13].

Текстовое описание раздела EXIF файла состоит из тегов, описывающих определенный параметр и его значение. Набор тегов содержит стандартизованную и обязательную часть, а также разделы, принадлежащие производителям техники и программного обеспечения для их специальных целей. Программное обеспечение, позволяющее

читать EXIF данные, ставит в соответствие тегам их определения, а значениям – значения тегов. Создатели не всегда придерживаются спецификации и потому случаются несовпадения. Например, производитель камеры может записать в поле, соответствующее тегу, информацию в некорректном формате или вообще о другом параметре. Если это узкоспециализированная программа под определенную марку камер, то недоразумений обычно не бывает. Пользователи обязаны своей покупкой подчиняться описанным в руководстве к программному обеспечению правилам. Но если это универсальная программа, то путаница с неправильным наименованием тегов и форматированием соответствующих им величин, случается не редко.

Все указанное говорит о том, что хоть метаданные и выдают некоторую информацию об изображении, она не всегда является правильной. Кроме того, значения тегов легко изменить нарушителям, что останется незамеченным, поэтому определить подлинность изображений по метаданным возможно далеко не всегда.

1.5. Обзор алгоритмов идентификации устройства фиксации цифровых изображений

1.5.1. Обнаружение артефактов оптической системы на изображениях

Оптические дефекты могут расплываться на несколько сенселей (блоков пикселей) матрицы цифрового устройства, вследствие чего

могут быть потеряны существенные данные на итоговом изображении [31].

Если поднести объектив камеры близко к точечному источнику света (настольная лампа), то внутри него можно увидеть пыль, ворсинки, пузырьки и т. п. Для оценки данных артефактов необходимо расположить объектив под углом к свету, чтобы за ним образовался темный фон. Обычно небольшое количество пыли и крохотных пузырьков допустимо. На практике наличие царапин и пузырьков на передней линзе практически не влияет на качество изображения, но может оказывать психологическое воздействие, особенно при покупке дорогостоящей оптики, в отличие от дефектов и царапин на задней линзе. Таким образом, чем дефекты ближе к матрице, тем большее влияние они оказывают на формируемое изображение. Пример рассмотренных артефактов проиллюстрирован на рис. 1.4.

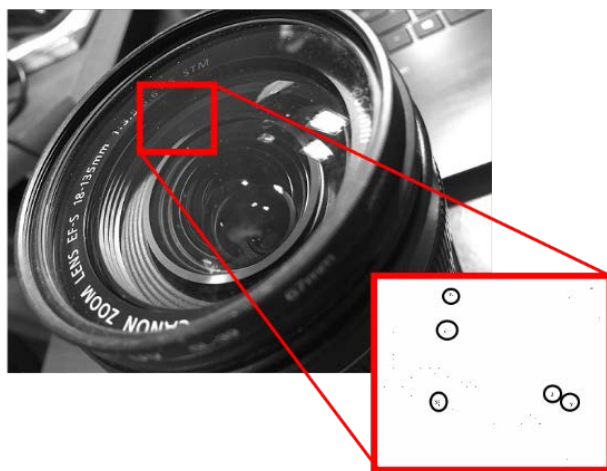


Рис. 1.4. Оптические артефакты на объективе камеры Canon 700D

Для детектирования подобных артефактов проводится моделирование пятен пыли, основанное на двух основных

характеристиках: резкое изменение распределения интенсивности изображения в зависимости от диафрагменного числа и проявление в основном в кругоподобной форме. Более того, сенсорная пыль может рассматриваться как черные, с отсутствующим фокусом, пятна с мягким переходом интенсивности. Субъективные визуальные наблюдения за реальными пятнами пыли подтверждают, что они имеют распределение интенсивности по Гауссу.

Таким образом, для решения поставленной задачи целесообразно использовать гауссовскую модель потери интенсивности (т. е. двумерную функцию Гаусса для моделирования пылевых пятен).

Рассматриваемая модель пятна пыли может быть выражена следующим образом [29, 30]:

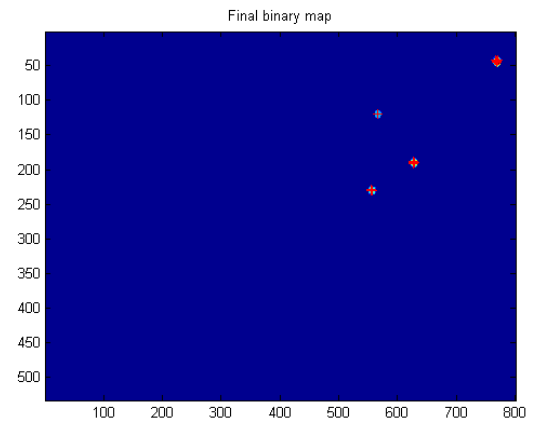
$$intensity\ loss(x, y) = \frac{-G}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\omega)^2 + (y-\omega)^2}{2\sigma^2}}, x, y = 0, \dots, 2\omega,$$

где G , σ и 2ω – коэффициент усиления, стандартное отклонение и ширина маски, соответственно.

Для проверки данного предположения сделана серия снимков плоского поля и формируется мастер-кадр, на котором указаны точки появления артефактов пыли (рис. 1.5). Для каждого устройства данное распределение будет уникальным.



а)



б)

Рис. 1.5. Результат построения карты распределения пылевых артефактов для камеры Canon 700D: а) распределение пятен на реальном изображении с камеры; б) шаблон пылевого распределения.

Следовательно, для каждой оптической подсистемы устройства формирования изображения будет сформирована собственная карта распределения артефактов оптических искажений. Однако причины возникновения указанных артефактов могут либо варьироваться с течением времени, либо быть устраненными с объектива. Поэтому рассмотренные оптические искажения не могут быть использованы для решения задачи идентификации устройства фиксации цифровых изображений.

1.5.2. Поиск неэффективных пикселей матрицы цифрового устройства

Большая часть идей фиксации характерных изображений возникала из сугубо практических задач. К примеру, с самого начала появления космических аппаратов именно изображения были

источником или предметом открытий, скандалов и всевозможных теорий.

С развитием техники множество проблем были решены еще до передачи устройства потребителям, но на заре появления цифровых фотоаппаратов множество операций производилось вручную.

Пионером применения цифровой фототехники можно считать Mariner-10 [34, 35]. Это американская автоматическая межпланетная станция, запущенная 3 ноября 1973 ракетой-носителем Атлас/Центавр (Atlas SLV-3D/Centaur D-1A) с космодрома на мысе Канаверал. Целью полёта было изучение планет Венера и Меркурий с пролётной траектории. До 2008 года «Маринер-10» оставался единственным аппаратом, произведшим исследования и съёмку Меркурия с близкого расстояния. Это был последний аппарат серии «Маринер», поскольку аппараты «Маринер-11» и «Маринер-12» были переименованы в «Вояджер-1» и «Вояджер-2» соответственно.

Фотографии Меркурия, полученные в 1975 году, выглядели следующим образом. По мере удаления от Земли увеличивалось влияние Солнца и космической радиации, что одновременно влияло на деградацию фоточувствительных сенсоров. Заметив этот эффект, ученые NASA (National Aeronautics and Space Administration) в течение каждого прохода вокруг планеты были вынуждены тратить топливо на разворот и съёмку далеких участков космоса для вычисления деградировавших пикселей, чтобы они не влияли на уникальные и впервые полученные цифровые изображения. Все изображения были получены в черно-белом варианте и далее художественно обработаны с

добавлением цвета и опубликованы для широкой общественности. Как и все широко популярные темы эти изображения неоднократно подделывались в прессе.

Обычно предполагается, что матрица устройства, только что выпущенного с завода, не имеет дефектов. В современных ПЗС матрицах размеры фототранзисторов (сенселей) составляют нанометры, а общее их количество измеряется миллионами [8, 9].

Таким образом, закономерно появление дефектных элементов. Когда они находятся в состоянии «пробой», то пропускают на выход полное напряжение питания, в изображении они остаются точками с максимальной амплитудой всех каналов (белый цвет), и носят название “hot pixel”. Когда же они находятся в состоянии «обрыв», то, несмотря на яркий падающий свет, не имеют отклика и на изображении соответственно вносят точку с нулем амплитуд (“dead pixel”). Оба из рассмотренных типов пикселей матрицы цифрового устройства фотофиксации можно отнести к категории так называемых неэффективных пикселей.

В силу специфики восприятия и самих изображений именно точки с максимальным свечением являются наиболее заметными и очевидными как для человека, так и для алгоритмов машинного зрения.

Процесс выявления “hot pixel” можно описать следующим образом. Как упоминалось ранее, появление “hot pixel” не зависит от снимаемого изображения, поэтому делается изображение с закрытой крышкой объектива. Таким образом, все сенсели, находящиеся в

исправном состоянии, должны дать ровный черный тон, а искомый – отличное от них максимальное значение. Полностью добиться значения в 1 невозможно в силу автоподстройки питания матрицы в самом фотоаппарате. Для определенности выбрана выдержка 1/10 с как середина доступного аппарату диапазона значений. Для независимости эксперимента от дальнейших пред- и пост- обработок аппарата изображения снимались в RAW формате *.CR2.

Иллюстрация рассмотренного процесса для фотоаппаратов Canon EOS 40D (старше по возрасту и времени в эксплуатации) и Canon EOS D700 (более нового) приведена на рис. 1.6.

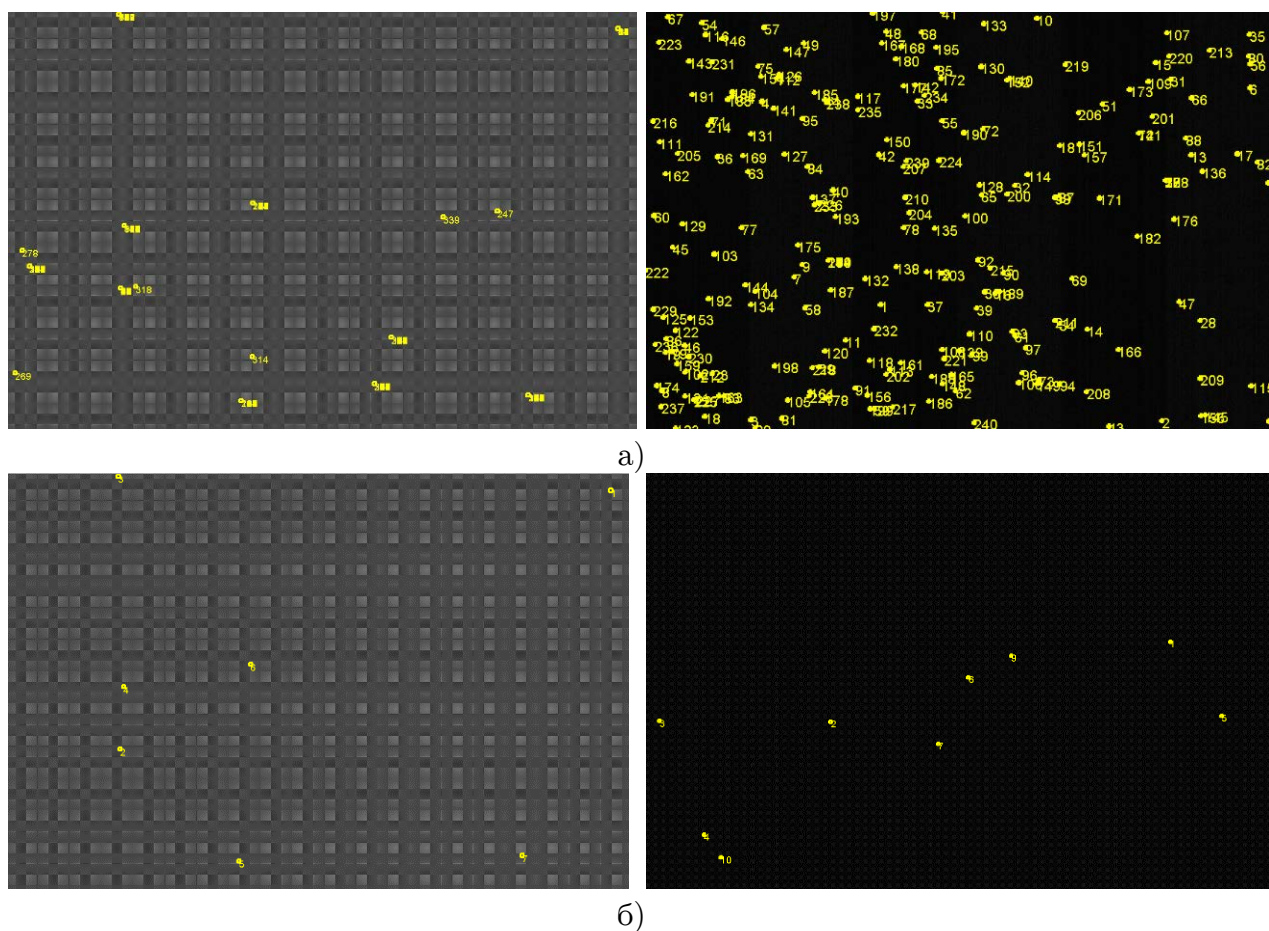


Рис. 1.6. Результат построения шаблона «горячих» пикселей для Canon 40D (левый столбец) и Canon 700D (правый столбец): а) без усреднения; б) усредненное изображение

Важно отметить, что фоторезисторы хоть и предназначены для фиксации изображения в оптическом диапазоне, но в силу внутреннего строения способны регистрировать и излучения в других диапазонах. Для нейтрализации случайных флуктуаций необходимо усреднить результат фиксации на серии изображений.

Проведено усреднение для серии в 30 кадров для каждого аппарата. Это проиллюстрировано на рис. 1.6а, где процесс поиска выполняется для каждого из серии изображений, запоминается и затем наносится на результирующее усреднённое изображение. На рис. 1.6б вначале проводится усреднение изображений, а затем выполняется поиск описанных точек.

Видно, что фотоаппарат Canon EOS 40D имеет достоверные характерные признаки в виде точек “hot pixel”. Это подтверждается экспериментом для каждого из изображений. Координаты всех найденных на серии точек были отсортированы.

Сильно заметные ступени соответствуют тому, что обнаружено большое количество точек с рассматриваемой координатой (рис. 1.7).

В случае фотоаппарата Canon EOS D700 таких ступеней всего несколько. Они не столь протяжены и едва различимы, поэтому трудно формализуются для автоматического поиска. Это говорит о том, что новый аппарат фактически не должен иметь дефектов, а резкие перепады являются иллюстрацией того, что неэффективные пиксели характерны для каждого конкретного аппарата в силу его особенной эксплуатации.

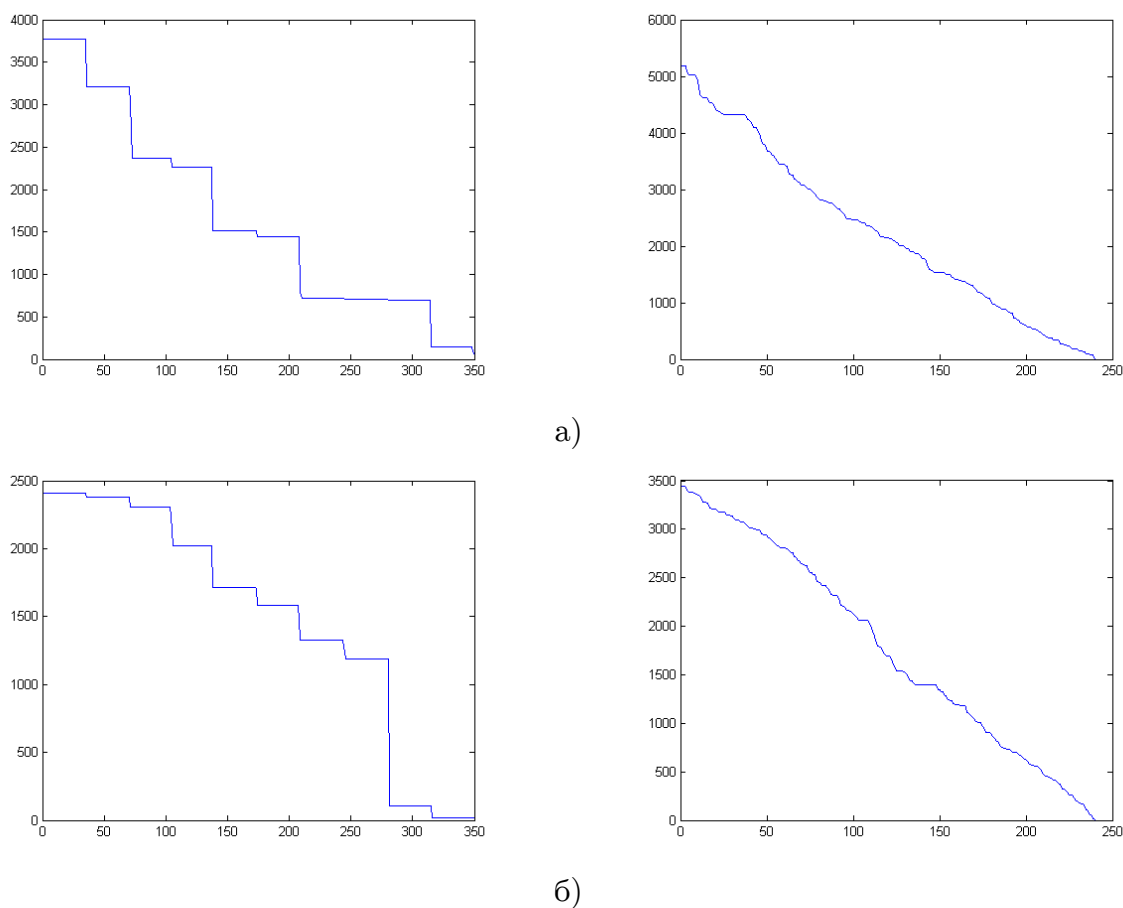


Рис. 1.7. Усреднение найденных неэффективных пикселей для Canon 40D (левый столбец) и Canon 700D (правый столбец): а) для координаты x ; б) для координаты y

Однако рассмотренное распределение неэффективных пикселей может меняться в ходе эксплуатации устройства фиксации цифровых изображений. Следовательно, данный характерный признак устройства не является уникальным и в случае его использования для идентификации устройства фиксации изображения может давать низкую точность классификации. Однако данный шаблон устройства можно использовать на этапе предобработки для улучшения качества изображения на выходе устройства.

1.5.3. Артефакты повторной интерполяции

Элементные компоненты, принимающие участие в процессе формирования изображения различных цифровых камер (например, линзы, оптические фильтры, ПЗС-матрица), производятся ограниченным числом способов. В связи с этим, различные камеры могут иметь сходные свойства [20]. Данный факт должен быть принят во внимание при сопоставлении особенностей изображения со свойствами цифровых камер. Тем не менее, интерполяция (demosaicing) и массив цветных фильтров CFA остаются уникальной характеристикой каждого конкретного цифрового устройства, а вариации интерполированных значений пикселей могут использоваться для классификации изображений, полученных с определённой модели цифровых устройств.

EM-алгоритм, предложенный в 1996 году [5], состоит из двух основных этапов: E-шаг (expectation) и M-шаг (maximization). E-шаг заключается в поиске неизвестных переменных на основе текущих оценок значений параметров, при этом скрытые переменные рассматриваются как наблюдаемые.

Шаг максимизации основывается на нахождении новых оценок значений параметров. Процедура продолжается до сходимости. На E-шаге метод генерирует два выхода. Одним из них является двумерный массив данных, называемый картой распределения вероятности, в котором каждое значение указывает на сходство каждого пикселя изображения с одной из двух групп образцов, коррелирующих или не коррелирующих с соседними пикселями

выбранного ядра интерполяции. Другой выход – оценка весовых (интерполяционных) коэффициентов, которые образуют сумму весов от каждого пикселя, являющуюся интерполяционным ядром алгоритма.

В связи с тем, что массивы цветных фильтров имеют больше зеленых цветовых значений, красные и синие цветовые каналы сильнее подвержены интерполяции. Таким образом, EM-алгоритм использовался только на красном канале. Однако он может быть тривиальным образом распространен и на другие каналы. Поскольку исходно не предполагается наличие какой-либо априорной информации о размере ядра интерполяции, карта распределения вероятностей и весовые коэффициенты получены для различных размеров такого ядра. Допустим, что $p(i, j)$ обозначает значение пикселя для выбранного цветового канала и оно коррелирует с соседями по следующей формуле:

$$p(i, j) = \sum_{n, m=-N}^N \beta(n, m) \times p(i - n, j - m).$$

В этом уравнении N показывает размер ядра интерполяции, а β обозначает матрицу весовых коэффициентов. На E-шаге предположим, что матрица β имеет случайный набор значений и на основе этой матрицы происходит расчет вероятности корреляции значения текущего пикселя с его ближайшими соседями. На этапе максимизации происходит оценка значений матрицы β в соответствии с вероятностью, рассчитанной на E-шаге. Процесс продолжается до сходимости.

При разработке нового классификатора значения матрицы β (весовые коэффициенты) используются в качестве признаков. В предыдущих работах [20, 22, 42] признаки извлекались на основе предположения о различных размерах интерполяционных ядер (3x3, 4x4 и 5x5), которые впоследствии были использованы при разработке классификаторов для определения модели цифровой камеры. Экспериментальные результаты показали, что точность повышается с увеличением размеров ядра.

Таким образом, в настоящей работе предлагается использовать размер ядра интерполяции, равный 5x5 пикселей. Следовательно, EM-алгоритм используется для оценки весовых коэффициентов в блоках пикселей 5x5.

Интерполяция низких порядков приводит к периодичности в дисперсии производной второго порядка интерполированного сигнала, которая может быть использована для определения скорости интерполяции. Следовательно, используя данный метод можно сначала получить вторую производную в каждой строке, а затем – среднее значение во всех строках. Для лучшего понимания, пусть $r(i, j)$ – определенная строка на изображении, а R – общее количество строк и C – общее число столбцов на изображении. Вторая производная каждой строки может быть вычислена следующим образом:

$$sd_r = 2r(i, j) - r(i, j + 1) + r(i, j - 1),$$

где $1 \leq j \leq C - 1$. После вычисления производных второго порядка каждой строки, полученные величины усредняются для формирования псевдодисперсионного сигнала

$$v_r = \sum_{i=0}^R |s_r(i, j)|.$$

Если изображение подвергалось интерполяции, то его псевдодисперсионный сигнал имеет периодичную структуру. В частотной области расположение пиков сигнала дисперсии характеризует скорость интерполяции, а величина пиков определяет использованный метод интерполяции. В предлагаемом алгоритме использовалась аналогичная методика для определения скорости и способа интерполяции, использованного в цифровом устройстве получения изображения.

Большинство цифровых камер кодируют и сжимают изображения в формат JPEG. Благодаря тому, что в формате JPEG блок кодирования равен 8x8 пикселей, DC-коэффициенты дискретного косинусного преобразования, которое там используется, могут представлять собой пики производной второго порядка, препятствующие обнаружению использования какой-либо формы интерполяции порядка 8. Таким образом, в обнаружении алгоритм интерполяции пики, появляющиеся в результате использования JPEG компрессии, должны игнорироваться. Изменение величины и указывает, что существуют различия в используемом алгоритме интерполяции. На рис. 1.8 изображены уровни частотного отклика для трех моделей цифровых устройств фотофиксации.

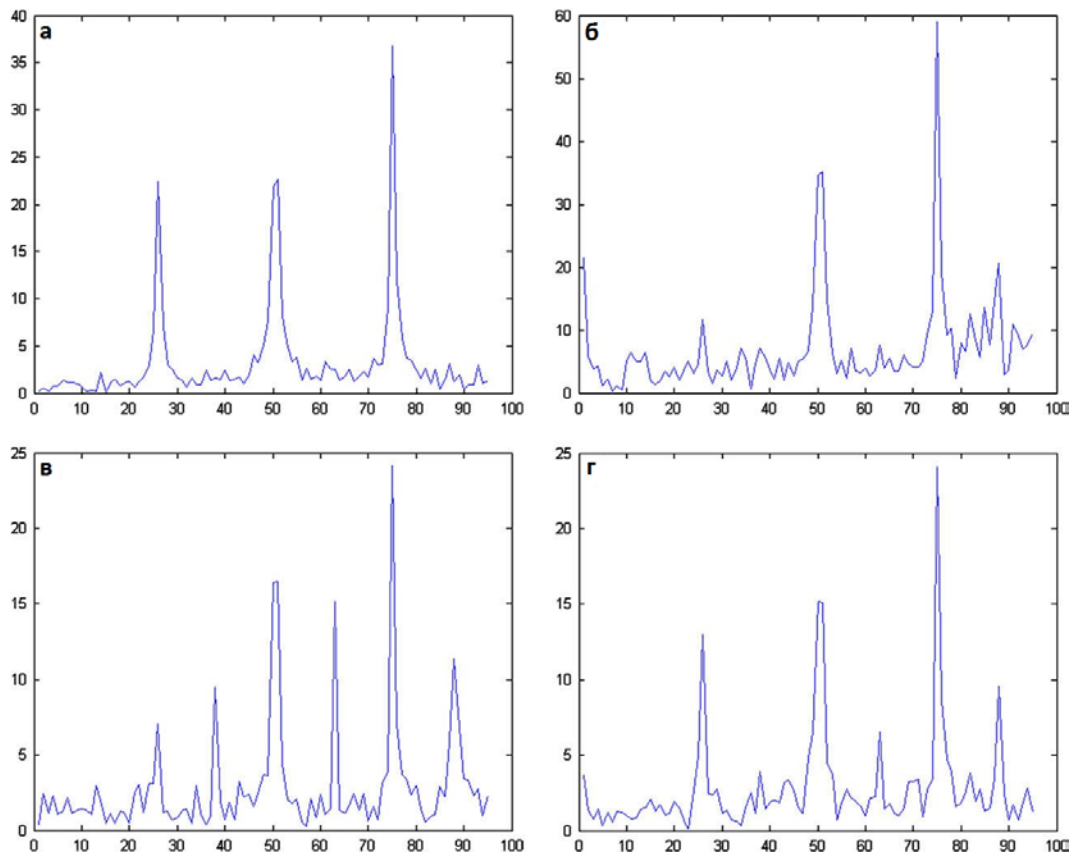


Рис. 1.8. Частотный спектр усредненных вторых производных в соответствии с JPEG компрессией и выходных JPEG изображений, полученных с трех моделей цифровых устройств фотофиксации: а) всплески вследствие JPEG сжатия; б) Canon Powershot S200; в) Sony DSC-51; г) Nikon E-2100

Следует отметить, что различия в значениях свидетельствуют об использовании различных способов интерполяции в этих устройствах. Таким образом, признаки, характеризующие устройство, включают в себя расположение всплесков, значения их пиков (кроме пиков, характеризующих JPEG сжатие) и энергию каждой частотной составляющей по отношению к другой частотной компоненте во всех цветовых полосах.

Таким образом, можно говорить о том, что консолидация признаков, полученных с помощью производных второго порядка и извлеченных посредством EM-алгоритма, повышает эффективность

классификации. Исходя из этого, вместо использования классификаторов для каждого набора признаков, можно использовать классификаторы для общего набора из 78 признаков. Однако процесс выявления признаков для каждого устройства является достаточно трудоемким и неадекватным рассматриваемой в настоящей работе задаче.

1.6. Краткие выводы

Таким образом, современные подходы к идентификации устройства фиксации цифрового изображения можно разделить на два класса: субъективные (экспертные), к числу которых относится сравнение изображения в первичном формате с тестовым и получение информации из метаданных файла изображения, и объективные (автоматизированные), базирующиеся на вносимых устройством в результирующее изображение искажениях и шумах.

Существует несколько современных алгоритмов, применяемых в рамках задачи идентификации устройства фотофиксации. Они основаны на анализе шумов и искажений, проявляющихся на разных этапах процесса формирования цифровых изображений: детектирование и локализация оптических искажений, вызванных посторонними артефактами на объективе, детектирование неэффективных пикселей матрицы цифрового устройства, а также определение интерполяционных признаков устройства. Однако все рассмотренные методы имеют недостатки, критичные для решения поставленной в данной работе задачи.

На основе проведенного анализа для построения алгоритма идентификации устройства фотофиксации в качестве уникального признака аппарата выбрана неравномерность реакции пикселей на падающий свет вследствие детерминированности и отсутствия корреляции между соседними пикселями матрицы.

ГЛАВА 2

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦИФРОВОГО УСТРОЙСТВА ФОТОФИКСАЦИИ

2.1. Вводные замечания

Зачастую, на цифровых изображениях присутствуют объекты, не являющиеся истинными для изображаемой сцены, а вызванные воздействием так называемой структурной помехи самого устройства формирования изображения. Вне зависимости от их размеров они могут быть обнаружены алгоритмами технического зрения как объекты сцены и ухудшить качество работы алгоритмов распознавания систем прикладного телевидения. Физическая природа подобного шума заключается, как было сказано ранее, в неоднородности фоточувствительности элементов матрицы устройства фиксации изображения и подсистем первичной обработки сигналов фотоприемных устройств. В зависимости от физического источника неоднородности различают четыре основных вида структурной помехи указанной природы: структурная помеха, вызванная дефектами (обусловлена пробоями р-п-переходов, отказа фоточувствительных элементов), коммутации, темнового тока [21] и чувствительности (появляется из-за неоднородности коэффициентов передачи каналов сенсоров матрицы устройства).

Главная идея, положенная в основу алгоритма детектирования характерного шума цифрового устройства фотофиксации, заключается в представлении искажений, вносимых неоднородностью

коэффициентов передачи каналов фотоприемных устройств, как последствия воздействия мультипликативной помехи структурного вида и являющейся, как будет показано в дальнейшем, уникальной характеристикой, идентифицирующей это устройство. Подобный подход использовался в работе [51], но для изображений инфракрасного диапазона для удаления структурного шума тепловизионного устройства формирования изображения.

Следует отметить, что в данной работе не рассматриваются методы удаления рассматриваемых шумов и искажений.

2.2. Формализация шумовых характеристик устройства фотофиксации

Из описанного выше вопроса возникновения шумовых влияний на цифровое изображение следует, что некоторые артефакты возникают в процессе захвата изображения устройством фотофиксации и не являются уникальными среди технических средств [38, 39]. Вопрос влияния искажений оптической подсистемы в общем случае является отдельной задачей и не входит в область рассмотрения данной работы. Следовательно, предлагается строить модель формирования изображения, учитывая только важные для решения поставленной задачи уникальные причины (влияния). Исходя из известного процесса формирования изображения, неэффективные пиксели и этап предусиления (по питанию) каждого сенселя, с последующими операциями АЦП и квантования значений дают матрицу коэффициентов эффективности преобразования свет-сигнал. Данная

матрица K по размерности равна матрице 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.

В обычных условиях проявление влияния неравномерности отклика пикселей (неоднородности коэффициентов передачи каналов матрицы сенсоров) в виде матрицы K будет сильно зависеть от интенсивности падающего света во время получения снимка по закону IK . Таким образом, неоднородность коэффициентов передачи каналов матрицы сенсоров является мультипликативным структурным шумом.

Как показано в исследованиях NASA [54], интенсивность излучения может быть за границей воспринимаемого зрительной системой человека цветового диапазона, но в то же время активировать сенсоры матрицы камеры.

Это известное в технике явление носит название «темновой ток» [21], проявляющееся в определенном уровне сигнала от сенселей на входе АЦП даже с закрытым объективом камеры. Уровень темнового тока сильно зависит от температуры и возрастает вдвое при нагревании устройства фотофиксации на 9 градусов по Цельсию. При повышении температуры большее количества электронов или дырок осядет в потенциальной яме. Для ослабления термоэлектронной эмиссии в студийной цифровой фототехнике применяют различные схемы теплоотвода, использующие в качестве теплообменника металлический корпус камеры, игольчатые радиаторы и элементы Пельтье.

Разумеется, такой подход неприменим к компактным фотоаппаратам, ограниченным по размерам и весу.

Для того, чтобы определить уровень темнового тока и исключить его величину при считывании фототоков пикселей, расположенные по краям столбцы и строки матрицы покрываются непрозрачным материалом. Составляющие их пиксели называются пикселями темнового тока (dark reference pixels), и, поскольку генерируемый ими заряд создан термоэлектронной эмиссией, он используется в качестве нулевого отсчета для остальных пикселей матрицы. При этом, поскольку при разных условиях (нагрев матрицы, ток питания и так далее) уровень темнового тока будет варьироваться, необходимо для каждого снимка заново считывать заряд пикселей темнового тока.

В рамках решения задач настоящей работы проведено исследование зависимости корреляционной метрики от температуры аппарата (рис. 2.1).

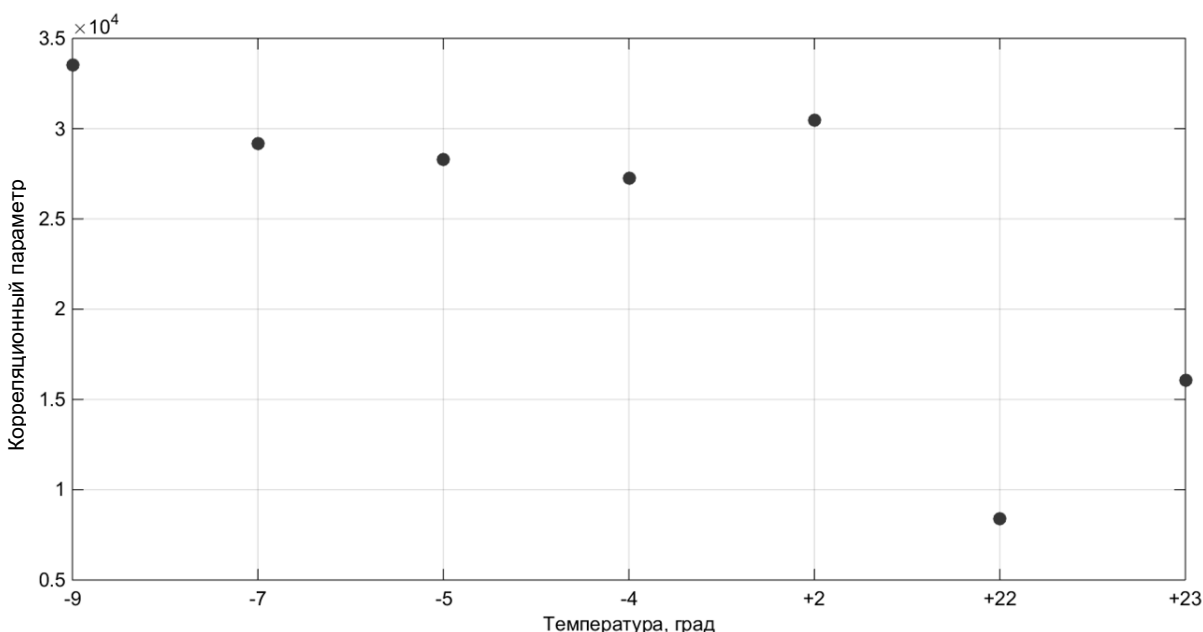


Рис. 2.1. Зависимость значения корреляции от температуры окружающей среды фотоприемного устройства Canon 40D

Как видно из графика, с ростом температуры устройства фотофиксации значение корреляционной метрики уменьшается.

В аппаратной части устройства формирования изображения вместе с темновым током имеет место ток питания сенселей [39]. Он, в свою очередь, дает постоянное смещение \mathbf{O} , в то время как темновой ток формально зависит от времени его накопления и настроенной чувствительности камеры, и выражается через \mathbf{D} , где \mathbf{D} имеет размерность матрицы сенсора $m \times n$ и смысл неравномерности в работе усилителей и питания каждого отдельного элемента. Модели всех остальных, не типизированных ранее шумов, принимаются за аддитивный шум \mathbf{N} .

Таким образом, модель формирования выходного изображения оптической и аппаратной системами устройства фотофиксации имеет следующий вид [51]:

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

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 \mathbf{F} будет получена оценка шумов $\boldsymbol{\varepsilon}$, уникальная для каждого конкретного аппарата в данный момент съемки [13]:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{F}(\mathbf{D} + \mathbf{O} + \mathbf{N}) . \quad (2)$$

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

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

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):

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

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, который действует на матрицу **K**, и является менее значимым по влиянию на итоговое изображение фактором по сравнению с собственными признаками аппаратной части устройства фотофиксации.

Рассмотренная модель формирования цифрового изображения в устройстве фотофиксации представлена на рис. 2.2.

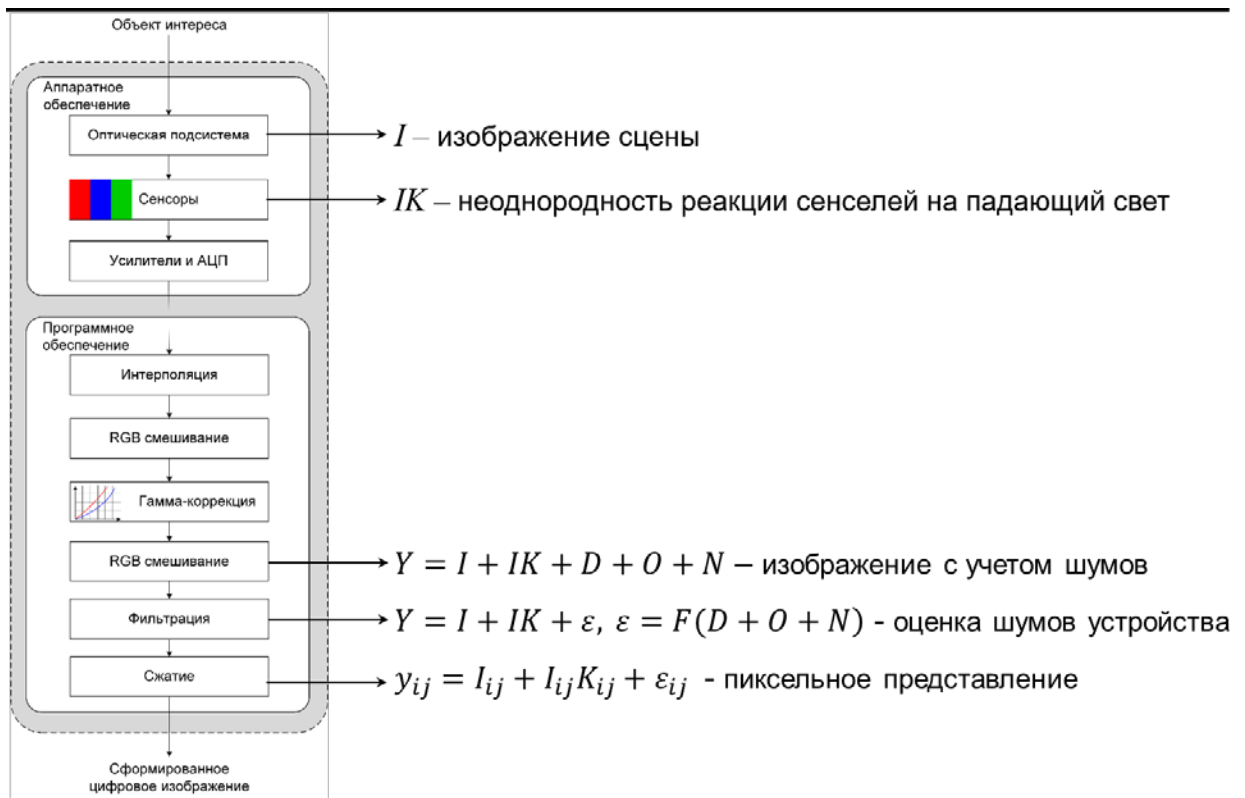


Рис. 2.2. Модель формирования цифрового изображения

Исходя из описания выходной характеристики сенсора (3), очевидно, что исходное изображение возможно оделить от матрицы \mathbf{K} при помощи фильтрации \mathbf{F} . Предполагая фильтрацию высококачественной, но допуская прохождение остаточного шума, получаем:

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

где $\hat{\mathbf{I}}$ – изображение после фильтрации, $\boldsymbol{\theta}$ – остаточный шум.

Данный подход, однако, требует оценки изображения для разделения \mathbf{IK} на компоненты, что накладывает определённые условия на алгоритм определения собственного шума матрицы цифрового устройства. Кроме того, возникает необходимость компенсировать остаточный шум. Эти ограничения определяют применение базы

изображений M , полученных с использованием конкретного аппарата для формирования его собственного признака:

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

Дальнейшие действия по фильтрации, поиску структуры изображения обозначим за алгоритм A , который действует на набор тестовых изображений (рис. 2.3).

2.3. Алгоритм детектирования структурного шума устройства

Предлагаемый алгоритм A построения структурного шума цифрового устройства можно описать следующим образом. Для исходного изображения (рис. 2.3а) выполняется разложение по вейвлетам Добеши [24, 25] (рис. 2.3б). В области полученных трансформант на каждом уровне вейвлет-преобразования сигнал разлагается на четыре поддиапазона частот (квадранта) LL $_n$, LH $_n$, HL $_n$, HH $_n$ (горизонталь, вертикаль, диагональ), где L – низкая частота; H – высокая частота; n – уровень разложения. Действия выполняются для каждого из поддиапазонов разложения (рис. 2.3в). Для выбора опорного уровня шума нормального распределения предлагается использовать один из градиентных методов оценки шума на изображении. Это связано прежде всего с тем, что в предлагаемом алгоритме используется вейвлет-разложение Добеши, которое позволяет получить градиент амплитуды шума [16]. Для оценки используется HH $_1$ поддиапазон, который содержит диагональные детали изображения высокого разрешения. Предыдущие исследования показывают [46], что стандартное отклонение шума может быть

достоверно получено с первого диагонального поддиапазона уровня разложения HH_1 с использованием следующей медианной оценки [14]:

$$\hat{\sigma} = \frac{\text{median}(|HH_1|)}{0.6745}.$$

Медиана абсолютного отклонения шума диагональной субполосы вейвлет-разложения Добеши нечувствительна к отдельным выбросам потенциально высоких амплитуд ($\text{median}(|HH_1|)$ обозначается как $MAD(HH_1)$, где MAD означает среднее абсолютное отклонение). Эта оценка в достаточной степени популярна и в целом обеспечивает надежность и точность результатов.

Далее проводится сканирование детализирующих коэффициентов в выбранном поддиапазоне усредняющим окном 3×3 пикселя с последующим усечением значений по уровню шума (рис. 2.3г) [26, 27]. Аналогичное сканирование поддиапазонов проводится и другими различными размерами окон для контроля предыдущего шага (рис. 2.3д, 2.3е, 2.3ж). Затем выделяются области интереса изображения и высокочастотные области выше уровня шума. Они образуют устойчивые детали объектов на изображении. Описанные действия проводятся для каждой из областей интереса на изображении. Каждая из полученных специальных областей делится на матрицу коэффициентов значимости. В результате деления значимые элементы объектов становятся равными по амплитуде уровню шума. Каждая из областей изображения заменяется нормированным участком (рис. 2.3з).

Далее, в области трансформант вейвлета Добеши удаляется низкочастотная компонента (рис. 2.3и). Таким образом, в области

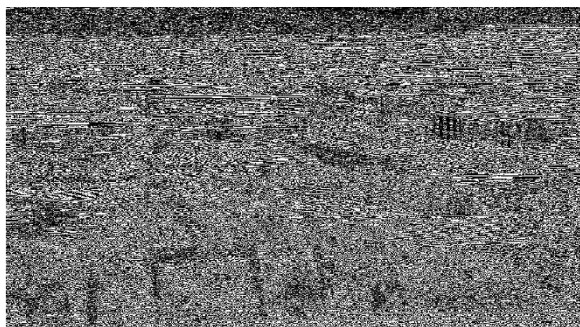
трансформант остается только шум. Затем выполняется обратное вейвлет-преобразование для возврата из области трансформант в пространственную область. Для устранения артефактов границ объектов и решения задачи поиска структурированных областей изображения применяется дополнительный фильтр, применяющийся для подавления аддитивного белого гауссовского шума [28]. Следовательно, в итоге остается распределение структурного шума цифрового устройства определенного из тестового изображения (рис. 2.3к).



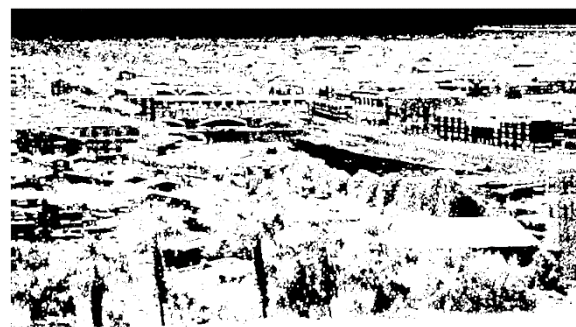
а)



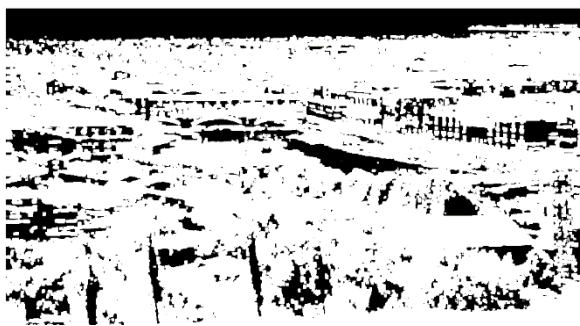
б)



в)



г)



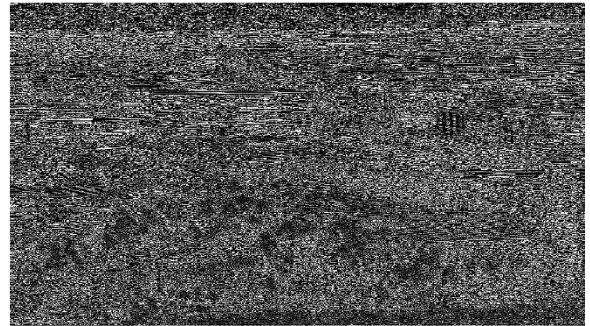
д)



е)



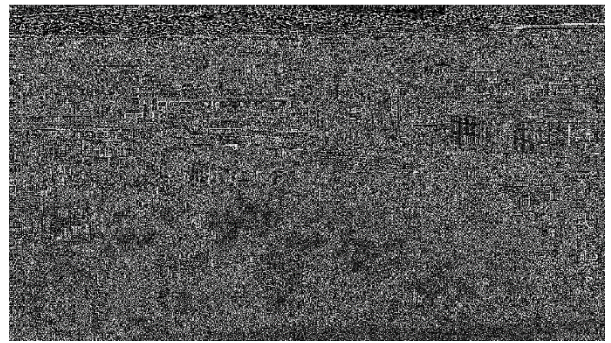
ж)



з)



и)



к)

Рис. 2.3. Результаты работы алгоритма по этапам: а) исходное изображение; б) вейвлет-разложение Добеши; в) поддиапазон разложения; г)-ж) сканирование окнами 3x3, 5x5, 7x7, 9x9, соответственно; з) выравнивание по уровню шума; и) вычитание исходного изображения; к) возврат в пространственную область

Процесс **A** описывается схемой, изображенной на рис. 2.4.



Рис. 2.4. 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. 2.5.

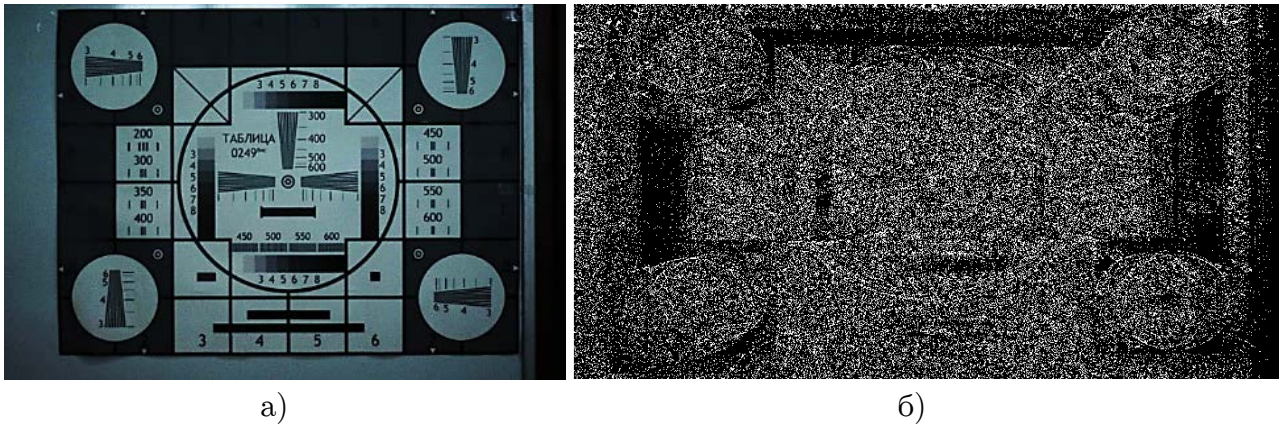


Рис. 2.5. Определение собственного признака аппарата: а) тестовое изображение; б) шаблон собственного признака

Построенное распределение помимо явно заметной шумовой составляющей содержит артефакты контента, содержащегося на рассматриваемом изображении. Вид гистограммы распределения шума матрицы устройства представлен на рис. 2.6.

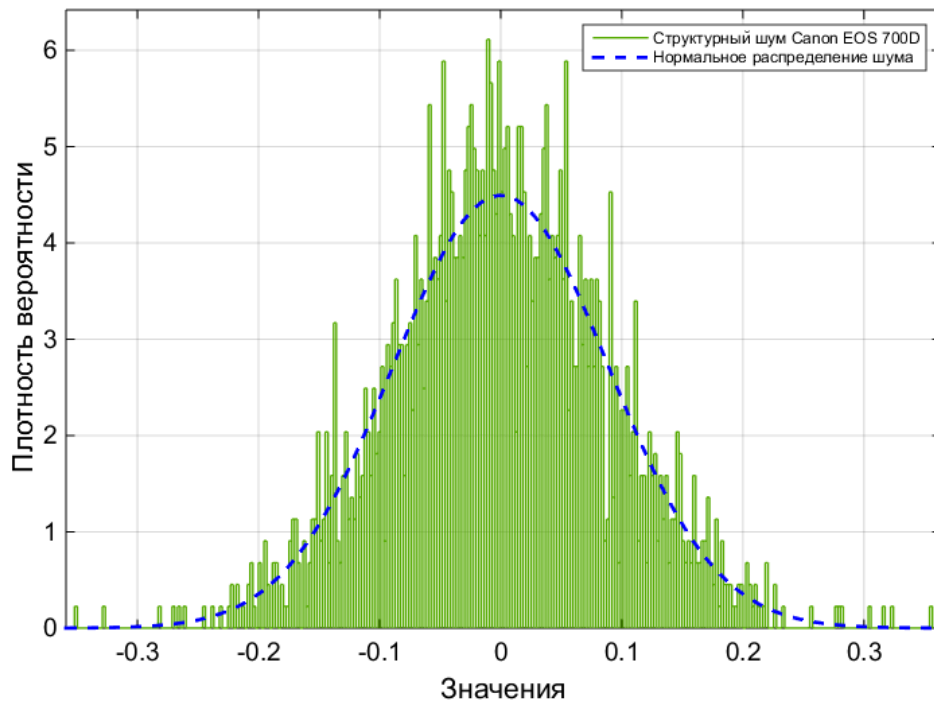


Рис. 2.6. Гистограмма собственного шумового признака тестового изображения

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

Полученные в ходе формирования собственные шумовые характеристики цифрового устройства могут быть представлены в виде распределений значений интенсивности пикселей и имеют нормальное распределение. Следовательно, выдвигается гипотеза о том, что решение задачи определения конкретного устройства формирования цифрового изображения может быть найдено путем сравнения статистических параметров гистограммы исследуемого аппарата и предполагаемого устройства его получения. Фактически данная задача сводится к классической бинарной задаче детектирования.

На основе выдвинутой гипотезы проведено статистическое сравнение распределений собственных признаков матрицы с 5 устройств из базы изображений и тестового изображения. Формирование распределений проводилось на основе 100 изображений для каждого устройства (рис. 2.7). Как показывают результаты такого статистического анализа, распределения имеют математическое ожидание в окрестности нуля, но сильно отличаются дисперсионным параметром.

Однако даже для априорно известного устройства получения тестового изображения статистические параметры не дают однозначного результата соответствия.

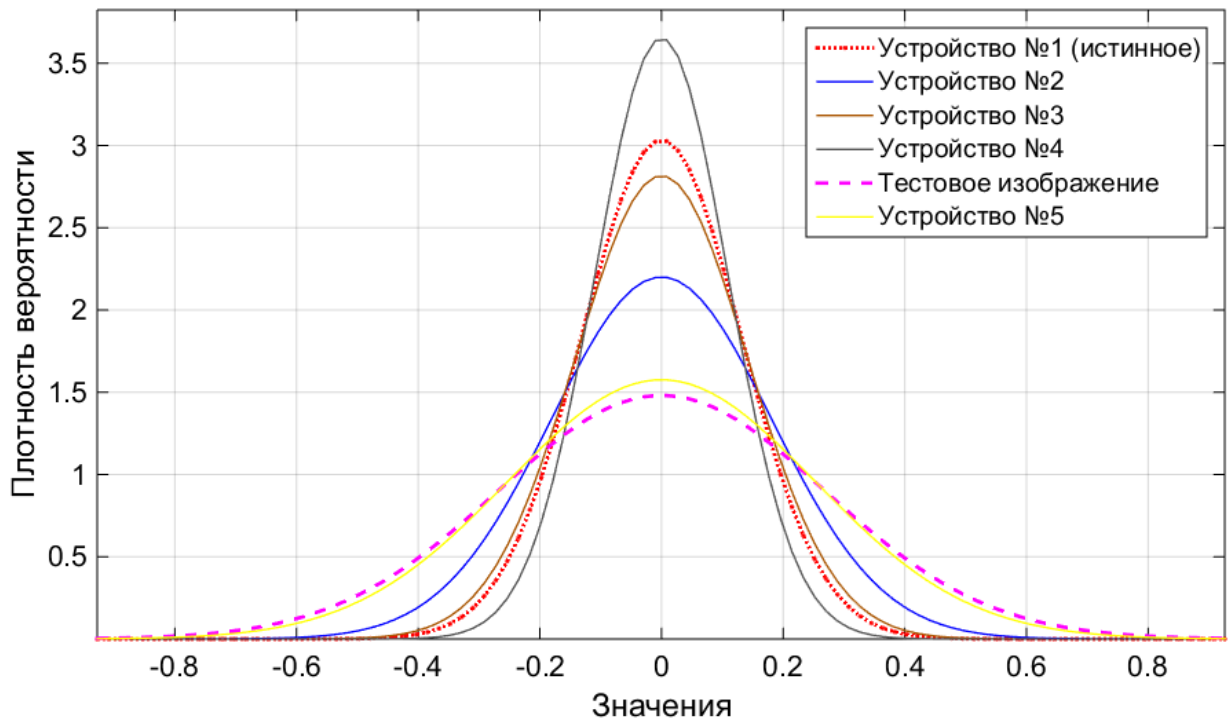


Рис. 2.7. Статистический анализ собственных признаков устройств

Таким образом, можно сделать вывод о том, что гипотеза о возможности статистического сравнения собственных признаков не подтвердилась для поставленной задачи.

Поскольку распределение собственного шума устройства шумоподобно и имеет гауссовскую структуру, то логично предположить, что спектр от него тоже шумоподобен. Следовательно, в качестве альтернативного подхода для анализа полученного двумерного распределения собственного шумового признака цифрового устройства можно рассмотреть спектральный анализ. Предполагается, что если спектры будут иметь разную структуру, то в дальнейшем тестовое изображение можно не раскладывать по вейвлетам Добеши, а само разложение сделать уникальным признаком устройства. В данном случае отличительным признаком по базе собственных распределений устройств являлись бы именно сами разложения изображений. Для

проверки рассмотренной гипотезы построены квадраты АЧХ (амплитудно-частотной характеристики) для распределений собственных шумовых характеристик пяти устройств фотофиксации (рис. 2.8).

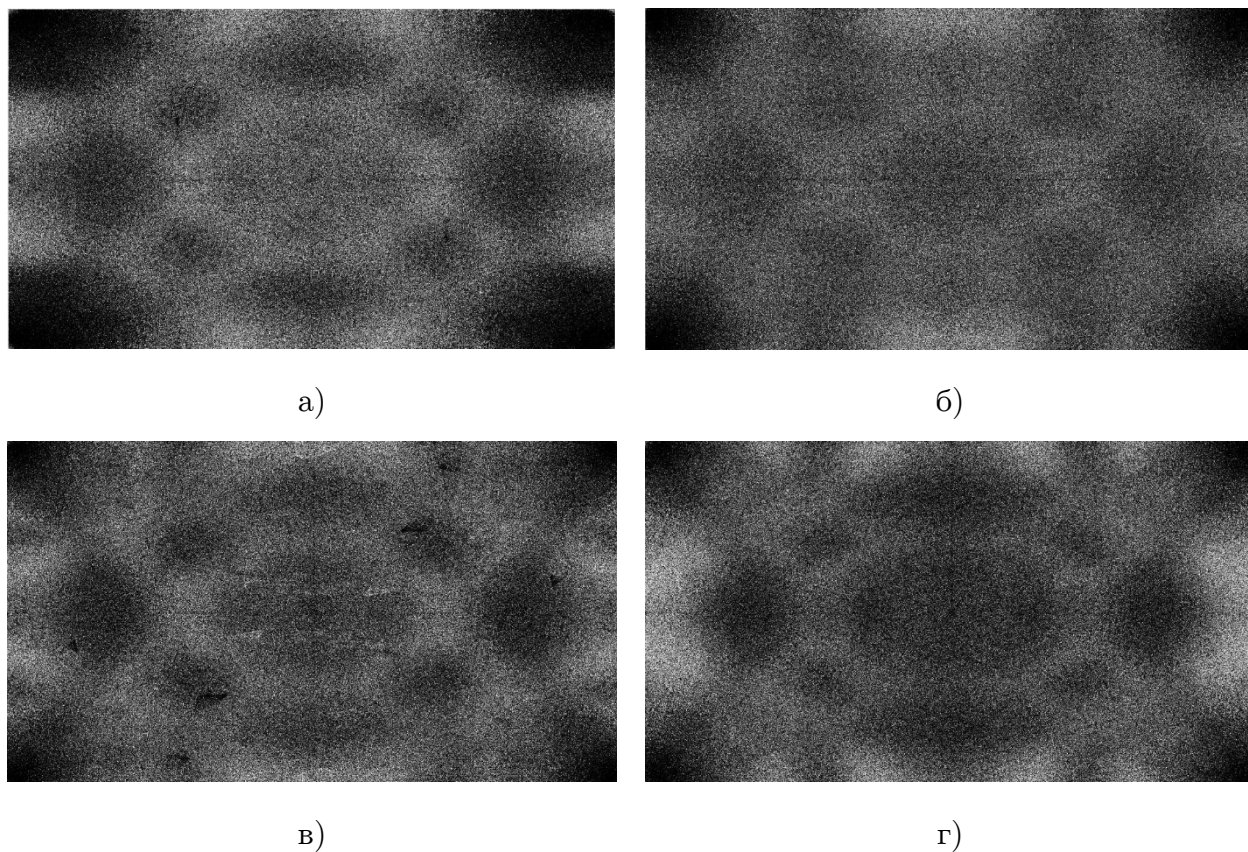


Рис. 2.8. Пример АЧХ для разных камер после применения фильтрации при детектировании областей с яркостью выше фона для тестового изображения из базы: а) Sony DSLR A700; б) Sony DSC W80; в) Panasonic DMC-FS5; г) Canon EOS 5D

Видно, что структура всех четырех АЧХ для разных устройств имеет похожий вид. Вместе с тем, прослеживаются свойства фильтра, используемого для усечения спектральных составляющих в области трансформант. При усечении темных участков гистограммы происходит отсечение частотных составляющих и, как видно на изображениях АЧХ, появляются темные регионы внутри.

Следовательно, можно сделать вывод, что предлагаемый шумовой признак цифрового устройства работает в узком диапазоне средних частот. Поэтому используемая пороговая обработка внутри спектрального разложения вносит в спектр необратимые изменения и не позволяет применять спектральный анализ для решения рассматриваемой в настоящей работе задачи. Следовательно, для решения задачи идентификации цифрового устройства формирования изображения предлагается использовать корреляционный метод в пространственной области.

Выбор метода корреляционного анализа для задачи классификации обусловлен двумя причинами. Во-первых, корреляция двух функций может быть вычислена посредством алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Во-вторых, применение инвариантной корреляционной обработки изображений позволяет решать поставленную задачу классификации в условиях искажений объектов на цифровом изображении, вызванных аффинными артефактами, фоновыми помехами, шумами устройства регистрации изображения и т. п.

2.4. Алгоритм корреляционного анализа

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 изображения и эталонного производится среди всего имеющегося набора двумерных импульсных характеристик устройств в базе:

$$\rho_q = \text{corr}(\text{pattern}_q, I_T K).$$

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

После этого, тестовое изображение сдвигается на один пиксель вправо, и процесс повторяется, так создается двумерный массив откликов, называемый корреляционным откликом.

Наибольший отклик получается при совпадении шумового распределения тестового изображения и действительного аппарата, с которого оно было получено $T = q$ (рис. 2.9).

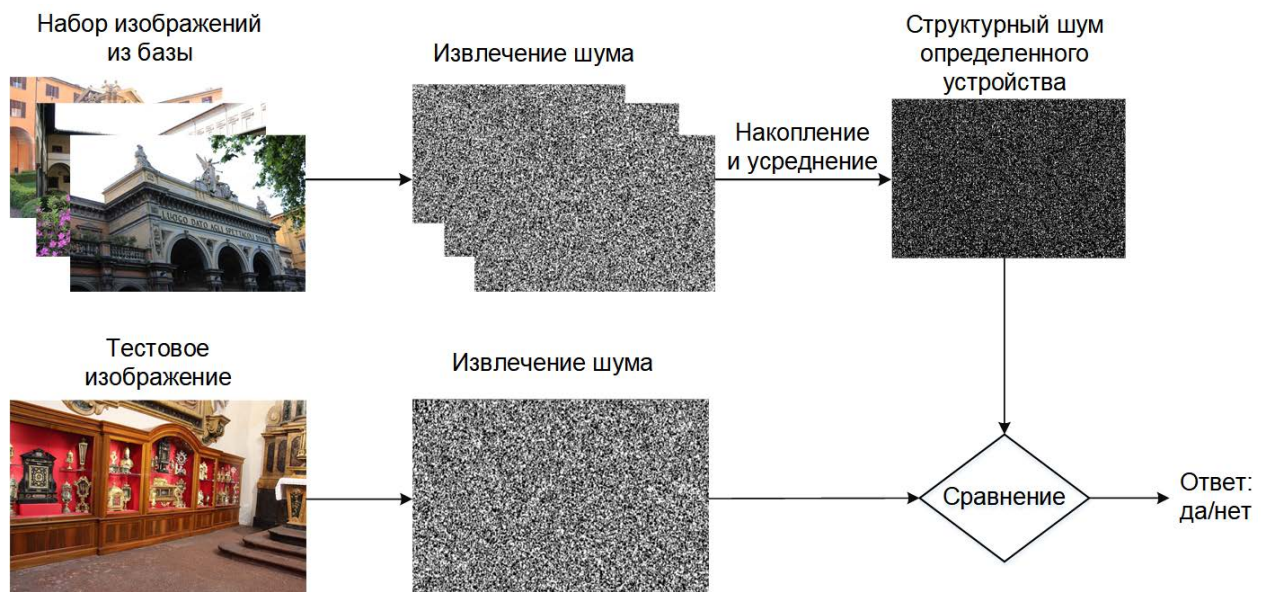


Рис. 2.9. Схема проверки гипотез о соответствии изображения определенному аппарату

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. 2.10).

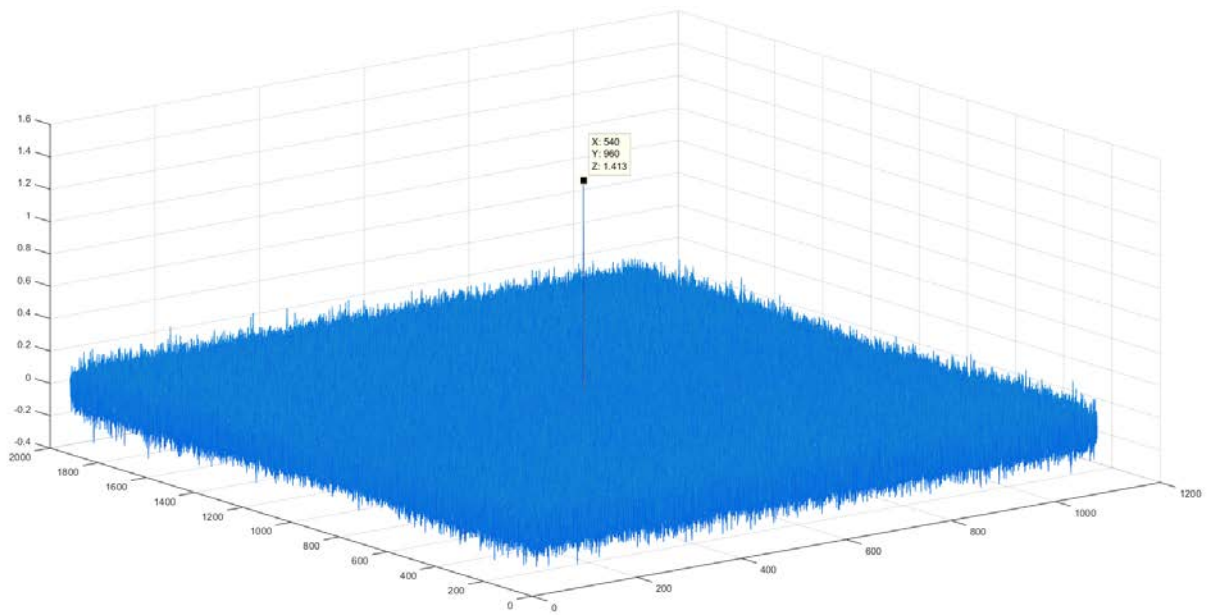


Рис. 2.10. Результат расчета двумерной функции корреляции при формировании тестового изображения предполагаемым аппаратом

В случае формирования исследуемого изображения не рассматриваемым устройством значения корреляции будут колебаться в окрестности нуля, а двумерная взаимная корреляционная функция является однородной (рис. 2.11).

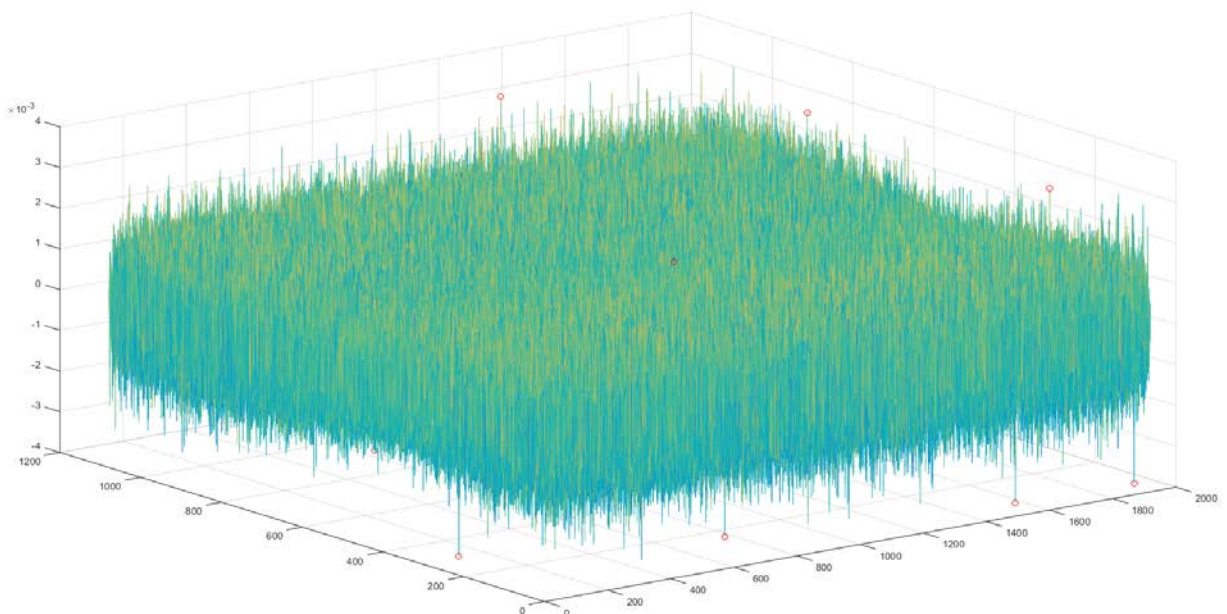


Рис. 2.11. Результат расчета двумерной функции корреляции при формировании тестового изображения аппаратом, отличным от предполагаемого

Полученные картины двумерной функции корреляции положительного и отрицательного случая представляют собой двумерную корреляционную функцию в окрестности некоего среднего значения (отрицательный случай) с ярко выраженным пиковым значением в окрестности центра изображения (положительный случай).

Таким образом, по наличию, форме, значению и остроте корреляционного пика можно делать выводы о сходстве между двумерным распределением структурной помехи устройства, с которого получено рассматриваемое тестовое изображение, с распределением структурной помехи предполагаемого устройства фиксации. При этом, чем тоньше форма корреляционного пика и больше его значение относительно среднего значения корреляционной функции, тем больше вероятность того, что артефакты структурной помехи схожи.

Предыдущие исследования в данной области показали [46], что использование среднего значения взаимной корреляционной функции не является объективным для данной задачи в силу зависимости от артефактов интенсивности изображений. Следовательно, предлагается применить нормировку на максимум корреляции. Данный критерий определяется как отношение максимального значения корреляции (квадрат амплитуды пика) к энергии шума, применительно для двумерной функции взаимной корреляции:

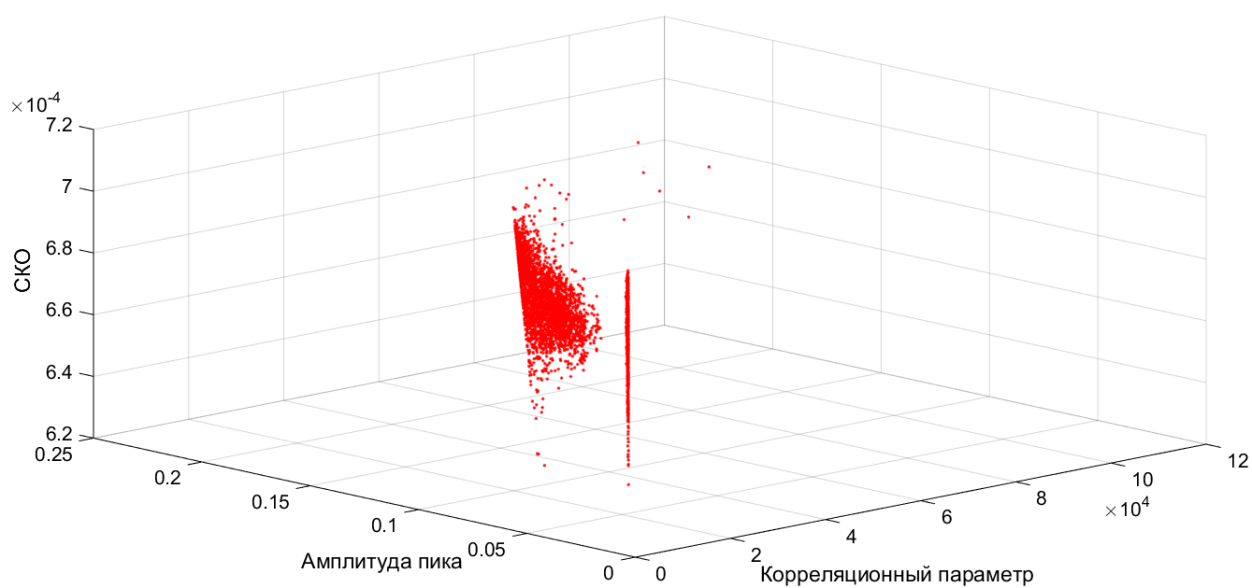
$$R_{max\ corr\ q} = \frac{corr_{max}^2(pattern_q, I_{TK})}{corr_{s_{max}}^2(pattern_q, I_{TK})} sign(corr_{max}(pattern_q, I_{TK})),$$

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

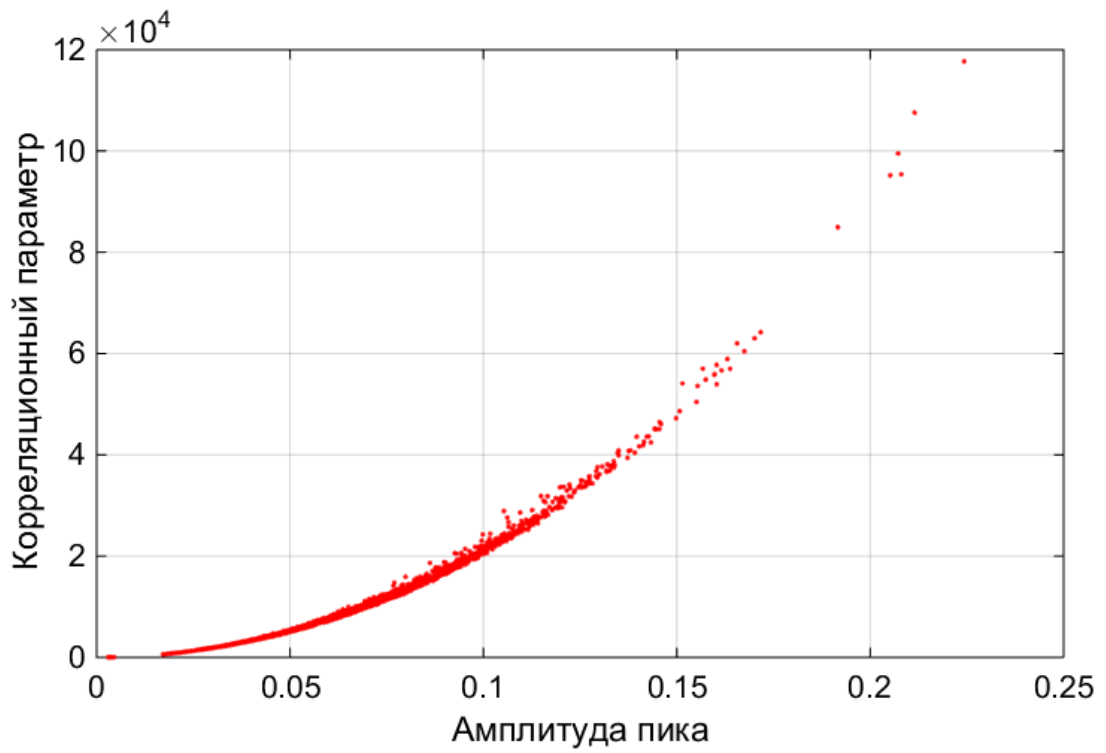
корреляции, $corr_{max}$ – максимальное значение взаимной корреляционной функции.

2.5. Выбор порога принятия решения

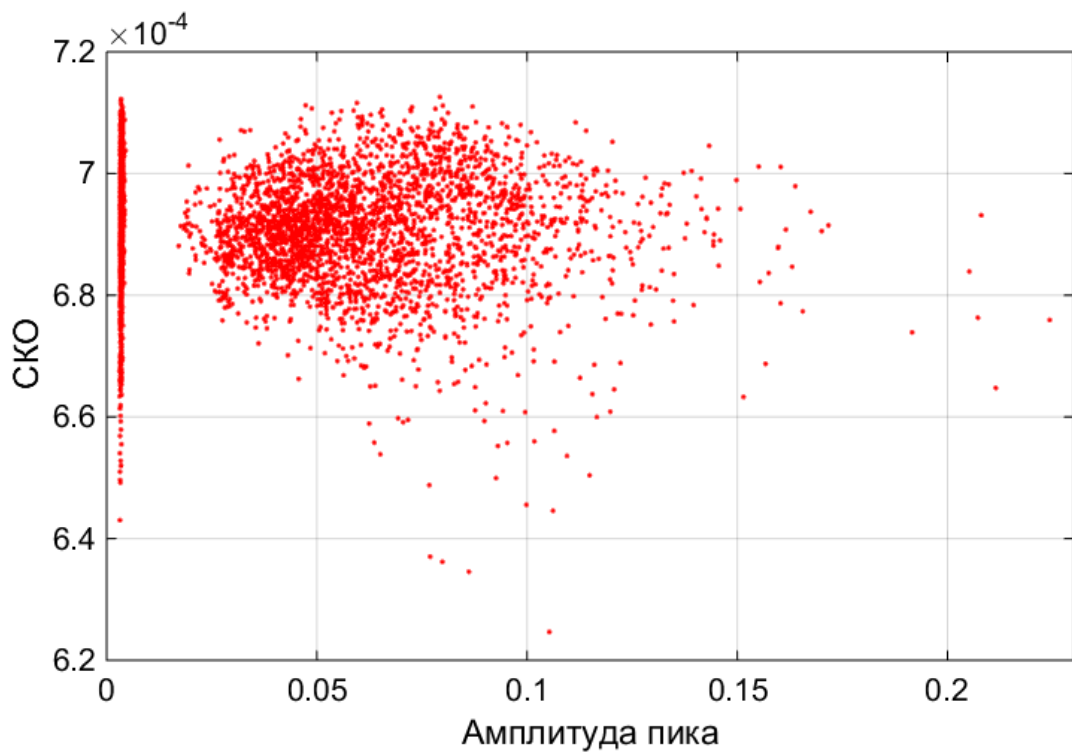
Для вынесения решения о принадлежности рассматриваемого цифрового изображения к предполагаемому аппарату проведено вычисление выходной метрики для 6000 случаев. Заведомо известно, что 3000 изображений получены с исследуемого аппарата, а остальные – с иных устройств фотофиксации (рис. 2.12). Для каждого случая рассчитаны 4 параметра: значение взаимной нормированной корреляции, амплитуда пика, математическое ожидание μ и дисперсия σ (СКО).



а)



б)



в)

Рис. 2.12. Результат тестирования алгоритма для определения порогового значения в координатах: а) нормированная взаимная корреляция, амплитуда пика, СКО; б) нормированная взаимная корреляция, амплитуда пика; в) СКО и амплитуда пика

Как видно из графика, положительные (совпадение структурного шума тестового изображения с признаком предполагаемого аппарата) и отрицательные (различие в структурных признаках предполагаемого аппарата и полученного из тестового изображения) исходы образуют два непересекающихся множества. Причем плотность распределения первых ниже, чем вторых.

Поскольку значения выходного критерия не коррелированы между собой, то для полученных результатов положительных и отрицательных исходов, и имеющих распределения, близкие к нормальному можно построить функции плотности распределения по закону [17]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

Следовательно, функция распределения будет иметь вид:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx.$$

Для решения данного интеграла используются табличные значения функций Лагранжа. Применив рассмотренное приближение и зная значения σ и μ , можно построить графики функций распределений (рис. 2.13).

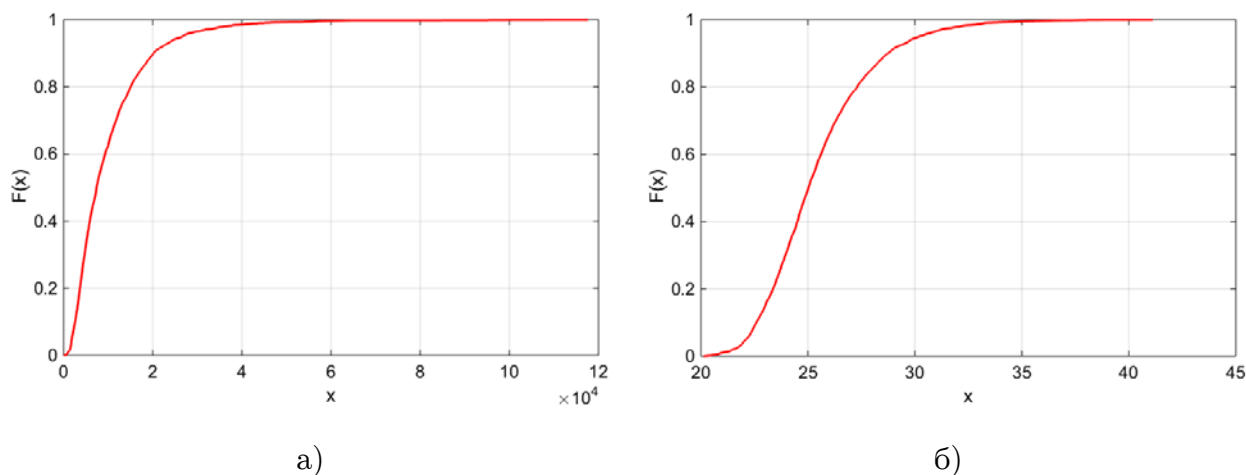


Рис. 2.13. Функция распределения для: а) положительных случаев; б) отрицательных случаев

На основании полученных графиков, а также зная результаты для случаев правильного приёма (TP – true positive), пропуска цели (FN – false negative), ложной тревоги (FP – false positive), верного пропуска (TN – true negative) можно определить порог срабатывания алгоритма. Случай пропуска цели в рамках поставленной задачи означает, что значение выходного корреляционного параметра между распределением шума матрицы предполагаемого устройства и структурного шума тестового изображения меньше порога принятия решения. В случае ложной тревоги значение корреляционного параметра между распределением шума тестового изображения и предполагаемого устройства, не имеющего отношения к данному изображению, оказалось выше значения порога.

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 $Spe = Sen = 99,97\%$. Графики данных характеристик работы алгоритма представлены на рис. 2.14.

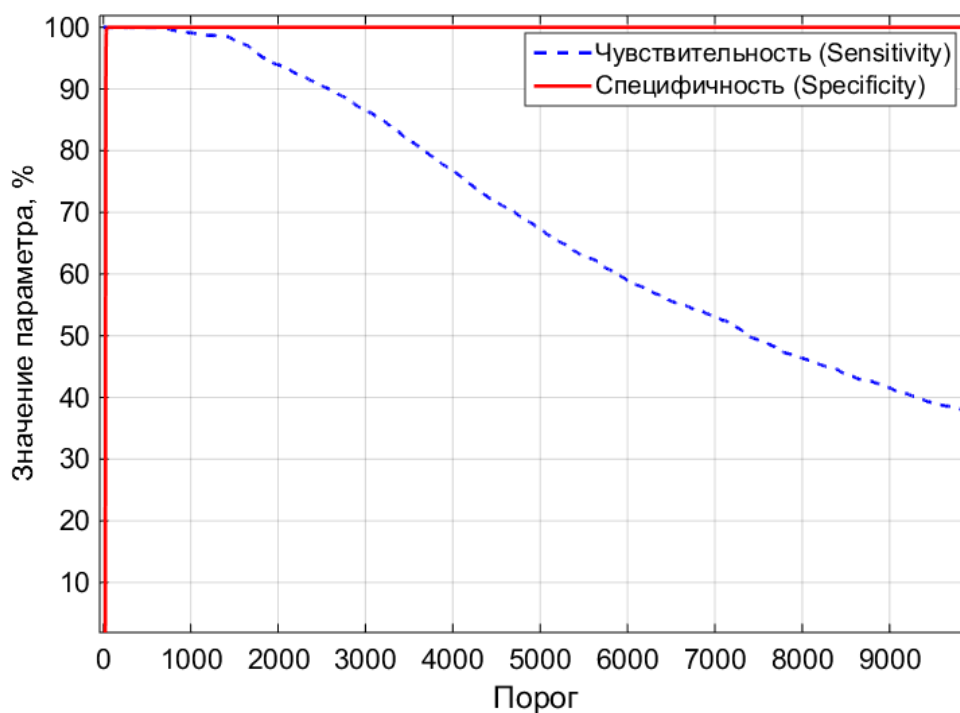


Рис. 2.14. Кривые специфичности и чувствительности алгоритма

Для определения порога принятия решения алгоритма идентификации устройства фиксации цифрового изображения использовался участок равенства характеристик (рис. 2.15).

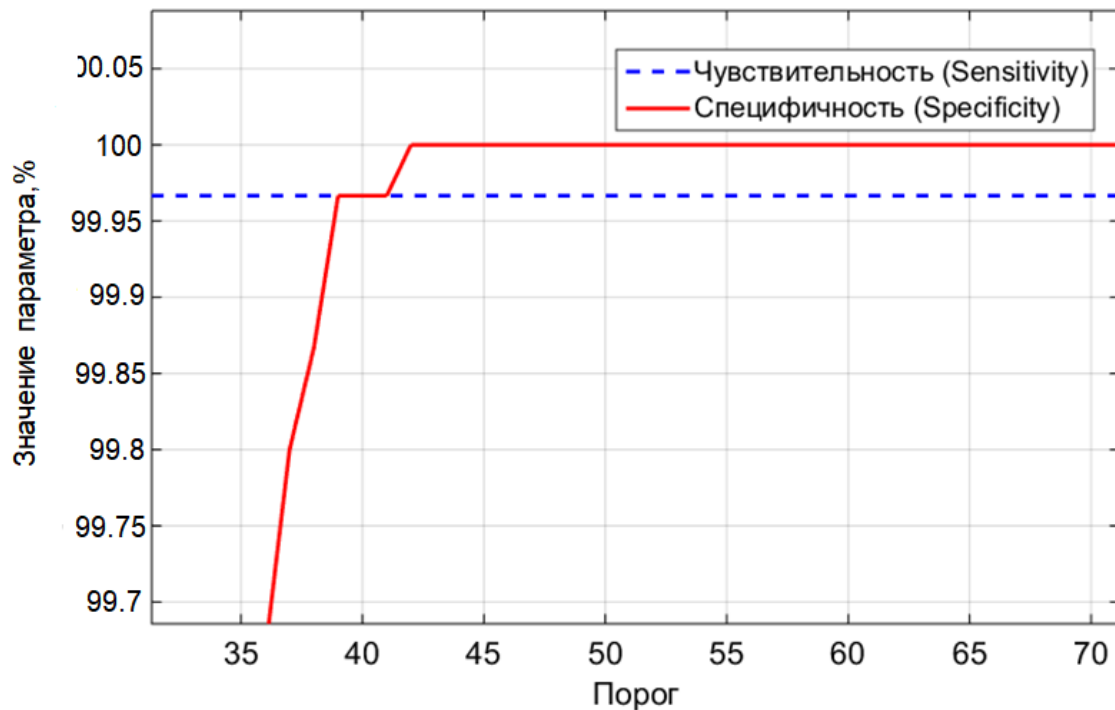


Рис. 2.15. Кривые специфичности и чувствительности алгоритма в увеличенном масштабе

На основе данных кривых построена ROC-кривая (рис. 2.16) и определен порог $\tau = 40$. ROC-кривая – двумерное пространство, одна из координат которого соответствует доле неверно принятых объектов (False Positive Rate, FPR), а другая – доле верно принятых объектов (True Positive Rate, TPR).

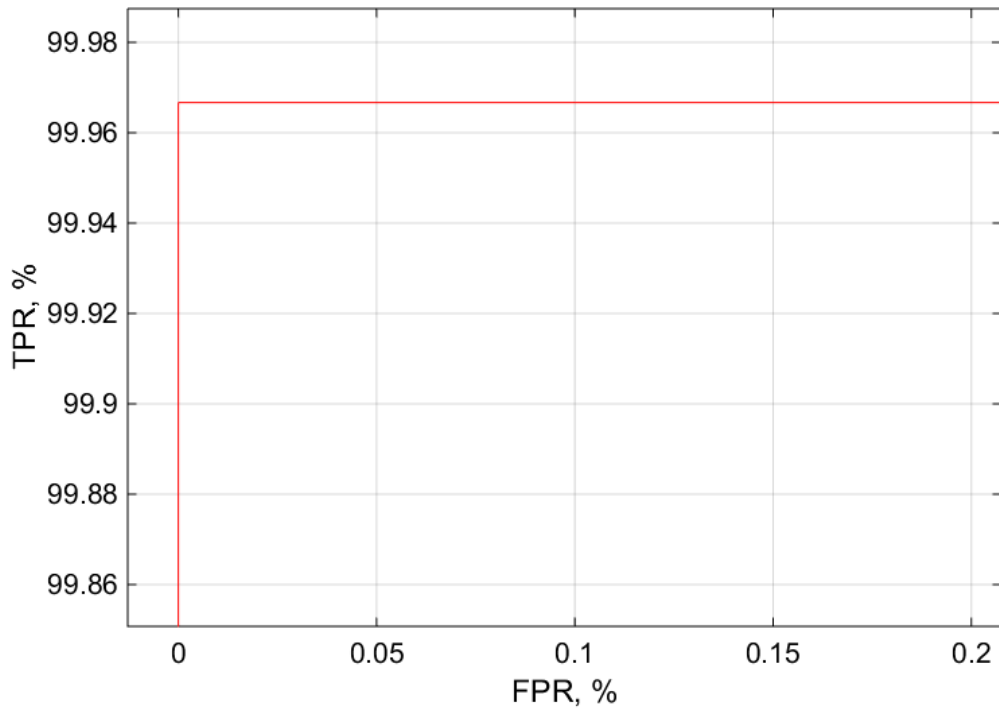


Рис. 2.16. ROC-кривая работы алгоритма идентификации устройства фотофиксации

При этом, $FPR = \frac{FP}{TN+FP} = 0.03\%$, $TPR = \frac{TP}{TP+FN} = 99.97\%$.

Следует отметить, что процент верного решения рассматриваемой задачи для алгоритма оценки интерполяционных артефактов составляет 97%, а для алгоритма на основе искажений оптической системы – 91% [54].

2.6. Краткие выводы

В качестве собственного признака устройства фотофиксации может использоваться шум матрицы на основе неоднородности реакции ее сенселей. Разработанный алгоритм детектирования собственного шума позволяет получить карту шумовой характеристики. Собственный шум цифрового устройства представляет собой случайный процесс с нормальным распределением. В качестве

выходного критерия алгоритма предложен корреляционный параметр на основе отношения максимального значения корреляции (квадрат амплитуды пика) к энергии шума применительно для двумерной функции взаимной корреляции.

Следует отметить, что структурный шум матрицы цифрового устройства является его уникальной характеристикой. Он может использоваться в решении задачи верификации цифровых изображений, то есть решения задачи повышения достоверности получения цифрового изображения с конкретного рассматриваемого устройства до 99,97%. Таким образом, увеличение вероятности 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%.

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВХОДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.1. Вводные замечания

Как правило, цифровые изображения, полученные с различных устройств фотофиксации и предоставляемые для судебно-технической экспертизы в качестве цифровой улики, имеют различные не унифицированные параметры: размер, тип файла, качество (для JPEG изображений). Также возможны случаи, когда предоставляется только часть изображения и необходимо определить его принадлежность к конкретному устройству. Это связано, прежде всего, с тем, что остальная часть является либо неинформативной (однородной по контенту), либо обрезанной с целью уменьшения объема занимаемой памяти файлом на носителе информации. Следовательно, необходимо исследовать алгоритм на устойчивость к указанным параметрам входных изображений.

3.2. База изображений

Для проведения тестирования рассмотренного в Главе 2 алгоритма была сформирована оригинальная база цифровых изображений, имеющая следующие характеристики:

- 51000 цифровых изображений различных сцен;
- 1000 фотографий 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.

Следует отметить, что изображения имеют формат JPEG, разрешение не менее 1920x1024 пикселей (Full HD) и с момента их формирования до поступления на вход алгоритма они не модифицировались. В случае, если поступающее на вход алгоритма изображение имело большее разрешение, то оно было автоматически уменьшено до требуемого размера. Так же все поступающие на вход алгоритма изображения автоматически трансформировались до горизонтального расположения. Сцены, присутствующие на изображениях, не имели значения, исключались абсолютно темные и гладкие кадры.

Для выбора необходимого для корректной работы алгоритма числа изображений, участвующих в формировании собственного признака, проведено тестирование зависимости коэффициента максимальной корреляции от количества изображений (рис. 3.1а).

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. 3.1б).

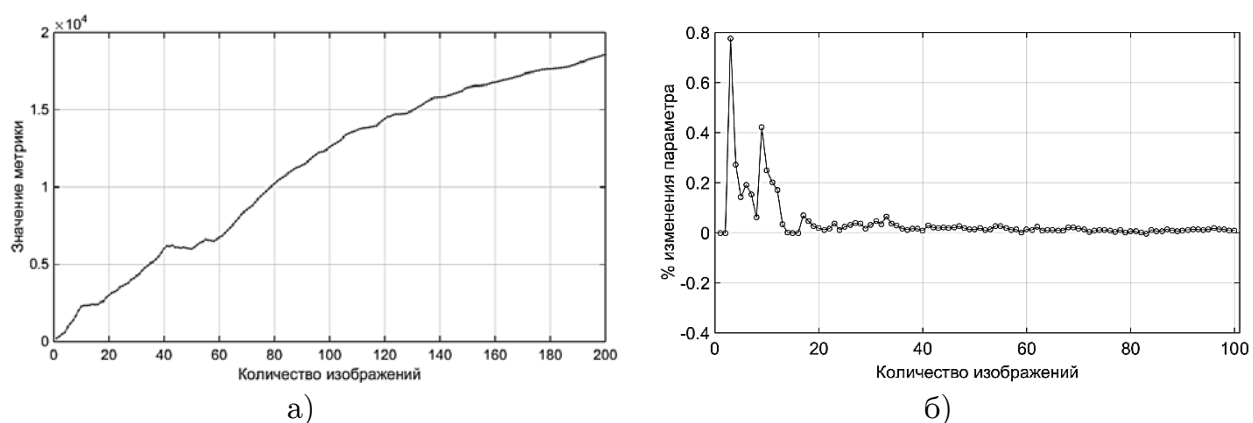


Рис. 3.1. Зависимость значения корреляционного параметра от числа используемых изображений: а) в абсолютном соотношении; б) в процентном соотношении

3.3. Зависимость выходной метрики от параметров входных изображений

3.3.1. Размер изображений

В области обработки цифровых изображений известно два основных линейных метода однокадрового пространственного увеличения изображения: билинейная и бикубическая интерполяции. Несмотря на то, что бикубическая интерполяция производит значительно более резкие изображения, чем билинейная, и, возможно, является оптимальной по соотношению времени обработки и качества на выходе, однако она может давать значения по амплитуде выше, чем были в оригинальном изображении. Следовательно, в данной работе предлагается использовать билинейный метод.

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. Для исследования выбраны известные

стандартные размеры кадра видеопоследовательности, соответствующие стандартным разрешениям экрана, 720 x 480, 800 x 600, 1024 x 768, 1280 x 720, 1366 x 768, 1600 x 900, 1920 x 1080.

Без потери общности, для проверки представленного решения случайным образом была сформирована база цифровых изображений для четырех цифровых фотоустройств формирования изображений: Sony DSLR A700, Sony DSC W80, Panasonic DMC-FS5 и Nokia N97. Для каждого аппарата имелось минимум 100 изображений размерностью 1920x1080. Этот набор применялся для составления шаблонов структурного шума устройств. Затем проводилось сравнение структурного шума каждого устройства с обнаруженным на тестовом изображении, не входившим в набор при формировании шумового признака устройства. Результаты тестирования случая совпадения аппарата с источником получения тестового изображения для различных размеров изображения представлены на рис. 3.2. В данном случае тестовое изображение получено с использованием аппарата Panasonic DMC-FS5.

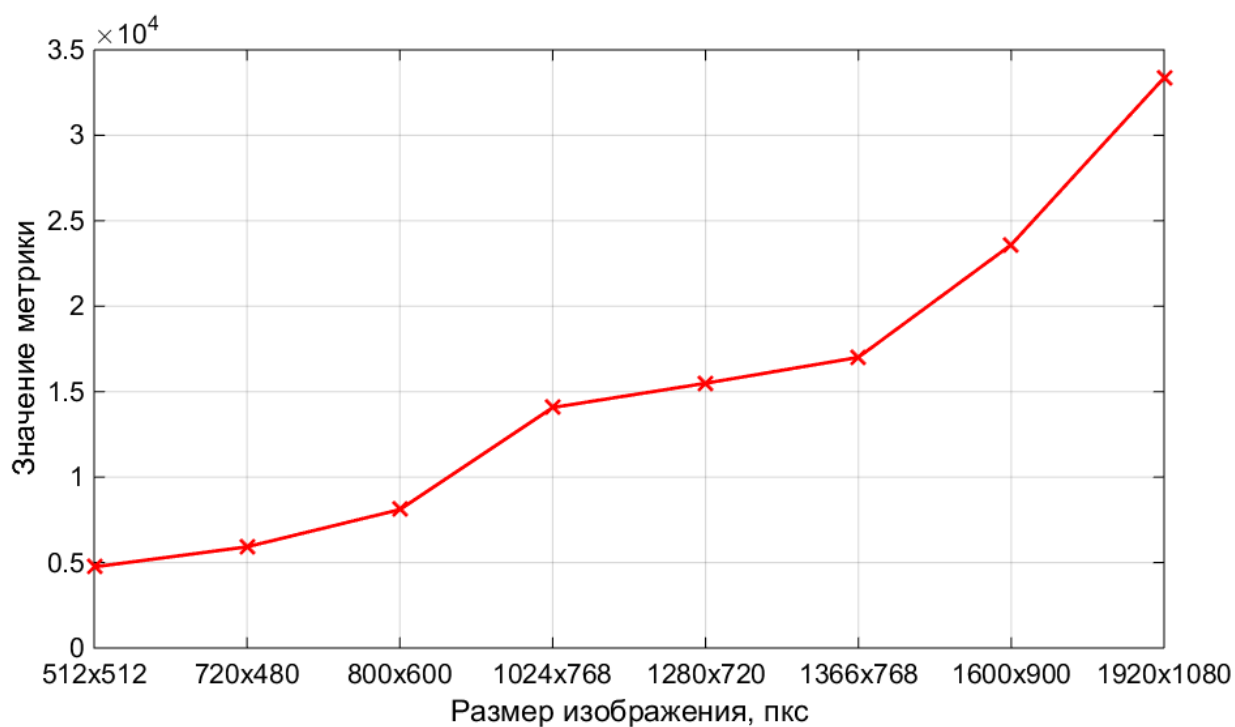


Рис. 3.2. Зависимость значений метрики и параметра быстродействия от размера изображения

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

На рис. 3.3 представлены результаты исследования, которые качественно описывает быстродействие предложенного алгоритма. Отметим, что с увеличением производительности используемого вычислительного устройства абсолютные значения могут измениться при сохранении общей тенденции.

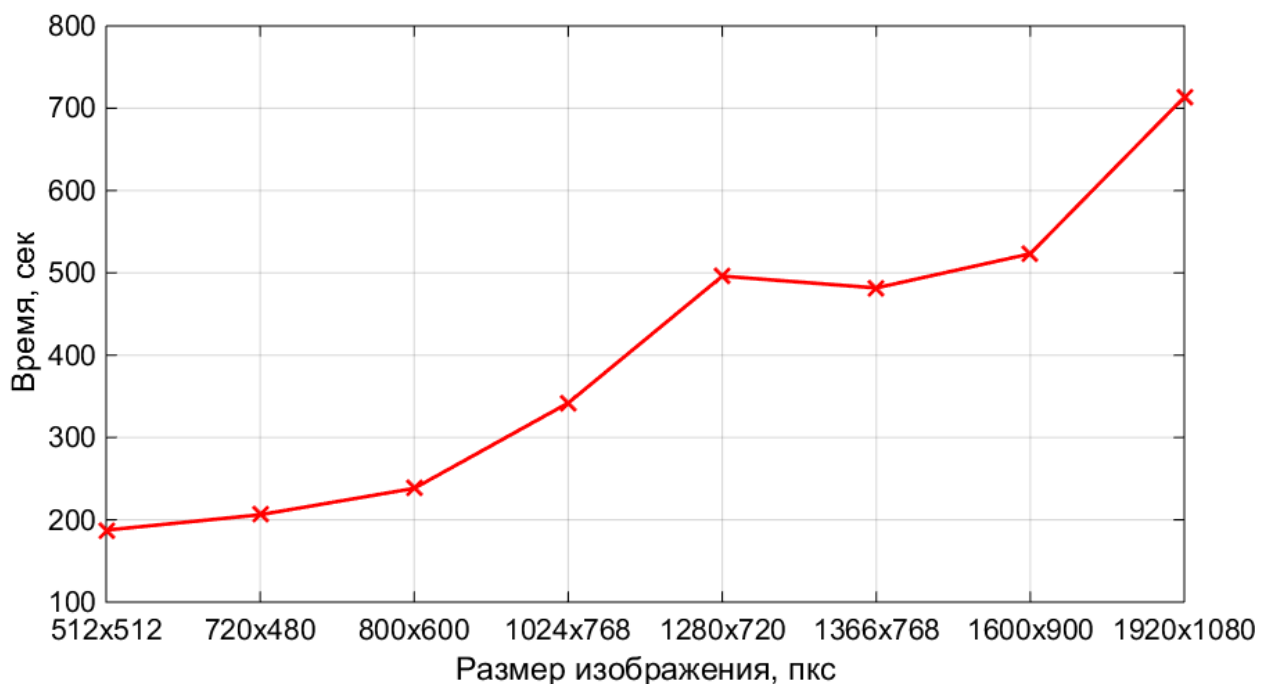


Рис. 3.3. Зависимость времени выполнения алгоритма от размеров изображения

На основе полученного графика можно сделать вывод – выигрыш в быстродействии для больших размеров изображений можно объяснить тем, что для пользовательской техники данные размеры являются стандартными, а остальные получены математическими операциями относительно наибольшего.

Повсеместное распространение устройств фиксации и отображения изображений с высокими значениями их разрешения положительно влияет на качество работы алгоритма, увеличивая значение корреляционного параметра, а значит, и уверенности алгоритма в результатах сравнения.

3.3.2. Формат используемых изображений

Для большей унификации электронные системы документооборота обычно работают с наиболее распространенными форматами сжатия и хранения цифровых изображений, такими как

JPEG (Joint Photographic Experts Group), PNG (Portable Network Graphics), JPEG2000 (Joint Photographic Experts Group 2000) и TIFF (Tagged Image File Format) [11]. Исходные изображения хранятся в формате DNG (Digital Negative Specification, цифровой негатив) – открытый формат для RAW-файлов изображений, используемый в цифровой фотографии. Данный формат разработан компанией Adobe Systems с целью создания стандартного формата для RAW-файлов изображений вместо множества форматов разных производителей фотокамер. Этот формат содержит первичную информацию о преобразовании устройством типа «свет-сигнал». Данное изображение еще не содержит артефактов различных процессов, происходящих в устройстве в ходе цифровой обработки изображений. На рис. 3.4 представлены результаты исследования влияния формата используемого изображения на уровень метрики взаимной корреляции.

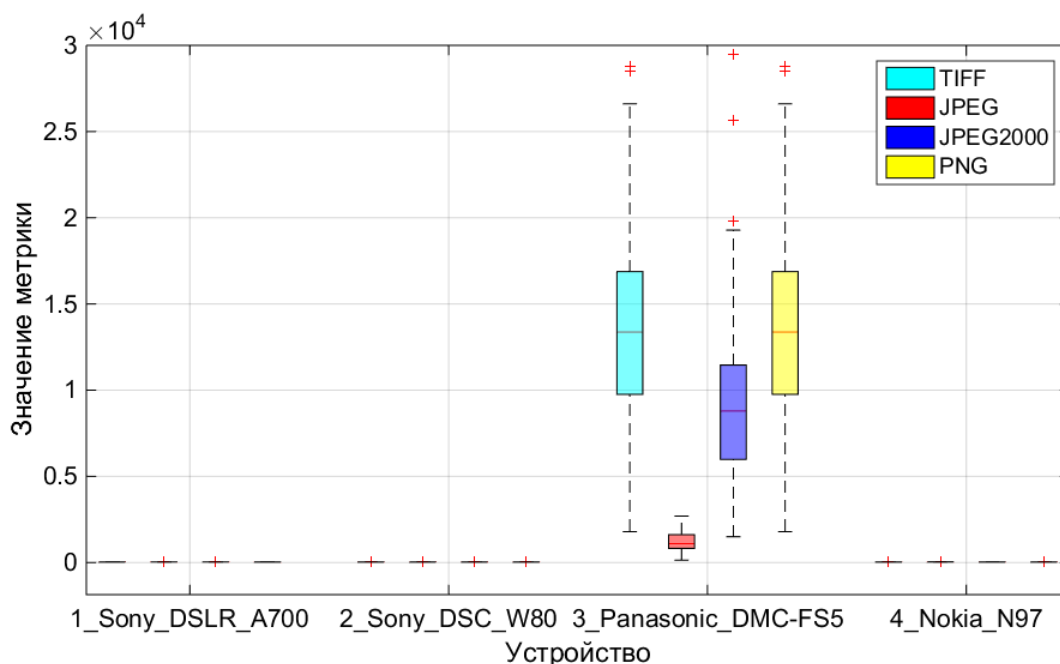


Рис. 3.4. Сравнение кодеков сжатия тестовых изображений

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. Для каждого аппарата имелось минимум по 100 изображений размерностью 1920x1080. Этот набор применялся для составления шаблонов структурного шума устройств. Затем 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. Очевидно, что значение выходного параметра для форматов сжатия PNG и TIFF наибольшее, поскольку они не предполагают сжатия данных. Из полученного графика также видно, что кодек JPEG является достаточно сложным для анализа, в силу того, что он изначально разработан для 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 [47]. 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 по влиянию параметра качества на возможность проведения идентификации устройств (рис. 3.5).

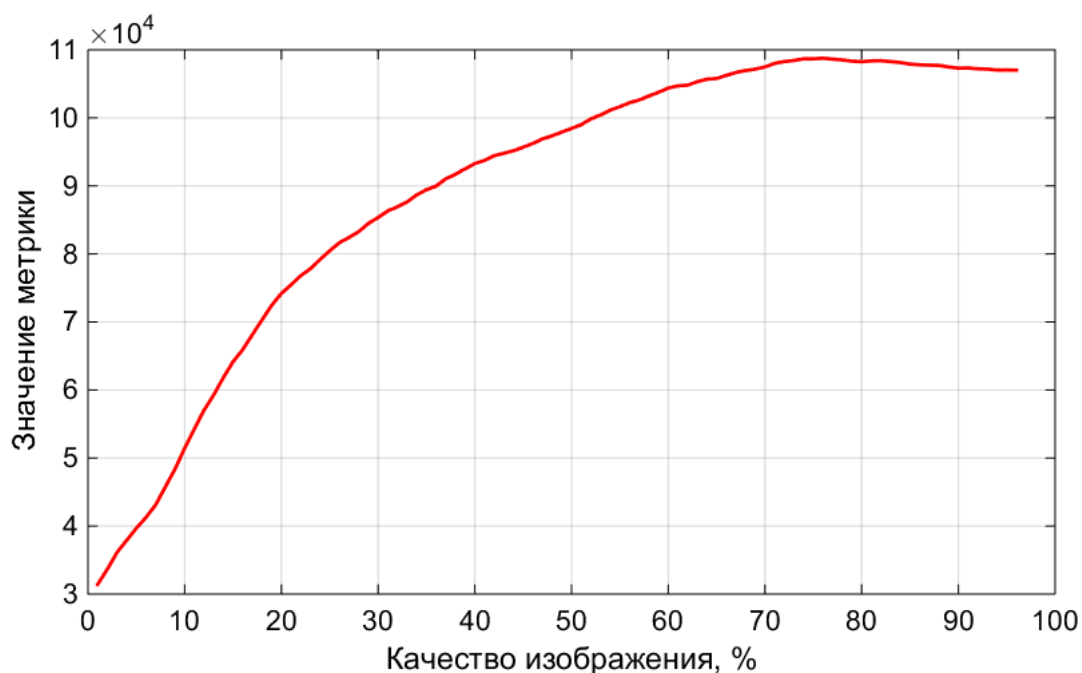


Рис. 3.5. Зависимость взаимной корреляции от параметра «качество» кодека JPEG

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. Данные настройки являются изначальными для бытовых устройств фотофиксации, поэтому минимально необходимым качеством JPEG-изображения для наилучшей работы алгоритма (максимальное значение корреляции) является значение 75% от максимального и выше.

3.3.3. Определение устройства по части входного изображения

При использовании зума в устройствах фотофиксации устройство производит с изображением сцены геометрическое преобразование типа обрезания и передискретизации до разрешения, определенного настройками аппарата. Необходимо найти минимальный

относительный размер области изображения (в %), при котором сохраняет 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. 3.6.



Рис. 3.6. Входные данные: а) исходное изображение; б) область изображения, составляющая 5% от исходного размера тестового изображения

Следует отметить, что в рамках эксперимента учтено отношение сторон области изображения относительно первоначального. Результаты данного тестирования представлены на рис. 3.7.

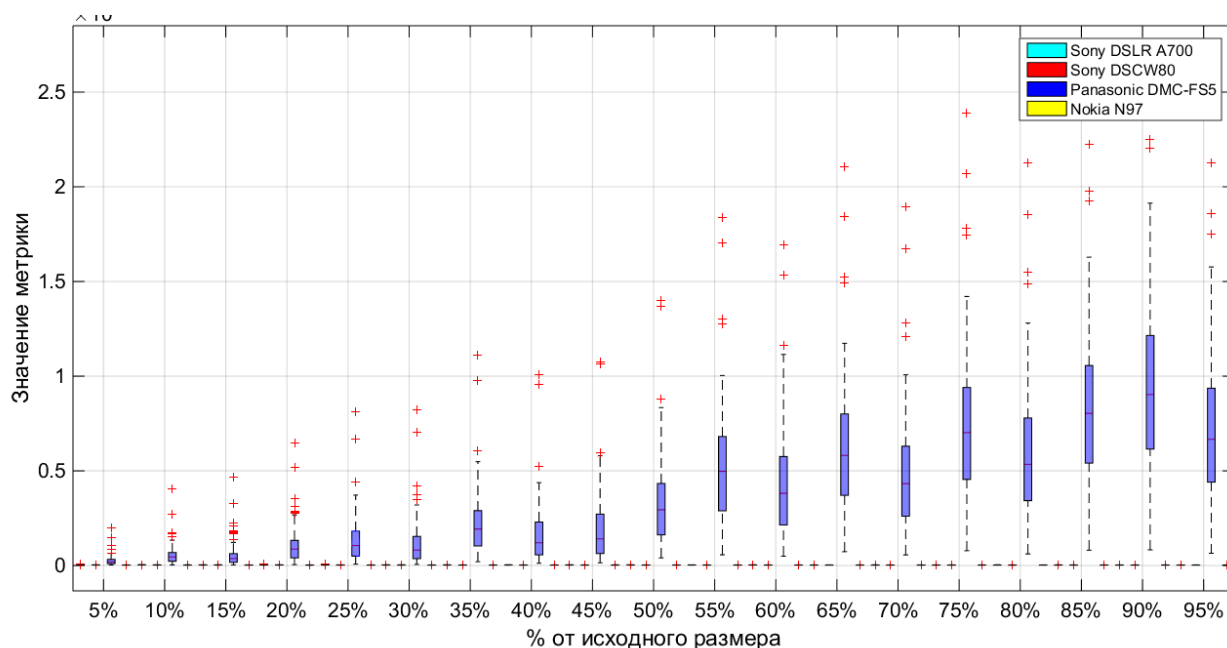


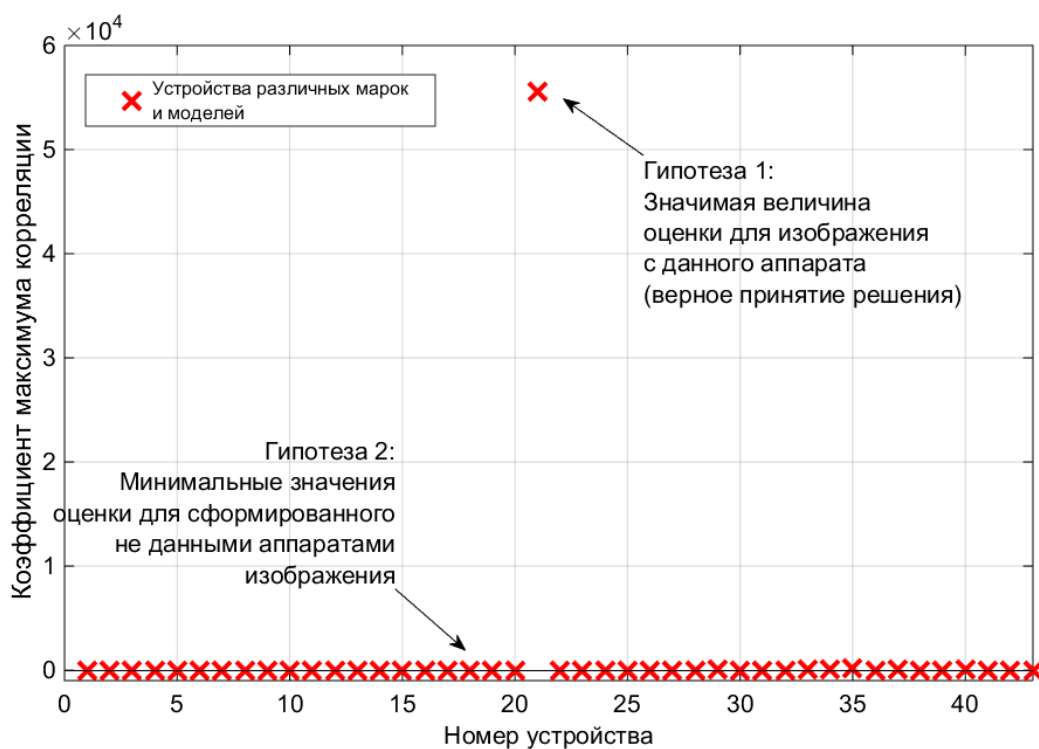
Рис. 3.7. Зависимость выходного параметра от размера используемой части цифрового изображения

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

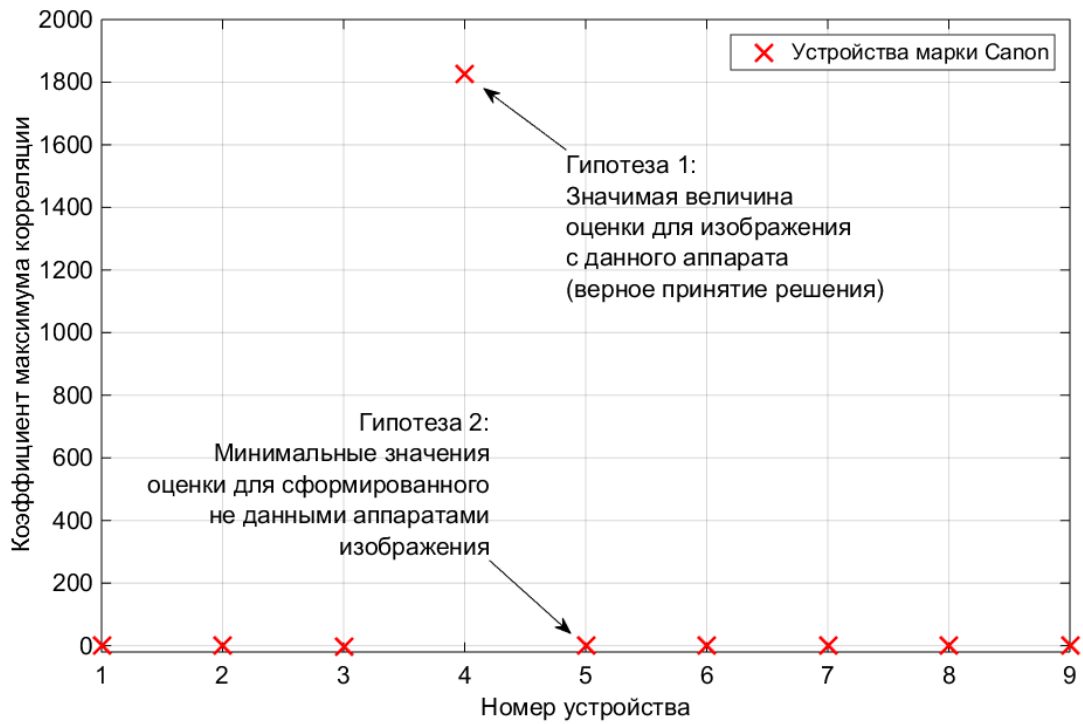
3.4. Эксперименты по идентификации устройства формирования изображения из базы

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. Следовательно, проведено тестирование на идентификацию источника формирования тестового изображения из имеющегося набора 43

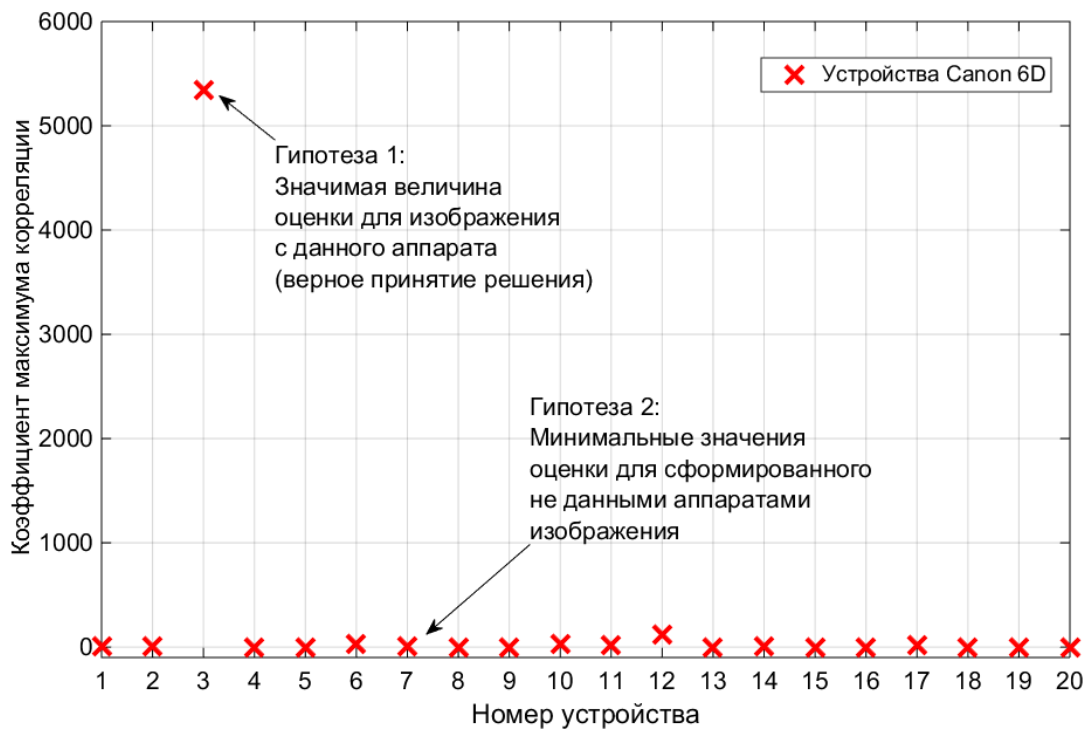
различных марок и моделей устройств (рис. 3.8а), среди 9 устройств различных моделей торговой марки Canon (рис. 3.8б) и 20 устройств производителя Canon модели EOS 6D (рис. 3.8в), для которых предварительно сформированы собственные признаки.



а)



б)



в)

Рис. 3.8. Результат идентификации устройства фотофиксации: а) среди различных моделей и марок; б) среди одной марки и различных моделей; в) среди одной модели и марки

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.

Также выполнена верификация набора цифровых изображений, состоящего из 14 тыс. экземпляров (рис. 3.9).

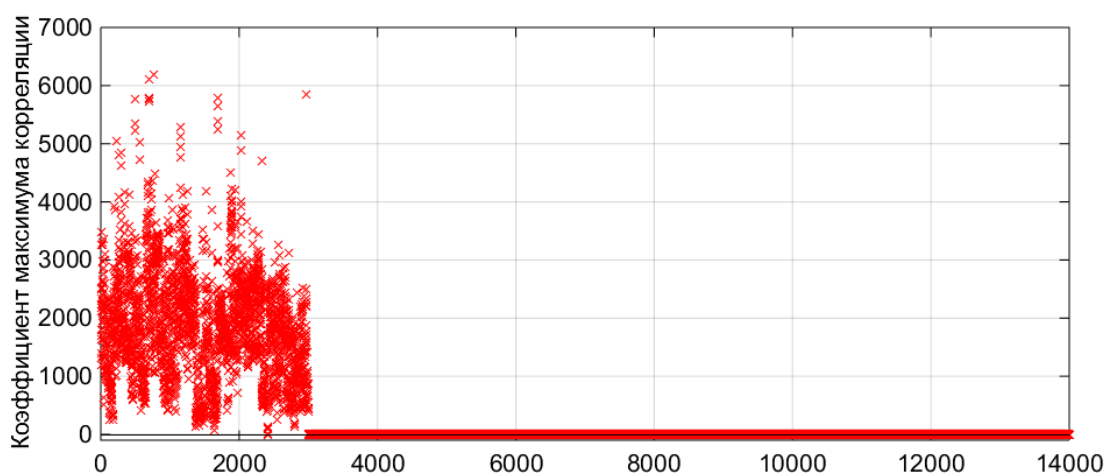


Рис. 3.9. Результаты верификации набора цифровых изображений

Сравнение проводилось с использованием предварительно определенного собственного признака известного устройства Canon EOS 700D. Результаты тестирования говорят о том, что первые 3 тыс. изображений получены с данного устройства, и оценка имеет значительную величину, а остальные 11 тыс. изображений получены не с рассматриваемого устройства, и значение оценки минимально.

3.5. Сравнение методов идентификации источника изображения

Для оценки предложенного выходного критерия алгоритма выполнено сравнение корреляционного параметра с известными корреляционными подходами: кросс-корреляцией и корреляцией Пирсона (рис. 3.10).

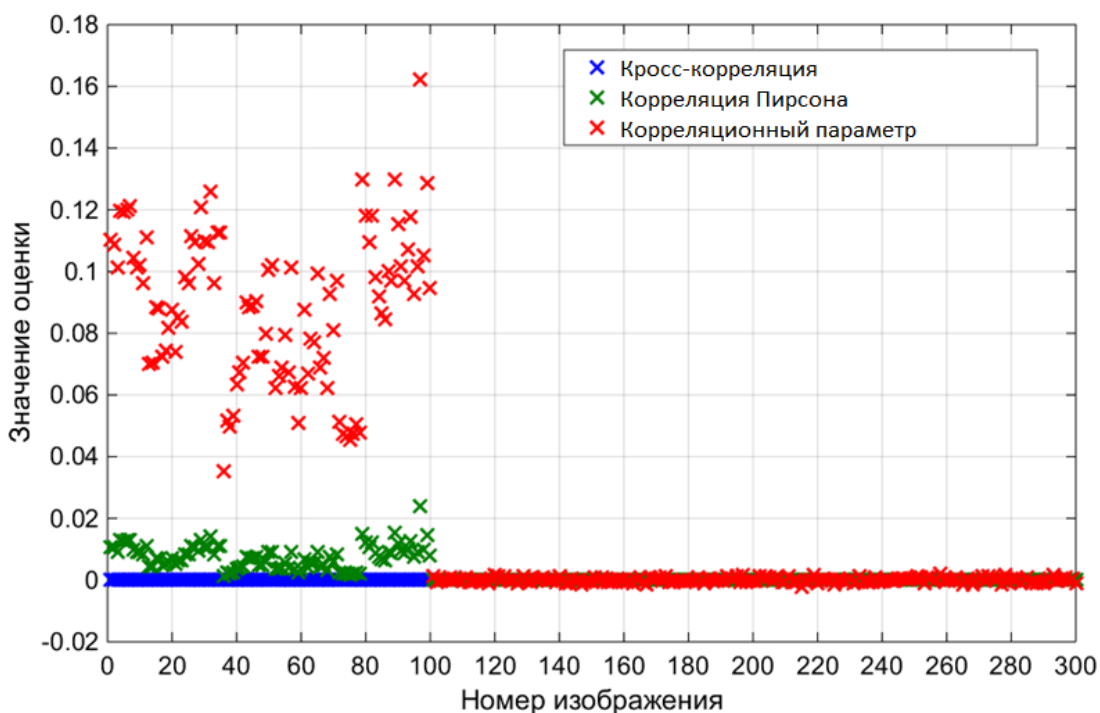


Рис. 3.10. Сравнение корреляционных методов

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.

3.6. Краткие выводы

Рассмотрено качество работы алгоритма в зависимости от параметров используемых цифровых изображений. Проведено тестирование алгоритма на оригинальной базе цифровых изображений. Добавление изображений в набор для формирования собственного признака увеличивает значение критерия на 2%. Рекомендуемое количество изображений в наборе – до 15, при этом рост значения оценки составляет в среднем 9%. Исследование работы алгоритма относительно размера используемых изображений показало, что он работоспособен в большом диапазоне размеров анализируемых изображений. Однако увеличение размера ведет к уменьшению быстродействия вычислительного устройства.

Проведено исследование качества работы алгоритма в зависимости от формата используемых изображений. Значение метрики корреляции для форматов сжатия PNG и TIFF наибольшее, поскольку они не предполагают сжатие данных. Однако наиболее распространенным форматом в современных устройствах фотофиксации является JPEG. Наилучшим качеством JPEG изображений для работы алгоритма является 75% сжатие относительно наилучшего качества. Следовательно, разработанный алгоритм может быть применен к самым распространённым форматам сжатия цифровых изображений. Для определения устройства фотофиксации по части изображения достаточно области, составляющей 5% от исходного размера изображения.

Установлено, что предложенный выходной критерий алгоритма имеет большую межклассовую различимость по сравнению с обычной кросс-корреляцией и корреляцией Пирсона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации можно сформулировать в следующем виде:

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 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 существующим 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котлова Н.А. Спектральные методы в криминалистике // Фотоника. 2016. №5. С. 76–89.
2. Газизов В.А., Четверкин П.А. Доказательственное значение цифровой фотографии при производстве судебно-экспертных исследований // Судебная экспертиза: дидактика, теория, практика. М.: Изд-во МосУМВД России, 2009. Вып. 4. С. 58–64.
3. Дмитриев Е.Н. Судебная экспертиза фотографических изображений: современное состояние и возможности решения экспертных задач // Судебная экспертиза. Саратов: Изд-во СЮИ МВД России. 2009. №3 (19). С. 73–79.
4. Малюка А.А. Цифровое изображение как объект судебной фото-технической экспертизы // Актуальные проблемы Российского права. М.: Изд-во МГЮА, 2010. №2 (15). С. 431–441.
5. Пономарев И.П. Цифровое алиби // Воронежские криминалистические чтения. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2010. Вып. 12. С. 269–279.
6. Recommendation T.81. Information technology – digital compression and coding of continuous-tone still images requirements and guidelines / The International telegraph and telephone consultative committee. 1993. 186 с.
7. A. Swaminathan, M. Wu, and K. J. Ray Liu. Digital image forensics via intrinsic fingerprints // IEEE Transactions on Information Security and Forensics, vol. 3, pp. 101–117, March 2008.

8. G.H. Chapman, J. Leung, A. Namburete, I. Koren and Z. Koren. Predicting pixel defect rates based on image sensor parameters // Proc. IEEE Int. Symposium on Defect and Fault Tolerance, 408-416, Vancouver, Canada, Oct. 2011.
9. G.H. Chapman, J. Leung, R. Thomas, I.Koren, and Z. Koren Projecting pixel defect rates based on pixel size, sensor area and ISO // Proc. Electronic Imaging, Sensors,Cameras, and Systems for Industrial/Scientific Applications XII, v.8298, 82980E-1-E-11, San Francisco, Jan 2012.
10. Anselmo Ferreira, Luiz C. Navarro, Giuliano Pinheiro, Jefersson A. dos Santos, Anderson Rocha. Laser printer attribution: Exploring new features and beyond // FSI. 2015. Vol. 247. pp. 105–125.
11. Сжатие данных. Алгоритмы и форматы. [Электронный ресурс] / URL: http://www.proximas.ru/compression_of_data.html. Режим доступа: свободный. (дата обращения: 15.04.2016).
12. Gunturk B. K., Glotzbach J., Altunbasak Y., Schafer R.W., Mersereau R.M. Demosaicking: color filter array interpolation in single chip digital cameras // IEEE Signal Processing Magazine September. 2004. 9.
13. Метаданные в цифровой фотографии. [Электронный ресурс] / URL: <http://www.ixbt.com/digimage/metadxph.shtml>. Режим доступа: свободный. (дата обращения: 20.04.2016).
14. R. Coifman, D. Donoho. Translation-invariant denoising // Wavelets and Statistics (1995). 125–150.

15. Кулешов С.В., Аксенов Ю.А., Зайцева А.А. Подход к идентификации источника снимков с цифровых камер // Инновационная наука. 2015. №5. С. 82–86.
16. D. Donoho, I. Johnstone, Ideal spatial adaption by wavelet shrinkage // Biometrika 8 (1994). 425–455.
17. A.C. Popescu, Statistical tools for digital image forensics, Ph.D. Dissertation, Department of Computer Science, Dartmouth College, Hanover, NH, 2005. Available from: <http://www.cs.dartmouth.edu/farid/publications/apthesis05.html/>
18. B. Mahdian, S. Saic, Detection of copy–move forgery using a method based on blur moment invariants // Forensic Science International 171 (2–3). 2007. pp. 180–189.
19. A. Popescu, H. Farid, Exposing digital forgeries by detecting traces of re-sampling // IEEE Transactions on Signal Processing 53 (2). 2005. pp. 758–767.
20. A. Popescu and H. Farid, “Exposing digital forgeries in color filter array interpolated images” // IEEE Transactions on Signal Processing, 2005. vol. 53, no. 10, pp. 3948–3959
21. Schöberl M., Senel C., Föfel S., Bloss H., Kaup A. Nonlinear Dark Current Fixed Pattern Noise Compensation for Variable Frame Rate Moving Picture Cameras // 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2009. Vol. 1, Glasgow, Scotland, pp. 268–272.
22. A.C. Gallagher and T. Chen. Image authentication by detecting traces of demosaicing // Proc. CVPR WVU Workshop, 2008.

23. J. Fridrich, D. Soukal, J. Lukas, Detection of copy-move forgery in digital images // Proceedings of Digital Forensic Research Workshop, IEEE Computer Society, Cleveland, OH, USA. 2003. pp. 55–61.
24. C.K. Chui, Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications, Academic Press, New York. 1992.
25. S.G. Mallat, A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 11 (7). 1989. pp. 674–693.
26. T. Brox, D. Farin, P.H.N. de With, Multi-stage region merging for image segmentation // Proceedings of the 22nd Symposium on Information Theory in the Benelux. 2001.
27. Z. Yu, C. Bajaj, Image segmentation using gradient vector diffusion and region merging // International Conference on Pattern Recognition. 2. 2002. 20941.
28. C. Brice, C. Fennema, Scene analysis using regions // Computer Methods in Images Analysis. 1 (3–4). 1970. pp. 205–226.
29. Kharrazi M., Sencar H.T., and Memon N. Blind Source Camera Identification // Proc. ICIP' 04, Singapore, 2004. October 24–27.
30. Yanmei fang, A.E. dirik, Xiaoxi sun, Nasir Memon. Source class identification for DSLR and compact cameras // IEEE'2009.
31. J. Pers and S. Kovacic. Nonparametric, model-based radial lens distortion correction using tilted camera assumption / In Kropatsch (Eds.) // Proceedings of the Computer Vision Winter Workshop 2002, pp. 286–295.

32. Bigas, M., Cabruja, E., Forest, J., Salvi, J. Review of CMOS image sensors // *Microelectronics Journal*, 2006, Vol. 37, pp. 433–451.
33. Gamal A.E., Fowler B., Min H., Liu X. Modeling and estimation of FPN components in CMOS image sensors // *International Society for Optics and Photonics*, 1998, Vol. 3301, pp. 168–177.
34. Liebe C.C. Star trackers for attitude determination // *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995, Vol. 10, pp. 10–16.
35. Liu, H.B., Wang, J., Tan, J., Yang, J., Jia, H., Li, X. “Autonomous on-orbit calibration of a star tracker camera // *Optical Engineering*, 2011, Vol. 50, pp. 023604.
36. Farid H. and Lyu, S. Detecting Hidden Messages Using Higher-Order Statistics and Support Vector Machines // F.A.P. Petitcolas (ed.): *5th International Workshop on Information Hiding*, LNCS vol. 2578, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, New York, 2002. pp. 340–354.
37. Kurosawa, K., Kuroki, K., and Saitoh, N. CCD Fingerprint Method - Identification of a Video Camera from Videotaped Images // *Proc of ICIP' 99*, Kobe, Japan, October 1999. pp. 537–540.
38. Holst G.C. *CCD Arrays, Cameras, and Displays*, 2nd edition, JCD Publishing & SPIE Pres, USA, 1998.
39. Janesick J.R. *Scientific Charge-Coupled Devices*, SPIE PRESS Monograph vol. PM83, SPIE–The International Society for Optical Engineering, January, 2001.
40. “Dark Frame Subtraction,” Qimage help, available: <http://www.ddisoftware.com/qimage/qimagehelp/dark.htm>.

41. Janesick J.R. Dueling Detectors // OE Magazine, February 2002. vol. 2(2).
42. D. Fu, Y.Q. Shi, W. Su, A generalized benford's law for jpeg coefficients and its applications in image forensics // SPIE Electronic Imaging: Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents, San Jose, CA, USA, January 2007.
43. C. Rey, J.-L. Dugelay, A survey of watermarking algorithms for image authentication // EURASIP Journal on applied Signal Processing Volume 2002 N6 – June 2002, special issue on image analysis for multimedia interactive services, 2002, pp. 613–621.
44. M.K. Johnson, H. Farid, Exposing digital forgeries by detecting inconsistencies in lighting // Proceedings of the 7th Workshop on Multimedia and Security, ACM, New York, NY, USA, 2005, pp. 1–10.
45. J. Lukas, J. Fridrich, M. Goljan, Digital camera identification from sensor pattern noise // IEEE Transactions on Information Forensics and Security 1 (2) (2006) 205–214.
46. B. V. K. Vijay Kumar and L. Hasebrook Performance measures for correlation filters // Appl. Opt. 29, pp. 2997–3006 (1990).
47. Fan Z. and de Queiroz R. L. Identification of Bitmap Compression History: JPEG Detection and Quantizer Estimation // IEEE Transactions on Image Processing, vol. 12, No. 2, February 2003, pp. 230–235.
48. Fridrich J., Goljan M., and Du R. Steganalysis Based on JPEG Compatibility // Special session on Theoretical and Practical Issues in

Digital Watermarking and Data Hiding, Multimedia Systems and Applications IV, Denver, Co, USA, August 19–24, 2001, pp. 275–280.

49. Fridrich J., Goljan M., and Hoge D. Attacking the OutGuess // Proc. Multimedia and Security, Workshop at ACM Multimedia, Juan-les-Pins, France, December 6, 2002.

50. Fridrich J., Goljan M., and Hoge D. Steganalysis of JPEG Images: Breaking the F5 Algorithm // Proc. 5th International Workshop on Information Hiding, Noordwijkerhout, The Netherlands, October 7–9 2002, pp. 310–323.

51. Баранцев А.А. Алгоритмы вейвлет-анализа и компенсации геометрических шумов сигналов телевизионных систем с матричными фотоприемниками: дис. ... канд. т. наук: 05.13.01. Рязань, 2012. 145 с.

52. Чумаченко А.Б. Разработка и исследование алгоритмов и методик идентификации цифровых устройств записи по создаваемым ими цифровым образам: дис. ... канд. т. наук: 05.03.19. Таганрог, 2010. 150 с.

53. Рублёв Д.П., Фёдоров В.М., Чумаченко А.Б., Макаревич О.Б. Установление авторских прав по неоднородностям цифровых образов. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2008. Вып. № 8. Т. 85. С. 141–147.

54. H. T. Sencar, and N. Memon Overview of State-of-the-art in Digital Image Forensics // Part of Indian Statistical Institute Platinum Jubilee Monograph series titled Statistical Science and Interdisciplinary Research, World Scientific Press, 2008.

55. Aminova, E., Trapeznikov, I., and Priorov, A.: Overview of digital forensics algorithms in DSLR cameras, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W4, 199-205, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W4-199-2017, 2017.

56. Aminova E., Trapeznikov I., Priorov A., Khryashchev V. DSLR Imperfections Extraction From Image For Source Detection // *Proceedings of the 22th Conference of Open Innovations Association FRUCT'22*. Jyväskylä, Finland, 15-18 May 2018. P. 12–18.

57. Аминова Е.А., Трапезников И.Н., Приоров А.Л. Определение устройства формирования цифрового изображения на основе собственных шумовых признаков // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2018. № 5. С. 46–53.

58. Аминова Е.А., Трапезников И.Н., Приоров А.Л., Брюханов Ю.А. Применение алгоритма определения устройства фотофиксации для различных параметров цифровых изображений // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2018. № 6. С. 60–68.

59. Аминова Е.А., Потапов Е.В., Романов А.А. Верификация изображений на основе уникального отпечатка матрицы устройства // *Доклады 17-ой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение»*. Москва, 2015. С. 694–696.

60. Аминова Е.А. Обзор основных шумов матрицы цифровых устройств // *Материалы международной научно-практической конференции «Роль науки в развитии общества»*. Уфа, 2015. С. 9–11.

61. Аминова Е.А., Трапезников И.Н. Разработка алгоритма верификации цифровых изображений на основе уникальных шумов

матрицы устройства // Тезисы докладов XIII всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение». Москва, 2015. С. 57–58.

62. Аминова Е.А. Потапов Е.В., Романов А.А. Идентификация цифрового устройства на основе шумов матрицы // Доклады LXX международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». Москва, 2015. С. 23-25.

63. Аминова Е.А. Анализ шумов матрицы в задаче идентификации цифрового устройства // Тезисы научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления». Москва, 2015. С. 12.

64. Аминова Е.А., Носков А.А. Комбинированный метод идентификации цифровых устройств фотофиксации // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPА-2016): докл. 18-й междунар. конф. Москва, 2016. Т. 2. С. 700–703.

65. Аминова Е.А., Носков А.А. Двухклассовая и мультиклассовая идентификации цифровых устройств фотофиксации // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС-2016: сб. докл. междунар. конф. Москва, 2016. Т. 2. С. 375–378.

66. Аминова Е.А. Влияние интерполяции и способа формирования изображения на идентификацию цифровых устройств фото фиксации // Сборник статей международной научно-

практической конференции "Научные исследования и разработки в эпоху глобализации" Волгоград, 2017. Т. 2. С. 10–13.

67. Аминова Е.А., Трапезников И.Н. Интерполяция в задаче верификации изображений цифровых устройств фото фиксации // XV Всероссийская научная конференция «Нейрокомпьютеры и их применение»: Тезисы докладов. – М: ФГБОУ ВО МГППУ, 2017. С. 92–94.

68. Аминова Е.А. Определение интерполяционных признаков формирования изображения в устройствах фото фиксации // Техническое зрение в системах управления: Тезисы 8-й научно-технической конференции, ТЗСУ-2017. Москва, 2017. С. 85–86.

69. Аминова Е.А., Трапезников И.Н. Определение необходимого для верификации цифровых изображений количества признаков // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2017): докл. 19-й междунар. конф. – Москва, 2017. Т. 2. С. 632–636.

70. Аминова Е.А., Трапезников И.Н. Формирование карты оптических признаков DSLR камеры на основе артефактов пыли // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС-2017: сб. докл. междунар. конф. Москва, 2017. С. 280-284.

71. Аминова Е.А., Приоров А.Л. Разработка и анализ алгоритма детектирования синтезированных изображений // Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017: Материалы 12-ой международной научно-технической конференции – Суздаль, 2017. С. 181–183.

72. Аминова Е.А., Трапезников И.Н., Приоров А.Л. Определение источника формирования цифрового изображения для различных форматов хранения данных // Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2018: Техническое зрение в системах управления – 2018: сб. тез. докл. научно-техн. конф. Москва, 2018. С. 11-12.

73. Аминова Е.А., Приоров А.Л. Применение алгоритма определения устройства фото фиксации для различных размеров цифрового изображения // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPА-2018): докл. 20-й междунар. конф. Москва, 2018. Т. 2. С. 640–644.

74. Аминова Е.А., Трапезников И. Н. DSLR_dust – программное обеспечение для обнаружения оптических искажений на цифровых изображениях // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615786 от 24 мая 2017.

75. Аминова Е.А., Трапезников И. Н., Приоров А.Л. Camera_FP – программное обеспечение для построения шумового распределения цифровых фотокамер // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613062 от 02 марта 2018.

76. Аминова Е.А., Трапезников И.Н., Приоров А.Л. FotoVer — программное обеспечение для идентификации устройства формирования цифрового изображения // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613593 от 19 марта 2018.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Визуальные примеры структурных шумов матриц цифровых устройств

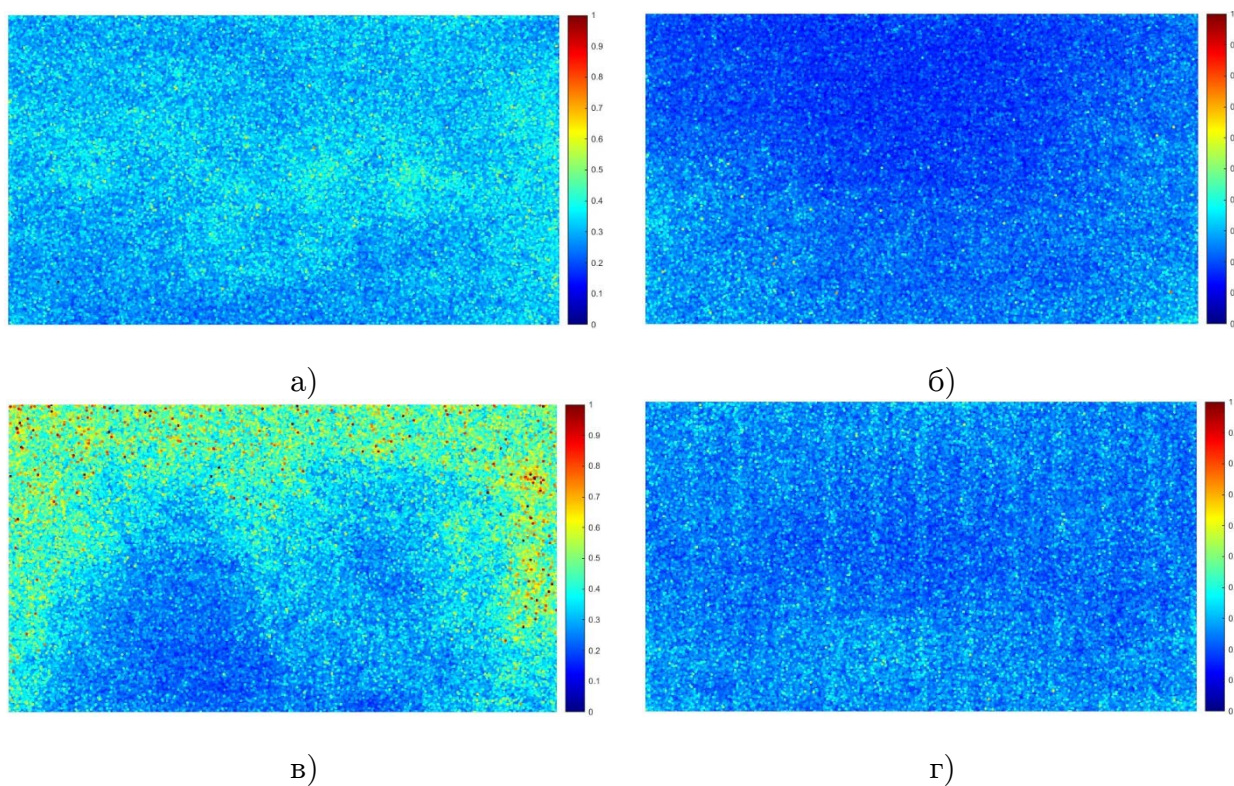


Рис. А.1. Двумерные распределения структурных шумов цифровых устройств фотофиксации: а) Sony DSLR A700; б) Sony DSC W80; в) Panasonic DMC-FS5; г) Canon EOS 5D

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ



Рис. Б.1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017615786

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018613593

«FotoVer — программное обеспечение для идентификации устройства формирования цифрового изображения»

Правообладатели: *Аминова Елена Альбертовна (RU), Приоров Андрей Леонидович (RU), Трапезников Илья Николаевич (RU)*

Авторы: *Аминова Елена Альбертовна (RU), Трапезников Илья Николаевич (RU), Приоров Андрей Леонидович (RU)*

Заявка № 2018610849

Дата поступления 29 января 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 марта 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


 Г.П. Ивлиев



Рис. Б.2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018613593

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018613062

Camera_FP - программное обеспечение для построения шумового распределения цифровых фотокамер

Правообладатели: *Аминова Елена Альбертовна (RU), Приоров Андрей Леонидович (RU), Трапезников Илья Николаевич (RU)*

Авторы: *Аминова Елена Альбертовна (RU), Трапезников Илья Николаевич (RU), Приоров Андрей Леонидович (RU)*

Заявка № 2018610352

Дата поступления 16 января 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 марта 2018 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Рис. Б.3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018613062

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты внедрения результатов работы

150000, г. Ярославль, ул. Республиканская д.23
тел: +7 (4852) 51 32 12 e-mail: ekc76@mvd.ru
р/с № 40101810700000010010
ИНН 7604016045 КПП 760401001 БИК
047888001

УТВЕРЖДАЮ
Бриг начальника
Экспертно-криминалистического
центра УМВД России по Ярославской
области

И.В. Сироткин
«13» июля 2018 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Аминовой Елены Альбертовны, выполненной в Ярославском государственном университете имени П.Г. Демидова (ЯрГУ), на тему «Разработка и анализ алгоритмов идентификации источников цифровых изображений».

Комиссия в составе: председатель комиссии – начальник отдела компьютерных экспертиз и технологий С.М. Воробьев, члены комиссии – старший эксперт отдела Скопинцев Я.М., эксперт Фурмавнин С.А., рассмотрев диссертационную работу Аминовой Е.А., составила настоящий акт о том, что ее результаты нашли применение в работе ЭКЦ УМВД России по Ярославской области. Особый практический интерес представляют следующие результаты диссертации:

1. Реализация алгоритма идентификации устройства фиксации цифрового изображения.
2. Методика использования цифровых изображений в качестве входных данных для алгоритма идентификации устройства фиксации цифровых изображений

Разработанные алгоритмы использованы при проведении предварительного анализа полученных на судебно-техническую экспертизу цифровых улик — цифровых изображений со съемных носителей информации. Их использование позволило сократить время на проведение экспертизы и повысить вероятность принятия верного решения в отношении установления истинного происхождения цифрового изображения.

Председатель комиссии _____ С.М. Воробьев
Члены комиссии _____ Я.М. Скопинцев
_____ С.А. Фурмавнин

Рис. В.1. Акт внедрения в производственный процесс
Экспертно-криминалистического центра УМВД России по Ярославской области

150003, г. Ярославль, ул. Победы, 16Б.
ИНН: 7606095476 КПП: 760601001
ОГРН: 1147606005447
Р/с: 40601810378883000001
ДФ ЯО (ГБУ ЯО «Электронный регион»
904050016)
Отделение Ярославль г. Ярославль
Тел./Факс (4852) 49-09-49
info@er76.ru; www.er76.ru

УТВЕРЖДАЮ
Директор государственного
бюджетного учреждения Ярославской
области «Электронный регион»
С.Э. Половников
«18» июля 2018 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Аминовой Елены Альбертовны, выполненной в Ярославском государственном университете имени П.Г. Демидова (ЯрГУ), на тему «Разработка и анализ алгоритмов идентификации источников цифровых изображений».

Комиссия в составе: председатель комиссии – директор С.Э. Половников, члены комиссии – заместитель директора Дуплов Д.Ф., начальник центра выпуска и обслуживания СКП ЭП Мальцева Н.Ю., рассмотрев диссертационную работу Аминовой Е.А., составила настоящий акт о том, что ее результаты нашли применение в работе Удостоверяющего центра ГБУ ЯО «Электронный регион». Особый практический интерес представляют следующие результаты диссертации:

1. Программная реализация алгоритма идентификации устройства фиксации цифрового изображения, применяемая для проведения экспертизы предоставляемых цифровых документов.
2. Методика использования цифровых изображений в качестве входных данных для алгоритма идентификации устройства фиксации цифровых изображений.

Разработанные алгоритмы использованы при проверке подлинности цифровых документов для аутентификации личности. Их использование позволило модернизировать программные средства удостоверяющего центра с целью повышения вероятности принятия верного решения в отношении подтверждения информации об источнике формирования цифрового документа.

Председатель комиссии

Члены комиссии




 С.Э. Половников
 Д.Ф. Дуплов
 Н.Ю. Мальцева

Рис. В.2. Акт внедрения в производственный процесс Удостоверяющего центра ГБУ ЯО «Электронный регион»

"УТВЕРЖДАЮ"

Первый проректор Ярославского
государственного университета
им. П.Г. Демидова



С.А. Кащенко

06 2018 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Аминовой Е.А. на тему
«Разработка и анализ алгоритмов идентификации источников цифровых
изображений» в учебный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой инфокоммуникаций и радиофизики, профессор, д.т.н. Брюханов Ю.А. и доцент кафедры инфокоммуникаций и радиофизики, к.т.н. Дубов М.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Аминовой Е.А. внедрены в учебный процесс на кафедре инфокоммуникаций и радиофизики физического факультета ЯрГУ (направление «Радиотехника»)

- в курсе «Цифровая обработка изображений» – алгоритм детектирования структурного шума матрицы источника формирования цифрового изображения;
- в курсе «Системы технического зрения» – алгоритм идентификации устройства фиксации цифровых изображений.

Заведующий кафедрой
инфокоммуникаций и радиофизики,
д.т.н., профессор

Ю.А. Брюханов

Доцент кафедры
инфокоммуникаций и радиофизики,
к.т.н.

М.А. Дубов

Рис. В.3. Акт внедрения в учебный процесс ЯрГУ

"УТВЕРЖДАЮ"

Первый проректор Ярославского
государственного университета
им. П.Г. Демидова

С.А. Кашенко

2018 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Аминовой Елены Альбертовны на тему «Разработка и анализ алгоритмов идентификации источников цифровых изображений» в научно-исследовательские работы

Результаты диссертационной работы Аминовой Е.А., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», использованы в научно-исследовательских работах:

- при выполнении НИР «Повышение информационной емкости цифровых изображений на основе анализа характерного шума матрицы устройства фотовидеофиксации» (грант РФФИ № 16-37-00301) внедрены: алгоритм детектирования структурного шума матрицы источника формирования цифрового изображения, алгоритм идентификации устройства фиксации цифровых изображений.

Заведующий кафедрой
инфокоммуникаций и радиофизики,
профессор, д.т.н.

Ю.А. Брюханов