

Исследование методов предварительной обработки изображений в задаче обнаружения дубликатов на изображении

А.В. Кузнецов^{а,б}, В.В. Мясников^{а,б}

^а Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

^б Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

Аннотация

Процесс создания дубликата на изображении включает в себя в копирование фрагмента изображения из одной области в другую область того же изображения. При этом копируемый фрагмент подвергается искажению: яркостным, геометрическим или их комбинациям. В данной работе предлагается исследование методов предварительной обработки изображений в рамках подхода, основанного на вычислении хэш-значений в скользящем окне [1,2]. Предварительная обработка заключается в препарировании исходного изображения при помощи одного из преобразований: снижение яркостного диапазона, вычисление градиента, разложение поля яркости по ортонормированному базису, адаптивное линейное контрастирование, локальный бинарный шаблон. Исследование позволит оценить влияние каждого преобразования на качество обнаружения дубликатов в зависимости от вносимых яркостных искажений.

Ключевые слова: дубликат; алгоритм обнаружения; предварительная обработка; хэш-значение

1. Введение

Одним из наиболее распространенных способов фальсификации изображений является встраивание дубликата. Процесс встраивания состоит из трех этапов: копирование фрагмента, внесение в этот фрагмент изменений (яркостные или геометрические) и вставка фрагмента в ту область изображения, содержимое которой предполагается скрыть от конечного пользователя. В данной работе под искажениями будем понимать яркостные искажения, включающие линейное контрастирование, добавление шума и фильтрацию. Пример фальсификации представлен на рис. 1.



Рис. 1. Пример фальсификации изображения.

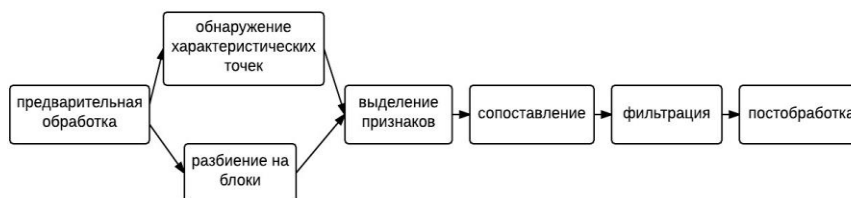


Рис. 2. Схема работы алгоритмов обнаружения дубликатов.

В современных публикациях по обработке изображений можно найти множество разработанных алгоритмов обнаружения дубликатов. Все они соответствуют единой схеме алгоритма, представленной в 2005 году Н. Farid и А. Popescu [3], и отличаются, как правило, только алгоритмами расчёта признакового описания. Данная схема представлена на рис. 2. Из рисунка можно выделить два основных типа алгоритмов в зависимости от используемого метода анализа изображения: на основе вычисления характеристических точек или на разбиении его на блоки. В качестве предварительной обработки в данной схеме применяются алгоритмы фильтрации шума, перевода в другие цветовые пространства и т.д. Признаки для анализа вычисляются либо на основе характеристических точек, либо в рамках разбиения изображения на блоки. Недостатком данной схемы является высокая вычислительная сложность, которая ограничивает использование скользящих окон для вычисления признаков на больших изображениях (>1000 x

1000). Причиной этому является этап сопоставления, в ходе которого производится поиск близких векторов признаков в рамках выбранной метрики. Существующие решения [4] не позволяют добиться существенного выигрыша в производительности.

В простейшем случае, когда этап внесения изменений в дубликат отсутствует, алгоритм обнаружения дубликата был реализован авторами в 2013-2014 г.г. [1, 2]. В основе алгоритма было использование аппарата хэш-функций, значения которых вычислялись в режиме скользящего окна. Предложенный метод продемонстрировал отсутствие пропусков дубликатов и очень низкую долю коллизий ($10^{-5}\%$) [5, 6]. Более того, предложенное решение обладало низкой вычислительной сложностью (по сравнению с существующей схемой на основе вычисления признаков), что позволило использовать его для анализа данных дистанционного зондирования Земли.

В случае, когда дубликаты содержат искажения (яркостные или геометрические), разработанный подход на основе хэш-функции не применим. По этой причине возникает задача преобразования входного изображения, содержащего искаженные дубликаты, таким образом, чтобы привести их к неискаженному виду и применить разработанное решение для поиска неизмененных дубликатов. В рамках этой задачи в работе предлагается сравнение методов предварительной обработки: снижение яркостного диапазона, вычисление градиента, разложение поля яркости по ортонормированному базису или адаптивное линейное контрастирование. Сравнение выполняется в смысле выбранного критерия качества обнаружения яркостно-искаженных дубликатов. Под искажениями в работе понимаются следующие яркостные искажения: яркостное смещение, линейное контрастирование, аддитивный белый шум.

2. Общая схема работы алгоритма обнаружения дубликатов

В основе предлагаемого решения, как было сказано выше, находится алгоритм обнаружения неискаженных дубликатов, ранее разработанный авторами [1, 2]. Алгоритм базируется на вычислении значений хэш-функции Рабина-Карпа [5] в скользящем окне и помещении этих значений в хэш-таблицу для подсчета количества одинаковых хэш-значений. Таким образом для использования этого алгоритма необходимо добиться приведения яркостно-искаженных дубликатов к неискаженному виду. Для решения этой задачи вводится этап препарирования входного изображения (рис. 3) при помощи одного из преобразований:

- снижение яркостных уровней путем квантования;
- вычисление градиента;
- разложение поля яркости по ортонормированному базису;
- адаптивное линейное контрастирование.

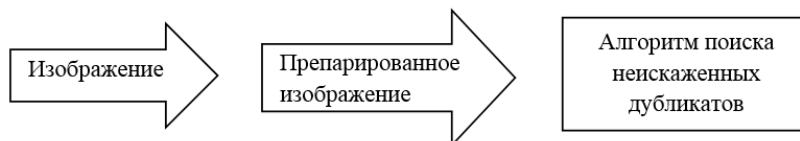


Рис. 3. Общая схема поиска искаженных дубликатов.

В следующем разделе будут подробно описаны способы препарирования исходного изображения, содержащего искаженные дубликаты.

3. Способы преобразования исходного изображения

3.1. Снижение яркостного диапазона

Самым очевидным способом снижения зависимости от яркостных искажений является уменьшение яркостного диапазона. Для этого производится снижение числа уровней квантования. Пусть значение каждого пикселя изображения $f(m, n) \in [0, 2^8 - 1]$, что соответствует 256 уровням квантования. Будем уменьшать число уровней квантования согласно следующему правилу:

$$g(m, n) = \frac{f(m, n)}{2^\varepsilon}, \tag{1}$$

где $\varepsilon = 1..7$ характеризует снижение уровней квантования до $2^{8-\varepsilon}$.

На рис. 4 показан пример снижения числа уровней квантования.

Помимо изображения, получаемого при помощи (1), создается 2ε изображений, отсчеты каждого из них вычисляются по следующей формуле:

$$g_i(m, n) = \frac{f(m, n) + i}{2^\varepsilon}, i \in [-\varepsilon, \varepsilon] \setminus \{0\}. \tag{2}$$

После этого производится обработка алгоритмом обнаружения неискаженных дубликатов $2\varepsilon + 1$ изображений, а результаты обработки объединяются.



Рис. 4. Результат снижения числа уровней квантования.

3.2. Вычисление значения градиента

Одним из наиболее простых способов выделения границ является пространственное дифференцирование функции яркости. Будем вычислять градиент для каждой точки изображения (функция яркости), а именно двумерный вектор, компонентами которого являются производные яркости изображения по горизонтали и вертикали:

$$\Delta f(x, y) = \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right) \tag{3}$$

В каждой точке изображения градиентный вектор ориентирован в направлении наибольшего увеличения яркости, а его длина соответствует величине изменения яркости. Так как направление может быть произвольным, для нахождения значения градиента функции яркости изображения будем вычислять длину вектора по следующей формуле, а результат хранить в промежуточном изображении $\tilde{f}(m, n)$:

$$\tilde{f}(m, n) = \sqrt{(f(m, n) - f(m + 1, n))^2 + (f(m, n) - f(m, n + 1))^2} . \tag{4}$$

Результат выделения границ $\tilde{f}(m, n)$ градиентным методом представлен на рис. 5.



Рис. 5. Результат выделения границ градиентным методом.

После получения изображения $\tilde{f}(m, n)$, оно подвергается бинаризации согласно следующему правилу:

$$\hat{f}(m, n) = \begin{cases} 1, & \tilde{f}(m, n) > \tilde{f}(m, n + 1) \mid \tilde{f}(m, n) > \tilde{f}(m + 1, n) \mid \tilde{f}(m, n) > \tilde{f}(m + 1, n + 1) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \tag{5}$$

После получения бинарного изображения $\hat{f}(m, n) \in \mathbf{B}$ производится последовательное выполнение следующих операций:

- сглаживание изображения фильтром Гаусса окном 3×3 ;
- вычисление модуля градиента (5);
- бинаризация по правилу (6).

Эта последовательность операций выполняется 7 раз. В итоге формируется 8 бинарных изображений $\hat{f}_i(m, n), i \in [0, 7]$, используемых для построения полутонного препарированного изображения:

$$g(m, n) = \sum_{i \in [0,7]} \hat{f}_i(m, n) \cdot 2^i. \quad (6)$$

3.3. Локальное разложение поля яркости изображения по ортонормированному базису

Данный метод основан на разложении значения поля яркости в локальной окрестности 5×5 текущего отсчета по базису. В качестве базиса возьмем линейно-разделимые полиномы, представимые в следующем виде:

$$e_{ij}(x, y) = e_i(x) \cdot e_j(y), \quad (7)$$

где $e_i(x)$ - ортонормированный базис на отрезке $[-2, 2]$, заданный в виде полиномов:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{1}{\sqrt{5}}; \\ e_2 &= \frac{1}{\sqrt{10}} x; \\ e_3 &= \frac{1}{\sqrt{14}} x^2 - \frac{2}{\sqrt{14}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Используя (7) и (8), получаем набор из 9 двумерных фильтров $e_{ij}(x, y)$ размером 5×5 . При этом e_{11} не учитывается, так как представляет из себя усредняющий фильтр. Полученные фильтры используются для построения 8 изображений:

$$\tilde{f}_{ij}(m, n) = \sum_{k=-2}^2 \sum_{l=-2}^2 f(m+k, n+l) \cdot e_{ij}(k, l), i, j \in [1, 3], (i, j) \neq (1, 1). \quad (9)$$

Дополнительным вариантом реализации данного преобразования является добавление этапа нормализации при применении фильтра $e_{ij}(k, l)$:

$$\tilde{f}_{ij}(m, n) = \frac{\tilde{f}_{ij}(m, n)}{\sum_{k=-2}^2 \sum_{l=-2}^2 f^2(m+k, n+l)}. \quad (10)$$

Полученные 8 изображений подвергаются процедуре бинаризации по отношению к своим медианам:

$$\hat{f}_{ij}(m, n) = \begin{cases} 1, & \tilde{f}_{ij}(m, n) > \text{median}(\tilde{f}_{ij}(m, n)) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (11)$$

Полутоновое препарированное изображение формируется по аналогии с (6).

3.4. Адаптивное линейное контрастирование

Яркостное искажение дубликата приводит к изменению его локальных характеристик. Для их восстановления воспользуемся методом адаптивного линейного контрастирования (АЛК), с помощью которого приведем локальные характеристики $\mu_f(m, n), \sigma_f(m, n)$ в окрестности $l \times l$ пикселя $f(m, n)$ к требуемым μ_g, σ_g . Для вычисления параметров линейного контрастирования воспользуемся следующими выражениями:

$$\begin{aligned} a_l(m, n) &= \frac{\sigma_g}{\sigma_f(m, n)}, \\ b_l(m, n) &= \mu_g - \mu_f(m, n) \frac{\sigma_g}{\sigma_f(m, n)}. \end{aligned} \quad (12)$$

После вычисления (12) производится преобразование значений пикселей в окрестности $l \times l$ в скользящем окне:

$$g_l(m, n) = a_l(m, n) \cdot f(m, n) + b_l(m, n). \quad (13)$$

В результате этой операции яркость всего изображения выравнивается и приводится в соответствие к заданным характеристикам μ_g, σ_g .

При необходимости обнаружения искажения в виде яркостного сдвига возможно использовать упрощенную версию АЛК, которая заключается в вычитании локального среднего в скользящем окне. При этом на других видах искажений этот способ будет показывать заведомо худшие результаты (например, при линейном контрастировании дубликата).

Вторым способом адаптивного выравнивая яркости является преобразование значений пикселей в заданной окрестности по следующему правилу (*softmax*):

$$g(m, n) = \frac{e^{f(m, n)}}{\sum_{(m', n') \in D} e^{f(m', n')}}. \quad (14)$$

3.5. Локальный бинарный шаблон

Локальный бинарный шаблон (ЛБШ) часто используется в распознавании образов в качестве признакового описания. Этот вид локальных признаков обладает низкой вычислительной сложностью, инвариантностью к равномерному изменению яркости и позволяет описывать текстуры [7]. На практике оператор ЛБШ совмещает свойства статистического и структурного текстурного анализа, позволяя строить дескрипторы цифровых изображений. Обобщением данного вида шаблонов является локальное порядковое преобразование, описанное в работе Мясникова В.В. [8]. Существует также ряд более сложных форм локальных шаблонов, сравнение которых было представлено авторами в работе [9, 10] в рамках признакового подхода к решению задачи обнаружения искаженных дубликатов.

Идея заключается в сравнении в рамках скользящего окна $3 \times 3 \times 8$ соседних отсчетов с центральным. В зависимости от результата сравнения центральному пикселю ставится в соответствие 8-битное число:

$$g(m, n) = \sum_{\substack{i, j \in [-1, 1] \\ k \in [0, 7]}} I(f(m+i, n+j) \geq f(m, n)) \cdot 2^k, (i, j) \neq (0, 0). \quad (15)$$

Пример вычисления ЛБШ показан на рис. 6.



Рис. 6. Результат вычисления значений ЛБШ.

4. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований был использован стандартный ПК (Intel Core i5-3470 3.2. ГГц, 8 Гб ОЗУ). В качестве объектов исследования были выбраны 10 полутоновых цифровых изображений с размерами 512×512 . Авторами была использована процедура автоматической генерации дубликатов на изображении [9, 10] с возможностью контроля их размеров, количества, а также алгоритма и степени вносимых искажений. Моделировались следующие искажения дубликатов:

1. Яркостный сдвиг (аддитивный параметр $b \in [-20, 20]$).
2. Линейное контрастирование (мультипликативный параметр $a \in [0.6, 0.9]$ и аддитивный параметр $b \in [-20, 20]$).
3. Аддитивный белый шум ($SNR \in [10, 300]$).

Для оценки качества разработанного алгоритма использовалась величина, связывающие количество верно обнаруженных отсчетов дубликатов и значения ошибок первого и второго рода – *F1_score*. Пусть *tp* – количество верно обнаруженных отсчетов дубликатов, *fp* – количество пропущенных отсчетов дубликатов, а *fn* – количество ложно обнаруженных отсчетов дубликатов. Тогда *F1_score* (*F1*) вычисляется следующим образом:

$$F1 = \frac{2 \cdot tp}{2 \cdot tp + fp + fn}. \quad (17)$$

При помощи разработанной процедуры моделирования искажений для каждого из 10 изображений формировалось 90 фальсифицированных изображений (по 30 изображений на каждый вид искажений), которые в дальнейшем обрабатывались алгоритмом обнаружения яркостно-искаженных дубликатов, основанном на 8 различных преобразованиях: снижение числа уровней квантования, вычисление градиента, разложение по базису (с нормализацией и без нее), АЛК, упрощенная версия АЛК, АЛК на основе функции *softmax* и вычисление ЛБШ.

На рис. 7 показано изменение значения F1 при варьировании аддитивного параметра *b* яркостного сдвига дубликата. Как видно из рисунка, использование большинства преобразований приводит к получению высоких значений F1. Хуже всего проявил себя алгоритм при препарировании изображения с помощью снижения числа уровней квантования.

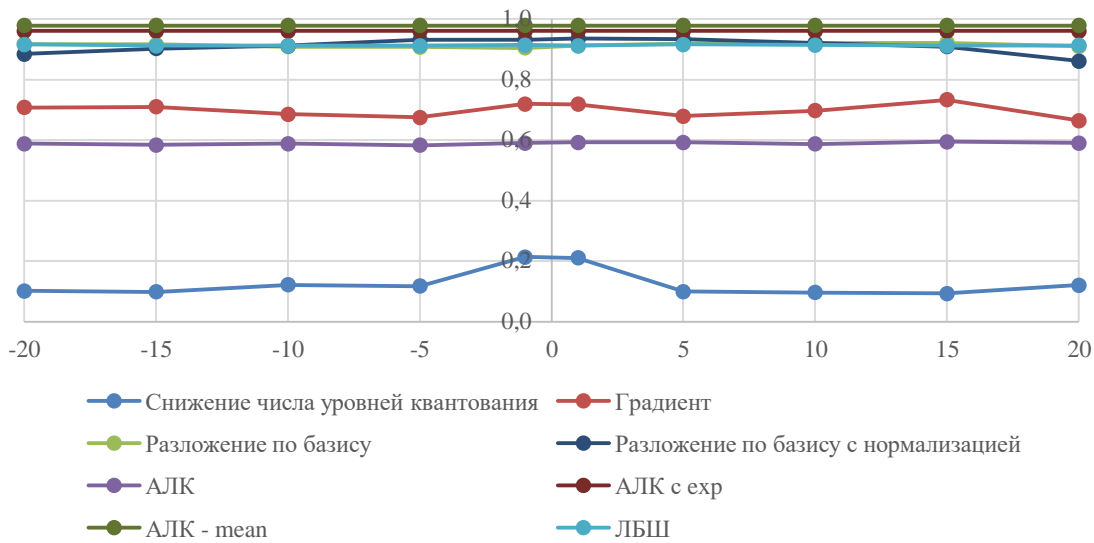


Рис. 7. Зависимость F1 от параметра яркостного сдвига *b*.

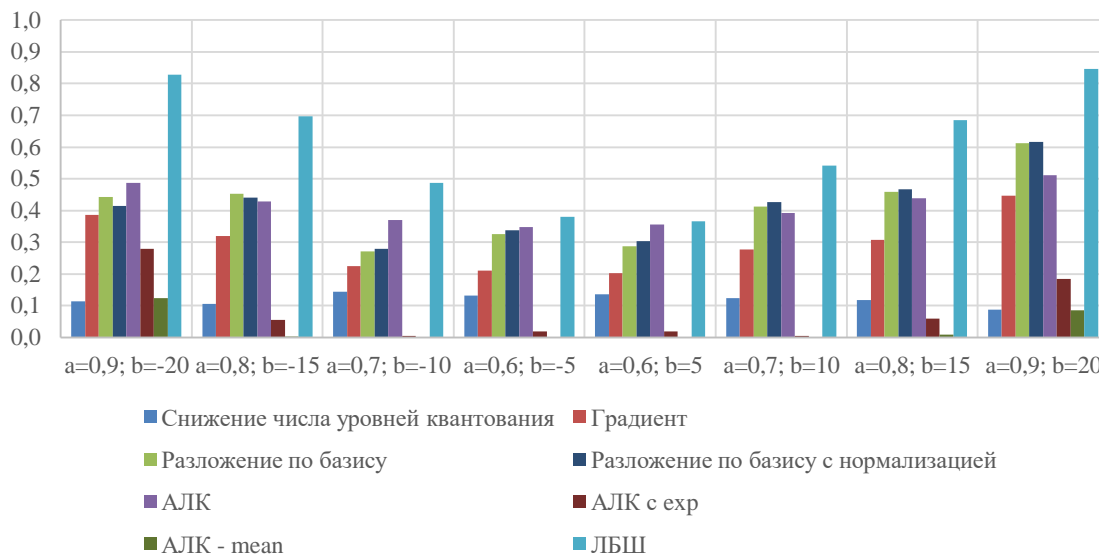


Рис. 8. Зависимость F1 от параметров линейного контрастирования *a* и *b*.

В случае искажения дубликата при помощи линейного контрастирования наилучшим среди преобразований в смысле метрики F1 является вычисление ЛБШ (рис. 8). Следует также отметить, что при снижении значения мультипликативного параметра *a* наблюдается снижение значения метрики F1 для большинства преобразований.

Проверка точности обнаружения дубликатов, искаженных при помощи аддитивного белого шума, проводилась для диапазона изменения соотношения “сигнал/шум” $SNR \in [10, 300]$, где $SNR = \frac{\sigma_{signal}}{\sigma_{noise}}$. Результаты зависимости F1 от значения SNR показаны на рис. 9. Следует отметить, что характер изменения значения F1 является схожим для всех преобразований, за исключением вычисления градиента, АЛК и снижения числа уровней квантования.

В качестве сравнения с подходом к обнаружению дубликатов, схема которого была показана на рис. 2, все проведенные эксперименты были также проведены для алгоритма обнаружения дубликатов на основе вычисления бинарных градиентных контуров [9, 10], который показал высокие результаты в сравнении с другими способами

вычисления локальных шаблонов. На рис. 10, 11 и 12 показаны соответственно зависимости значения $F1$ от изменения параметров искажений дубликатов.

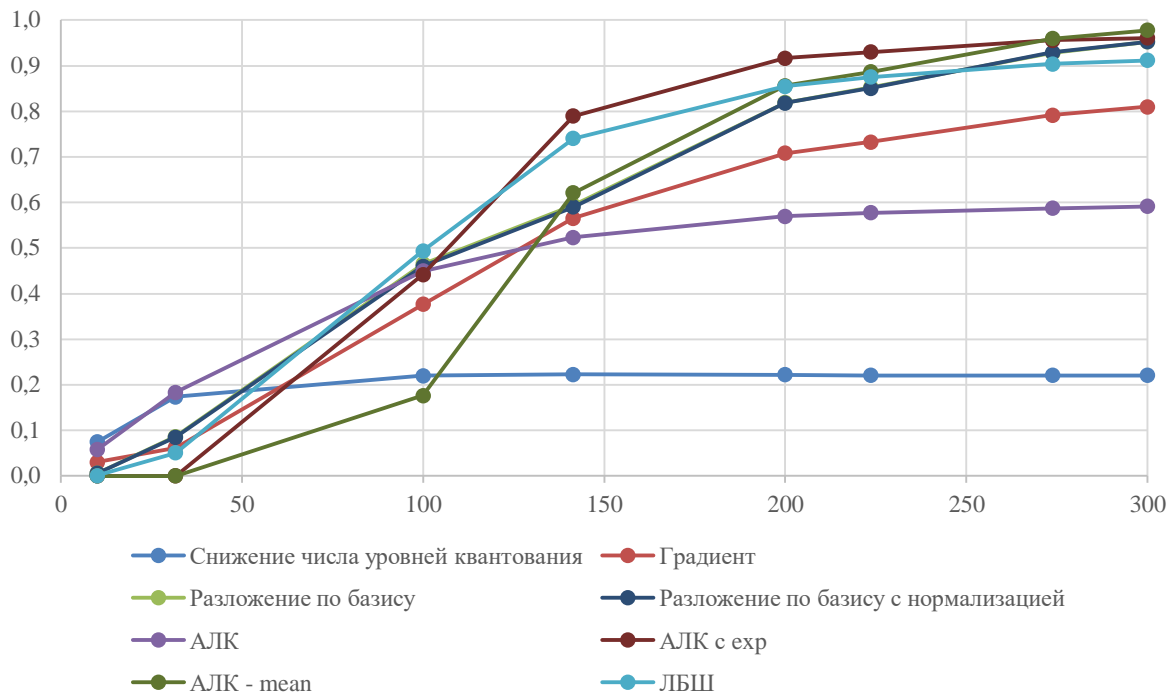


Рис. 9. Зависимость $F1$ от значения SNR.

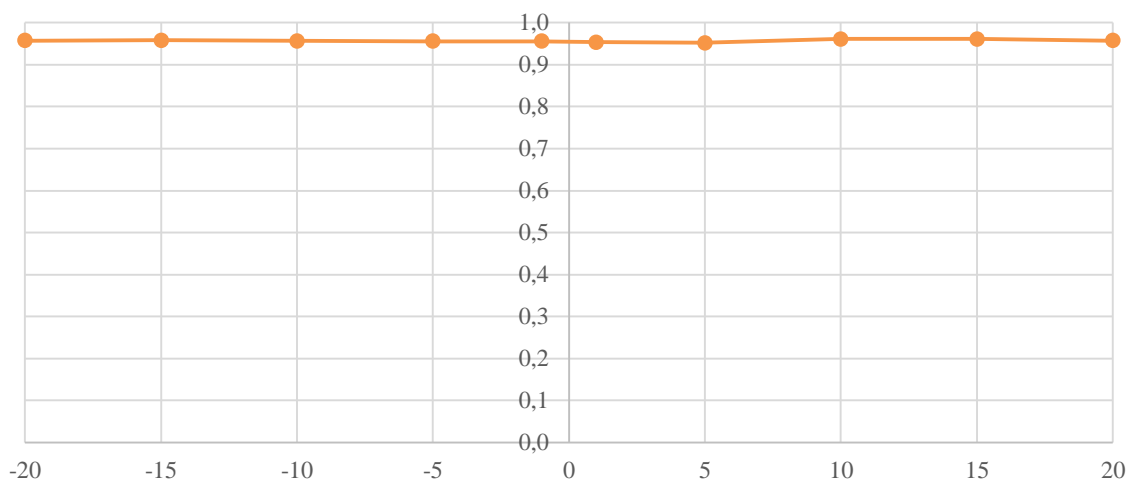


Рис. 10. Зависимость $F1$ от параметра яркостного сдвига b .

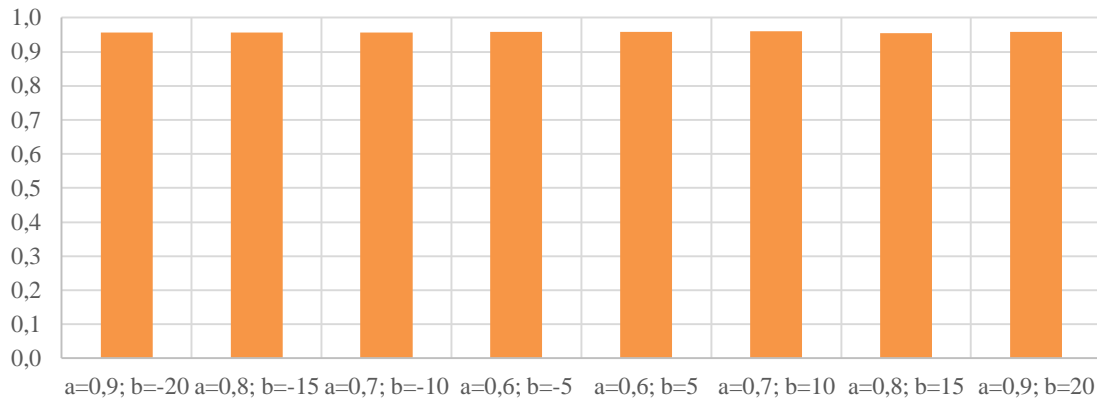


Рис. 11. Зависимость $F1$ от параметров линейного контрастирования a и b .

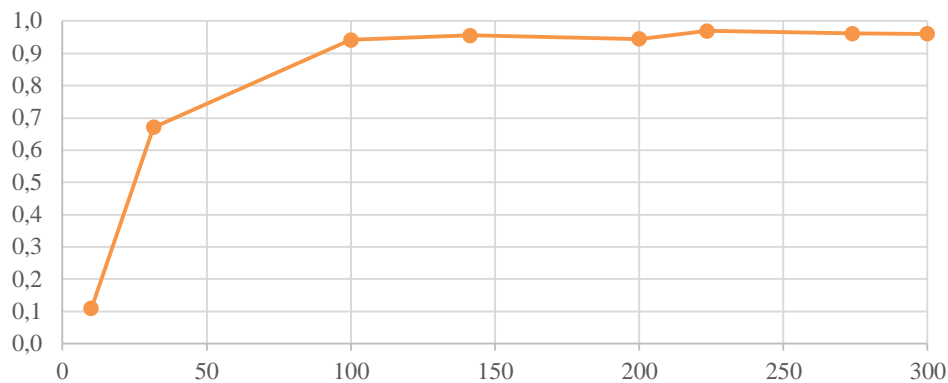


Рис. 12. Зависимость F1 от значения SNR.

Как можно видеть из результатов экспериментов, данный алгоритм показывает высокие результаты в смысле выбранного критерия качества $F1$. Существенно более высокие значения показателя качества наблюдаются при уменьшении мультипликативного коэффициента a линейного контрастирования и при значении соотношения «сигнал/шум» $SNR \in [30, 100]$. При этом вычислительная сложность решения, основанного на вычислении признаков описания, значительно превышает вычислительную сложность предложенного в данной работе подхода.

Учитывая результаты всех экспериментов, продолжение исследований в области методов предварительной обработки изображений в задаче обнаружения искаженных дубликатов является перспективным. При низкой вычислительной сложности есть возможность добиться высоких показателей качества обнаружения в сравнении с известными решениями, значительно превышающими предложенное по сложности.

5. Заключение

В данной работе показано применение предварительных методов обработки изображений в задаче поиска искаженных дубликатов. В качестве объектов исследования были выбраны следующие методы препарирования изображений: снижение яркостного диапазона, вычисление градиента, разложение поля яркости по ортонормированному базису, АЛК, ЛБШ. Проведенные исследования показали устойчивость большинства преобразований к яркостному сдвигу. В случае наличия искажений типа линейное контрастирование использование преобразования на основе ЛБШ привело к высоким значениям показателя качества $F1$ в сравнении с другими методами препарирования. При искажении дубликатов аддитивным белым шумом применение большей части преобразований позволяет обнаруживать их при $SNR > 100$. В дальнейшем планируется продолжить исследование методов предобработки изображений для обнаружения более сложных форм искажения дубликатов или расширения диапазона параметров, при которых обнаружение возможно.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 16-37-00056, № 15-07-01164, № 16-29-09494.

Литература

- [1] Глумов, Н.И. Поиск дубликатов на цифровых изображениях / Н.И. Глумов, А.В. Кузнецов, В.В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 360-367.
- [2] Кузнецов, А.В. Алгоритм обнаружения дубликатов на цифровых изображениях с использованием эффективных линейных локальных признаков / А.В. Кузнецов, В.В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 489-494.
- [3] Popescu, A., Farid, H. Exposing digital forgeries by detecting duplicated image regions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ists.dartmouth.edu/library/102.pdf> (03.02.2017).
- [4] Christlein, V. An Evaluation of Popular Copy-Move Forgery Detection Approaches / V. Christlein, C. Riess, J. Jordan, E. Angelopoulou // IEEE Transactions on information forensics and security. – 2012. – Vol. 7(6). – P. 1841-1854.
- [5] Kuznetsov, A.V. A fast plain copy-move detection algorithm based on structural pattern and 2D Rabin-Karp rolling hash / A.V. Kuznetsov, V.V. Myasnikov // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2014. – Vol. 8814(1). – P. 461-468.
- [6] Kuznetsov, A.V. Remote Sensing Data Copy-Move Forgery Protection Algorithm / A.V. Kuznetsov // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2016. – Vol. 9972. – P. 544-552.
- [7] Wang, L. Texture classification using texture spectrum / L. Wang, D.-C. He // Pattern Recognition. – 1990. – Vol. 23(8), P. 905-910.
- [8] Мясников, В.В. Локальное порядковое преобразование цифровых изображений / В.В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 397-405.
- [9] Кузнецов, А.В. Алгоритм обнаружения искажённых дубликатов на цифровых изображениях с использованием бинарных градиентных контуров / А.В. Кузнецов, В.В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 284-293.
- [10] Kuznetsov, A. A copy-move detection algorithm using binary gradient contours / A. Kuznetsov, V. Myasnikov // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2016. – Vol. 9730. – P. 349-357.