

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ СИММЕТРИЧНОГО КЛОНИРОВАНИЯ ПРИ ФАЛЬСИФИКАЦИИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

А.А. Кобозева, В.В. Зорило, Е.Ю. Лебедева

Одесский национальный политехнический университет,
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: zorilovika@mail.ru

Предлагается теоретически обоснованная модификация метода выявления результатов одного из наиболее часто используемых при фальсификациях цифровых изображений инструментов, реализованных в большинстве графических редакторов – клонирования, разработанного авторами ранее. Базовый метод основан на анализе сингулярных чисел блоков матрицы изображения. Предложенная модификация позволяет эффективно выявлять замещающие области, симметрично отраженные по вертикали/горизонтали и/или подвергнутые повороту на угол, кратный 90° , что подтверждается приведенными результатами вычислительных экспериментов. Разработанный метод может быть эффективно использован для выявления фальсификации цифрового видео.

Ключевые слова: фальсификация цифровых изображений, клонирование, симметричное клонирование, фотомонтаж, матрица, сингулярное число

Введение

Цифровые изображения (ЦИ) в настоящее время стали неотъемлемой частью бытовой и профессиональной деятельности человека. Развитие цифровой техники для создания и редактирования ЦИ, а также общедоступность графических редакторов обуславливает необходимость усовершенствования существующих и создания новых методов выявления нарушений целостности ЦИ.

Часто при обработке ЦИ, в частности, при их фальсификации, возникает необходимость дублирования или удаления каких-либо объектов. Удобнее всего с точки зрения сохранения надежности восприятия получаемого изображения использовать для этого фрагменты того же изображения: замещающие области (ЗО) выбираются, как правило, вблизи обрабатываемого объекта, чтобы минимизировать отличия света/тени, яркости/контрастности. И в случае дублирования объекта, и в случае его сокрытия происходит копирование групп пикселей из одной части изображения в другую путем параллельного переноса. Данная операция часто производится с помощью инструмента, реализованного в большинстве графических редакторов, называемого Штамп (Клон). Разновидностью клонирования является симметричное клонирование (СК) – зеркальное отображение клонированной области в горизонтальной/вертикальной плоскостях.

В настоящий момент в открытой печати широко обсуждаются вопросы разработки методов и алгоритмов, целью которых является выявление клонированных участков ЦИ, однако существующие современные методы и алгоритмы не лишены значительных недостатков: большинство из них требует значительных вычислительных затрат [1–5], самые эффективные из них (алгоритмы SIFT и SURF [6, 7]) недостаточно эффективны для объектов простой формы и без ярко выраженной текстуры, а также в случае

клонированных участков малого размера, ориентированы на форматы хранения изображения [8].

Все вышесказанное оставляет важной и актуальной задачу разработки принципиально новых методов и алгоритмов выявления клонированных участков изображения.

Цель статьи и постановка исследований

В [9] на основе общего подхода к анализу состояния и технологии функционирования информационных систем [10] был разработан новый метод выявления клонированных областей. Идея метода состояла в нахождении блоков матрицы изображения, имеющих одинаковые сингулярные числа (СНЧ), реализуемая при помощи анализа матрицы клонирования [9]. В связи с тем, что основная информация ЦИ несет низкими частотами, которые, в свою очередь, отвечают, в основном, наибольшим СНЧ [11], с целью уменьшения вычислительных затрат для выявления клонированных блоков, полученных в результате стандартного разбиения матрицы, в разработанном в [9] методе анализ ЦИ проводится путем попарного сравнения на равенство значений сумм 4 наибольших СНЧ блоков между собой. При использовании данного метода для выявления СК было установлено, что при малых размерах замещающей области (30) он является недостаточно эффективным.

Целью работы является повышение эффективности выявления клонированных замещающих областей, симметрично отраженных и/или подвергнутых повороту на угол, кратный 90° , путем модификации метода выявления клонирования, основанного на общем подходе к анализу состояния и теории функционирования информационной системы [9].

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Обосновать теоретически характерные свойства СНЧ симметрично клонированных блоков матрицы цифрового изображения.
- 2) Исследовать особенности проявления свойств сингулярных чисел блоков матрицы цифрового изображения в случае симметричного клонирования и/или поворота на угол, кратный 90° , в системе чисел с плавающей точкой.
- 3) Адаптировать метод выявления клонирования для эффективного выделения клонированных замещающих областей, симметрично отраженных и/или подвергнутых повороту на угол, кратный 90° .

Основная часть

Математически СК области ЦИ представляет собой умножение матрицы клонированной области на матрицу перестановок. Имеет место следующая теорема.

Теорема. Симметричное клонирование не меняет сингулярных чисел подматрицы матрицы цифрового изображения, которая (подматрица) отвечает замещающей области.

Доказательство. Математически СК для части ЦИ с $k \times k$ -матрицей A может быть представлено в матричном виде как: AP (при горизонтальном отражении); PA (при вертикальном); PAP (при отражении по обоим направлениям одновременно), где P — $k \times k$ -матрица перестановок [12]:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Пусть

$$A = U\Sigma V^T \quad (1)$$

— сингулярное разложение матрицы A , где U, V — ортогональные $k \times k$ -матрицы левых и правых сингулярных векторов соответственно, а Σ — диагональная матрица СНЧ A [12]. Тогда для AP с учетом (1) и симметричности P будет иметь место равенство:

$$AP = U\Sigma V^T P = U\Sigma(PV)^T. \quad (2)$$

Поскольку для матрицы PV имеет место равенство:

$$(PV)^T(PV) = V^T P P V = I,$$

где I — единичная матрица соответствующего размера, то (2) представляет сингулярное разложение матрицы AP , сингулярные числа которой представлены диагональю Σ , т.е. совпадают с СНЧ матрицы A .

Для матриц PA и PAP с учетом (1) аналогично получим:

$$PA = (PU)\Sigma V^T, \quad (3)$$

$$PAP = P(U\Sigma V^T)P = (PU)\Sigma(PV)^T, \quad (4)$$

при этом для матрицы PU имеет место равенство:

$$(PU)^T(PU) = U^T P P U = I,$$

т.е. PU , как и PV является ортогональной, а значит (3), (4) представляют сингулярные разложения матриц PA и PAP соответственно, откуда видно, что СНЧ этих матриц совпадают с СНЧ матрицы A , что и требовалось показать.

Таким образом, теоретически доказано, что СК не меняет СНЧ ЗО. Однако, как уже было упомянуто выше, на практике при тестировании разработанного в [9] метода для выявления областей СК возникало значительное количество ошибок первого рода. Для наглядности проиллюстрируем это на примере.

Для выявления СК, как и в случае клонирования без каких-либо дальнейших отражений и поворотов замещающей области, поставим в соответствие ЦИ матрицу клонирования (МК), каждый элемент которой соответствует одному блоку и равен нулю в случае несовпадения значения суммы четырех наибольших СНЧ данного блока со значениями сумм остальных блоков, 1 в случае выявления совпадений. Области, содержащие единицы в МК, соответствуют искомой области фальсификации ЦИ, а также той его части, которая являлась прототипом ЗО.

Фальсифицируем ЦИ способом клонирования одной части ЦИ — замещающей области, в другую часть этого же изображения, отразив при этом клонированную ЗО по горизонтали (рис. 1(а)), повернув ЗО против часовой стрелки на 90° (рис. 2(а)). Отражение по вертикали, а также поворот в любом из направлений на угол, кратный 90°

принципиально не меняет поведения элементов МК. На МК, соответствующей фальсифицированному ЦИ, представленной в виде бинарного изображения (рис. 1(б), 2(б)), ЗО и ее прототип в целом нашли свое отражение. Однако внутри ЗО оказались блоки, которые, будучи клонированными, не определены как таковые. В случае малого размера ЗО это принципиально может привести к пропуску фальсифицированного ЦИ – ошибке I рода.

Как доказано выше, отражение матрицы по любому из оговоренных направлений не меняет ее СНЧ, однако программная реализация разработанного метода выявления клонирования требует учета особенностей машинной арифметики. Эти особенности приводят к тому, что, в силу накопления вычислительной погрешности, для некоторых симметрично клонированных блоков их СНЧ могут отличаться друг от друга, причем это отличие, в общем случае, сравнимо с ошибкой округления (табл. 1).

Аналогичная картина для СНЧ блоков матрицы ЦИ имеет место и в случае поворота блока на угол, кратный 90° .

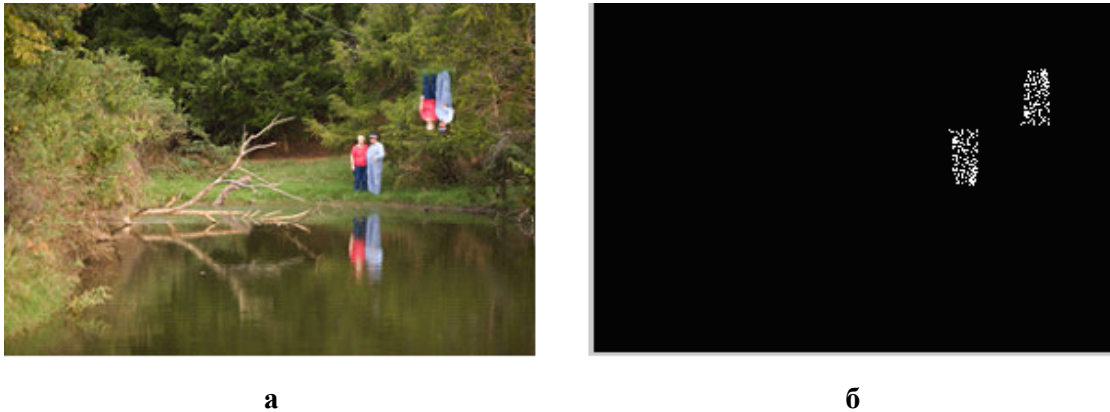


Рис. 1. Выявление фальсификации: а – фотомонтаж на основе симметричного клонирования; б – МК фальсифицированного ЦИ

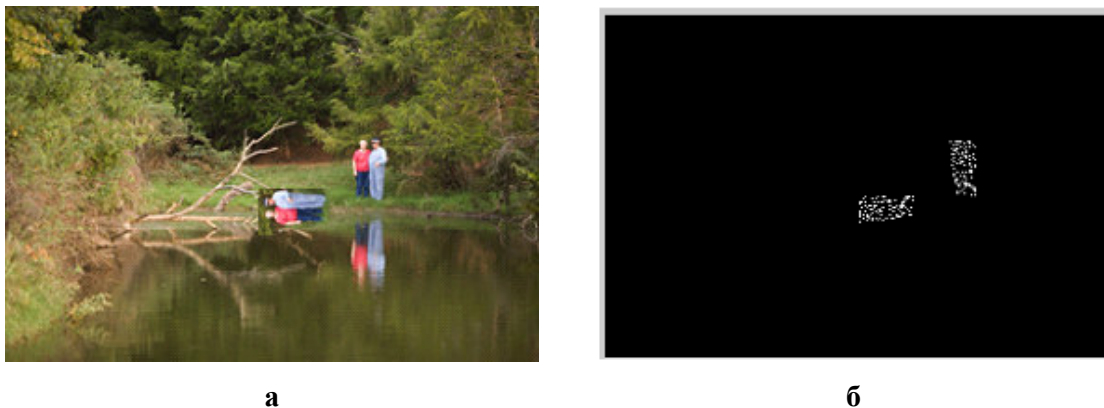


Рис. 2. Выявление фальсификации: а – фотомонтаж на основе поворота клонированного участка на угол, кратный 90° ; б – МК фальсифицированного ЦИ

Таблиця 1.

Отличия сингулярных спектров симметрично клонированных блоков

№ СЧ	СЧ симметрично клонированного блока	СЧ прототипа симметрично клонированного блока
1	383.826924389038	383.826924389040
2	38.8159972854393	38.8159972854394
3	12.7508929678442	12.7508929678442
4	11.2552643837216	11.2552643837216
5	9.17239356953573	9.17239356953573
6	6.16090100655953	6.16090100655953
7	4.61823508109017	4.61823508109020
8	0.725686359495353	0.725686359495354

Для эффективного выявления ЗО проведена модификация метода, разработанного в [9], в результате которой его основные шаги выглядят следующим образом.

- 1) Разбить матрицу F ЦИ на пересекающиеся 8×8 -блоки

$$F_{ij},$$

$$i = 1, 2, \dots, [(n-7)/8], \quad j = 1, 2, \dots, [(m-7)/8],$$

так, чтобы каждый блок отличался от соседнего на один столбец (строку).

- 2) Построить матрицу S с элементами

$$s_{ij} = \sum_{k=1}^4 \sigma_k,$$

$$i = 1, 2, \dots, [(n-7)/8], \quad j = 1, 2, \dots, [(m-7)/8],$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ – наибольшие СЧ соответствующего блока F_{ij} .

- 3) Построить МК C с элементами c_{ij} , $i = 1, 2, \dots, [(n-7)/8]$, $j = 1, 2, \dots, [(m-7)/8]$, каждый из которых отвечает блоку F_{ij} ЦИ. Для определения c_{ij} сравнить s_{ij} попарно со всеми элементами матрицы S :

если для s_{ij} найдется элемент s_{kl} , $k \neq i \vee l \neq j$, матрицы S , что $|s_{ij} - s_{kl}| < \delta$, где δ — значение порога,

то $c_{ij} = 1$,

иначе $c_{ij} = 0$.

- 4) Элементы $c_{ij} = 1$ матрицы C соответствуют клонированным блокам ЦИ.

Значение порога $\delta = 10^{-7}$ было получено экспериментально, при этом было установлено, что увеличение δ приводит к увеличению количества ошибок II рода, уменьшение – к увеличению количества ошибок I рода. Результаты работы модифицированного метода выявления клонированных областей для фотомонтажей, представленных на рис. 1(а), 2(а), отражены на рис. 3, что наглядно демонстрирует повышение эффективности базового метода (сравн. с рис. 1(б), 2(б)).

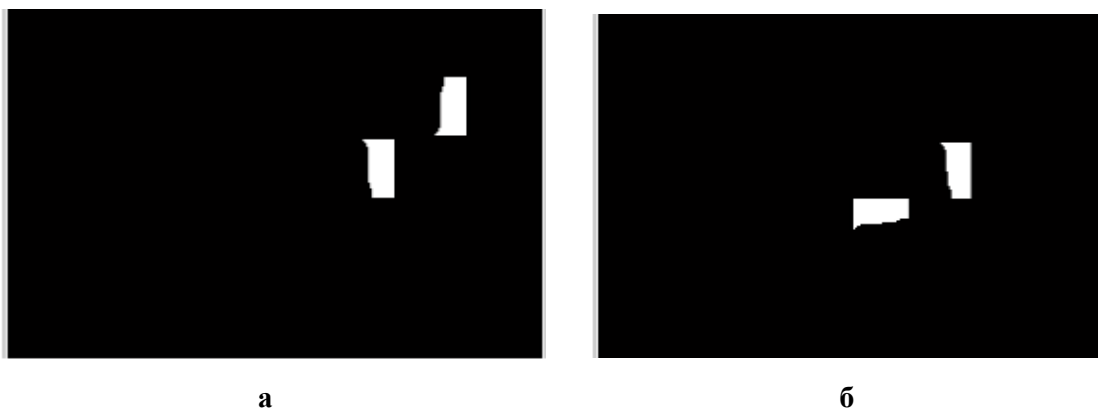


Рис. 3. Выявление фальсификации: а – МК фальсифицированного ЦИ, представленного на рис. 1(а); б – МК фальсифицированного ЦИ, представленного на рис. 2(а)

Для анализа эффективности модифицированного метода выявления клонирования (ММВК) был проведен вычислительный эксперимент с использованием ЦИ в форматах с потерями и без потерь: 600 ЦИ, полученных без привлечения профессиональных фотографов фотокамерами различного качества (множество V_1), 200 ЦИ из базы NRCS [13], являющейся традиционной при тестировании различных алгоритмов, работающих с ЦИ. В ходе эксперимента симметрично отраженные клонированные ЗО имели различные конфигурации и размеры, в том числе и равные одному блоку 8×8 пикселей. Симметричное отражение клонированных ЗО проводилось по горизонтали, по вертикали. Также ММВК был протестирован для случаев, где ЗО была подвергнута повороту на угол, кратный 90° в направлении как по часовой, так и против часовой стрелки. Результаты вычислительного эксперимента с изображениями, размер ЗО в которых не привязывался к размеру ЦИ и не зависел от размера блоков стандартного разбиения его матрицы, а также в случае размера ЗО, равного размеру блока 8×8 пикселей, приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Анализ эффективности ММВК

	Отражение/Угол поворота (град.)	V_1				V_2			
		TIFF	JPEG	JPEG 2000 БП	JPEG 2000 СП	TIFF	JPEG	JPEG 2000 БП	JPEG 2000 СП
Ошибки, % I рода	Горизонтальное	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	0.3	0.3	0.3
	Вертикальное	0.3	0.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	90°	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	180°	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	270°	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
II рода		9.9				8.5			

Таким образом, проведенный эксперимент подтвердил высокую эффективность ММВК в выявлении объекта клонирования даже в том случае, когда ЗО сравнима с размерами одного блока 8×8 стандартного разбиения матрицы ЦИ.

ММВК инвариантен к формату хранения ЦИ, используемых при проведении фотомонтажа, и успешно адаптирован для выявления симметрично отраженных

клонированных ЗО, а также клонированных ЗО, подвергнутых повороту на угол, кратный 90° .

Вычислительная сложность ММВК определяется полиномом четвертой степени, что является приемлемым с точки зрения его практического применения.

Замечание. При использовании для несанкционированного изменения ЦИ инструмента графических редакторов Штамп (Клон) часто в качестве постобработки используется коррекция цвета для клонированной области. Такая операция приведет к изменению СНЧ блоков, содержащихся в ЗО. Однако это изменение будет носить строго определенный характер, позволяющий адаптировать ММВК для выявления клонирования в этом случае. Результаты исследования данного способа фальсификации изображения в настоящий момент готовятся авторами к печати.

Выводы

Предложенная в данной работе модификация метода выявления клонирования, основанного на общем подходе к анализу состояния и технологии функционирования информационной системы, дала возможность эффективно использовать его для выявления фальсификации цифрового изображения, осуществленной путем отражения клонированных замещающих областей по вертикали и/или горизонтали, а также поворота их в любом направлении на угол, кратный 90° .

Эффективность модифицированного метода выявления клонирования не зависит от формата хранения цифрового изображения, использованного для фальсификации: количество ошибок I рода составило 0.3–0.6%, II рода – 8,5–9.9%.

Разработанный метод может быть использован для выявления клонированных областей в цифровом видео. В этом случае анализу подвергаются матрицы ключевых кадров видеопоследовательности.

Список литературы

1. Dybala, B. Detecting Filtered Cloning in Digital Images / B. Dybala, B. Jennings, D. Letscher // MM&Sec'07 Proceedings of the 9th workshop on Multimedia & Security, September 20–21, Dallas, Texas, USA. — 2007. — PP. 43–50.
2. Pan, X. Region Duplication Detection Using Image Feature Matching / X. Pan, S. Lyu // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. — 2010. — Vol. 5, No. 4. — PP. 857–867.
3. Wang, J. Detection of image region duplication forgery using model with circle block / J. Wang, *et al.* // MINES'09 Proceedings of the 2009 International Conference on Multimedia Information Networking and Security, November 18–20. — 2009. — Vol. 1. — PP. 25–29.
4. Баранов, П.Е. Использование треугольных блоков для определения области фальсификации в изображениях / П.Е. Баранов, Е.Ю. Лебедева // Інформаційна безпека. — 2011. — № 2(6). — С. 139–144.
5. Myna, A.N. Detection of Region Duplication Forgery in Digital Images Using Wavelets and Log-Polar Mapping / A.N. Myna, M.G. Venkateshmurthy, C.G. Patil // ICCIMA'07 Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA 2007). — Vol. 3. — PP. 371–377.
6. Bay, H. SURF: Speeded Up Robust Features / H. Bay, *et al.* // Computer Vision and Image Understanding. — 2008. — Vol. 110, No. 3. — PP. 346–359.
7. Lowe, D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints / D.G. Lowe // International Journal of Computer Vision. — 2004. — Vol. 60, Iss. 2. — PP. 91–110.
8. Нариманова, Е.В. Условия проявления DQ-эффекта / Е.В. Нариманова // Інформаційна безпека. — 2010. — № 1(3). — С. 15–22.
9. Зорило, В.В. Выявление клонирования как фальсификации цифрового изображения / В.В. Зорило // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». — Х.: НТУ «ХПІ», 2011. — № 35 — С. 31–38.

10. Кобозева, А.А. Анализ информационной безопасности: монография / А.А. Кобозева, В.А. Хорошко. — К.: ГУИКТ, 2009. — 251 с.
11. Кобозева, А.А. Связь свойств стеганографического алгоритма и используемой им области контейнера для погружения секретной информации / А.А. Кобозева // Искусственный интеллект. — 2007. — №4. — С. 531–538.
12. Бахвалов, Н.С. Численные методы [Текст] : учебное пособие для студентов физико-математических специальностей вузов / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. — 8-е изд. — М. : Физматлит ; Л. : Невский диалект, 2000. — 622 с.
13. NRCS Photo Gallery: [Электронный ресурс] // United States Department of Agriculture. Washington, USA. Режим доступа: <http://photogallery.nrcs.usda.gov> (Дата обращения: 26.07.2012).

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ СИМЕТРИЧНОГО КЛОНУВАННЯ ПРИ ФАЛЬСИФІКАЦІЇ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ

А.А. Кобозєва, В.В. Зоріло, О.Ю. Лебедева

Одеський національний політехнічний університет,
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: zorilovika@mail.ru

Пропонується теоретично обґрунтована модифікація методу, який був розроблений авторами раніше, виявлення результатів одного з найбільш часто використовуваних при фальсифікаціях цифрових зображень інструментів, реалізованих в більшості графічних редакторів – клонування. Базовий метод заснований на аналізі сингулярних чисел блоків матриці зображення. Запропонована модифікація дозволяє ефективно виявляти заміщаючі області, симетрично відображені по вертикалі/горизонталі та/або піддані повороту на кут, кратний 90° , що підтверджується наведеними результатами обчислювальних експериментів. Розроблений метод може бути ефективно використаний для виявлення фальсифікації цифрового відео.

Ключові слова: фальсифікація цифрових зображень, клонування, симетричне клонування, фотомонтаж, матриця, сингулярне число

METHOD OF SYMMETRIC CLONING DETECTION IN THE FALSIFIED DIGITAL IMAGES

Alla A. Kobozeva, Victoria V. Zorilo, Olena Yu. Lebedyeva

Odessa National Polytechnic University,
1 Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine; e-mail: zorilovika@mail.ru

This paper focuses on the modification of cloning detection method based on the analysis of singular values of digital image matrices' blocks. This modification gives an opportunity to detect symmetric cloning and/or digital image copy-past areas, replaced areas rotated on 90 degree. Proposed method can be effectively used for detecting of digital video falsification.

Keywords: image falsification, cloning, symmetric cloning, image forgery, matrix, singular value