

УДК 004.056.5

А.А. Кобозева, доктор технических наук
Е.Ю. Лебедева

ОСНОВЫ МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ КЛОНИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОДВЕРГНУТЫХ КОРРЕКЦИИ ЯРКОСТИ

На основе общего подхода к анализу состояния и технологии функционирования информационных систем впервые разработан теоретически обоснованный метод выявления клонированных участков цифрового изображения в условиях его постобработки – коррекции яркости. Получено формальное представление результата коррекции яркости, что дало возможность практического определения количества градаций яркости.

Ключевые слова: клонирование, цифровое изображение, матрица, сингулярные числа, сингулярные векторы, коррекция яркости, n -оптимальный вектор.

На основі загального підходу до аналізу стану й технології функціонування інформаційних систем уперше розроблено теоретично обґрунтований метод виявлення клонуваних ділянок цифрового зображення в умовах його постобробки – корекції яскравості. Отримано формальне представлення результату корекції яскравості, що дало можливість практичного визначення кількості градаций яскравості.

Ключові слова: клонування, цифрове зображення, матриця, сингулярні числа, сингулярні вектори, корекція яскравості, n -оптимальний вектор.

Method for the detection of cloned areas of the digital image, exposed to the brightness correction, is developed. Proposed method is based on the general approach to the state and technology analysis of an information system functioning. Formal representation of the brightness correction that has given the chance for the practical definition of the quantity of gradation of brightness is received.

Keywords: cloning, digital image, matrix, singular value, singular vector, brightness correction, n -optimal vector.

Современное состояние информационных технологий, их бурное развитие и проникновение во все сферы жизни человека привело к росту возможностей несанкционированного изменения информационных контентов – их фальсификации.

Методы выявления областей фальсификации цифровых изображений, аудио и видео составляют значимую часть комплексной системы информационной безопасности [1], входя в совокупность пассивных методов защиты информации [2].

Большое внимание в современной научной печати уделяется детектированию фальсификаций цифровых изображений (ЦИ) [3–5], проведенных с использованием средств графических редакторов, таких как Adobe Photoshop, Adobe Illustrator, Adobe Flash, CorelDRAW и других. Как следует из открытых источников, одним

из наиболее часто используемых при несанкционированных изменениях ЦИ инструментов здесь является “Штамп”, или клонирование [6]. Задача выявления клонированных участков цифровых контентов до настоящего момента не решена полностью, в частности, не существует математически обоснованных методов (алгоритмов), позволяющих выявлять области клонирования в случае постобработки ЦИ (например, коррекции яркости и/или контрастности клонированных областей), что является чрезвычайно распространенным на практике, оставляя упомянутую задачу *актуальной*.

Для решения задач, связанных с выявлением несанкционированных изменений ЦИ, хорошо зарекомендовал себя общий подход к анализу состояния и технологии функционирования информационных систем (ОПАИС), основанный на теории возмущений и матричном анализе [1, 3–6].

Целью статьи является разработка основ метода выявления клонированных участков цифрового изображения в условиях его постобработки – коррекции яркости клонированных областей на основе ОПАИС.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить ряд следующих *задач*.

1. Разработать математический базис для метода выявления клонированных участков изображения, подвергнутых коррекции яркости, в ходе чего:

- получить формальное представление результата коррекции яркости;
- определить характеристики возмущений формальных параметров, определяющих ЦИ, в результате коррекции яркости.

2. Определить способ нахождения количества градаций яркости, на которое проведена коррекция ЦИ (его подобласти).

3. Выделить определяющие факторы пороговых значений параметров ЦИ, которые позволят выявить клонированные участки, подвергнутые постобработке.

В соответствии с ОПАИС, состояние любой информационной системы, в частности ЦИ, формально описывается совокупностью однозначно определяющих ее параметров – сингулярных чисел (СНЧ) и сингулярных векторов (СНВ) соответствующей матрицы (матриц).

Матричное представление коррекции яркости ЦИ в соответствии с результатами реализации этой операции в графическом редакторе Adobe Photoshop с некоторым допущением имеет следующий вид:

$$\bar{Y} = Y \pm K,$$

где Y , \bar{Y} - $n \times n$ -матрицы яркости ЦИ до и после коррекции соответственно, K - матрица коррекции:

$$K = \begin{pmatrix} k & \dots & k \\ \dots & \dots & \dots \\ k & \dots & k \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где k – натуральное число, определяющее количество градаций яркости, на которое происходит коррекция. На практике малая часть элементов матрицы $\bar{Y} - Y$ могут

незначительно отличаться от k . Это происходит в результате перевода ЦИ из одного формата хранения в другой (с целью формирования матрицы яркости) в ходе выполнения операции коррекции в графическом редакторе, а также в том случае, когда в результате коррекции яркости элементы \bar{Y} выходят за границы множества. В силу незначительности отличия на практике $\bar{Y} - Y$ от K ниже в теоретических выкладках это отличие не учитывается.

Построим для матрицы K нормальное сингулярное разложение [1]:

$$K = U_K \Sigma_K V_K^T, \quad (2)$$

где U_K, V_K – ортогональные матрицы левых и правых СНВ соответственно, левые СНВ являются лексикографически положительными [1], $\Sigma_K = \text{diag}(\sigma_1^K, \dots, \sigma_n^K)$ – матрица СНЧ K . В силу (1):

$$\sigma_1^K > 0, \quad \sigma_2^K = \dots = \sigma_n^K = 0. \quad (3)$$

Одним из наиболее важных числовых параметров, характеризующих ЦИ, является энергия E сигнала. Учитывая различные способы вычисления энергии [1] и соотношение (3), для K имеем:

$$E = k^2 n^2 = (\sigma_1^K)^2,$$

откуда:

$$\sigma_1^K = k \cdot n. \quad (4)$$

Пускай

$$Y = U \Sigma V^T$$

нормальное сингулярное разложение матрицы яркости Y ЦИ, где матрицы $U = (u_1, \dots, u_n)$, $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$, $V = (v_1, \dots, v_n)$ ($u_i, v_i, i = \overline{1, n}$, – столбцы матриц U, V – левые и правые СНВ Y) определяются аналогично матрицам U_K, Σ_K, V_K в (2). В соответствии с [7], левый и правый СНВ матриц Y, K , отвечающие максимальным СНЧ σ_1, σ_1^K соответственно, близки к n -оптимальному вектору n^0 пространства R^n , где n -оптимальный – это вектор, находящийся в первом координатном ортанте и образующий равные углы с векторами стандартного базиса R^n [1]. Тогда, допуская незначительную погрешность, можно считать, что:

$$\bar{Y} = Y \pm K = U \Sigma V^T \pm U_K \Sigma_K V_K^T \approx$$

$$\begin{aligned}
& \approx \begin{pmatrix} n^o & u_2 & \dots & u_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n^o & v_2 & \dots & v_n \end{pmatrix}^T \pm \\
& \mp \begin{pmatrix} n^o & u_2^k & \dots & u_n^k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \pm kn & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n^o & v_2^k & \dots & v_n^k \end{pmatrix}^T = \\
& = \begin{pmatrix} n^o & u_2 & \dots & u_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \pm kn & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n^o & v_2 & \dots & v_n \end{pmatrix}^T \quad (5)
\end{aligned}$$

Формула (5) представляє із себе нормальне сингулярне розкладення матриці \bar{Y} , із которой витекає то, що:

– формальним представленням корекції яркості ЦІ являється збільшення/зменшення в разі освітлення/затемнення зображення максимального СНЧ σ_1 матриці Y на величину, рівну добутку kn , при цьому всі інші СНЧ залишаються без змін. Таким чином, визначення кількості градаций яркості, на яку відбулася корекція, може бути зроблено відповідно до формули:

$$k = \frac{|\sigma_1 - \bar{\sigma}_1|}{n}, \quad (6)$$

де $\bar{\sigma}_1$ – максимальне СНЧ матриці \bar{Y} ;

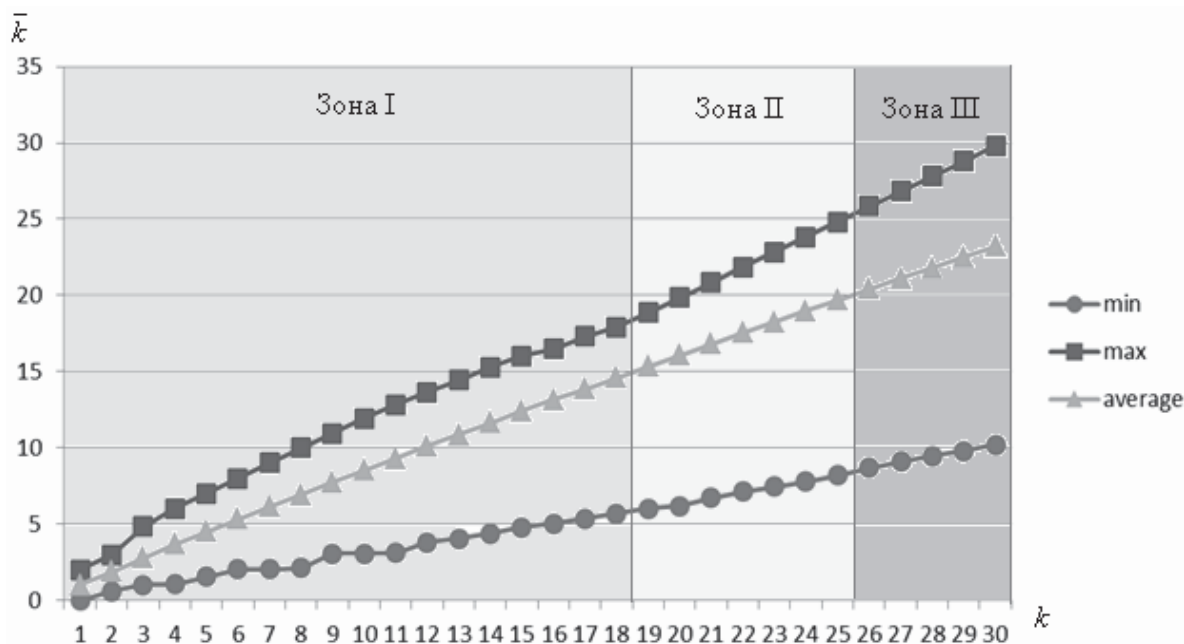
– СНВ, являючись результатом нормального сингулярного розкладення матриці яркості ЦІ, в результаті корекції яркості не змінюються.

Аналогічне висновок буде мати місце в разі корекції яркості для окремих частин (блоків) ЦІ, являючись результатом клонування.

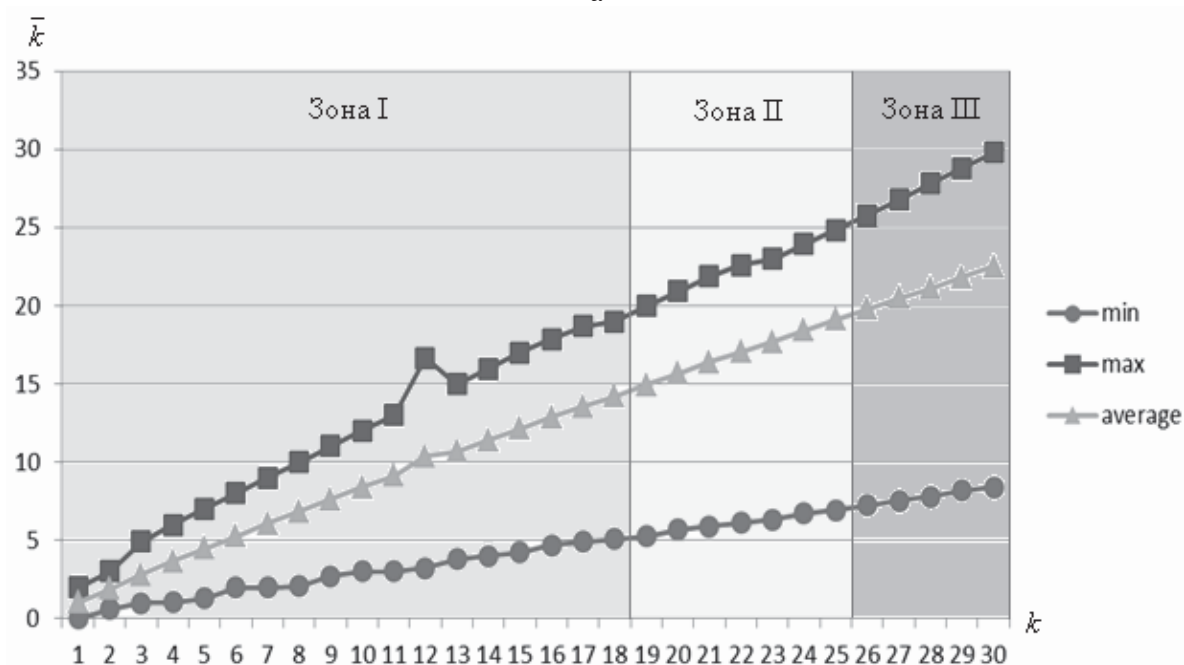
Отримані теоретичні результати є основою для розробки методу виявлення фальсифікацій в ЦІ, отриманих при допомозі клонування з зміною яркості.

В силу зроблених вище допущень очевидно, що формула (6) на практиці може не виконуватися в точності. Для отримання рекомендацій по її практичному використанню був проведений наступний обчислювальний експеримент. ЦІ (блок ЦІ) піддався корекції яркості на відоме число градаций k . Для оригінального і зміненого ЦІ (блоків ЦІ) визначалися максимальні СНЧ

соответствующих матриц яркости: σ_1 и $\bar{\sigma}_1$, по значениям которых с использованием (6) вычислялось значение \bar{k} – так называемое предсказываемое значение коррекции. Результаты эксперимента приведены на рис. 1, где для каждого конкретного значения k представлены наименьшее, наибольшее и среднее из \bar{k} по всем тестируемым ЦИ.



а



б

Рис.1. Залежність передбачуваного значення \bar{k} корекції яркості ЦІ від істинного значення: а – операція освітлення; б – операція затемнення

Как следует из результатов вычислительного эксперимента, абсолютная погрешность $|\bar{k} - k|$ увеличивается с ростом k . Такой результат является ожидаемым, так как при увеличении k возрастает вероятность того, что измененное значение яркости окажется вне сегмента, а значит подвергнется дополнительному возмущению за счет введения его в границы. С учетом полученных результатов для уточнения \bar{k} будет использоваться некоторое пороговое значение P , получаемое с учетом минимального и максимального значений \bar{k} (рис.1) так, что

$$k \in [\bar{k} - P, \bar{k} + P], \quad k \in Z,$$

где Z – множество целых чисел. Пороговое значение P будет зависеть от величины найденной коррекции яркости \bar{k} . Примером организации такой зависимости может случить выделение нескольких зон для возможных значений k , используемых при коррекции, в каждой из которых будет определяться свое P (рис.1).

На основе полученных выше результатов предлагается метод обнаружения клонированных частей ЦИ с матрицей яркости Y , подвергнутых коррекции яркости, основные шаги которого следующие.

1. Разбить матрицу яркости Y ЦИ на пересекающиеся блоки $C = \{c_1, c_2, \dots, c_s\}$,

$\bigcup_{i=1}^s c_i = Y$, размерами $p \times p$ (здесь каждый последующий блок c_i отличается от предыдущего c_{i-1} сдвигом на 1 пиксель вправо, влево, вниз или вверх).

2. Каждый блок $c_i, i=1, \dots, s$ рассмотреть в паре со всеми блоками $c_j, j=i, \dots, s$. Для каждой пары:

2.2. Вычислить нормальные сингулярные разложения $c_i = U_i \Sigma_i V_i^T$ и $c_j = U_j \Sigma_j V_j^T$;

2.3. Для диагональных элементов матриц $\Sigma_i = \text{diag}(\sigma_1^{(i)}, \dots, \sigma_p^{(i)})$ и $\Sigma_j = \text{diag}(\sigma_1^{(j)}, \dots, \sigma_p^{(j)})$ построить соответственно линейные аппроксимации

$$y = a_i x + b_i, \quad y = a_j x + b_j$$

для $p-1$ СНЧ (исключая максимальные СНЧ) и вычислить:

$$q_{ij} = \begin{cases} \frac{a_i}{a_j}, & \text{если } a_i \geq a_j, \\ \frac{a_j}{a_i}, & \text{если } a_i < a_j \end{cases}.$$

Если $P_1 \leq q_{ij} \leq P_2$,

где P_1, P_2 – пороговые значения, определяемые экспериментально, то

ВЫЧИСЛИТЬ

$$\bar{k} = \frac{|\sigma_1^{(i)} - \sigma_1^{(j)}|}{p}$$

Последовательно изменять значения яркости всех пикселей блока c_i на каждое из возможных значений коррекции из диапазона $[\bar{k} - P; \bar{k} + P]$, где P – пороговое значение коррекции, отвечающее зоне нахождения \bar{k} . Для каждого полученного в результате коррекции блока c_i и блока c_j вычислить коэффициент корреляции

$$\text{Correlation}(d_i', c_j) = \delta.$$

Если $\delta \geq P_c$,

где P_c – пороговое значение коэффициента корреляции, устанавливаемое экспериментально,

то

блоки c_i и c_j – оригинальный и клонированный, с коррекцией яркости.

Иначе

рассмотреть следующую пару блоков.

Некоторые из результатов тестирования предложенного метода для наглядности представлены на рис. 2 для $p=8$, $P_1=1.0$, $P_2=1.2$, $P=5$, $P_c=0.994$, где для первого изображения в части рис. 2 (в) выделены блоки, ложно принятые за клонированные.

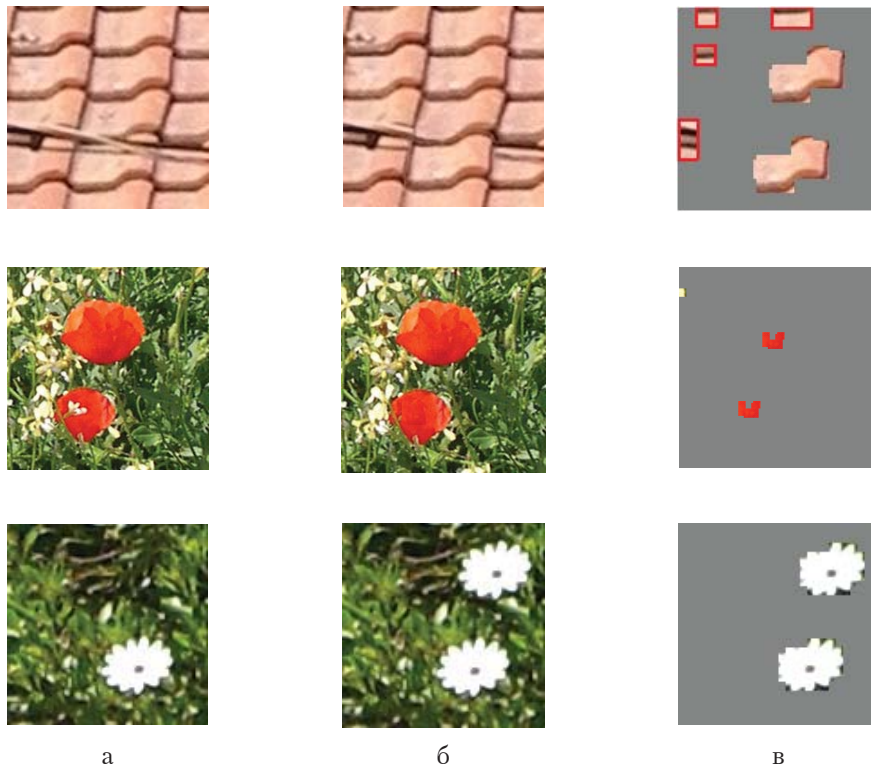


Рис. 2. Результаты применения метода выявления клонированных участков ЦИ в условиях последующей коррекции яркости: а – исходные изображения; б – фальсифицированные ЦИ; в – обнаруженные области клонирования

Замечание. Для устранения/уменьшения количества лжеблоков при работе метода выявления клонированных областей в условиях коррекции яркости рекомендуется при первичном анализе ЦИ использовать блоки c_i , для которых $p > 8$, что очевидно приведет к менее точному определению границ клонированных областей. Для уточнения локализации области клонирования и ее прототипа предложенный метод может быть применен повторно, но только в границах “грубо” определенных им областей с использованием блоков c_i , для которых $p \leq 8$. Результаты эксперимента, реализующего предложенную модификацию метода, в настоящий момент готовятся к печати.

Выводы. В работе на основе ОПАИС был впервые разработан теоретически обоснованный метод выявления клонированных участков цифрового изображения в условиях его постобработки – коррекции яркости клонированных областей. В ходе работы получено формальное представление результата коррекции яркости, что дало возможность как теоретического, так и практического определения количества градаций яркости, на которое проведена коррекция ЦИ или его подобласти, позволяющее локализовать область клонирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кобозева А.А. Анализ информационной безопасности : монография / А.А. Кобозева, В.А. Хорошко. – К. : ГУИКТ, 2009. – 251 с.
2. Нариманова Е.В. Проверка целостности цифрового сигнала [Текст] : монография / Е.В. Нариманова. – Донецк : Цифровая типография, 2011. – 180 с.
3. Зорило В.В. Метод выявления симметричного клонирования при фальсификации цифрового изображения / В.В. Зорило, А.А. Кобозева, Е.Ю. Лебедева // Информатика та математичні методи в моделюванні. – 2013. – Том 3, – № 1. – С. 5–12.
4. Кобозева А.А. Основы общего подхода к решению проблемы обнаружения фальсификации цифрового сигнала / А.А. Кобозева // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2009. – Вип. 72. – С. 35–41.
5. Кобозева А.А. Метод виявлення фальсифікації цифрового зображення в умовах збурних дій / А.А. Кобозева, В.В. Зорило // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т.Шевченка. – 2009. – № 20. – С. 147–154.
6. 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.
7. Кобозева А.А. Анализ чувствительности сингулярных векторов матрицы изображения как основа стеганоалгоритма, устойчивого к сжатию / А.А. Кобозева, М.А. Мельник // Захист інформації. – 2013. – № 2. – С. 49–58.

Отримано 14.10.2013